



Tendencias y perspectivas sobre PFAS en agua potable y su regulación

Walter Manuel HOYOS-ALAYO *¹ 

¹ Universidad Tecnológica del Perú, Chiclayo, Perú.
*E-mail: C23712@utp.edu.pe

Enviado: 20/09/2025; Aceptado: 13/03/2026; Publicado: 15/04/2026.

RESUMEN: Las PFAS preocupan por su persistencia, toxicidad y presencia en el agua de consumo, con una exposición extendida y normas en revisión, lo que demanda una síntesis cuantitativa para orientar decisiones. El objetivo fue caracterizar la evolución científica y normativa sobre los PFAS en el agua potable e identificar actores, redes, hitos y vacíos. Se realizó un análisis bibliométrico en Scopus hasta el 24 de agosto de 2025, con 3581 documentos, procesados en Bibliometrix 5.1.1 y VOSviewer 1.6.19, aplicando las leyes de Lotka y de Bradford, la coautoría, el RPYS, el conteo fraccional y los mapas temáticos. Los resultados indican un crecimiento anual del 25,14%, un pico de 623 artículos en 2024, 11 291 autores y 6,54 coautores por documento, una coautoría internacional del 27,62%, 278 fuentes, un top diez que concentra el 58%, liderazgo de Estados Unidos y China, y una RPYS con un máximo en 2020 de 16 216 citas, señales de giro hacia enfoques de clase y mayor tracción de riesgo, biomonitorio y tratamiento. Se concluye que el campo es joven y ya consolidado, con utilidad regulatoria, aunque persisten brechas en la normalización de métricas grupales, en la vinculación entre el desempeño de planta y la exposición humana, en la evaluación de costos, en la gestión de residuos y en la comunicación del riesgo.

Palabras clave: Sustancias perfluoroalquilo y polifluoroalquilo; compuestos químicos eternos; agua potable; regulación ambiental; bibliometría; evaluación de riesgo; análisis bibliométrico

TRENDS AND PERSPECTIVES ON PFAS IN DRINKING WATER AND ITS REGULATION

ABSTRACT: PFAS are a concern due to their persistence, toxicity, and presence in drinking water, with widespread exposure and regulations under review, demanding a quantitative synthesis to guide decision-making. The objective was to characterize the scientific and regulatory evolution regarding PFAS in drinking water and to identify stakeholders, networks, milestones, and gaps. A bibliometric analysis was conducted in Scopus up to August 24, 2025, with 3581 documents, processed using Bibliometrix 5.1.1 and VOSviewer 1.6.19, applying Lotka's and Bradford's laws, co-authorship, RPYS, fractional counting, and thematic maps. The results indicate an annual growth rate of 25.14%, a peak of 623 articles in 2024, 11,291 authors and 6.54 co-authors per document, international co-authorship of 27.62%, 278 sources, a top ten authorship accounting for 58% of the articles, leading positions held by the United States and China, and a peak of 16,216 citations in 2020. There are also signs of a shift towards class-based approaches and increased focus on risk, biomonitoring, and treatment. The study concludes that the field is young and already well-established, with regulatory utility, although gaps remain in the standardization of group metrics, in linking plant performance and human exposure, in cost assessment, in waste management, and in risk communication.

Keywords: Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances; perennial chemical compounds; drinking water; environmental regulation; bibliometrics; risk assessment; bibliometric analysis.

1. INTRODUCCIÓN

Las sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS) constituyen una familia de compuestos sintéticos de amplia aplicación industrial por su resistencia térmica y química, así como por sus propiedades repelentes al agua y al aceite (KANG et al., 2025; VAN LAREBEKE et al., 2025).

La magnitud del universo químico a analizar es, sin embargo, extraordinaria: la OCDE identificó 4 730 números CAS en su base global (criterio “PFAS 2018”), mientras que el conjunto de estructuras PFAS curado en el DSSTox/CompTox de la EPA alcanzó 14 735 entradas en agosto de 2022, y esfuerzos recientes reportan del orden de

millones de compuestos potencialmente fluorados en repositorios abiertos, lo que complejiza el censo y la regulación del grupo químico (EPA [UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY], 2022; SCHYMANSKI et al., 2023; OECD [ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT], 2024;).

Desde la perspectiva de exposición poblacional, la evidencia indica una presencia generalizada de PFAS en matrices hídricas y, de manera preocupante, en el agua de consumo (ZHAI et al., 2025). Un estudio nacional del USGS estimó que el 45 % del agua de grifo en los Estados Unidos

contiene al menos un PFAS medido (se analizaron 32 compuestos), lo que confirma la ubicuidad de estas sustancias en sistemas urbanos y pozos privados (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2023). En el plano global, un metaanálisis geoespacial que compiló >45 000 muestras de aguas superficiales y subterráneas mostró que una fracción sustantiva de los sitios excede los valores guía vigentes de potabilización, con patrones de sobrepaso que dependen de la jurisdicción y de las fuentes locales de emisión (ACKERMAN GRUNFELD et al., 2024).

Los riesgos sanitarios asociados a la exposición crónica también están bien documentados por organismos independientes (SAN ROMÁN et al., 2025). El informe de la Academia Nacional de Ciencias, Ingeniería y Medicina (NASEM) sugiere puntos de corte clínicos en el suero: < 2 ng mL⁻¹ (sin efectos esperados), 2–20 ng mL⁻¹ (riesgo potencial, especialmente en poblaciones sensibles) y > 20 ng mL⁻¹ (mayor riesgo), y recomienda integrar la determinación de PFAS séricos en el cuidado clínico de comunidades expuestas (GUIDANCE ON PFAS EXPOSURE, TESTING, AND CLINICAL FOLLOW-UP, 2022).

De forma consistente, la EFSA estableció en 2020 una ingesta semanal tolerable grupal de 4,4 ng kg⁻¹ de peso corporal semana⁻¹ para PFOS, PFOA, PFNA y PFHxS, basada en la inmunotoxicidad (disminución de anticuerpos posvacunales) como efecto crítico, lo que refuerza la necesidad de controles estrictos en el agua de bebida (EFSA [EUROPEAN FOOD SAFETY AUTHORITY], 2020; CRAWFORD et al., 2023). Además, síntesis recientes de la literatura epidemiológica continúan vinculando la exposición a PFAS con dislipidemia, ciertas neoplasias, disfunción tiroidea, bajo peso al nacer y respuestas vacunales reducidas (BLINE et al., 2024a; SIGVALDSEN et al., 2024).

En respuesta, el horizonte regulatorio ha cambiado de manera decisiva. El 10 de abril de 2024, la EPA de los EE. UU. finalizó la primera norma nacional de agua potable para PFAS, fijando MCL (límite máximo de contaminante) individuales de 4 ppt para PFOA y PFOS, y de 10 ppt para PFNA, PFHxS y HFPO-DA (GenX), además de un índice de peligro (Hazard Index) para mezclas de PFHxS, PFNA, HFPO-DA y PFBS. La regla entró en vigor el 25 de junio de 2024 (EPA [United States Environmental Protection Agency]).

La propia EPA estima que la implementación reducirá la exposición de casi 100 millones de personas, prevendrá miles de muertes y decenas de miles de enfermedades graves, con un costo anual esperado de aproximadamente US\$ 1,5 mil millones; el financiamiento federal disponible para apoyar a los sistemas de agua incluye US\$ 9 000 millones dedicados a PFAS y otros US\$ 12 000 millones para mejoras generales de agua potable bajo la Ley Bipartidista de Infraestructura (EPA [UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY], 2024a). En la Unión Europea, la Directiva de Agua Potable recast introdujo dos nuevos parámetros: “Suma de 20 PFAS” (0,1 µg L⁻¹) y “PFAS Totales” (0,5 µg L⁻¹), con cumplimiento obligatorio a partir del 12 de enero de 2026 (EUROPEAN COMMISSION, 2025; EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2024).

En este contexto de riesgo, regulación emergente y complejidad química, la producción científica ha crecido aceleradamente y se ha diversificado hacia vertientes que abarcan desde la detección analítica de ultratrazas hasta la evaluación de riesgos, el tratamiento y la gobernanza ambiental (YANG; LI, 2025; ZHAI et al., 2025).

Ante la dispersión temática y metodológica del campo PFAS-agua potable, que abarca detección analítica de ultratrazas, evaluación de la exposición y del riesgo, tecnologías de tratamiento, gobernanza y un marco regulatorio en rápida evolución, el análisis bibliométrico se presenta como una herramienta idónea para sintetizar la evidencia, identificar actores clave (países, instituciones y autores), caracterizar redes de colaboración y co-citación, reconocer hitos científicos y normativos, como la recast de la Directiva de Agua Potable en la UE y la fijación de MCL (Nivel Máximo de Contaminante) por la EPA, y ubicar vacíos de investigación que aún limitan la gestión del riesgo (mezclas, PFAS emergentes y sustitutos, métricas integradas como AOF (Adsorbable Organic Fluorine, Flúor Orgánico Adsorbible) y TOF (Total Organic Fluorine, Flúor Orgánico Total) y aproximaciones no dirigidas) (COATES; HARRINGTON, 2024; ORENIBI et al., 2025).

La pertinencia de este estudio radica en que solo a través de una visión panorámica es posible aportar bases empíricas sólidas para políticas de agua potable segura, el diseño y la actualización de estándares, la priorización de tecnologías costo-efectivas de remoción y la comunicación de riesgos a decisores y a la población (LYU et al., 2025; WANG et al., 2025).

Conocer la complejidad de este fenómeno, para impulsar intervenciones orientadas a la protección de la salud pública y a la gestión sostenible del recurso hídrico, requiere, primero, una comprensión amplia del avance teórico-metodológico y del curso histórico seguido en la consolidación de lo que hoy entendemos por investigación sobre PFAS en el agua de consumo y su regulación.

Este panorama permite formular la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es el nivel de conocimiento científico sobre los PFAS en el agua potable y su regulación a lo largo del tiempo? En torno a ella, articulamos doce interrogantes ordenadas lógicamente: i) ¿cuál es la evolución temporal de las publicaciones sobre PFAS en agua de consumo y su regulación?, ii) ¿qué tipos de documentos, artículos y revisiones, predominan en el corpus y cuál es su peso relativo a lo largo del periodo estudiado?, iii) ¿cuáles son las áreas y subáreas dentro de Environmental Sciences más asociadas en Scopus y cómo se distribuyen?, iv) ¿cuáles son las filiaciones institucionales más influyentes y cuál es su aporte relativo?, v) ¿quiénes son los autores más prominentes y cómo se caracterizan sus trayectorias y tamaños de equipo?, vi) ¿en qué medida la productividad autorial se ajusta a la Ley de Lotka y qué implica ello sobre la concentración del liderazgo y la colaboración?, vii) ¿cuáles son las revistas más influyentes en la difusión de investigaciones sobre PFAS, agua potable y estándares de calidad, y cuál es su aporte al total publicado?, viii) ¿cuál es el núcleo de revistas según la Ley de Bradford y cómo se distribuyen las zonas de difusión, núcleo y anillos periféricos?, ix) ¿cuál es el nivel de colaboración internacional y cómo se organiza por países e instituciones?, x) ¿qué revela la Reference Publication Year Spectroscopy, RPYS, sobre las raíces históricas del campo y los años con sobrecitación?, xi) ¿qué tipos de publicaciones seminales, métodos, guías, síntesis y documentos normativos, explican los picos identificados por la RPYS en analítica, toxicología, tratamiento y regulación?, y xii) ¿cuáles son las perspectivas de investigación emergentes que orientan la agenda futura según la dinámica de palabras clave y el mapa temático?

2. MATERIAL AND METHODS

Con el propósito de caracterizar el abordaje científico de los PFAS en agua destinada al consumo humano y su marco regulatorio, se empleó la cartografía bibliométrica como método cuantitativo, basado en la matemática y la estadística, para analizar la producción científica y los patrones de comunicación académica en un dominio complejo y de rápida evolución. Este enfoque permite sintetizar tendencias, identificar actores e hitos y visibilizar vacíos y líneas emergentes, ofreciendo una visión panorámica del campo de “PFAS, agua potable y regulación”. Siguiendo la propuesta de Luna-Morales et al. (LUNA-MORALES et al., 2023), la aplicación de la bibliometría se desarrolló mediante los siguientes pasos: (i) formulación de la pregunta general y de las preguntas específicas de investigación; (ii) identificación de la base de datos pertinente; (iii) construcción de una ecuación canónica de búsqueda; y (iv) análisis estadístico de los metadatos recuperados.

El estudio adopta un enfoque cuantitativo, de nivel exploratorio-descriptivo, con un diseño longitudinal no experimental y retrospectivo. La estrategia analítica se orientó a rastrear e interpretar la evolución de la literatura desde los primeros registros pertinentes hasta el corte temporal de la búsqueda, con el fin de reconstruir su trayectoria histórica, identificar momentos de inflexión y valorar el grado de consolidación del campo en estudio (BELLIDO-VALDIVIEZO et al., 2023; GARCÍA et al., 2025).

A partir de la pregunta de investigación, se construyó la ecuación canónica de búsqueda, seleccionando los términos clave más relevantes del campo: (TITLE-ABS-KEY("PFAS" OR "perfluoroalkyl" OR "polyfluoroalkyl" OR "per- and polyfluoroalkyl" OR "perfluorinated compound*" OR "polyfluorinated" OR PFOA OR PFOS OR PFNA OR PFHxS OR "GenX" OR HFPO-DA) AND (water W/3 (drinking OR potable OR supply OR tap OR "ground water" OR groundwater OR "surface water"))) OR TITLE-ABS-KEY("PFAS" OR PFOA OR PFOS OR PFNA OR PFHxS OR "GenX" OR HFPO-DA) AND (regulation* OR policy OR policies OR guideline* OR standard* OR "maximum contaminant level" OR MCL OR "drinking water directive" OR "safe drinking water act" OR SDWA OR "risk assessment")) AND (DOCTYPE(ar) OR DOCTYPE(re)) AND NOT TITLE-ABS-KEY(soil OR sludge OR biosolid* OR "air emission*" OR "food packaging" OR textile*) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENVI")). La búsqueda se realizó sin restricciones de idioma ni acotación del periodo temporal, a fin de maximizar la sensibilidad de la recuperación y seguir la evolución del campo desde sus orígenes hasta el presente. La fuente para la recuperación de información fue Scopus, por su cobertura multidisciplinaria, la rigurosidad de sus procesos de indexación y la solidez de sus metadatos para analizar autores, instituciones, países y revistas. Como resultado, hasta el 24 de agosto de 2025 se recuperaron 3851 registros.

Para asegurar la pertinencia temática del corpus y reducir el “ruido” asociado a estudios de PFAS en matrices no hídricas (alimentos, textiles, aire), se priorizó el ámbito Environmental Sciences (LIMIT-TO(SUBJAREA,"ENVI")), dado que concentra la literatura sobre calidad del agua, tratamiento y evaluación ambiental; esto se verificó mediante un post-filtro y un muestreo manual, preservando la sensibilidad sin sacrificar el foco.

Los registros recuperados de Scopus se exportaron en formato Comma Separated Values (CSV) para su revisión y

control de calidad. Se realizó una depuración manual para excluir documentos irrelevantes, como estudios sin vínculo con políticas públicas, trabajos centrados en diversidad o inclusión sin componente evaluativo y documentos que no aportaron instrumentos, marcos operativos ni métricas verificables. Se eliminaron duplicados y se verificó la consistencia de títulos, resúmenes y palabras clave, con el fin de asegurar un conjunto de datos alineado con el objetivo del estudio, quedando finalmente 3581 registros.

Asimismo, los registros recuperados fueron sometidos a un análisis matemático-estadístico orientado a responder las preguntas de investigación; posteriormente, se procesaron en hojas de cálculo (Excel) para facilitar su organización e interpretación (OSEMWEGIE et al., 2023). Dado que los metadatos incorporan múltiples relaciones entre autores, instituciones, países, afiliaciones, revistas y patrocinadores, se elaboraron mapas científicos de redes semánticas y de coautoría (PRAHANI et al., 2024). Este mapeo y su visualización se realizaron con software especializado y de acceso libre, en particular Bibliometrix 5.1.1 (2025 – entorno R) y VOSviewer 1.6.19 (2023).

Bibliometrix permite realizar análisis estadísticos avanzados y generar gráficos bibliométricos y cuenta con el respaldo de la R Foundation for Statistical Computing (ARIA; CUCCURULLO, 2024). A su vez, VOSviewer, desarrollado por la Universidad de Leiden, está diseñado para construir y visualizar redes bibliométricas de revistas, autores o documentos mediante relaciones de citación, coocurrencia y RPYS; además, incorpora minería de texto para construir redes de coocurrencia de términos clave (SULPHEY et al., 2024; VAN ECK; WALTMAN, 2024). La combinación de estas herramientas permitió una comprensión integral de los dominios de PFAS, agua potable y regulación, al visibilizar avances, vacíos y oportunidades de investigación futura.

Se aplicaron pruebas y modelos bibliométricos específicos: RPYS para identificar raíces históricas; Ley de Lotka para la productividad autoral; y Ley de Bradford para los núcleos de fuentes, utilizando funciones de Bibliometrix (R) con conteo fraccional/completo según el análisis y la normalización por fuerza de asociación.

3. RESULTADOS

Los indicadores bibliométricos generales (Figura 1) delimitan un campo de investigación dinámico y de alto impacto. El corpus, que abarca de 1997 a 2025, reúne 3581 documentos publicados en 278 fuentes, con una tasa media de crecimiento anual de 25,14%. Participan 11 291 autores y solo 58 trabajos son de autor único, lo que equivale a 1,62 %. El promedio es de 6,54 coautores por documento y la coautoría internacional alcanza el 27,62%. El conjunto acumula 156 897 referencias, con un promedio de 43,81 por artículo. La edad promedio del documento es de 4,59 años. El impacto es alto: 43,62 citas por documento. El vocabulario del campo es amplio, con 7227 palabras clave de autor.

Como se observa en la Figura 2, la producción académica sobre el tema tuvo un arranque incipiente entre 1997 y 2006, con valores de 0 a 10 artículos por año y un total acumulado de 44. A partir de 2007, inicia una primera expansión que alcanza 66 artículos en 2010, seguida de un estancamiento relativo en 2011-2014 con valores cercanos a 53-69. Desde 2015, el crecimiento se reanuda con 81 artículos, supera los 100 en 2016-2017, alcanza los 130 en 2018 y se acelera con 190 en 2019 y 224 en 2020. El quiebre más fuerte ocurre entre

Tendencias y perspectivas sobre PFAS en agua potable y su regulación

2021 y 2024, con 318, 369 y 443 artículos y un máximo de 623 en 2024. En 2025 se observan 533, un descenso de 14,5% respecto de 2024, atribuible al corte temporal del corpus y a rezagos de indexación.

El ranking de productividad de autores (Figura 3) destaca a WANG Y (109), ZHANG Y (104), WANG X (95), ZHANG J (87), LIU Y (86), LI Y (85), LI J (76), WANG J (69), LIU J (67) y LI X (61). En conjunto, los diez primeros

acumulan 839 artículos, que representan el 23,43% de los 3581 documentos del corpus. El autor mejor posicionado explica el 3,04 % del total. Cuando se ajusta por coautoría mediante conteo fraccional, los aportes equivalentes para este mismo grupo oscilan entre 8,29 y 15,96 artículos, con una mediana de 11,68 y un agregado de 118,9, lo que equivale al 3,32% del total fraccional del corpus. La relación entre el conteo completo y el fraccional para los líderes se ubica en torno a 7, lo que refleja equipos numerosos por publicación.



Figura 1. Indicadores bibliométricos generales.
Figure 1. Gerais bibliometric indicators.

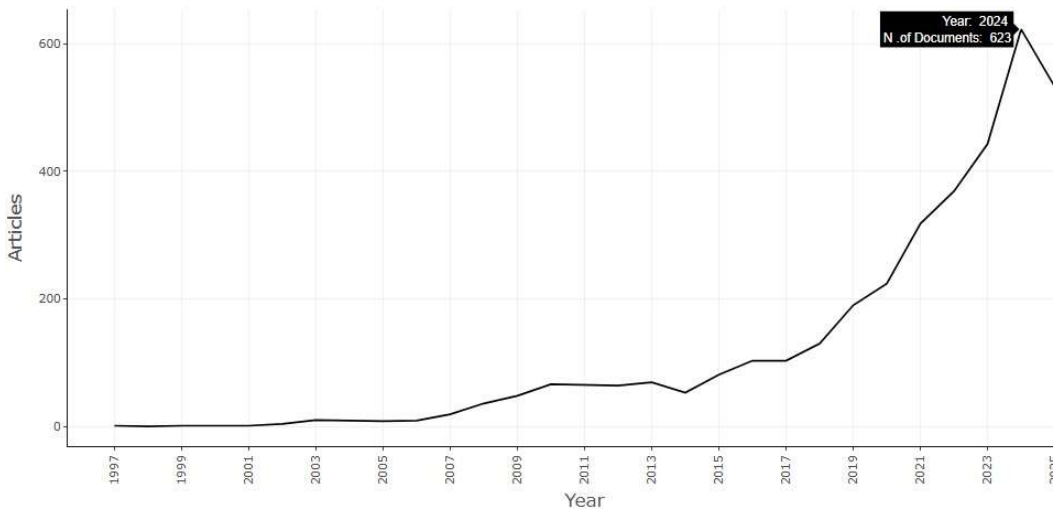


Figura 2. Producción científica anual.
Figure 2. Annual scientific production.

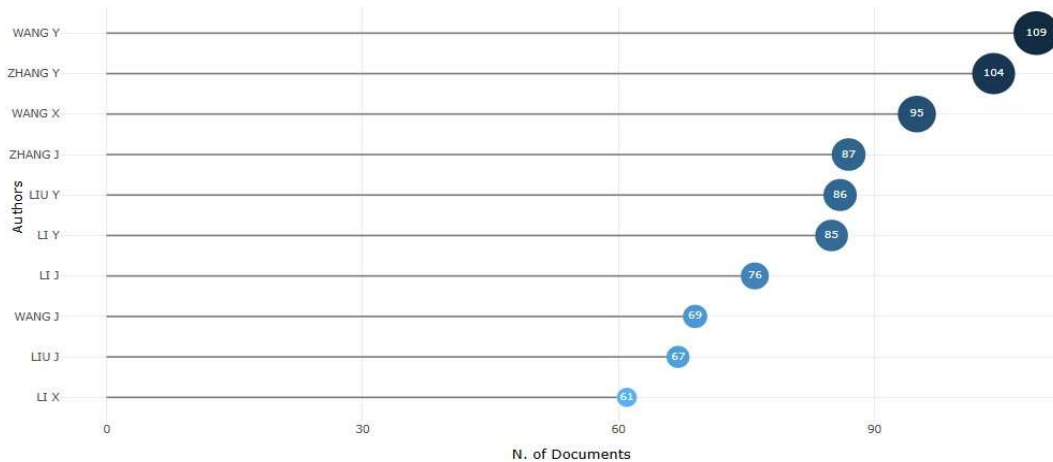


Figura 3. Autores relevantes.
Figure 3. Relevant authors.

La Figura 4 muestra la proporción de autores según el número de artículos que firmaron. La curva desciende con rapidez y presenta una cola larga. El punto de una sola

publicación concentra la mayor fracción de autores, 70,6 %. A partir de 2 artículos, la participación cae de forma marcada y, por encima de 10 artículos, el porcentaje se aproxima al

1%. En los extremos se observan los perfiles hiperproductivos, con 60 a 100 publicaciones, cuya frecuencia es marginal. La línea continua que acompaña a la serie observada se superpone casi por completo, lo que indica un ajuste sólido al modelo de Lotka. El núcleo editorial del campo (Figura 5) está altamente concentrado y está liderado por revistas ambientales de alto impacto, donde lidera Science of the Total Environment con 381 artículos, seguida de Environmental Science and Technology con 343 y de Chemosphere con 316. Completan el top 10: Environmental

Pollution (193), Environment International (192), Journal of Hazardous Materials (186), Environmental Research (157), Water Research (142), Ecotoxicology and Environmental Safety (90), and Environmental Health Perspectives (77). Estas diez revistas reúnen 2077 documentos, lo que representa el 58,0 % del corpus. El top 3 concentra el 29,0% y el top 5, el 39,8%. Dado que el promedio global es de 12,88 artículos por fuente, las tres primeras publican entre 24 y 30 veces ese promedio, lo que evidencia una fuerte concentración en las cabeceras de alto flujo.

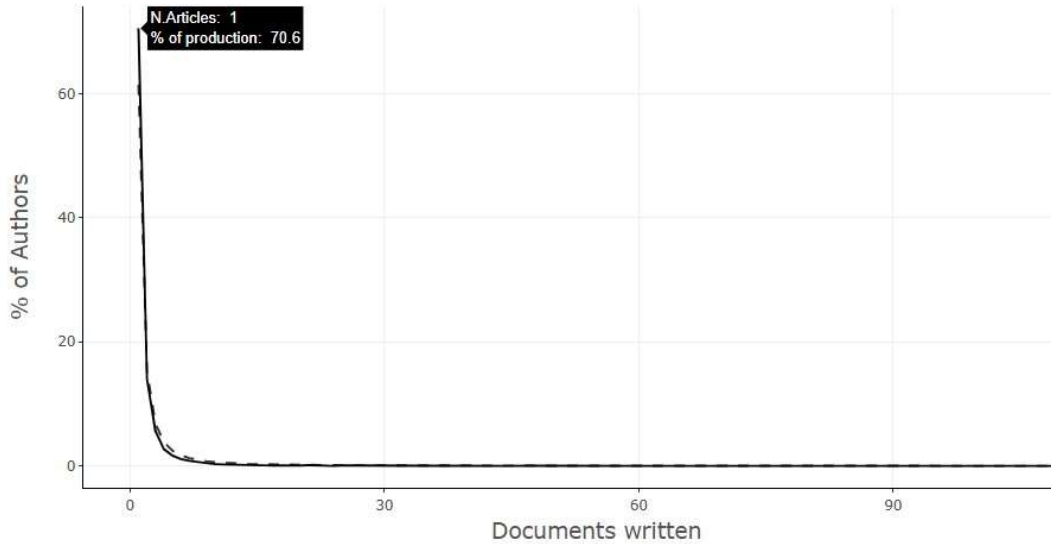


Figura 4. Distribución de los autores según su productividad - Ley de Lotka.
Figure 4. Distribution of two authors based on their productivity – Lei de Lotka.

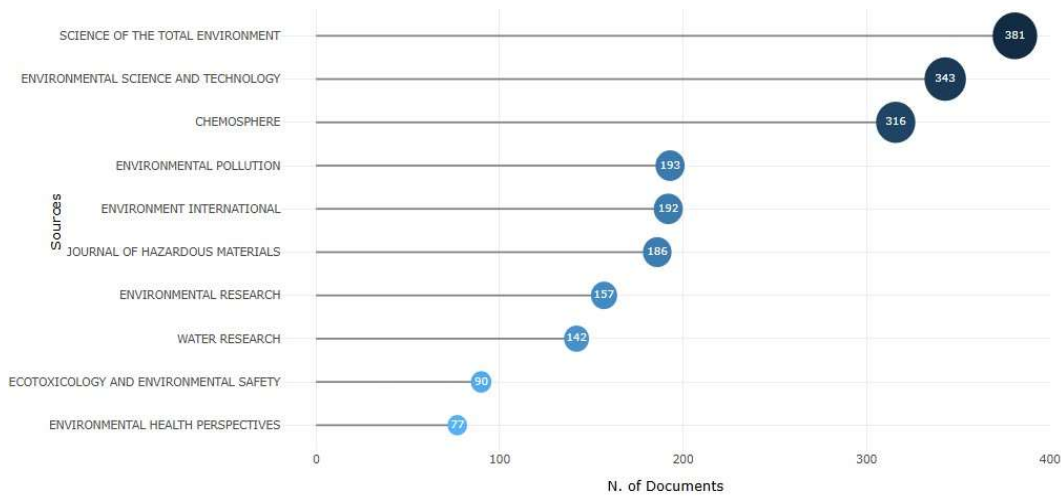


Figura 5. Revistas destacadas.
Figure 5. Featured Journals.

La distribución de Bradford (Figura 6) muestra la curva que ordena las revistas por rango y el número de artículos por fuente. El rectángulo gris indica el núcleo. Ese núcleo lo conforman tres cabeceras con 1040 artículos en total: Science of the Total Environment (381), Environmental Science and Technology (343) y Chemosphere (316). El segundo anillo reúne las siete revistas siguientes con 1037 artículos acumulados, Environmental Pollution, Environment International, Journal of Hazardous Materials, Environmental Research, Water Research, Ecotoxicology and Environmental Safety y Environmental Health Perspectives. El tercer anillo agrupa el resto de fuentes: 268 revistas que suman 1504 artículos. En términos relativos, el

núcleo concentra el 29,0% del total, el segundo anillo, el 28,9% y el tercero, el 42,0%.

La Figura 7 ordena las afiliaciones por número de artículos: Beijing encabeza con 342 documentos, seguido por Nankai University con 263, Chinese Academy of Sciences con 243, Sun Yat-sen University con 241 y Nanjing University con 225. Completan el top 10 University of California con 180, Hohai University con 165, University of Florida con 162, Tongji University con 154 y Stockholm University con 149. En conjunto, las diez primeras suman 2124 artículos, lo que representa el 59,31 % del corpus. El top 3 aporta 848 artículos (23,68%) y el top 5, 1314 (36,69%). El nodo "Beijing" representa el 9,55 % del total. Nankai y la

Tendencias y perspectivas sobre PFAS en agua potable y su regulación

Academia de Ciencias representan el 7,34% y el 6,79%, respectivamente. Entre las no chinas, University of

California, University of Florida y Stockholm University reúnen 491 artículos, lo que representa el 13,71 % del corpus.

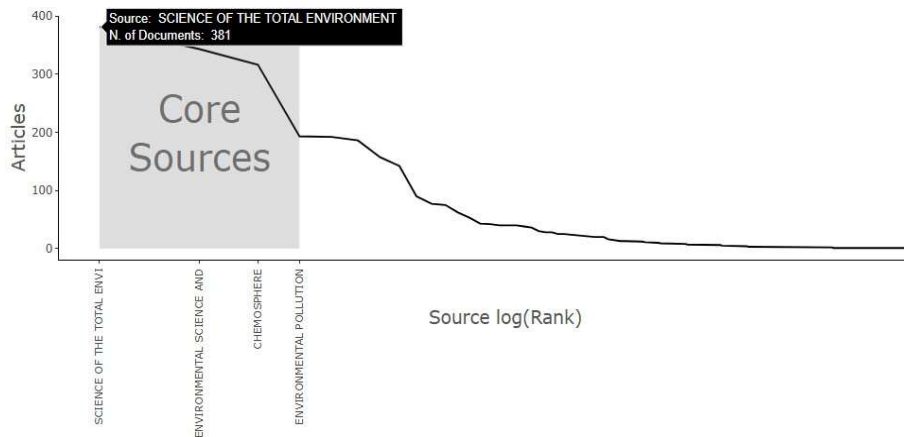


Figura 6. Dispersión de artículos - Ley de Bradford.
Figure 6. Dispersal of articles – Bradford Lei.

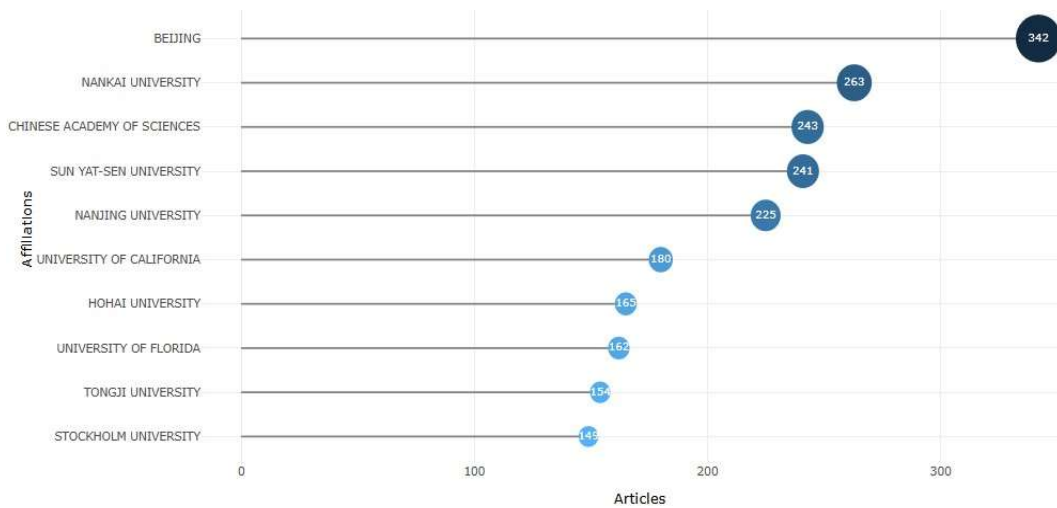


Figura 7. Afiliaciones institucionales.
Figure 7. Institutional affiliations.

La distribución geográfica de la producción (Figura 8) ubica a Estados Unidos y China como polos de producción, con barras que superan ampliamente al resto del grupo y que rondan los mil artículos cada uno en el recuento por participación nacional de Scopus. Les siguen Canadá, Suecia, Alemania, Australia, Reino Unido, Italia, Japón y Países Bajos, con volúmenes sensiblemente menores y en el rango

de centenares. La figura proviene de Analyze results, por lo que se aplica el conteo completo por país; un mismo artículo se acredita a todos los países coautores. El top 10 refleja tres bloques geográficos activos: Norteamérica, Asia oriental y Europa occidental, con Estados Unidos y China a la cabeza y una base europea diversificada.

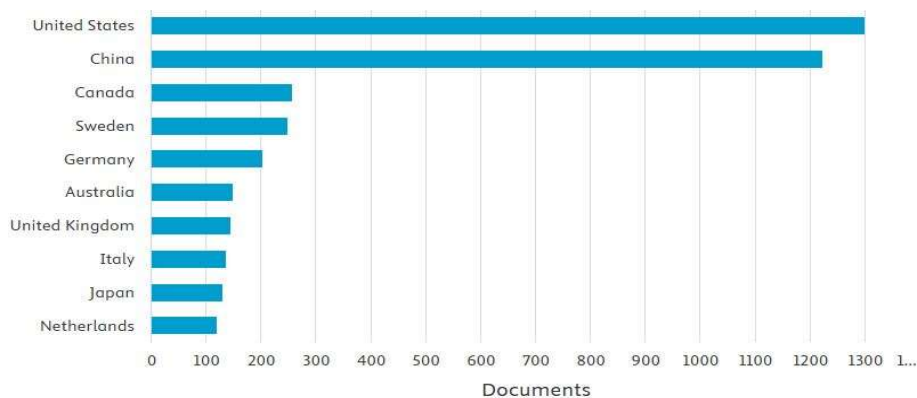


Figura 8. Producción por países.
Figure 8. Production by country.

La Figura 9 muestra la frecuencia acumulada anual de 10 términos. En 2025 lidera PFAS con 714 ocurrencias. Le siguen PFOS con 348 y PFOA con 317. Los descriptores de clase crecen con fuerza; per- and polyfluoroalkyl substances alcanza 209 y perfluoroalkyl substances 145. El plural de PFASs llega a 140. Los términos de salud y las matrices hídricas avanzan en paralelo: risk assessment 184, drinking water 165 y surface water 112. Perfluorooctanoic acid registra 124, en línea con la trayectoria de PFOA. El quiebre visual ocurre a partir de 2021, cuando PFAS supera a PFOS y PFOA y se despega hasta 2025. La Figura 10 muestra 6917

asignaciones de área para 3581 documentos de Scopus, en los que predomina Environmental Science con 52,8 % (3654). Le siguen Chemistry con 12,8% (883) y Medicine con 10,5% (724). Completan el grupo principal Pharmacology, Toxicology and Pharmaceutics con 6,5% (447), Engineering con 3,7% (256), Biochemistry, Genetics and Molecular Biology con 3,7% (254), Chemical Engineering con 3,2% (224), Agricultural and Biological Sciences con 3,0% (208), Earth and Planetary Sciences con 1,4% (99) y Social Sciences con 1,2% (80). El conjunto “Other” agrupa el 1,3 % (88) de las asignaciones menores.

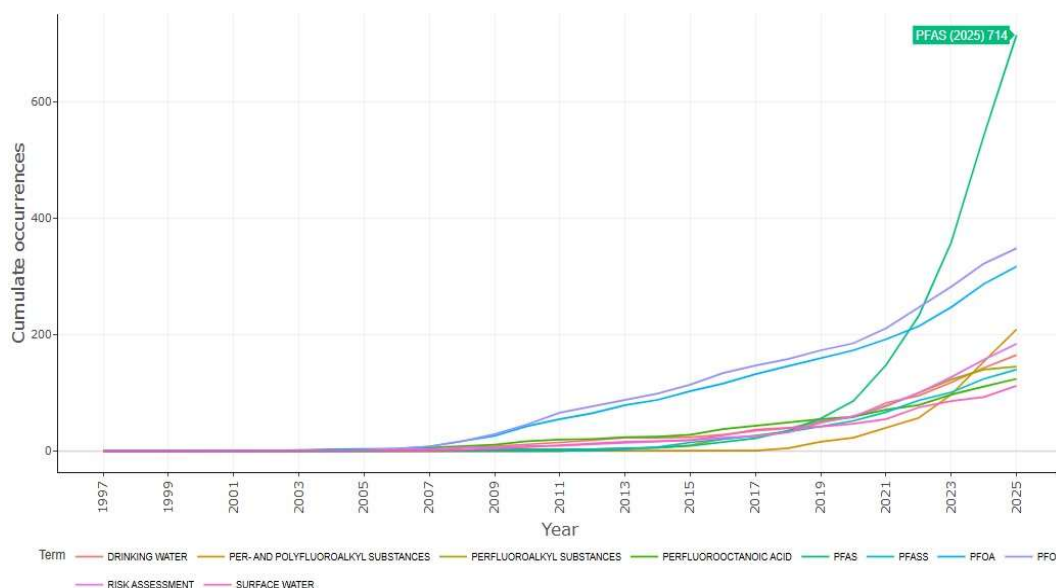


Figura 9. Frecuencia de las palabras a lo largo del tiempo.
Figure 9. Frequency of words over time.

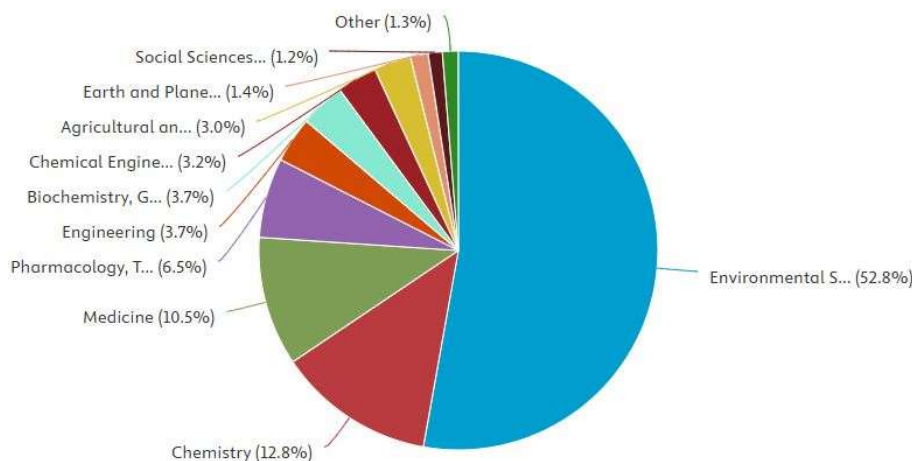


Figura 10. Publicaciones por áreas de estudio.
Figure 10. Publications by study areas.

La Figura 11 muestra una red de coocurrencia construida a partir de palabras clave del corpus completo analizado entre 1997 y 2025. En esta visualización, el tamaño del nodo representa la frecuencia de ocurrencia, el grosor del enlace expresa la fuerza de coocurrencia y el color indica el año medio de aparición calculado por VOSviewer para los términos que cumplieron el umbral de inclusión en la red. Por ello, la escala cromática se concentra entre 2019 y 2022, no como un recorte adicional del periodo de estudio, sino como el intervalo efectivo en el que se agrupa la mayor densidad de

términos con presencia y conexión relevantes, lo que permite identificar con mayor nitidez las tendencias temáticas recientes del campo. A partir de esta estructura se distinguen cinco núcleos temáticos interconectados. Núcleo químico, PFAS, fluorocarbonos, PFOS, PFOA, ácidos perfluorocarboxílicos y ácido perfluorooctanoico concentran los mayores nodos. Núcleo de matrices hídricas, drinking water, surface water, groundwater, water supply, and rivers. Núcleo de analítica, liquid chromatography, mass spectrometry, tandem mass spectrometry, limit of detection.

Los años pico más recientes revelan que la sobrecitación se apoya en revisiones integradoras y artículos con alcance sanitario y regulatorio. En 2019 sobresalen Sunderland et al. sobre vías de exposición humana y efectos en la salud, con 104 citas locales; Ateia et al. sobre PFAS de cadena corta y ultracorta, con 83; y Boone et al. sobre PFAS en aguas de fuente y tratadas de Estados Unidos, con 49. En 2020, año de máximo absoluto, dominan Glüge et al. con una síntesis sobre usos de PFAS, con 114 citas locales, Cousins et al. con el planteamiento de gestionar las PFAS como una clase química, con 50, Belkouteb et al. sobre el desempeño de carbón activado granular en una planta de tratamiento de agua potable, con 40, y Andrews et al. sobre exposición poblacional a través del agua de consumo, con 39. El impulso continúa en 2021 con Ankley et al. sobre riesgo ecológico, Fenton et al. sobre toxicidad y salud humana, y el perfil toxicológico de perfluoroalquilos, mientras que en 2022 resaltan Evich et al. en Science sobre PFAS en el ambiente, con 100 citas locales, junto con Cousins et al. sobre el rebase del espacio operativo seguro planetario. En suma, los años pico identifican una transición clara desde la detección y el

destino ambiental de compuestos individuales hacia un marco centrado en la exposición humana, el tratamiento del agua, la gestión por clase y la regulación, lo que otorga sentido histórico y temático a la RPYS del campo.

En la Figura 13, el plano ubica los temas (palabras clave del autor) según su centralidad en el eje X y su densidad en el eje Y. En la zona básica, de alta centralidad y baja densidad, aparecen dos polos: “pfas; per- and polyfluoroalkyl substances; risk assessment” y, separado, “pfos; pfoa; perfluorinated compounds”. En la zona motora, de alta centralidad y alta densidad, destaca “perfluoroalkyl substances; biomonitoring; exposure”. En el cuadrante de nicho, de baja centralidad y alta densidad, sobresalen “prenatal exposure; pregnancy; children”. En la franja emergente o en declive, de baja centralidad y baja densidad, se ubican “perfluorooctanoic acid; perfluorooctane sulfonate; oxidative stress”. Un clúster aplicado cercano a la frontera de nicho, “per- and polyfluoroalkyl substances; adsorption; water treatment”, muestra una alta densidad y una centralidad media.

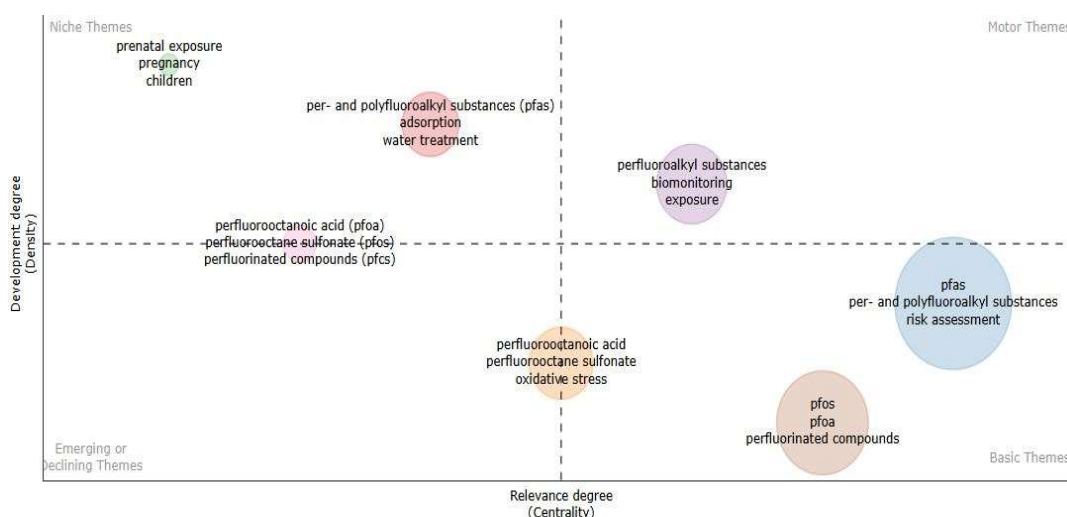


Figura 13. Mapa temático.
Figure 13. Thematic map.

4. DISCUSIÓN

Las Figuras 1 y 2 muestran un campo en expansión acelerada y de recambio rápido. El crecimiento anual de 25,14 %, el pico de 623 artículos en 2024 y la edad promedio de 4,59 años confirman que la evidencia reciente domina el corpus. La trayectoria temporal, surgimiento, expansión temprana, meseta y aceleración, se alinea con la adopción de vigilancia de ultratrazo y marcos de riesgo, junto con tecnologías analíticas basadas en cromatografía líquida y espectrometría de masas, y con el uso creciente de etiquetas de clase y métricas integradas; este patrón coincide con la renovación metodológica y regulatoria reportada para PFAS en agua de consumo, donde se combinan LC-MS/MS y HRMS, screening no dirigido, y decisiones sobre estándares e índices de peligrosidad para mezclas que han movilizad publicaciones y citas en los últimos años (ALSADIK et al., 2025; LIN et al., 2025; RAPOO et al., 2025; WANG et al., 2025; YANG et al., 2025).

Las figuras 3 y 4 evidencian cómo la autoría sostiene dicha expansión. Un pequeño núcleo concentra la productividad bajo conteo completo, pero el ajuste fraccional revela aportes efectivos más distribuidos y equipos grandes por artículo, en

promedio 6,54 coautores por documento, coherentes con campañas de muestreo extensas, instrumentación avanzada y validaciones cruzadas; asimismo, el ajuste de la curva a la Ley de Lotka indica madurez organizativa y una base amplia de autores ocasionales, 70,6% de autores de una sola publicación, que alimentan la diversidad temática, mientras que el núcleo hiperproductivo articula líneas que conectan analítica, riesgo y control en planta (DEGHANI et al., 2025; KANG et al., 2025; VITALE et al., 2025; VU et al., 2025; WEI et al., 2025).

Las figuras 5 y 6 confirman un sistema editorial eficiente y concentrado, consistente con la Ley de Bradford. Tres cabeceras generalistas ambientales canalizan cerca de un tercio de la producción, lo que facilita la difusión rápida de resultados que combinan monitoreo, evaluación de riesgo y tecnologías de remoción; a su vez, el segundo anillo, con revistas de proceso y de salud ambiental, aporta validación técnica, desempeño a escala piloto y lectura sanitaria, claves para trasladar resultados a operación y regulación; finalmente, la periferia extensa recoge variaciones contextuales, ajustes metodológicos y tecnologías emergentes, incluidas rutas de destrucción y manejo de concentrados, que amplían la

frontera de solución tecnológica (BABAYEV et al., 2022; AO et al., 2024; GUNNARSDÓTTIR et al., 2025; LEE et al., 2025; MARTANO et al., 2025; TIAN et al., 2025).

La Figura 7 y la Figura 8 sitúan el liderazgo institucional y geográfico; China y Estados Unidos forman el binomio que explica volumen, cobertura analítica y tracción regulatoria; en China predominan la vigilancia de ultratrazas, los enfoques de clase y la evaluación y mejora de tecnologías; en cambio, en Estados Unidos se priorizan los estándares, la gestión del riesgo y la transferencia tecnológica a los sistemas de agua; Europa occidental aporta monitoreo ambiental y estudios de exposición, además de la conexión con la Directiva de Agua Potable; por su parte, Canadá y Australia sostienen series de casos históricas asociadas a AFFF y acuíferos, lo que afina criterios de remediación y operación (AKER et al., 2023; BLINE et al., 2024b; MA et al., 2024; ALGHAMDI et al., 2025; DE PAULA NUNES et al., 2025; KANG et al., 2025; KARAKOLTZIDIS et al., 2025; LI et al., 2025).

La Figura 9 muestra el cambio léxico que acompaña ese reordenamiento; el desplazamiento desde PFOS y PFOA hacia etiquetas de clase como PFAS y per and polyfluoroalkyl substances, junto con el ascenso de términos funcionales como risk assessment y drinking water, señala la adopción de marcos grupales y su integración explícita con decisiones de potabilización y de salud pública; a partir de 2021, PFAS supera a PFOS y PFOA en frecuencia, lo que consolida el giro de enfoque; esta migración mejora la coherencia entre medición, exposición y control; reduce la fragmentación por compuesto; y facilita la lectura regulatoria y el diseño de soluciones aplicables en planta (DESILVA; RUTKAUSKAS, 2022; BALOGUN; OBENG-GYASI, 2024; DONG et al., 2025; KOŽIŠEK et al., 2025; WANG et al., 2025).

La Figura 10 refuerza la lógica de ese tránsito con una base disciplinar anclada en ciencias ambientales y química; predomina Environmental Science con 52,8%; le siguen Chemistry con 12,8% y Medicine con 10,5%; se suma un bloque sanitario en expansión y una capa de ingeniería orientada al desempeño y los costos; este triángulo, ambiente y química para detectar y entender, salud para valorar el riesgo e ingeniería para cumplir y operar, explica la aceleración reciente del campo y la convergencia hacia métricas integradas y resultados con relevancia operativa en el abastecimiento de agua (AGARWAL et al., 2025; BELAY et al., 2025; CHOI et al., 2025; SIMONETTI et al., 2025; STROSKI; SAPOZHNIKOVA, 2025; WU et al., 2025).

La Figura 11 detalla la estructura semántica mediante coocurrencia y revela cinco núcleos conectados, química, matrices hídricas, analítica, toxicología y exposición, y tratamiento; el gradiente temporal indica un predominio inicial de términos analíticos que dan paso a etiquetas de control y gestión; adsorption y water pollutant ganan centralidad reciente; drinking water funciona como nodo puente entre química, monitoreo y salud; los enlaces fuertes entre familias químicas y medición, por ejemplo PFAS con fluorocarbon y liquid chromatography con mass spectrometry, sostienen la lectura transversal del dominio; este patrón explica la adopción rápida de enfoques de clase y la integración operativa entre detección, evaluación del riesgo y control (BABAYEV et al., 2022; ABASS et al., 2024; ALSADIK et al., 2025; ALTMEYER MENDES et al., 2025; SIMONETTI et al., 2025).

La Figura 12, con la RPYS, confirma raíces intelectuales recientes; el máximo de 16 216 citas en 2020 y los picos entre 2013 y 2022 se explican por tres fuerzas concurrentes;

métodos analíticos de alta resolución y abordajes no dirigidos que redefinieron límites de detección y priorización de compuestos; síntesis toxicológicas y epidemiológicas que consolidaron marcos de interpretación clínica y de riesgo; e hitos normativos y de política pública, como la NPDWR (National Primary Drinking Water Regulation) de la EPA de 2024 y la recast (2020/2184/UE) de la Directiva de Agua Potable en la Unión Europea, que sirvieron de documentos ancla para miles de artículos y aceleraron la citación; este patrón describe un dominio de obsolescencia corta, guiado por la capacidad analítica y por decisiones regulatorias, con renovación rápida de la evidencia clave que orienta tratamiento y control en sistemas de agua (ADEWUYI; LI, 2024; CHAKRABORTY et al., 2025; DE PAULA NUNES et al., 2025; DONG et al., 2025).

La Figura 13 organiza los temas por centralidad y densidad; el bloque básico con pfas y risk assessment indica que el enfoque de clase ya estructura el campo; el clúster motor biomonitoring y exposure anticipa mayor tracción sobre decisiones clínicas y normativas; en cambio, el clúster aplicado adsorption y water treatment muestra alta densidad pero requiere vincular desempeño en planta con reducción de exposición y cumplimiento de estándares para migrar a zona motora; los temas de nicho en salud infantil conservan cohesión interna aunque con baja centralidad, por lo que conviene integrar mediciones en agua de abastecimiento y métricas clínicas; por último, el frente emergente de oxidative stress exige articular biomonitoring con parámetros regulados para sustentar criterios de mezcla (CRUTE et al., 2022; CHEN et al., 2024; COATES; HARRINGTON, 2024; CONLEY et al., 2024; ABEYSINGHE et al., 2025; LI et al., 2025).

Las Figuras 1 a 13, consideradas en conjunto, describen un dominio joven, productivo y ya consolidado en visibilidad y cooperación; el lenguaje y las estructuras transitan de compuestos individuales a marcos de clase y a decisiones centradas en riesgo y operación; la evidencia apoya cuatro prioridades que orientan la agenda inmediata; la primera es normalizar etiquetas y métricas grupales para reducir dispersión terminológica y afinar mapas semánticos y redes; la segunda es vincular sistemáticamente el desempeño en planta, por ejemplo adsorción, intercambio iónico y membranas, con indicadores de exposición humana y con cumplimiento de estándares, lo que elevaría la centralidad del clúster de tratamiento; la tercera es integrar costos y gestión de residuos del tratamiento, incluido manejo de concentrados y regeneración, con el fin de cerrar la brecha economía-operación visible en la red y en la periferia editorial; la cuarta es ampliar la interfaz con ciencias sociales y comunicación del riesgo para reforzar la adopción y el cumplimiento en sistemas de agua, en coherencia con el desplazamiento léxico y la estructura disciplinar observada (ABASS et al., 2024; AHRENS et al., 2025; GUNNARSDÓTTIR et al., 2025; KARAKOLTZIDIS et al., 2025; LEE et al., 2025; SAN ROMÁN et al., 2025).

5. CONCLUSIONES

El análisis bibliométrico confirma que la investigación sobre PFAS en agua potable ha crecido de forma acelerada, con un pico en 2024 y casi dos tercios de la producción concentrada entre 2021 y 2025. El dominio es joven pero ya consolidado, con predominio de artículos y revisiones, alta visibilidad en revistas de impacto y una base disciplinar que

combina ciencias ambientales, química, toxicología e ingeniería, con vínculos claros con la salud pública.

La producción se estructura en torno a una autoría masiva y colaborativa, con una concentración moderada en un núcleo reducido de investigadores y una fuerte participación internacional. Las revistas clave y el liderazgo institucional de China y Estados Unidos, junto con la participación europea, configuran un sistema editorial y geográfico que facilita la validación cruzada y la traducción del conocimiento en políticas y regulaciones.

Las raíces intelectuales recientes, visibles en la RPYS, muestran que la dinámica del campo depende de avances analíticos, de la síntesis de riesgo y de hitos normativos. El lenguaje migró de compuestos individuales a etiquetas de clase, y los clústeres temáticos evidencian tres ejes centrales: riesgo, biomonitorio y tratamiento. El frente aplicado de adsorción aún requiere una mayor conexión con las métricas de exposición y con el desempeño regulatorio para consolidarse como motor.

El nivel de conocimiento científico sobre PFAS en el agua potable y su regulación es amplio, robusto y en rápida actualización, con una alta capacidad para incidir en la toma de decisiones. Persiste, no obstante, la necesidad de normalizar las métricas de clase, vincular los resultados de planta con indicadores de exposición humana, integrar los costes y la gestión de residuos del tratamiento y reforzar la interfaz con las ciencias sociales y la comunicación del riesgo. Estas brechas marcan la agenda futura y son claves para acelerar el cumplimiento normativo y la protección de la salud poblacional.

5. REFERENCES

- ABASS, K.; ALMUSLEH, Y.; SHANABLEH, A.; SEMERJIAN, L. PFAS in the GCC: Towards environmental sustainability and public health protection. **Emerging Contaminants**, v. 10, n. 4, e100360, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100360>
- ABEYSINGHE, H.; MA, X.; TSIGE, M. PFAS removal via adsorption: A synergistic review on advances of experimental and computational approaches. **Chemosphere**, v. 377, e144323, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144323>
- ACKERMAN GRUNFELD, D.; GILBERT, D.; HOU, J.; JONES, A. M.; LEE, M. J.; KIBBEY, T. C. G.; O'CARROLL, D. M. Underestimated burden of per- and polyfluoroalkyl substances in global surface waters and groundwaters. **Nature Geoscience**, v. 17, n. 4, p. 340-346, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01402-8>
- ADEWUYI, A.; LI, Q. Per- and polyfluoroalkyl substances contamination of drinking water sources in Africa: Pollution sources and possible treatment methods. **Chemosphere**, v. 365, e143368, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143368>
- AGARWAL, V.; KUMAR, M.; DOGRA, K.; MEJIA AVENDAÑO, S. Isomers of perfluorooctanesulfonate exhibit preferential infiltration and contrasting ionic associations between surface water and groundwater. **Journal of Hazardous Materials**, v. 494, e138445, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138445>
- AHRENS, L.; LUNDGREN, S.; MCCLEAF, P.; KÖHLER, S. Removal of perfluoroalkyl substances (PFAS) from different water types by techniques based on anion exchange (AIX), powdered activated carbon (PAC), iron(III) chloride and nanofiltration (NF) membrane – A systematic comparison. **Science of the Total Environment**, v. 970, e179004, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179004>
- AKER, A.; AYOTTE, P.; CARON-BEAUDOIN, E.; DE SILVA, A.; RICARD, S.; GAUDREAU, É.; LEMIRE, M. Plasma concentrations of perfluoroalkyl acids and their determinants in youth and adults from Nunavik, Canada. **Chemosphere**, v. 310, e136797, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136797>
- ALGHAMDI, W.; PARTINGTON, J. M.; LEUNG, I. K. H.; CLARKE, B. O. Premium ultra-trace analytical method for part per quadrillion (ppq) PFAS quantification in drinking water. **Analytica Chimica Acta**, v. 1368, e344333, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2025.344333>
- ALSADIK, A.; AKINTUNDE, O. O.; HABIBI, H. R.; ACHARI, G. PFAS in water environments: recent progress and challenges in monitoring, toxicity, treatment technologies, and post-treatment toxicity. **Environmental Systems Research**, v. 14, n. 1, e18, 2025. <https://doi.org/10.1186/s40068-025-00411-9>
- ALTMAYER MENDES, S.; AGGARWAL, R.; SVANSTRÖM, M.; PETERS, G. Review of water treatment technologies for PFAS from a life cycle perspective, with meta-analysis of financial costs and climate impacts. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 223, e108524, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108524>
- AO, W.; MIAN, M. M.; ZHANG, Q.; ZHOU, Z.; DENG, S. Bamboo-derived low-cost mesoporous biochar for efficient removal of per- and polyfluoroalkyl substances from contaminated water. **ACS ES and T Water**, v. 4, n. 6, p. 2711-2720, 2024. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.4c00211>
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. **Bibliometrix: Comprehensive Science Mapping Analysis**, 2024. <https://cran.r-project.org/web/packages/bibliometrix/index.html>. Acceso em: 8 jun. 2024.
- BABAYEV, M.; CAPOZZI, S. L.; MILLER, P.; MCLAUGHLIN, K. R.; MEDINA, S. S.; BYRNE, S.; ZHENG, G.; SALAMOVA, A. PFAS in drinking water and serum of the people of a southeast Alaska community: A pilot study. **Environmental Pollution**, v. 305, e119246, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119246>
- BALOGUN, M.; OBENG-GYASI, E. Association of combined PFOA, PFOS, Metals and allostatic load on hepatic disease risk. **Journal of Xenobiotics**, v. 14, n. 2, p. 516-536, 2024. <https://doi.org/10.3390/jox14020031>
- BELAY, M. H.; ROBOTTI, E.; GHIGNONE, A.; FABBRIS, A.; BRANDI, J.; CECCONI, D.; MASINI, M. A.; DONDERO, F.; MARENGO, E. Sensitive and accurate determination of 32 PFAS in human serum using online SPE-UHPLC-HRMS. **Journal of Hazardous Materials**, v. 485, e136780, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136780>
- BELLIDO-VALDIVIEZO, O.; CARDOZA-SERNAQUÉ, M. A.; CARDOZA-SERNAQUÉ, L. S.; GAMARRA-MENDOZA, S.; ESTRADA-ESPINOZA, J. A.; TORRES-SOLANO, C. G.; BOLAÑO GARCÍA, M.; ZAVALA PALACIOS, A. Digital Citizenship: A bibliographic Review of the Publications in Scopus from

2017 to 2022. In: LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology, 21. **Proceedings...** Buenos Aires: hybrid event, p. 1-10, 2023. Available online: <https://laccei.org/LACCEI2023-BuenosAires/meta/FP975.html>

- BLINE, A. P.; DEWITT, J. C.; KWIATKOWSKI, C. F.; PELCH, K. E.; READE, A.; VARSHAVSKY, J. R. Public health risks of PFAS-related immunotoxicity are real. **Current Environmental Health Reports**, v. 11, n. 2, p. 118-127, 2024a. <https://doi.org/10.1007/s40572-024-00441-y>
- BLINE, A. P.; ELLIS, L. B.; PELCH, K. E.; LAM, J.; SEN, S.; ZLATNIK, M.; VARSHAVSKY, J. The effect of per and polyfluoroalkyl substance (PFAS) exposure on gestational diabetes mellitus and its subclinical risk factors: A systematic review and meta-analysis protocol. **Environment International**, v. 188, e108711, 2024b. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108711>
- CHAKRABORTY, S.; COE, S. T.; ANAND, S.; FAHEEM, M.; WANG, X.; BHANDARI, R. K. PFOS caused fertility defects and disrupted spermatogenic gene networks in medaka with a transgenerational history of ancestral BPA exposure. **Environmental Research**, v. 282, e122056, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.122056>
- CHEN, Y.-J.; YANG, J.-S.; LIN, A. Y.-C. Comprehensive nontargeted analysis of fluorosurfactant byproducts and reaction products in wastewater from semiconductor manufacturing. **Sustainable Environment Research**, v. 34, n. 1, e14, 2024. <https://doi.org/10.1186/s42834-024-00221-1>
- CHOI, J. W.; PARENTI, M.; SLUPSKY, C. M.; TANCREDI, D. J.; SCHMIDT, R. J.; SHIN, H.-M. Maternal serum and placental metabolomes in association with prenatal exposure to per- and polyfluoroalkyl substances and their relevance to child neurodevelopment in an ASD-enriched cohort. **Environmental Pollution**, v. 383, e126811, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126811>
- COATES, K. A.; HARRINGTON, P. D. B. Contamination levels of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in recent North American precipitation events. A review. **Water Research**, v. 266, e122390, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122390>
- CONLEY, J. M.; LAMBRIGHT, C. S.; EVANS, N.; BANGMA, J.; FORD, J.; HILL, D.; MEDLOCK-KAKALEY, E.; EARL GRAY, L. Maternal and neonatal effects of maternal oral exposure to perfluoro-2-methoxyacetic Acid (PFMOAA) during Pregnancy and Early Lactation in the Sprague-Dawley Rat. **Environmental Science and Technology**, v. 58, n. 2, p. 1064-1075, 2024. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c08559>
- CRAWFORD, L.; HALPERIN, S. A.; DZIERLENGA, M. W.; SKIDMORE, B.; LINAKIS, M. W.; NAKAGAWA, S.; LONGNECKER, M. P. Systematic review and meta-analysis of epidemiologic data on vaccine response in relation to exposure to five principal perfluoroalkyl substances. **Environment International**, v. 172, e107734, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107734>
- CRUTE, C. E.; HALL, S. M.; LANDON, C. D.; GARNER, A.; EVERITT, J. I.; ZHANG, S.; BLAKE, B.; OLOFSSON, D.; CHEN, H.; MURPHY, S. K. Evaluating maternal exposure to an environmental per and polyfluoroalkyl substances (PFAS) mixture during pregnancy: Adverse maternal and fetoplacental effects in a New Zealand White (NZW) rabbit model. **Science of the Total Environment**, v. 838, e156499, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156499>
- DE PAULA NUNES, E.; PESTANA, B. A. D.; PEREIRA, B. B. Human biomonitoring and environmental health: a critical review of global exposure patterns, methodological challenges and research gaps. **Journal of Toxicology and Environmental Health - Part B: Critical Reviews**, v. 29, n. 2, p. 109-127, 2025. <https://doi.org/10.1080/10937404.2025.2529845>
- DEGHANI, M. H.; AGHAEI, M.; BASHARDOUST, P.; REZVANI GHALHARI, M.; NAYERI, D.; MALEKPOOR, M.; SHEIKHI, S.; SHI, Z. An insight into the environmental and human health impacts of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): exploring exposure pathways and their implications. **Environmental Sciences Europe**, v. 37, n. 1, e81, 2025. <https://doi.org/10.1186/s12302-025-01122-9>
- DESILVA, V.; RUTKAUSKAS, J. Potable Reuse and PFAS. **Journal - American Water Works Association**, v. 114, n. 10, p. 52-62, 2022. <https://doi.org/10.1002/awwa.2017>
- DONG, Z.; JI, G.; WANG, F.; WANG, F. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): Current prevalence, regulatory frameworks, and safe drinking water guidelines in the United States. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 13, n. 5, e118145, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118145>
- EFSA_European Food Safety Authority. Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food. **EFSA Journal**, v. 18, n. 9, e6223, 2020. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6223>
- EPA_United States Environmental Protection Agency. **Benefits and Costs of Reducing PFAS in Drinking Water**. 2024a. Available online: https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-04/pfas-npdwr_fact-sheet_cost-and-benefits_4.8.24.pdf. Accessed at: 27 Ago. 2025.
- EPA_United States Environmental Protection Agency. **Final PFAS National Primary Drinking Water Regulation**. 2024b. Available online: <https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-04/drinking-water-utilities-and-professionals-technical-overview-of-pfas-npdwr.pdf>. Accessed at: 27 Ago. 2025.
- EPA_United States Environmental Protection Agency. **CompTox Chemicals Dashboard**. 2022. Available online: https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-06/chemicals_dashboard_march2022.pdf. Accessed at: 27 Ago. 2025.
- EUROPEAN COMMISSION. **Drinking water**. 2025. Available online: https://environment.ec.europa.eu/topics/water/drinking-water_en. Accessed at: 27 Ago. 2025.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. **PFAS pollution in European waters**. 2024. Available online: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/pfas-pollution-in-european-waters>. Accessed at: 27 Ago. 2025.

- GARCÍA, L. K. O.; ALAYO, W. M. H.; TABOADA, S. L. V.; BENITES, N. I. P. Bibliometric analysis on bridging the digital divide among university students: trends and prospects. **Revista Conhecimento Online**, v. 1, p. 193–220, 2025. <https://doi.org/10.25112/rco.v1.3963>
- GUIDANCE ON PFAS EXPOSURE, TESTING, AND CLINICAL FOLLOW-UP. Washington, D.C.: National Academies Press, 2022. Available online: <https://www.nap.edu/catalog/26156>. Accessed at: 27 Ago. 2025.
- GUNNARSDÓTTIR, M. J.; ANDRADÓTTIR, H. Ó.; OLAFSDÓTTIR, K.; HLODVERSDOTTIR, I. I.; KALLENBORN, R.; RÆDER, E. M.; LYCHE, J. L.; BECANOVA, J.; LOHMANN, R. PFAS in drinking water, wastewater and surface water in Reykjavik, Iceland. **Environmental Science: Advances**, v. 4, n. 9, p. 1427–1443, 2025. <https://doi.org/10.1039/d5va00054h>
- HUA, L.; DONALD, W. A. Assessment of per- and polyfluoroalkyl substances in Sydney drinking water. **Chemosphere**, v. 385, e144611, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144611>
- KANG, J.-K.; KIM, M.-G.; OH, J.-E. Occurrence and removal of 42 legacy and emerging per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in drinking water treatment plants in South Korea. **Water Research X**, v. 29, e100329, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2025.100329>
- KARAKOLTZIDIS, A.; KARAKITSIOS, S. P.; GABRIEL, C.; SARIGIANNIS, D. A. Integrated PBPK modelling for PFOA exposure and risk assessment. **Environmental Research**, v. 282, e121947, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121947>
- KOŽÍŠEK, F.; DVORAKOVA, D.; KOTAL, F.; JELIGOVÁ, H.; MAYEROVA, L.; SVOBODOVÁ, V.; JURIKOVA, M.; GOMERSALL, V.; PULKRABOVÁ, J. Assessing PFAS in drinking water: Insights from the Czech Republic's risk-based monitoring approach. **Chemosphere**, v. 370, e143969, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143969>
- LEE, W. K.; WAN, H. T.; CHENG, Z.; CHAN, W. Y.; LAM, T. K. Y.; LAI, K. P.; WANG, J.; CAI, Z.; WONG, C. K. C. Impact of PFOS exposure on murine fetal hematopoietic stem cells, associated with intrauterine metabolic perturbation. **Environmental Science and Technology**, v. 59, n. 11, p. 5496–5509, 2025. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5c02623>
- LI, R.; ZHANG, S.; XIE, Z.; GAO, C.; ZHAO, M.; XU, Y.; MIAO, M.; YUAN, W.; TAO, L.; LIANG, H. Regulatory successes and lingering threats: A decade of prenatal PFAS exposure trends and risk transitions in an urban city in China. **Environmental Pollution**, v. 382, e126760, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126760>
- LIN, Z.; DOUDRICK, K.; HERCKES, P.; CHESTER, M.; WESTERHOFF, P.; BOYER, T. H. Life cycle assessment of the thermal oxidation and pyrolysis of granular activated carbon loaded with perfluorooctane sulfonic acid (PFOS). **Journal of Cleaner Production**, v. 501, e145325, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145325>
- LIU, Y.; LEI, H.; LU, Y.; WANG, P.; WU, T. Multiple impacts of human activities on environmental fate of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in the Xiaoqing River of China. **Environmental Pollution**, v. 382, e126738, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126738>
- LUNA-MORALES, M. E.; PÉREZ-ANGÓN, M. Á.; LUNA-MORALES, E. Strengthen of a Scientific Field in Latin America: Evolutionary Computation. **Journal of Scientometric Research**, v. 12, n. 2, p. 264–274, 2023. <https://doi.org/10.5530/jscires.12.2.025>
- LYU, J.; CHEN, Y.; ZHANG, L.; WEN, X.; TUDI, M. Evaluation of human exposure risks to perfluoroalkyl acid residues via municipal drinking water and source analysis in China. **Environmental Technology and Innovation**, v. 40, e104367, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104367>
- MA, K.; LU, Y.; ZHANG, Y.; ZHANG, Y. Trend of PFAS concentrations and prediction of potential risks in Taihu Lake of China by AQUATOX. **Environmental Research**, v. 251, e118707, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118707>
- MARTANO, P.; MAHDI, S.; ZHOU, T.; BARAZANDEGAN, Y.; IHA, R.; DO, H.; BURKEN, J.; NAM, P.; YANG, Q.; MU, R. Visceral, neural, and immunotoxicity of per- and polyfluoroalkyl substances: a mini review. **Toxics**, v. 13, n. 8, e658, 2025. <https://doi.org/10.3390/toxics13080658>
- OECD_Organization for Economic Co-Operation and Development. **OECD Global Forum on the Environment dedicated to Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS)**. 2024. 8p. Available online: <https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/topics/policy-sub-issues/risk-management-risk-reduction-and-sustainable-chemistry2/events/pfas-gfe-2024/global-forum-on-environment-work-on-pfass.pdf>. Accessed at: 27 Ago. 2025.
- ORENIBI, E.; ILLÉS, Á.; SANDIL, S.; ENDRÉDI, A.; SZEKERES, J.; DOBOSY, P.; ZÁRAY, G. Temporal and spatial distribution of inorganic fluoride, total adsorbable organofluorine, PFOA and PFOS concentrations in the Hungarian section of the Danube River. **Journal of Hazardous Materials**, v. 485, e136820, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136820>
- OSEMWEGIE, O. O.; OLANIRAN, A. F.; FOLORUNSHO, J. O.; NWONUMA, C. O.; OJO, O. A.; ADETUNDE, L. A.; ALEJOLOWO, O. O.; OLUBA, O. M.; DARAMOLA, F. Y. Preliminary bibliometrics of plant-derived health foods over the last decade in the Scopus database. **African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development**, v. 23, n. 8, p. 24363–24382, 2023. <https://doi.org/10.18697/ajfand.123.22765>
- PRAHANI, B. K.; RIZKI, I. A.; SUPRAPTO, N.; IRWANTO, I.; KURTULUŞ, M. A. Mapping research on scientific creativity: A bibliometric review of the literature in the last 20 years. **Thinking Skills and Creativity**, v. 52, e101495, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2024.101495>
- RAPOO, S. M.; THAOGE-ZWANE, M. L.; OKONKWO, J. O. Distribution pattern, source apportionment, and health risk assessment of per- and polyfluoroalkyl substances in drinking water treatment plants in South Africa. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 44, n. 8, p. 2133–2142, 2025. <https://doi.org/10.1093/etojnl/vgaf136>

- SAN ROMÁN, A.; ABILLEIRA, E.; GONZÁLEZ-GAYA, B.; AYALA-CABRERA, J. F.; BARROETA, Z.; ETXEBARRIA LOIZATE, N.; IRIZAR, A. Tracking early-life PFAS exposure in children at ages 4, 8, and 14 years: A longitudinal study from the INMA Spanish birth cohort. **Environmental Research**, v. 283, e122198, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.122198>
- SCHYMANSKI, E. L.; ZHANG, J.; THIESSEN, P. A.; CHIRSIR, P.; KONDIC, T.; BOLTON, E. E. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in PubChem: 7 million and growing. **Environmental Science & Technology**, v. 57, n. 44, p. 16918-16928, 2023. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c04855>
- SIGVALDSEN, A.; HØJSAGER, F. D.; PAARUP, H. M.; BECK, I. H.; TIMMERMANN, C. A. G.; BOYE, H.; NIELSEN, F.; HALLDÓRSSON, T. I.; NIELSEN, C.; MÖLLER, S.; BARINGTON, T.; GRANDJEAN, P.; JENSEN, T. K. Early-life exposure to perfluoroalkyl substances and serum antibody concentrations towards common childhood vaccines in 18-month-old children in the Odense Child Cohort. **Environmental Research**, v. 242, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117814>
- SIMONETTI, F.; BRILLARELLI, S.; AGOSTINI, M.; MANCINI, M.; GIOIA, V.; MURTAS, S.; MIGLIORATI, V. A review on the latest frontiers in water quality in the era of emerging contaminants: A focus on perfluoroalkyl compounds. **Environmental Pollution**, v. 381, e126402, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126402>
- STROSKI, K. M.; SAPOZHNIKOVA, Y. Method development and validation for analysis of 74 per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in food of animal origin using QuEChERSER method and LC-MS/MS. **Analytica Chimica Acta**, v. 1364, e344216, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2025.344216>
- SULPHEY, M. M.; ALKAHTANI, N. S.; SENAN, N. A. M.; ADOW, A. H. E. A bibliometric study on organizational citizenship behavior for the environment. **Global Journal of Environmental Science and Management**, v. 10, n. 2, p. 891-906, 2024. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2024.02.29>
- TIAN, Y.; TANG, Y.; WANG, H.; HUANG, X.; LI, J.; CHEN, X.; ZHOU, N.; LI, W.; LI, A. Emerging contaminants in the lower Yangtze River basin: spatiotemporal distribution, ecological risks in surface water, and fate in wastewater treatment plants. **Environmental Pollution**, v. 384, e126984, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126984>
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Tap water study detects PFAS 'forever chemicals' across the US**. 2023. Available online: <https://www.usgs.gov/news/national-news-release/tap-water-study-detects-pfas-forever-chemicals-across-us>
- VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. **VOSviewer - Visualizing scientific landscapes**. Centre for Science and Technology Studies (CWTS), 2024. Available online: <https://www.vosviewer.com>. Accessed at: 8 Jun. 2024.
- VAN LAREBEKE, N.; COX, B.; REMY, S.; VOORPOELS, S.; DEN HOND, E.; COLLES, A.; LEERMAKERS, M.; SCHOETERS, G.; VERHEYEN, V. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS), thyroid hormones, sexual hormones and pubertal development in adolescents residing in the neighborhood of a 3M factory. **Environmental Health: A Global Access Science Source**, v. 24, n. 1, e34, 2025. <https://doi.org/10.1186/s12940-025-01188-1>
- VITALE, D. S.; REEVES, D. M.; COFFIN, E. S.; CASSIDY, D. P. Naturally occurring surface water foams as a PFAS sampling matrix. **Journal of Hazardous Materials**, v. 496, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.139456>
- VU, T. K.; FAUVELLE, V.; NGUYEN, T. T.; BUI, V. H.; MALLERET, L. Occurrence and levels of industrial persistent organic pollutants under the Stockholm convention: A review of water resources in Southeast Asian countries. **Journal of Hazardous Materials Advances**, v. 20, e100872, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jhazadv.2025.100872>
- WANG, J.; SHI, B.; XIE, Y.; ZHOU, Y.; SU, C.; ZHANG, J.; DIAO, J.; ZHENG, Z.; MENG, J.; KHIM, J. S. An optimised hydrodynamic model coupled with geographic analysis accurately predicts the distribution of PFAS in the Bohai and Yellow Seas, East Asia. **Journal of Hydrology**, v. 661, e133682, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133682>
- WEI, C.-C.; HOW, C. M.; HUANG, C.-W.; HUANG, W.-Y. Long-term exposure to environmentally relevant concentrations of hexafluoropropylene oxide dimer acid (GenX) induces trans-generational motor deficits through H3K27 demethylase jmjd-1.2 /PHF8 in *Caenorhabditis elegans*. **Environmental Pollution**, v. 384, e126981, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126981>
- WU, H.; HUANG, X.; DUAN, X.; LAO, A.; ZHENG, Z. Meta-analysis evaluates toxicity of PFAS to microalgae: Mechanisms and ecological risks. **Journal of Hazardous Materials**, v. 496, e139328, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.139328>
- YANG, F.; LI, Z. Research hotspots and trend analysis of per- and polyfluoroalkyl substances in the environmental field based on bibliometric analysis. **Emerging Contaminants**, v. 11, n. 2, e100464, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100464>
- YANG, C.; YANG, J.; LV, Y.; SHI, Y.; CUI, D.; YIN, M.; LI, L.; ZHANG, J.; XU, C. Suspect and non-target screening for emerging contaminants of potential concern and risk assessment in wastewater treatment plants: A case study of a typical industrial city in China. **Science of the Total Environment**, v. 989, e179857, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179857>
- ZHAI, C.; ZHANG, K.; LIU, Y.; XIA, S. Enhancing selectivity of nanofiltration membranes for mineral ions and per- and polyfluoroalkyl substances via dual-component-assisted interfacial polymerization. **Water Research**, v. 287, e124315, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.124315>

Contribuições dos autores: W.M.H.A.: conceptualization, methodology, data curation, formal analysis, investigation, software, visualization, project management, original manuscript writing, revision and editing.

Data availability: The data for this research can be obtained by email upon request to the author.

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.



Copyright: © 2026 by the authors. This article is an Open-Access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons **Attribution-NonCommercial (CC BY-NC)** license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).