



**Residualidad y presencia de las PFAS en los sistemas de acueducto y fuentes de abastecimiento a nivel mundial, riesgos en la salud y algunos procesos de remoción: Una revisión del estado del arte.**

Leidy Carolina Tabares Carvajal

Informe de práctica presentado para optar al título de Ingeniero Sanitario

Asesora

Valentina Ossa Zuluaga, Ingeniera Ambiental

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería Sanitaria  
Medellín, Antioquia, Colombia  
2024

<b>Cita</b>	(Tabares Carvajal, 2023)
<b>Referencia</b>	(Tabares Carvajal, 2023). Residualidad y presencia de las PFAS en los sistemas de acueducto y fuentes de abastecimiento a nivel mundial, riesgos en la salud y algunos procesos de remoción: Una revisión del estado del arte. [Informe de práctica]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## Tabla de contenido

Resumen .....	5
Abstract .....	6
Introducción .....	7
1 Planteamiento del problema .....	8
1.1 Antecedentes .....	9
2 Justificación.....	10
3 Objetivos .....	11
3.1 Objetivo general .....	11
3.2 Objetivos específicos.....	11
4 Marco teórico .....	12
5 Metodología .....	15
5.1. Diseño de la Investigación .....	15
5.2. Preparación de la Recopilación de Datos .....	15
5.3. Recopilación de Datos.....	16
5.4. Análisis de Datos.....	16
5.5. Interpretación .....	16
6 Resultados y Análisis .....	17
7 Conclusiones .....	27
Referencias .....	28

## Lista de Gráficas

<b>Gráfica 1.</b> Resultados arrojados por Scopus de las fechas de los registros publicados sobre PFAS. .....	18
<b>Gráfica 2.</b> Resultados arrojados por Scopus de documentos encontrados en la búsqueda por país o territorios. ....	18

## Lista de Ilustraciones

<b>Ilustración 1.</b> Clasificación general de familias de PFAS. ....	13
<b>Ilustración 2.</b> Propiedades químicas generales del PFOS Y PFOA. ....	14
<b>Ilustración 3.</b> Metodología de estudio de caso cualitativo.....	15
<b>Ilustración 4.</b> Vías de liberación y exposición de los PFAS en el medio ambiente y los seres humanos. ....	20

## Resumen

La presencia de contaminantes emergentes en el medio acuático es una problemática de interés que ha crecido en los últimos años, sobre todo por la particularidad, de que, por su pequeño tamaño no son removidos con mayor facilidad en los procesos de tratamientos de aguas (Marín et al., 2021). Específicamente, el grupo de sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS) que, según autores como Domingo et al. (2019), han cobrado interés a lo largo de los años por sus amplias aplicaciones, siendo dos de estos compuestos, el sulfonato de perfluorooctano (PFOS) y el ácido perfluorooctanoico (PFOA) los más conocidos. Se ha comprobado la residualidad de estos en los sistemas de acueducto a nivel mundial, y también en fuentes de agua superficial y subterránea. Con este trabajo se realizó una revisión bibliográfica acerca de estas sustancias, a través de la metodología de estudio de caso cualitativo, el porqué de su importancia e interés para la comunidad científica y general, los riesgos que conlleva la presencia de estas en fuentes de agua y sistemas de acueducto, las falencias en los procesos de potabilización y las prevenciones que se llevan a cabo para minimizar su generación.

*Palabras clave:* Contaminantes emergentes, PFAS, Sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS), PFOS, PFOA, agua potable, toxicidad.

### **Abstract**

The presence of emerging contaminants in aquatic environments is a matter of interest that has grown in recent years, primarily due to the peculiarity that, because of their small size, they are not easily removed in water treatment processes ( Marín et al., 2021).

Specifically, the group of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFAS), which, according to authors such as Domingo et al. (2019), have gained interest over the years due to their wide range of applications. Two of these compounds, perfluorooctanesulfonate (PFOS) and perfluorooctanoic acid (PFOA), are the most well-known and well-researched. Various studies have confirmed their persistence in water supply systems worldwide, as well as in surface and groundwater sources. This work includes a literature review of these substances and presents, through a qualitative case study methodology, the reasons for their importance and interest to the scientific and general community, the risks associated with their presence in water sources and water supply systems, the shortcomings in purification processes, and the preventive measures taken to minimize their generation.

*Keywords:* Emerging contaminants, PFAS, Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFAS), PFOS, PFOA, drinking water, toxicity.

---

## Introducción

El crecimiento acelerado de la población ha generado un deterioro en el recurso hídrico debido a los procesos de industrialización y desarrollo antrópico, donde las principales fuentes de contaminación a aguas superficiales y subterráneas son las descargas de aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas (Naskar et al., 2022).

Los contaminantes emergentes (CE), son sustancias químicas de diferentes orígenes y naturaleza tales como productos de aseo personal, farmacéuticos, plaguicidas, pesticidas, entre otros (Jiménez, 2021).

Los CE de nuestro interés en esta revisión fueron las sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS) constituyen una clase de compuestos altamente fluorados que han sido ampliamente utilizados en diversas aplicaciones industriales y productos de consumo (Wee et al., 2023). Esta amplia utilización de los PFAS ha llevado a su presencia generalizada en el medio ambiente, donde los niveles de contaminación y su distribución están influenciados tanto por factores antropogénicos como naturales. Como resultado, los PFAS han ingresado a diversas cadenas alimenticias terrestres y acuáticas, llegando finalmente a los seres humanos como consumidores finales (Wee et al., 2023). La persistencia, bioacumulación y toxicidad de los PFAS, han llevado a su reconocimiento como contaminantes de preocupación emergente (Gallen et al., 2017).

Se ha demostrado que los PFAS se encuentran presentes en aguas superficiales y subterráneas en todo el mundo (Blotevogel et al., 2023). Estos compuestos no solo representan una preocupación ambiental, sino que también plantean riesgos potenciales para la salud humana, lo que ha llevado a la implementación de pautas y directrices para limitar su presencia en ambientes acuáticos (Podder et al., 2021).

Con el objetivo de proporcionar información sobre cómo es el panorama de las PFAS en cuanto a residualidad y presencia en fuentes de agua y sistemas de acueducto a nivel mundial, además de los riesgos y de qué forma prevenir el aumento en la generación de estas, se realizó esta revisión del estado del arte sobre las PFAS. Es esencial continuar investigando y monitoreando los PFAS para comprender mejor su ocurrencia y comportamiento en el medio ambiente acuático y abordar sus implicaciones para la salud pública y la sostenibilidad ambiental.

## 1 Planteamiento del problema

La presencia de sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS) en los sistemas de acueducto y fuentes de abastecimiento a nivel global representa una preocupación creciente en el ámbito medioambiental y de salud pública (Podder et al., 2021). Estas sustancias, conocidas por su amplia aplicación en diversas industrias, han demostrado su persistencia en el entorno acuático (Wee et al., 2023), lo que plantea interrogantes significativos sobre los riesgos asociados y los métodos efectivos de eliminación.

El interrogante que motivó esta investigación se centra en entender la magnitud del problema y los impactos que la presencia de PFAS en el agua para consumo humano tiene en la salud de las comunidades y la eficacia de los procesos de remoción de PFAS existentes.

La revisión del estado del arte se presentó como una herramienta fundamental para abordar aspectos relevantes a tener en cuenta, por lo tanto, esta revisión se enfocó en dar respuesta a las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cuál es la dimensión de la presencia de PFAS en los sistemas de acueducto y fuentes de abastecimiento a nivel mundial?
- ¿Hay presencia de PFAS en el agua potable?
- ¿Qué procesos de tratamiento de aguas pueden remover los PFAS?

---

## 1.1 Antecedentes

Los Perfluoroalquilos y Polifluoroalquilos, comúnmente conocidos como PFAS, son sustancias químicas sintéticas que se han utilizado ampliamente en una variedad de productos de consumo y procesos industriales desde la década de 1940. Estos compuestos desempeñan roles fundamentales como surfactantes, retardantes de llama, aditivos, lubricantes y pesticidas, y se generan como subproductos, residuos e intermediarios en diversos procesos industriales (Wee et al., 2023). Estos compuestos se caracterizan por tener cadenas de carbono completamente fluoradas, lo que les confiere una notable estabilidad química y térmica (Blotevogel et al., 2023), que se refleja con la persistencia y resistencia a la degradación, además, son de naturaleza hidrofóbica y lipofóbica, y su capacidad de bioacumulación y sorción facilitan su transporte a través de diversos medios ambientales, lo que conlleva toxicidad para los organismos (Wee et al., 2023).

Debido a su resistencia, los PFAS se han empleado en productos como repelentes de manchas, lubricantes, pinturas, textiles, espumas contra incendios, utensilios de cocina antiadherentes y envases de alimentos (Wee et al., 2023).

Aunque existen más de 4000 compuestos pertenecientes a esta clase y se utilizan en diversas industrias y productos, comúnmente conocidos como "productos químicos eternos", solo un pequeño número de ellos está actualmente bajo monitoreo y regulación, en particular del ácido perfluorooctanoico (PFOA) y del sulfonato de perfluorooctano (PFOS) (Gallen et al., 2017).

Su presencia en el medio ambiente es un tema de creciente preocupación, ya que estas sustancias pueden persistir indefinidamente en el entorno y bioacumularse en seres humanos y otros organismos, representando una preocupación ambiental global (Podder et al., 2021). La exposición a los PFAS se produce principalmente a través de fuentes como alimentos, agua potable, polvo y aire (Gallen et al., 2017; Buck et al., 2011).

Uno de los riesgos más preocupantes asociados con los PFAS es su impacto en la salud humana (Zhu et al., 2020).

## **2 Justificación**

La justificación de este proyecto de investigación se fundamenta en la creciente preocupación global sobre la presencia de sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas en sistemas de acueducto y fuentes de abastecimiento de agua, así como en la necesidad de recalcar los riesgos asociados a la salud humana e identificar los métodos de eliminación en sistemas de potabilización u otros, que pueden ser más efectivos. La elección de este tema se basa en la relevancia de abordar un problema ambiental y de salud pública que afecta a comunidades en todo el mundo, los cual desde el área de la ingeniería Sanitaria son de vital importancia.

El conocimiento sobre la extensión de la contaminación por PFAS a nivel mundial a través de las diversas aguas para consumo, así como los riesgos para la salud, es esencial para la toma de decisiones en torno a la gestión del recurso hídrico vital y la protección de la vida.

El aporte significativo de este trabajo de práctica a la ingeniería radica en la generación de un cuerpo de conocimiento detallado y enfocado hacia la problemática de las PFAS en sistemas de suministro de agua. Esta información puede servir como base para el diseño y desarrollo de estrategias de tratamiento y remoción más efectivas. Al comprender los riesgos y las limitaciones de los procesos de remoción de PFAS existentes, los ingenieros y profesionales en el campo podrán trabajar hacia soluciones más eficientes y sostenibles en la gestión del agua potable.

Además, esta investigación busca contribuir a tomar conciencia sobre la importancia de controlar y mitigar la presencia de PFAS en los sistemas de abastecimiento de agua, promoviendo la seguridad y la calidad del agua potable para las comunidades en todo el mundo.

### **3 Objetivos**

#### **3.1 Objetivo general**

Establecer el estado actual de conocimiento sobre la residualidad y presencia de PFAS en los sistemas de acueducto y fuentes de abastecimiento por medio de una revisión del estado del arte, aplicando la metodología de estudio de caso cualitativo.

#### **3.2 Objetivos específicos**

Identificar los riesgos a la salud asociados a la residualidad y presencia de PFAS en los sistemas de acueducto y fuentes hídricas a nivel mundial, mediante una revisión bibliográfica.

Determinar cuáles son los procesos de remoción de PFAS existentes y su aplicabilidad para minimizar la residualidad de los PFAS.

---

## 4 Marco teórico

El estado del arte en investigación constituye una herramienta esencial para evaluar el conocimiento acumulado y abrir nuevos horizontes en un campo específico (Guevara, 2016). Esta práctica se ha vuelto fundamental en instituciones académicas y centros de investigación para evaluar y orientar la producción de conocimiento en áreas de interés (Guevara, 2016).

Aunque no existe un consenso sobre una metodología única, se identifican elementos comunes como la idea inicial, la recuperación y análisis bibliográfico, y la articulación de resultados (Nacional de La Pampa Argentina et al., 2019).

De acuerdo a (Guevara, 2016) existen tres enfoques conceptuales del estado del arte. La primera se centra en una investigación documental, la segunda en una revisión de propuestas investigativas y la tercera en una construcción de sentido.

(Ramirez et al., 2012) menciona que la investigación se puede clasificar como cualitativa y cuantitativa. La cualitativa se enfoca en comprender fenómenos en su contexto completo, considerando múltiples realidades y evitando imponer interpretaciones únicas. Sus criterios de validez incluyen la coherencia de resultados y la capacidad de sustentarlos en evidencia empírica. Mientras que la investigación cuantitativa busca la objetividad y se basa en la idea de que la realidad es observable sin alterarla, aplicando definiciones operacionales y buscando replicabilidad.

Para este proyecto se utilizó la metodología de estudio de caso cualitativo de (Im et al., 2023), la cual es descrita más adelante y se aplicó al tema de interés, las PFAS.

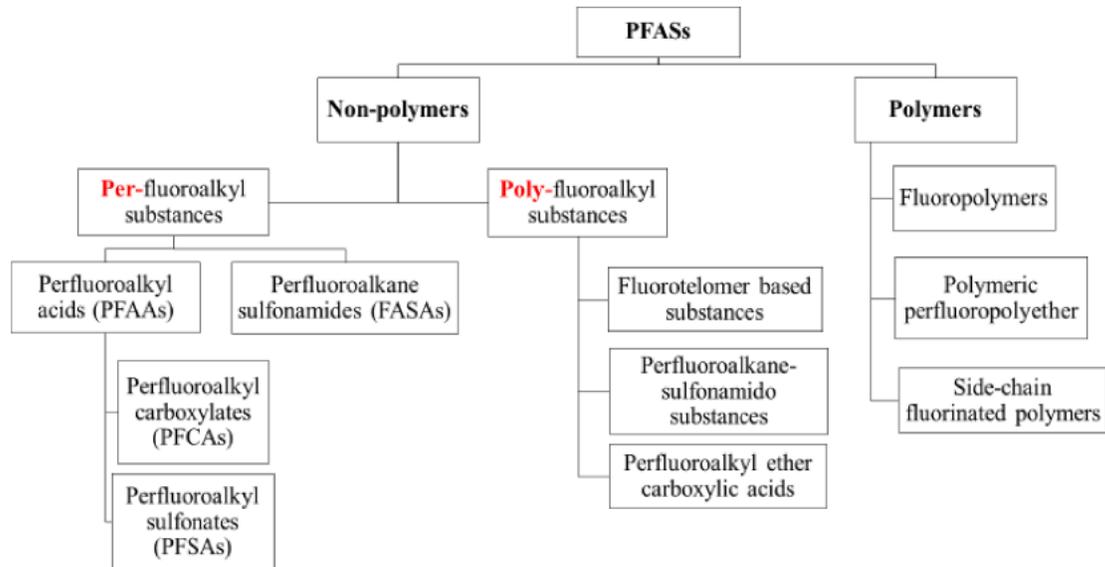
Los Perfluoroalquilos y Polifluoroalquilos, comúnmente conocidos como PFAS, son sustancias químicas sintéticas que se han utilizado ampliamente en una variedad de productos de consumo y procesos industriales. Estos compuestos desempeñan roles fundamentales como surfactantes, retardantes de llama, aditivos, lubricantes y pesticidas, y se generan como subproductos, residuos e intermediarios en diversos procesos industriales (Wee et al., 2023).

Su presencia en el medio ambiente es un tema de creciente preocupación, ya que estas sustancias pueden persistir indefinidamente en el entorno y bioacumularse en seres humanos y otros organismos, representando un riesgo a la salud y una preocupación ambiental global (Podder et al., 2021).

Dentro de la familia de los PFAS, se distinguen dos subgrupos: los no poliméricos y los poliméricos, como se muestra en la **Ilustración 1**.

**Ilustración 1.**

Clasificación general de familias de PFAS.



*Nota.* Tomado de General classification of PFAS family, de K. Singh et al., 2023, (Singh et al., 2023).

Los PFAS no poliméricos incluyen tanto sustancias perfluoroalquiladas como polifluoroalquiladas. Las perfluoroalquiladas están completamente fluoradas, excepto en el extremo terminal donde presentan un grupo funcional polar, los polifluoroalquilados exhiben una cadena alifática que no está completamente fluorada, conteniendo al menos un átomo de carbono no fluorado. En cuanto a los PFAS poliméricos, estos consisten en moléculas grandes creadas mediante la repetición de unidades más pequeñas (Singh et al., 2023).

Los PFAS engloban a los ácidos perfluoroalquilcarboxílicos (PFCA), entre los cuales se encuentra el ácido perfluorooctanoico (PFOA), conocido por su toxicidad y persistencia en el medio ambiente. El PFOA, ha sido identificado como uno de los más tóxicos, siendo ampliamente distribuido. Su presencia se da en una variedad de productos industriales y de consumo, ha generado inquietudes debido a su potencial toxicidad y persistencia en el medio ambiente (Zango

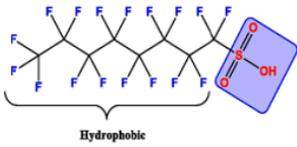
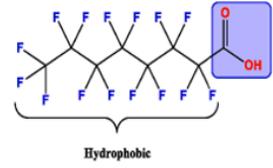
et al., 2023).

Adicionalmente, el ácido perfluorooctanesulfónico (PFOS) se ha identificado durante mucho tiempo como un contaminante orgánico persistente (COP) y se ha incluido en la lista de contaminantes orgánicos prioritarios en el medio ambiente (Zango et al., 2023).

En la Ilustración 2 se presentan algunas características químicas general de PFOS y PFOA.

**Ilustración 2.**

Propiedades químicas generales del PFOS Y PFOA.

Nombre corto	Nombre completo (US EPA)	Formula	Estructura Química	Enlaces C-F	Número de C	Masa Molar (g/mol)
PFOS	Ácido Perfluorooctanesulfónico	$CF_3 - (CF_2)_7 - SO_3H$		8	8	500,13
PFOA	Ácido Perfluorooctanoico	$CF_3 - (CF_2)_6 - COOH$		7	8	414,07

*Nota.* Adaptado de List of common PFAS and their chemical properties, de K. Singh et al., 2023, (Singh et al., 2023).

El Convenio de Estocolmo, orientado a la eliminación progresiva de COPs, ha incluido el PFOS y el PFOA en su lista. Esta inclusión resalta la preocupación global por la presencia y los efectos adversos de estos compuestos en el medio ambiente y la salud humana (Zango et al., 2023).

Por otro lado, la eliminación de los PFAS durante la potabilización del agua es un desafío importante, por lo que se han desarrollado varios procesos y tecnologías para eliminar estos contaminantes del agua, pero su eficacia puede variar (Campo et al., 2016).

En las diferentes investigaciones, se ha destacado la necesidad de desarrollar métodos efectivos para la eliminación de estos compuestos del entorno. Las técnicas de degradación, como la fotólisis y la biorremediación, han mostrado limitaciones. Frente a esto, se han explorado y demostrado la eficacia de técnicas como la fotofenton, la electroquímica, la fotoelectroquímica y

la fotocatalítica para la degradación y defluoración de los PFAS. Estos métodos, han mostrado ser capaces de atacar y degradar eficientemente estas moléculas persistentes, marcando un avance significativo en su eliminación del medio ambiente, sin embargo, se cuenta con muchos retos, para una completa remoción de todos los PFAS a gran escala (Singh et al., 2023).

## 5 Metodología

Se llevó a cabo una revisión del estado del arte sobre el tema de interés utilizando la metodología de estudio de caso cualitativo que describe (Im et al., 2023). A continuación, se presenta el esquema resumen y la descripción de cada paso:

### *Ilustración 3.*

*Metodología de estudio de caso cualitativo.*



### 5.1. Diseño de la Investigación

-Establecimiento de la Pregunta de Investigación: Se realizó una formulación de preguntas de investigación para dar un enfoque a la revisión.

-Selección de Caso: Con la selección de las preguntas se puede plantear un objetivo general.

### 5.2. Preparación de la Recopilación de Datos

- Selección de Casos Candidatos: Se realizó para identificar fuentes de datos relevantes para la revisión, como bases de datos científicas, estudios académicos y revisiones previas.

-Revisión de la Clasificación del Investigador: Estar familiarizado con los conceptos claves y la terminología relacionada con las PFAS, ayudó a llevar a cabo una revisión más efectiva. Por ejemplo, tener claras las palabras claves.

-Desarrollo de Protocolos: Se definieron criterios claros para la inclusión y exclusión de artículos en la revisión.

### **5.3. Recopilación de Datos**

-Recopilación de Datos de Casos: se seleccionó una fuente de búsqueda de artículos científicos relevantes sobre las PFAS. Además, se realizó un registro de información sobre cada artículo, como título, autores, año de publicación, resumen y resultados clave.

### **5.4. Análisis de Datos**

-Descripción Detallada del Caso: Se realizó la propuesta del proyecto donde se especifica la descripción detallada del Título, Resumen, Palabras claves, Introducción, Objetivos, Marco teórico, metodología, Cronograma, Presupuesto, Resultados esperados y las respectivas Referencias Bibliográficas.

-Análisis del Tema: Se buscó examinar los patrones o las tendencias y las conclusiones clave en los artículos revisados.

### **5.5. Interpretación**

-Significado del Caso: Se buscó presentar y resumir las principales conclusiones de la revisión del estado del arte realizada y su importancia en el contexto del tema de interés, en este caso de las PFAS.

---

## 6 Resultados y Análisis

Se realizó una formulación de preguntas de investigación claras y específicas relacionadas con las sustancias PFAS para dar un enfoque a la revisión: ¿Cuáles son las principales fuentes de contaminación de PFAS?, ¿Cuál es el estado actual de conocimiento sobre la residualidad y presencia de PFAS en los sistemas de acueducto y fuentes de abastecimiento?, ¿Cuáles son los efectos de las PFAS en la salud humana?, ¿Cuáles son los procesos de remoción de las sustancias PFAS? ¿Cuáles de estos procesos han resultado más eficientes para la remoción de PFAS?

Con la selección de las preguntas se realizó la selección del caso de estudio, se plantearon el objetivo general y los objetivos específicos que resultan el camino para dar respuesta a la investigación.

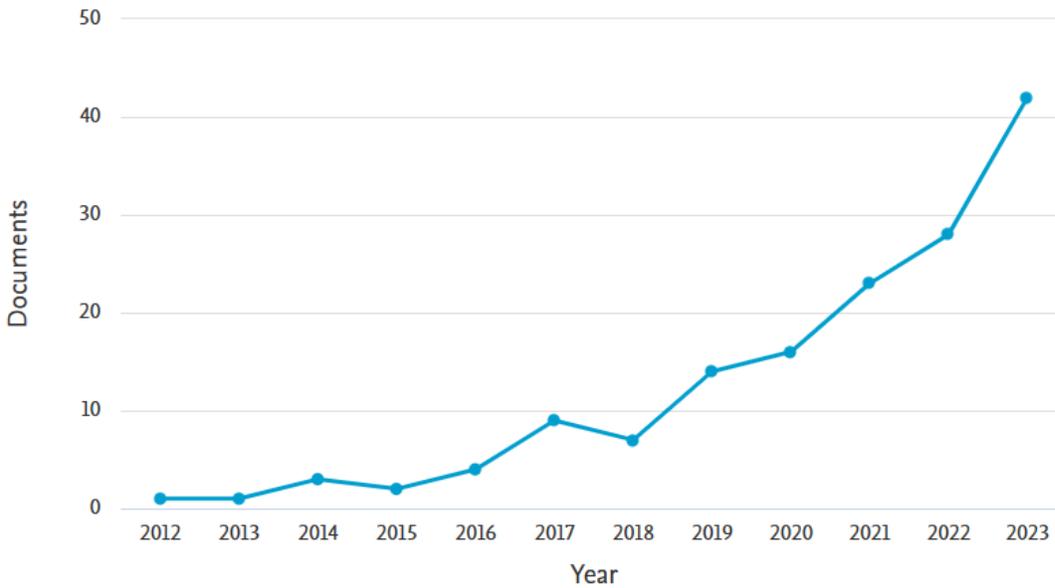
Se realizó la búsqueda de información para identificar fuentes de datos relevantes para la revisión, en las bases de datos científicas de la universidad, principalmente artículos indexados de Scopus por medio de palabras claves. Estar familiarizado con los conceptos claves y la terminología relacionada con las PFAS, ayudó a llevar a cabo una revisión más efectiva. Por ejemplo, haber tenido claras las palabras claves como "water treatment", "Perfluoroalkyl substances", "perfluoroalkyl substances", "PFAS", obteniendo así un total de 150 registros.

Al explorar los años en los que se realizan publicaciones sobre este tema, se percibe que se ha reportado de estos contaminantes desde el año 2012, siendo los años 2021, 2022 y 2023 los años en los que más se desarrollan artículos de este tipo como se evidencia en la **Gráfica 1**.

**Gráfica 1.**

Resultados arrojados por Scopus de las fechas de los registros publicados sobre PFAS.

Documents by year

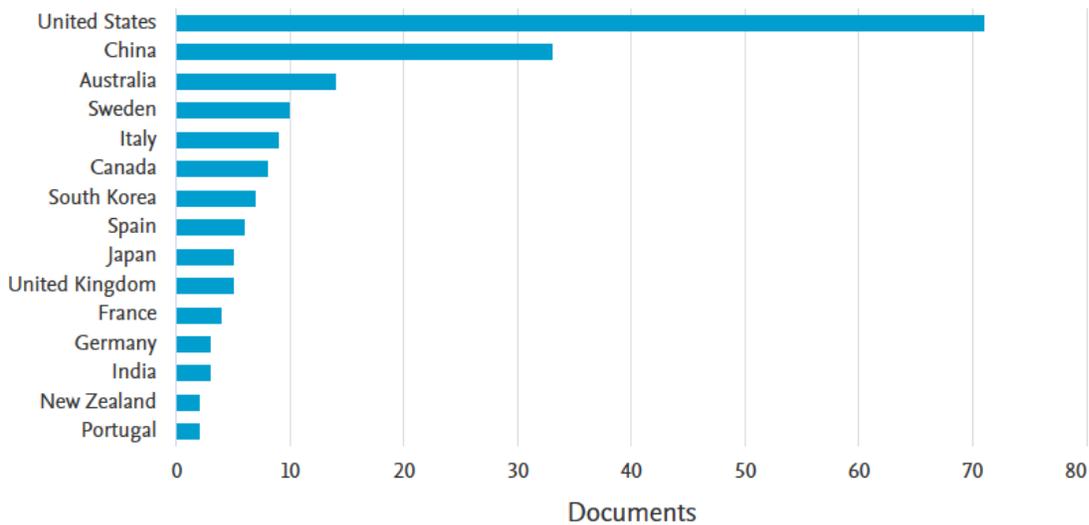


**Gráfica 2.**

Resultados arrojados por Scopus de documentos encontrados en la búsqueda por país o territorios.

Documents by country or territory

Compare the document counts for up to 15 countries/territories.



En la **Gráfica 2** se observa los países que más han hecho estudios de PFAS, se evidencia que en Latinoamérica hay pocos estudios.

Se definieron criterios claros para la inclusión y exclusión de artículos en la revisión. Esto incluyó años de publicación de máximo 8 años, artículos en inglés, artículos científicos de revistas reconocidas, entre otros.

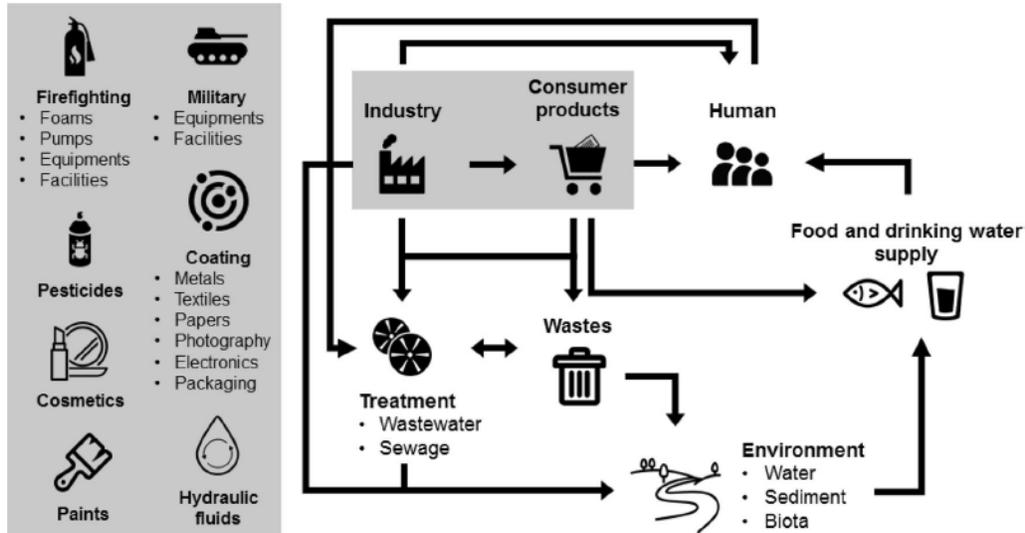
Ahora bien, para el desarrollo de la recopilación de artículos de interés, se seleccionaron haciendo lectura del resumen, análisis y resultados de las publicaciones, y buscando significancia con el tema. Asimismo, los textos fueron seleccionados gracias a filtros de las búsquedas ya mencionados anteriormente. A continuación, se presentan los datos relevantes de las investigaciones.

Como se mencionó antes, los PFAS son sustancias que constituyen un conjunto de compuestos químicos. Su característica estructura de carbono rodeada de átomos de flúor les confiere una notable resistencia a diversos procesos de descomposición y diferentes grupos funcionales, como alcoholes, ácidos carboxílicos, sulfonatos y amidas están presentes en sus cabezas, otorgándoles propiedades fisicoquímicas y aplicaciones variadas. Presentan una inercia química, capacidad para soportar altas temperaturas y excelentes propiedades tensioactivas, han encontrado utilidad en numerosas aplicaciones industriales y de consumo a nivel mundial. Estas aplicaciones incluyen utensilios de cocina antiadherentes, tratamientos impermeabilizantes en prendas de vestir, textiles, muebles, alfombras, así como recubrimientos impermeables para papel y cartón, y agentes supresores de niebla en la industria del chapado metálico y en espumas contra incendios. Sus principales, el PFOA y PFOS han sido identificados a nivel mundial en diversas muestras ambientales, que abarcan agua, suelo, vida silvestre, seres humanos y polvo doméstico (Gallen et al., 2017), lo que se traduce a distintas vías de liberación como se presenta en la **Ilustración 4**.

Su presencia en el medio ambiente es un tema de creciente preocupación, ya que estas sustancias pueden persistir indefinidamente en el entorno y bioacumularse en seres humanos y otros organismos, representando un riesgo a la salud y una preocupación ambiental global (Podder et al., 2021).

#### Ilustración 4.

Vías de liberación y exposición de los PFAS en el medio ambiente y los seres humanos.



*Nota.* Tomado de Release and exposure pathways of PFAS in the environment and humans, de S.Y. Wee and A.Z. Aris, 2023, (Wee et al., 2023).

Uno de los riesgos más destacados es la posible relación entre la exposición a PFAS y una serie de enfermedades crónicas y efectos adversos para la salud ((Wickham et al., 2021); (Zhu et al., 2020)). Algunas de estas enfermedades incluyen:

- Problemas reproductivos: Estudios han sugerido que la exposición a PFAS podría estar asociada con problemas de fertilidad, bajo peso al nacer y complicaciones durante el embarazo (Wee et al., 2023; Zhu et al., 2020).
- Efectos en el sistema inmunológico: Se ha observado que la exposición a PFAS puede suprimir la función del sistema inmunológico, lo que podría aumentar la susceptibilidad a enfermedades infecciosas y reducir la eficacia de las vacunas (Wee et al., 2023; Wickham et al., 2021; Zhu et al., 2020).
- Enfermedades del hígado: Existe evidencia de que la exposición a PFAS está relacionada con enfermedades hepáticas, como aumento de enzimas hepáticas y hepatomegalia (Wickham et al., 2021; Zhu et al., 2020).

- Problemas en el sistema endocrino: Los PFAS han sido asociados con interrupciones en el sistema endocrino, lo que podría afectar la regulación hormonal y tener implicaciones en el desarrollo y la función de diversos órganos (Wickham et al., 2021; Zhu et al., 2020).
- Efectos sobre el desarrollo: La exposición prenatal a PFAS se ha vinculado con un mayor riesgo de efectos adversos en el desarrollo, incluyendo alteraciones cognitivas y de comportamiento en niños (Wee et al., 2023; 2021; Zhu et al., 2020).
- Cáncer: Si bien la relación entre PFAS y el cáncer aún se está estudiando, algunos estudios han sugerido una posible conexión entre la exposición a ciertos PFAS y el cáncer de riñón, testicular y de tiroides (Wickham et al., 2021).

La gravedad de estos riesgos para la salud depende de varios factores, incluyendo la duración y nivel de exposición, así como la susceptibilidad individual (Zhu et al., 2020).

Debido a las afectaciones a la salud y la preocupación por su existencia, su detección en sistemas de agua potable en diversos países enfatiza la necesidad de abordar este problema a nivel mundial:

#### **Estados Unidos:**

La detección de PFAS en la población general de los Estados Unidos durante 2015-2016 reveló que estas sustancias son ubicuas en la población (Zhu et al., 2020). Los niveles medios de varios tipos de PFAS en muestras de sangre se encuentran en el rango de ng/ml, lo que indica una exposición generalizada (Zhu et al., 2020). Además, se ha demostrado que la exposición continua a concentraciones relativamente bajas de PFAS en el agua potable puede aumentar significativamente las concentraciones séricas (Ingold et al., 2023).

A pesar de la ubicuidad o presencia de estas sustancias, la falta de regulación adecuada y la información limitada sobre sus efectos en la salud han generado incertidumbre y preocupación en las comunidades afectadas (Domingo et al., 2019).

### **Canadá:**

Canadá ha estado investigando la presencia de PFAS en el agua potable y ha encontrado que estos compuestos están presentes en varias regiones del país. Aunque los niveles pueden variar, existe una preocupación constante por los riesgos potenciales para la salud, lo que ha llevado a un mayor escrutinio y esfuerzos de regulación (Campo et al., 2016). Domingo et al. (2019) menciona estudios realizados por D'eon et al. (2009) quienes determinaron los niveles de una nueva clase de ácidos perfluorados, los ácidos fosfónicos perfluorados (PFPA), en una cuenca urbana, muestras tomadas de arroyos y ríos dentro y alrededor de la ciudad de Toronto, Ontario.

En Canadá, las directrices de calidad del agua potable para el PFOA es de 200 ng/L y la del PFOS es de 600 ng/L (Zango et al., 2023).

### **Brasil:**

(Domingo et al., 2019), afirma por otros estudios, que, en Brasil, se ha informado de la exposición a PFAS a través del agua potable basada en la detección de PFAS en el agua del grifo con concentraciones de PFOA: 46 ng/L y PFOS: 44 ng/L, mientras que en el agua embotellada PFOA: 12 ng/L.

### **Francia:**

En la investigación de Bach et al.,(2017) se llevó a cabo un estudio con múltiples objetivos, en el cual se enfocaron en identificar la presencia de PFAS vertidos en un río francés por parte de dos plantas de fabricación de fluoropolímeros. Además, evaluaron el impacto tanto de la contaminación reciente como pasada de PFAS en la calidad del agua de dos campos de pozos situados a lo largo del río. Este vertido tuvo un claro impacto en la calidad del agua de los recursos utilizados para abastecer de agua potable, siendo registrado como los niveles totales de PFAS más altos reportados en Francia hasta esa fecha. A pesar de que las concentraciones totales de PFAS en el agua tratada variaron entre 86 y 169 ng/L, se consideraron significativamente elevadas, aunque no sobrepasaron los valores de referencia disponibles.

### **Italia:**

En el estudio de Ingelido et al., (2018), se investigó la exposición de la población que vive en áreas del Véneto, Italia, se midieron las concentraciones séricas de la población y se compararon con un grupo de control que vivía en áreas vecinas con exposición de fondo conocida. Se encontró una diferencia significativa en las concentraciones de PFAS entre los sujetos expuestos y no expuestos confirmando una exposición significativa debido a la contaminación del agua potable. Se identificaron subgrupos con diferentes niveles de exposición, siendo la contaminación del agua el factor principal que influye en los niveles de PFAS en la sangre, junto con otros factores como el sexo, años de residencia y la cría de ganado propio. No se encontró relación con el rasgo genético del transportador renal estudiado.

### **España:**

En España, también se ha detectado la presencia de PFAS en el agua potable y otros entornos (Gallen et al., 2017). Un estudio realizado en el condado de Tarragona en España se encontró que la ingesta dietética era la principal vía de exposición al PFOS y PFOA, seguida por el consumo de agua potable (Domingo et al., 2019).

Por otro lado, en 2021, el Parlamento Europeo adoptó nuevos límites de 0.5 µg/L para todos los PFAS en el agua potable, como medida estricta de control (Singh et al., 2023).

### **Suecia:**

Nyström-Kandola et al., (2023) señalan que el agua potable puede ser una fuente importante de exposición a PFAS, especialmente para poblaciones afectadas por la contaminación de fuentes puntuales. Se habla de concentraciones que superan los 100 ng / L de ácido perfluoroalquilo (PFAA) individual. El estudio se centró en evaluar las asociaciones entre bajas concentraciones de PFAA en el agua potable y las concentraciones séricas de estos compuestos en adolescentes suecos, revelando que el agua contaminada de bajo nivel es una fuente significativa de exposición a PFAAs y que la bioacumulación parece ser mayor a niveles bajos de contaminación de PFAAs en el agua, así como se marca una diferencia entre hombres y mujeres.

### **Alemania:**

En Alemania, se realizaron investigaciones para evaluar la presencia de PFAS en el agua potable de todo el país (Ingold et al., 2023). Se encontró que las concentraciones de varios tipos de PFAS variaban ampliamente, pero en general, estaban por debajo del límite de 0,1 µg/L. Sin embargo, se detectaron niveles superiores a este límite en algunas muestras (Ingold et al., 2023).

En Alemania las organizaciones establecieron límites para agua potable de 90 ng/L) y se encuentran entre las naciones que han establecido límites permitidos para la contaminación por PFAS en agua (Singh et al., 2023).

### **Japón:**

Autores como Kaboré et al., (2018), realizaron estudios acerca de la presencia de en de sustancias perfluoroalquilo y polifluoroalquilo en agua potable en Japón.

Resaltando la importancia del estudio para el país, dada su industrialización y uso de productos que contienen PFAS, la preocupación por la contaminación y sus impactos en la salud es relevante en este país.

Varios países asiáticos han introducido regulaciones específicas para el PFOS en concordancia con el Convenio de Estocolmo. A pesar de que en Japón el PFOA, PFHxA, PFHxS y PFOS están sujetos a ciertas regulaciones, la mayoría de los químicos PFAS no están contemplados en estas normativas. Como medida provisional, Japón ha fijado un estándar regulatorio para los PFAS (que comprenden la cantidad combinada de PFOS y PFOA) por debajo de los 50 ng/L (Singh et al., 2023).

### **China:**

China ha llevado a cabo investigaciones sobre la presencia de PFAS en su agua potable. Se ha observado que las concentraciones de PFAS varían geográficamente, y las áreas industriales pueden tener niveles más altos debido a la producción de productos que contienen PFAS (Tan et al., 2017). Por ejemplo, en el este de China, se han observado niveles variables de PFAS en muestras de agua del grifo, con concentraciones más altas en regiones específicas, como el delta del río Yangtze (Tan et al., 2017). Las concentraciones totales de PFAS en el agua del grifo oscilaron entre 1,4 y 175 ng/L, pero el resultado más preocupante fue que las concentraciones de

PFOA (115-151 ng/L) encontradas en el agua del grifo de tres distritos de Hangzhou excedieron el estándar de calidad del agua potable de la USEPA de 70 ng/L (Domingo et al., 2019).

Recientemente, en China se han establecido nuevos Estándares Nacionales para la Calidad del Agua Potable, que establecen límites para los PFAS (PFOS y PFOA) en 40 y 80 ng/L, respectivamente. Además, esta actualización prohíbe la fabricación, importación y exportación de PFOS y sus sales a partir del 1 de enero de 2024 (Singh et al., 2023).

### **India:**

Teniendo en cuenta las preocupaciones en materia de salud y la falta de conocimiento sobre su presencia generalizada en distintas matrices y sus características toxicológicas, el país ha firmado el Convenio de Estocolmo, pero aún no cuenta con regulaciones para el uso de PFAS. Dadas estas circunstancias, se ha propuesto la necesidad de regular la producción y utilización de PFAS y sus precursores (Singh et al., 2023).

### **África:**

El estudio realizado por Essumang et al., (2017) proporciona información sobre la presencia de contaminación por ácidos perfluoroalquilos (PFAAs) en ríos y agua potable en Ghana. Se identificaron cinco tipos de PFAAs, que incluyen PFOA, PFOS, PFHxA, PFDA y PFPeA. Las concentraciones promedio totales de PFAAs en los ríos Kakum y Pra se situaron en 281 y 398 ng/L, respectivamente, mientras que el agua del grifo, que se abastece a partir del tratamiento del agua de estos ríos, presentó concentraciones de 197 y 200 ng / L, respectivamente.

### **Australia:**

Domingo et al. (2019) menciona un estudio realizado por (Thompson et al., 2011) en el que investigó el aporte del agua potable a la ingesta diaria de PFAA. Los más frecuentemente detectados fueron el PFOS y el PFOA, presentes en el 49% y el 44% de todas las muestras, respectivamente. La concentración más alta registrada correspondió al PFOS, con 16 ng/L, seguido por el PFHxS y el PFOA, con concentraciones de 13 y 9,7 ng/L, respectivamente.

En Australia, el Departamento de Salud y Food Standards Australia New Zealand (FSANZ) han establecido directrices de salud que regulan el PFOA, fijando un límite para el agua potable en

---

160 ng/L. Asimismo, para la suma de PFOS y PFHxS con un límite en el agua potable de 560 ng/L (Singh et al., 2023).

Por otro lado, la eliminación de los PFAS del agua potable es un desafío importante, por lo que se han desarrollado varios procesos y tecnologías para eliminar estos contaminantes del agua, pero su eficacia puede variar (Campo et al., 2016).

Estas investigaciones han sido extensas debido a su persistencia y resistencia a los métodos convencionales. Se han examinado una variedad de tecnologías de tratamiento de aguas, desde la biorremediación hasta la oxidación avanzada y la sorción (Zango et al., 2023). A pesar de la diversidad de enfoques, persisten deficiencias significativas, algunos métodos resultan ineficaces o generan contaminación secundaria, y otros son costosos o requieren condiciones operativas difíciles de mantener (Saawarn et al., 2022; Zango et al., 2023).

Entre las tecnologías avanzadas, la oxidación química, la fotocatalisis y la nanofiltración se han identificado como las más efectivas para la remoción y mineralización de PFAS (Banks et al., 2020; Saawarn et al., 2022; Zango et al., 2023).

Los procesos convencionales, como la coagulación y los filtros de arena, muestran limitaciones en la eliminación de PFAS debido a la fuerza de sus enlaces y su electronegatividad (Singh et al., 2023). Además, las tecnologías avanzadas, como la tecnología de plasma o la degradación química, se enfrentan a desafíos, como altos requisitos de energía o la formación de subproductos tóxicos (Singh et al., 2023; Wanninayake, 2021). Esto ha llevado a la necesidad de buscar enfoques sinérgicos que combinen múltiples técnicas para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad en la eliminación de PFAS (Wanninayake, 2021).

La sorción, mediante absorbentes como carbón activado o nanosorbentes, ha demostrado ser prometedora, aunque su efectividad puede variar según las propiedades del compuesto y del absorbente (Banks et al., 2020). Además, las membranas de ósmosis inversa y nanofiltración muestran una alta eficacia en la eliminación de PFAS, especialmente de compuestos de cadena corta, aunque se requieren más estudios bajo diferentes condiciones operativas (Banks et al., 2020).

La fotocatalisis y la sonodegradación han destacado como tecnologías efectivas para la degradación de PFAS en agua, pero aún enfrentan desafíos como la variabilidad en la eficiencia según las condiciones del agua y la energía consumida (Banks et al., 2020).

## **7 Conclusiones**

La detección generalizada de PFAS en múltiples países, su estado actual y la presencia constante en el agua potable ha generado una preocupación global. Esta presencia, junto con la falta de regulaciones adecuadas en algunos lugares, destaca la urgencia de abordar la contaminación por PFAS a nivel internacional.

La exposición a los PFAS se ha relacionado con una serie de efectos adversos para la salud humana, incluyendo problemas reproductivos, alteraciones en el sistema inmunológico, enfermedades hepáticas, interrupciones en el sistema endocrino y efectos adversos en el desarrollo, entre otros. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de comprender mejor los riesgos asociados con la exposición a estas sustancias y abogar por medidas regulatorias más estrictas para proteger la salud pública.

Si bien se han identificado múltiples enfoques para la eliminación de PFAS, ninguna técnica individual ha demostrado ser completamente efectiva. Se requieren investigaciones adicionales, especialmente en enfoques combinados y en la optimización de tecnologías específicas, para abordar los desafíos persistentes en la remoción de estos contaminantes del agua.

### Referencias

- Bach, C., Dauchy, X., Boiteux, V., Colin, A., Hemard, J., Sagres, V., Rosin, C., & Munoz, J. F. (2017). The impact of two fluoropolymer manufacturing facilities on downstream contamination of a river and drinking water resources with per- and polyfluoroalkyl substances. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(5), 4916–4925. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8243-3>
- Banks, D., Jun, B. M., Heo, J., Her, N., Park, C. M., & Yoon, Y. (2020). Selected advanced water treatment technologies for perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances: A review. *Separation and Purification Technology*, 231(April 2019), 115929. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115929>
- Blotevogel, J., Thagard, S. M., & Mahendra, S. (2023). Scaling up water treatment technologies for PFAS destruction: current status and potential for fit-for-purpose application. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 41, 100944. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2023.100944>
- Buck, R. C., Franklin, J., Berger, U., Conder, J. M., Cousins, I. T., Voogt, P. De, Jensen, A. A., Kannan, K., Mabury, S. A., & van Leeuwen, S. P. J. (2011). Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: Terminology, classification, and origins. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 7(4), 513–541. <https://doi.org/10.1002/ieam.258>
- Campo, J., Lorenzo, M., Pérez, F., Picó, Y., Farré, M. la, & Barceló, D. (2016). Analysis of the presence of perfluoroalkyl substances in water, sediment and biota of the Jucar River (E Spain). Sources, partitioning and relationships with water physical characteristics. *Environmental Research*, 147, 503–512. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.03.010>
- Domingo, J. L., & Nadal, M. (2019). Human exposure to per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) through drinking water: A review of the recent scientific literature. *Environmental Research*, 177(July). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108648>
- Essumang, D. K., Eshun, A., Hogarh, J. N., Bentum, J. K., Adjei, J. K., Negishi, J., Nakamichi, S., Habibullah-Al-Mamun, M., & Masunaga, S. (2017). Perfluoroalkyl acids (PFAAs) in the Pra and Kakum River basins and associated tap water in Ghana. *Science of the Total Environment*, 579, 729–735. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.035>
- Gallen, C., Drage, D., Eaglesham, G., Grant, S., Bowman, M., & Mueller, J. F. (2017). Australia-

- wide assessment of perfluoroalkyl substances (PFASs) in landfill leachates. *Journal of Hazardous Materials*, 331, 132–141. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.02.006>
- Guevara Patiño, R. (2016). El estado del arte en la investigación: ¿análisis de los conocimientos acumulados o indagación por nuevos sentidos? *Folios*, 1(44), 165–179. <https://doi.org/10.17227/01234870.44folios165.179>
- Im, D., Pyo, J., Lee, H., Jung, H., & Ock, M. (2023). Qualitative research in healthcare: data analysis. *Journal of preventive medicine and public health*, 56(2), 100-110. <https://doi.org/10.3961/jpmph.22.471>
- Ingelido, A. M., Abballe, A., Gemma, S., Dellatte, E., Iacovella, N., De Angelis, G., Zampaglioni, F., Marra, V., Miniero, R., Valentini, S., Russo, F., Vazzoler, M., Testai, E., & De Felip, E. (2018). Biomonitoring of perfluorinated compounds in adults exposed to contaminated drinking water in the Veneto Region, Italy. *Environment International*, 110(October 2017), 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.10.026>
- Ingold, V., Kämpfe, A., & Ruhl, A. S. (2023). Screening for 26 per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in German drinking waters with support of residents. *Eco-Environment & Health*, 2(August), 235–242. <https://doi.org/10.1016/j.eehl.2023.08.004>
- Jiménez, B. (2021). Diclofenac Degradation by Radiocatalysis. *J. Water Chem. Technol.* 43, 243–248 DOI: <https://doi-org.udea.lookproxy.com/10.3103/S1063455X21030048>
- Jacobo-Marín, D., & de León, G. S. (2021). Emerging contaminants in water: Regulation in Mexico, precautionary principle and comparative perspective. *Revista de Derecho Ambiental(Chile)*, 15, 51–75. <https://doi.org/10.5354/0719-4633.2021.57414>
- Kaboré, H. A., Vo Duy, S., Munoz, G., Méité, L., Desrosiers, M., Liu, J., Sory, T. K., & Sauvé, S. (2018). Worldwide drinking water occurrence and levels of newly-identified perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances. *Science of the Total Environment*, 616–617, 1089–1100. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.210>
- Naskar, J., Boatemaa, MA, Rumjit, NP et al. (2022). Recent Advances of Nanotechnology in Mitigating Emerging Pollutants in Water and Wastewater: Status, Challenges, and Opportunities. *Agua Aire Suelo Contaminación* 233, 156 DOI: <https://doi-org.udea.lookproxy.com/10.1007/s11270-022-05611-y>
- Nacional de La Pampa Argentina, U., Reyes, G., & Enrique, C. (2019). Estrategia metodológica

- 
- para elaborar el estado del arte como un producto de investigación educativa Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. *Praxis Educativa (Arg)*, 23(3), 0–12. <https://doi.org/10.19137/praxiseducativa-2019-230307>
- Nyström-Kandola, J., Ahrens, L., Glynn, A., Johanson, G., Benskin, J. P., Gyllenhammar, I., Lignell, S., & Vogs, C. (2023). Low concentrations of perfluoroalkyl acids (PFAAs) in municipal drinking water associated with serum PFAA concentrations in Swedish adolescents. *Environment International*, 180(August), 108166. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108166>
- Podder, A., Sadmani, A. H. M. A., Reinhart, D., Chang, N. Bin, & Goel, R. (2021). Per and polyfluoroalkyl substances (PFAS) as a contaminant of emerging concern in surface water: A transboundary review of their occurrences and toxicity effects. *Journal of Hazardous Materials*, 419(June), 126361. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126361>
- Ramirez, Fabián; Zwerg, A. (2012). Metodología de la investigación: más que una receta. *AD-Minister*, 0(20), 91–111.
- Saawarn, B., Mahanty, B., Hait, S., & Hussain, S. (2022). Sources, occurrence, and treatment techniques of per- and polyfluoroalkyl substances in aqueous matrices: A comprehensive review. *Environmental Research*, 214(P4), 114004. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114004>
- Singh, K., Kumar, N., Kumar Yadav, A., Singh, R., & Kumar, K. (2023). Per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) as a health hazard: Current state of knowledge and strategies in environmental settings across Asia and future perspectives. *Chemical Engineering Journal*, 475(March), 145064. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145064>
- Tan, K. Y., Lu, G. H., Piao, H. T., Chen, S., Jiao, X. C., Gai, N., Yamazaki, E., Yamashita, N., Pan, J., & Yang, Y. L. (2017). Current Contamination Status of Perfluoroalkyl Substances in Tapwater from 17 Cities in the Eastern China and Their Correlations with Surface Waters. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 99(2), 224–231. <https://doi.org/10.1007/s00128-017-2109-3>
- Wanninayake, D. M. (2021). Comparison of currently available PFAS remediation technologies in water: A review. *Journal of Environmental Management*, 283(October 2020), 111977.

---

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.111977>

- Wee, S. Y., & Aris, A. Z. (2023). Revisiting the “forever chemicals”, PFOA and PFOS exposure in drinking water. In *npj Clean Water* (Vol. 6, Issue 1, pp. 1–16). Springer US. <https://doi.org/10.1038/s41545-023-00274-6>
- Wickham, G. M., & Shriver, T. E. (2021). Emerging contaminants, coerced ignorance and environmental health concerns: The case of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *Sociology of Health and Illness*, 43(3), 764–778. <https://doi.org/10.1111/1467-9566.13253>
- Zango, Z. U., Khoo, K. S., Garba, A., Kadir, H. A., Usman, F., Zango, M. U., Da Oh, W., & Lim, J. W. (2023). A review on superior advanced oxidation and photocatalytic degradation techniques for perfluorooctanoic acid (PFOA) elimination from wastewater. *Environmental Research*, 221(January), 115326. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115326>
- Zhu, Y., & Bartell, S. M. (2020). Per-and polyfluoroalkyl substances in drinking water and birthweight in the US: A county-level study. *Environmental Epidemiology*, 4(4). <https://doi.org/10.1097/EE9.000000000000107>