



e-ISSN 2588-0721
DOI: [10.33936/riemat.v11i1.8312](https://doi.org/10.33936/riemat.v11i1.8312)

RIEMAT

Página web de la revista: <https://revistas.utm.edu.ec/index.php/Riemat>



Artículo de Revisión

Fouling por sales y sedimentos en intercambiadores de calor: análisis bibliométrico 2010–2025

Salt and sediment fouling in heat exchangers: a bibliometric analysis 2010–2025

Gianfranco Di Mattia-Castro ^{a*}, Víctor Moreno-Riquero ^b, José Navia-Zamora ^c, Marco Osorio-Trávez ^d

^a Carrera de Ingeniería Industrial, Facultad de Ciencias de la Industria y Producción, Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Quevedo, Ecuador.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1048-9554>

^b Carrera de Ingeniería Industrial, Facultad de Ciencias de la Industria y Producción, Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Quevedo, Ecuador.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1516-5823>

^c Carrera de Ingeniería Industrial, Facultad de Ciencias de la Industria y Producción, Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Quevedo, Ecuador.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2442-0513>

^d Carrera de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Quevedo, Ecuador.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8695-959X>

* Autor para correspondencia.
gianfranco@uteq.edu.ec

Recibido: 25/02/2026
Aceptado: 24/03/2026
Publicado: 01/06/2026

Citacion sugerida: Mattia-Castro, G., Moreno-Riquero, V., Navia-Zamora, J. & Osorio-Trávez, M. (2026). Fouling por sales y sedimentos en intercambiadores de calor: análisis bibliométrico 2010–2025. *Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología. RIEMAT*, 11(1), 55-69. <https://doi.org/10.33936/riemat.v11i1.8312>

Resumen

El ensuciamiento por deposición de sales y sedimentos en intercambiadores de calor representa uno de los principales factores de degradación del desempeño térmico en la industria de procesos, con impactos directos en la eficiencia energética y los costos operativos. Este estudio tuvo como objetivo analizar, desde una perspectiva bibliométrica, la evolución, estructura y tendencias de la producción científica indexada en Scopus entre 2010 y 2025 sobre fouling por cristalización y sedimentación. Se adoptó un diseño retrospectivo con enfoque mixto, combinando indicadores de productividad, impacto y colaboración mediante Bibliometrix/Biblioshiny, junto con mapeo científico en VOSviewer para identificar redes y clústeres temáticos. El corpus final comprendió 682 artículos, evidenciando un crecimiento sostenido y una alta tasa de colaboración (97,2 % de coautoría). China, Estados Unidos y Alemania lideran la producción, mientras que un núcleo reducido de revistas concentra cerca de un tercio de los trabajos. El análisis de palabras clave reveló una transición desde enfoques experimentales centrados en resistencia térmica y cristalización hacia un paradigma dual que integra simulación computacional y, de forma emergente, aprendizaje automático. Se identifican brechas en la articulación entre ingeniería térmica y ciencia de datos, así como en la formalización del vínculo con sostenibilidad energética. Los resultados ofrecen una cartografía integral que orienta futuras líneas de investigación y decisiones estratégicas en ingeniería térmica aplicada.

Palabras clave: fouling, intercambiadores de calor, cristalización, análisis bibliométrico, aprendizaje automático

Abstract

Fouling caused by salt deposition and sediment accumulation in heat exchangers remains one of the most critical factors limiting thermal performance in process industries, directly affecting energy efficiency and operational costs. This study aimed to examine, through a bibliometric approach, the evolution, structure, and emerging trends of scientific production indexed in Scopus between 2010 and 2025 on crystallization and particulate fouling. A retrospective mixed-method design was adopted, integrating productivity, impact, and collaboration indicators using Bibliometrix/Biblioshiny, together with science mapping in VOSviewer to identify thematic clusters and collaboration networks. The final dataset comprised 682 journal articles, revealing sustained growth and a strong collaborative pattern (97.2% multi-authored publications). China, the United States, and Germany lead global output, while a small core of journals concentrates nearly one-third of the publications. Keyword co-occurrence analysis indicates a clear transition from predominantly experimental studies focused on thermal resistance and crystallization mechanisms toward a dual paradigm that combines computational fluid dynamics and, more recently, machine learning-based predictive modeling. Gaps persist in the integration between thermal engineering and data-driven approaches, as well as in the explicit linkage to sustainable energy agendas. The findings provide a comprehensive intellectual mapping that supports strategic research planning and technological development in applied thermal engineering.

Keywords: fouling, heat exchangers, crystallization, bibliometric analysis, machine learning



1. Introducción

Los intercambiadores de calor constituyen el núcleo operativo de prácticamente toda industria de proceso, desde la generación de energía y la refinación de hidrocarburos hasta la desalinización y la agroindustria. Su eficiencia termodinámica determina, en gran medida, el consumo energético y la huella de carbono del sector industrial, lo que los vincula de manera directa con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 7 (ODS 7), que promueve el acceso a una energía asequible, fiable y no contaminante (United Nations, 2015). Sin embargo, el rendimiento termohidráulico de estos sistemas se ve severamente limitado por el fouling o ensuciamiento: la acumulación indeseada de material sobre las superficies de transferencia de calor, que genera resistencia térmica adicional, reduce el coeficiente global de transferencia y eleva la caída de presión (Awais & Bhuiyan, 2019; Bott, 1995; Epstein, 1983).

Las pérdidas asociadas en naciones industrializadas se estiman en torno al 0.25 % del producto interno bruto, cifra equivalente a más de 4 400 millones de dólares anuales solo en Estados Unidos (Garrett-Price et al., 1985; Jackowski et al., 2021; Müller-Steinhagen et al., 2011). En contextos regionales, la variabilidad fisicoquímica de los fluidos de proceso exacerba la precipitación de sales y la deposición de sedimentos, reduciendo la vida útil de los activos térmicos (Pan et al., 2016). Desde una perspectiva mecanicista, entre las cinco categorías tradicionales de fouling (Bott, 1995; Epstein, 1983), la cristalización de sales minerales (CaCO_3 , CaSO_4) y la sedimentación particulada representan los fenómenos más prevalentes en aplicaciones con fluidos acuosos (Herz et al., 2021; Shaikh et al., 2023).

La cristalización de estas sales de solubilidad inversa (CaCO_3 , CaSO_4) se intensifica con la temperatura de superficie, convirtiendo las zonas de mayor transferencia térmica en sitios preferentes de nucleación (Helalzadeh et al., 2005; Pääkkönen et al., 2012). Los depósitos, además, alteran la hidrodinámica del sistema, incrementando la caída de presión y modificando el esfuerzo de corte (Berce et al., 2021; Han et al., 2020), al punto de que la literatura contemporánea cuestiona la práctica tradicional de asignar factores estáticos de ensuciamiento, pues induce sobredimensionamientos que paradójicamente aceleran la deposición (Abuwatfa et al., 2023).

El estado del arte ha experimentado un crecimiento sustancial durante la última década. Herz et al. (2021) y Shaikh et al. (2023) ofrecieron revisiones detalladas del fouling por cristalización, confirmando que el problema permanece sin solución satisfactoria a escala industrial (Kapustenko et al., 2023) demostraron que las tasas de fouling en intercambiadores de placas pueden ser entre 5 y 20 veces menores que en los de carcasa y tubos, y (Ben-Mansour et al., 2023) examinaron la complejidad adicional del fouling en sistemas con cambio de fase. En el ámbito de las superficies funcionales, (Goswami et al., 2023) concluyeron que la energía superficial es un parámetro crítico para la reducción del fouling, mientras que (Yan et al., 2023) señalaron que los materiales superhidrofóbicos pueden prevenir el ensuciamiento desde su origen.

Se ha confirmado también la eficacia de recubrimientos compuestos PDA/PTFE (Wang et al., 2023) y de geometrías bioinspiradas que perturban la capa límite térmica (Kapustenko et al., 2023; Marzouk et al., 2023). La irrupción de la Industria 4.0 ha actuado como catalizador en la implementación de la inteligencia artificial en el monitoreo del fouling. Villa y Brusamarello (2025) encontraron las SVM y k-NN como técnicas más utilizadas, y Ikram et al. (2024) obtuvieron coeficientes de correlación de 0.99 en modelos de FNN-MLP que predicen la resistencia de fouling. Últimamente, la tendencia se ha centrado en el uso de arquitecturas de aprendizaje profundo (LSTM, y regresiones de procesos gaussianos) que incorporan datos de sensores IoT (Jin et al., 2021; Nizam et al., 2022), lo cual permite sortear las limitaciones de los modelos empíricos tradicionales (Bogojeski et al., 2021; Zou et al., 2023). Si bien el modelado por CFD y la reciente inclusión de gemelos digitales han comenzado a utilizarse de forma complementaria, la vinculación con datos operativos en tiempo real sigue siendo un desafío (Ikram et al., 2024; Melesse et al., 2020; Sundar et al., 2020).

Los vacíos existentes justifican un estudio sistemático involucrando la bibliometría a pesar de la riqueza de la materia. Aunque hay revisiones narrativas que abordan distintos elementos (cristalización, corrosión, coatings, algoritmos predictivos), no hay un análisis bibliométrico que contenga la evolución temporal, distribución geográfica, redes de colaboración y la estructura de la investigación intelectual sobre el fouling de sales y sedimentos 2010-2025 (Benzarti et al., 2023; Peña et al., 2022). La convergencia en los últimos años de subcampos tan variados como la ciencia de materiales, la nanotecnología, la inteligencia artificial, y los gemelos digitales ha fragmentado el ecosistema, y sin metodologías cuantitativas se hace cada vez más

complicado el análisis de estas tendencias.

Los análisis bibliométricos previos se centran en los intercambiadores desde una perspectiva general o en el biofouling marino, subrepresentado la convergencia entre degradación térmica por incrustaciones, materiales avanzados y digitalización del mantenimiento. La relación entre fouling y las agendas de sostenibilidad (ODS 7) tampoco ha sido cartografiada. La relevancia del presente estudio radica en que, a nivel teórico, permite documentar la transición epistemológica desde metodologías de limpieza programada hacia estrategias proactivas basadas en ciencia de datos y superficies funcionalizadas; a nivel metodológico, técnicas como la coocurrencia de palabras clave y el acoplamiento bibliográfico revelan patrones ocultos en grandes volúmenes de datos (Kirby, 2023; van Eck & Waltman, 2010); y a nivel aplicado, los hallazgos orientarán a investigadores e ingenieros sobre las brechas de conocimiento prioritarias, subrayando cómo la mejora a microescala de las superficies de transferencia térmica tiene impacto macroscópico en la reducción de emisiones industriales.

El estudio se fundamenta en la clasificación fenomenológica del ensuciamiento de (Epstein, 1983), concentrándose en el fouling por cristalización y por sedimentación. La severidad se cuantifica mediante la resistencia térmica por ensuciamiento (R_f , en $(m^2 \cdot K)/W$), que penaliza el coeficiente global de transferencia de calor en condición limpia (U_c), derivando en un coeficiente degradado (U_f) según $1/U_f = 1/U_c + R_f$ (Kern & Seaton, 1959). Este parámetro es dinámico: su magnitud varía con el envejecimiento, la composición química y las condiciones termodinámicas del depósito (Ishiyama et al., 2010; Müller-Steinhagen et al., 2011; Shaikh et al., 2023),

Como enfoque metodológico, el análisis bibliométrico se ha consolidado como herramienta rigurosa para la evaluación cuantitativa de la producción científica (Donthu et al., 2021; Moral-Muñoz et al., 2020; Zupic & Čater, 2015), usando para este caso VOSviewer (van Eck & Waltman, 2010) y la base de datos Scopus, elegida por su cobertura multidisciplinaria en el área de la ingeniería (Martins et al., 2024). El objetivo general consiste en analizar bibliométricamente la evolución, la estructura y las tendencias de la producción científica indexada en Scopus sobre fouling por deposición de sales y sedimentos en intercambiadores de calor, en el periodo 2010-2025, tratando de identificar frentes emergentes, redes de cooperación y vacíos de conocimiento.

Las preguntas de investigación son: (1) ¿Cuál ha sido la evolución temporal y distribución geográfica de la producción científica? (2) ¿Cuáles son los autores, instituciones, países y revistas más productivos e influyentes? (3) ¿Qué redes de colaboración existen entre autores, instituciones y países? (4) ¿Cuáles son los clústeres temáticos dominantes y cómo reflejan la convergencia hacia la Industria 4.0 y los materiales avanzados? (5) ¿De qué manera se vincula esta producción con el ODS 7? Se formula la hipótesis de que la producción ha experimentado un crecimiento acelerado, con concentración en Asia y Europa, y una evolución temática que transita desde enfoques experimentales clásicos hacia un paradigma dual dominado por la ingeniería de superficies nanoestructuradas y el modelado predictivo mediante aprendizaje automático.

El artículo se organiza como sigue: la sección de metodología detalla el protocolo de búsqueda y herramientas empleadas; los resultados presentan los hallazgos en producción, distribución geográfica, redes y análisis temático; la discusión interpreta críticamente los resultados; y las conclusiones sintetizan las contribuciones y formulan recomendaciones para futuras líneas de investigación.

2. Materiales y Métodos

2.1 Diseño del estudio

Un diseño bibliométrico retrospectivo con enfoque mixto: cuantitativos de productividad, impacto y colaboración, más mapeo científico a través de análisis de redes (Donthu et al., 2021; Zupic & Čater, 2015). El corpus final de 682 artículos resulta comparable con el obtenido por (Peña et al., 2022) en un estudio bibliométrico afín sobre recuperación de calor ($n = 627$), y supera el umbral de 500 registros recomendado por Donthu et al. (2021) para garantizar la estabilidad estadística de los indicadores de coocurrencia y redes de colaboración. La cobertura temática fue validada por saturación de palabras clave: las diez terms más frecuentes representan el 78,3 % de las ocurrencias totales del tesoro, indicando que el corpus captura adecuadamente el núcleo disciplinar. Scopus fue la única fuente utilizada por su cobertura multidisciplinaria

en ingeniería y energía y por la estandarización de metadatos (Martins et al., 2024; Moral-Muñoz et al., 2020). El estudio se estructuró en tres fases: (a) recuperación y depuración del corpus; (b) análisis bibliométrico descriptivo en R/Biblioshiny (Aria & Cuccurullo, 2017); y (c) mapeo y visualización de redes en VOSviewer (Van Eck y Waltman, 2010).

2.2 Estrategia de búsqueda

Se construyó una ecuación en Scopus articulando tres bloques mediante AND: (a) fenómeno de ensuciamiento (fouling, scaling, deposit, sedimentation); (b) sistema térmico (heat exchanger*); y (c) naturaleza del depósito o efecto térmico (CaCO₃, CaSO₄, crystalliz*, thermal resistance, heat transfer*), aplicados sobre TITLE-ABS-KEY con sinónimos, variantes ortográficas y truncamientos derivados del marco conceptual de la Introducción. La ecuación final con filtros es:

TITLE-ABS-KEY (("fouling" OR "scaling" OR "scale deposition" OR "deposit*" OR "encrustation" OR "incrustation" OR "sedimentation") AND ("heat exchanger*") AND ("salt*" OR "mineral*" OR "crystalliz*" OR "crystalli*" OR "CaCO3" OR "calcium carbonate" OR "CaSO4" OR "calcium sulfate" OR "particulate" OR "sediment*" OR "thermal resistance" OR "heat transfer")) AND PUBYEAR > 2009 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENER") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "CENG")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final"))

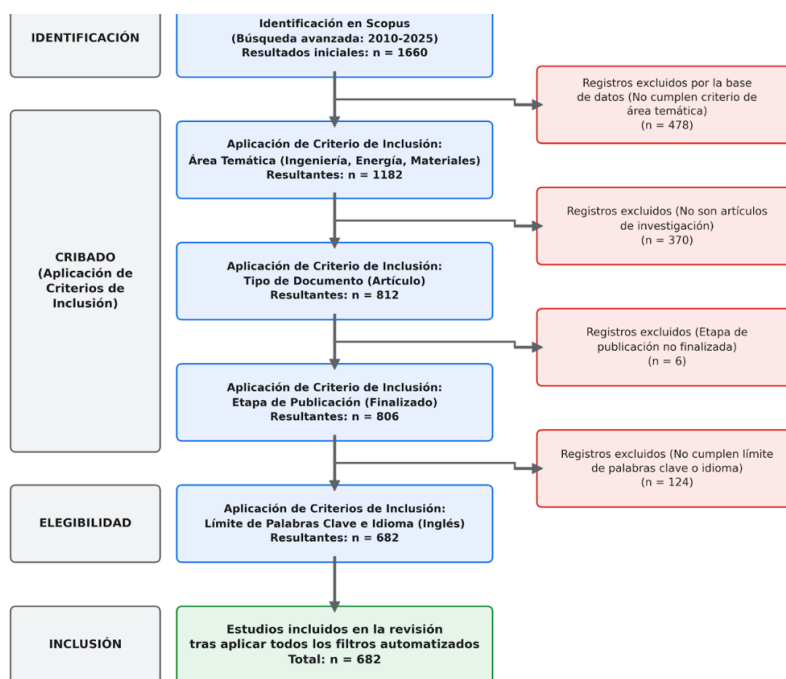
Los filtros delimitan: ventana temporal 2010 - 2025; áreas Engineering, Energy, Environmental Science y Chemical Engineering; tipo documental exclusivamente artículos (DOCTYPE "ar"); y etapa de publicación final. La búsqueda se ejecutó el 19 de febrero de 2026 y se exportó en formato CSV con todos los campos disponibles (autores, afiliaciones, resumen, palabras clave, DOI, citas, referencias, EID, entre otros).

2.3 Criterios de elegibilidad y selección del corpus

De acuerdo con la declaración PRISMA adaptada para estudios bibliométricos (Page et al., 2021), se determinaron los siguientes criterios a priori. Inclusión: artículos originales indexados en Scopus con título, resumen o palabras clave que aborden la contaminación por sales, sedimentos o cristalización en intercambiadores de calor; período 2010–2025; campos ENGI, ENER, ENVI o CENG; artículo final; sin restricción de idioma.

Figura 1

Diagrama de flujo PRISMA adaptado con contadores de cada fase.



Exclusión: revisiones, metaanálisis, conference papers, libros, editoriales y notas; artículos in press; duplicados (DOI/EID); registros irrelevantes tras cribado de título/resumen (e.g., biofouling marino sin componente de sales); registros carentes simultáneamente de autores y resumen. En caso de ambigüedad se aplicó exclusión conservadora.

El flujo de selección comprendió cinco fases (ver Figura 1): (1) identificación y aplicación de filtros; (2) eliminación de duplicados; (3) cribado de pertinencia temática; (4) verificación de metadatos; y (5) conformación del corpus final. Los contadores de cada fase se reportan en la sección de Resultados.

2.4 Depuración y normalización de datos

El CSV se importó en R mediante `convert2df()` de `bibliometrix`, verificando la coincidencia entre registros exportados e importados. Se validó la coherencia de campos (rango temporal, tipo documental, presencia de autores) y se ejecutó una segunda verificación de duplicados por DOI y títulos normalizados. La normalización abarcó: (a) autores, desambiguados mediante el Author ID de Scopus y unificación manual de variantes; (b) instituciones y países, con atribución geográfica por afiliación de cada coautor y full counting para artículos multipaíses; y (c) palabras clave, mediante unificación ortográfica (singular/plural, grafías británica/americana), consolidación de sinónimos y construcción de un tesoro documentado, exportado como archivo de texto para `Biblioshiny` y `VOSviewer`. Se priorizaron las Author Keywords, complementándose con Index Keywords en registros que carecieran de aquellas.

2.5 Análisis bibliométrico y mapeo científico

En `Biblioshiny` (`bibliometrix` v. 5.0, R v. 2026.01.1) se ejecutaron tres bloques de análisis: (a) descriptivos: producción anual, fuentes, autores, instituciones y países más productivos, artículos más citados y ratio de colaboración; (b) leyes bibliométricas: Bradford (concentración de fuentes) y Lotka (productividad de autores), junto con indicadores de impacto (h-index local, SJR, CiteScore); y (c) mapeo científico: redes de coocurrencia de Author Keywords, coautoría (autores, instituciones, países), cocitación, acoplamiento bibliográfico y evolución temática. Los análisis de cocitación y acoplamiento bibliográfico no pudieron ejecutarse debido a que la exportación CSV de Scopus no incluyó el campo de referencias citadas (véase sección 3.1); esta limitación se documenta en sección 3.7.4.

En `VOSviewer` (v. 1.6.20) se generaron mapas complementarios de coocurrencia de palabras clave, coautoría de países, cocitación de fuentes y acoplamiento bibliográfico, importando el tesoro de la sección 2.4 como `thesaurus file`. La configuración técnica se mantuvo consistente entre ambas herramientas: full counting; normalización por `association strength`; umbrales mínimos de ocurrencias/documentos: 5; algoritmo de clusterización: 5. El alcance geográfico es global; se define operacionalmente "país" como país de afiliación de cada coautor, con full counting en artículos multinacionales.

2.6 Reproducibilidad

Se conservan para auditoría: CSV original de Scopus, CSV depurado, tesoro de homologación, archivos de configuración de `VOSviewer` y figuras en alta resolución. Las versiones exactas de R, `bibliometrix` y `VOSviewer`, así como los parámetros de cada análisis, se reportan íntegramente. Como limitación inherente se reconoce el uso exclusivo de Scopus y el sesgo de autoasignación de las Author Keywords.

3. Resultados y Discusión

3.1 Caracterización del corpus y dinámica temporal

El corpus definitivo comprendió 682 artículos de revista (DOCTYPE «ar», versión final) publicados entre 2010 y 2025, indexados en Scopus en las áreas de Engineering, Energy, Environmental Science y Chemical Engineering. No se requirió exclusión adicional por tipo documental; el idioma fue exclusivamente inglés. Los campos críticos estuvieron completos, salvo Author Keywords en 100 registros (14,7 %), complementados con Index Keywords. El campo de referencias citadas no fue incluido en la exportación CSV, lo cual limita los análisis de cocitación y acoplamiento bibliográfico; esta restricción se compensa con un análisis de evolución temática por periodos (sección 3.6). La Tabla 1 sintetiza los indicadores descriptivos.

Tabla 1

Estadísticos descriptivos del corpus (N = 682).

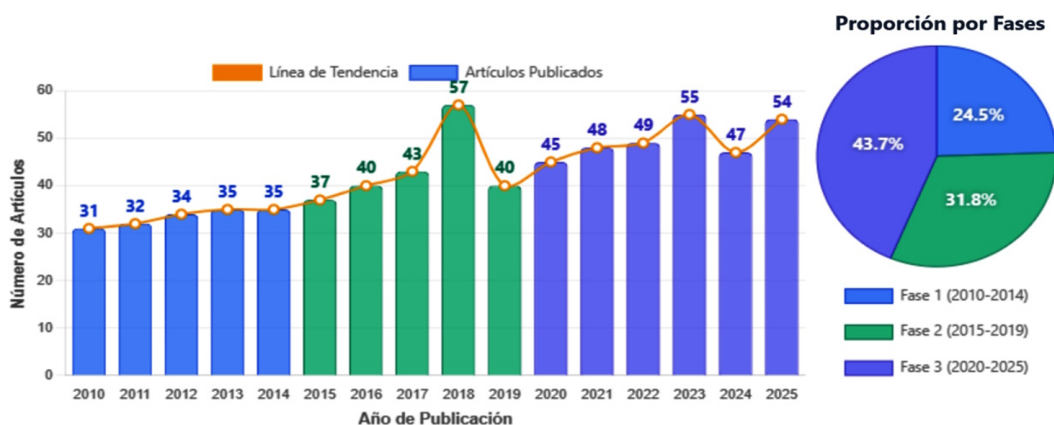
Indicador	Valor
N (artículos)	682
Rango temporal	2010–2025
Fuentes (únicas)	186
Autores (únicos)	1 981
Promedio autores/artículo	4,16
Artículos de autor único	19 (2,8 %)
Índice de colaboración	4,28
Author Keywords (únicas)	1 759
Total de citas recibidas	15 947
Media de citas/artículo	23,38
Mediana de citas	13,0
Artículos sin citas	48 (7,0 %)
Idioma	Inglés (100 %)

Nota: Tomado de Scopus / Biblioshiny. (2026)

La dinámica temporal (Figura 2) mostró un crecimiento moderado y sostenido (CAGR = 1,37 %). Se distinguen tres fases: 2010–2014, con 167 artículos (24,5 %; media 33,4/año); 2015–2019, con 217 (31,8 %; media 43,4/año) y un pico de 57 publicaciones en 2018; y 2020–2025, con 298 (43,7 %; media 49,7/año), máximos en 2023 (n = 55) y 2025 (n = 54). El descenso de 2024 (n = 47) podría deberse a desfases de indexación.

Figura 2

Producción anual de artículos, 2010–2025.



3.2 Fuentes de publicación

Los 682 artículos se distribuyeron en 186 revistas. El análisis de Bradford identificó un núcleo de tres revistas que concentra el 31,7 % de la producción (216 artículos): Applied Thermal Engineering (n = 107; 15,7 %), International Journal of Heat and Mass Transfer (n = 64; 9,4 %) y Heat Transfer Engineering (n = 45; 6,6 %). La zona 2 agrupó 21 revistas (235 artículos) y la zona 3, 162 revistas (231 artículos).

Tabla 2

Revistas con mayor productividad y citas acumuladas.

Revista	Art.	Citas
Applied Thermal Engineering	107	2 656
Int. J. Heat and Mass Transfer	64	2 390
Heat Transfer Engineering	45	784
Fuel	26	1 142
Energy	24	512
Int. J. Thermal Sciences	22	684
Applied Energy	14	881
Energies	14	—
Case Studies in Thermal Eng.	11	—
Desalination	11	381

Nota: Tomado de Scopus. (2026)

En impacto citacional, Fuel (1 142 citas / 26 artículos) y Applied Energy (881 / 14) exhibieron la mayor eficiencia por artículo, lo que indica contribuciones de alto impacto en conversión energética. La presencia de Desalination (381 citas) confirma el vínculo activo entre fouling por cristalización y tecnologías de desalinización.

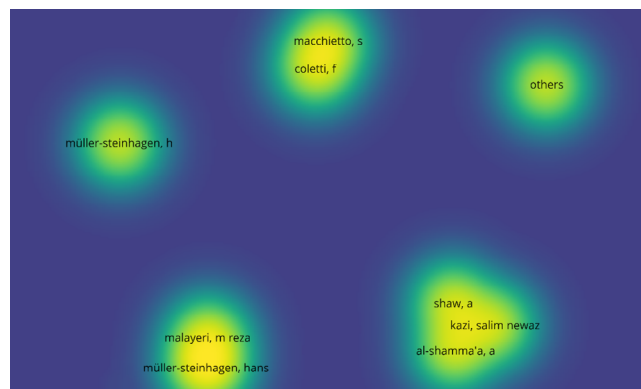
3.3 Autores, instituciones y colaboración

Se identificaron 1981 autores únicos; 1583 (79,9 %) contribuyeron con un solo artículo, consistente con la ley de Lotka. Los más productivos fueron Malayeri, M.R. (n = 21), Wang, Y. (n = 18), Wang, J. (n = 17), Shen, C. (n = 14) y Xu, Z. (n = 13). En impacto citacional acumulado lideraron Ya-Ling, Y.-L. (693 citas), Scheffknecht, G. y colaboradores (539 citas, asociadas a una revisión seminal de oxi-combustión), y Tang, S. (537 citas).

La colaboración es predominante: el 97,2 % de los artículos son multiautor (n = 663; índice de colaboración 4,28), con solo 19 de autor único. A nivel institucional, Northeast Electric Power University (China) lideró con 105 afiliaciones, seguida del Harbin Institute of Technology (48), Tianjin University (36), Universiti Malaya (33) y el Institute for Chemical and Thermal Process Engineering de Braunschweig (37), reflejando los polos chino y alemán de investigación en fouling.

Figura 3

Red de coautoría – VOSviewer.



Nota: Tomado de VOSviewer. (2026)

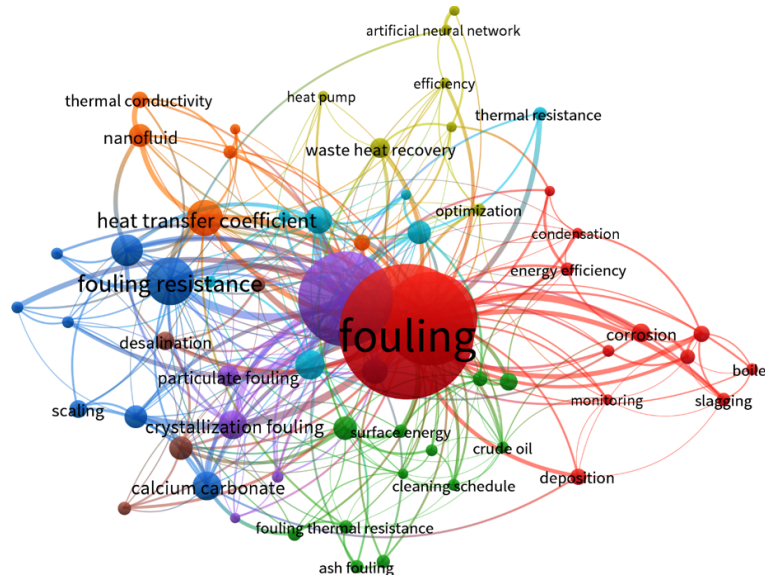
3.4 Distribución geográfica y colaboración internacional

China ocupó la primera posición con 334 afiliaciones, seguida de Estados Unidos (142), Alemania (82), Irán

(37); (d) Aplicaciones industriales críticas: Enfocado en sectores de alta demanda como energy efficiency (39), desalination (38) y boilers (28).

Figura 5

Mapa de coocurrencia de Author Keywords.



Nota: Tomado de VOSviewer. (2026)

3.6 Evolución temática y dinámica de frentes emergentes

Para complementar el análisis estático de coocurrencia y explorar la dimensión diacrónica del campo, se examinó la frecuencia de Author Keywords en los tres periodos definidos en la sección 3.1: 2010–2014 (n = 167), 2015–2019 (n = 217) y 2020–2025 (n = 298). La Tabla 4 presenta las palabras clave con mayor variación absoluta entre el primer y el tercer periodo.

Tabla 4

Evolución de Author Keywords por periodos.

Palabra clave	2010–14	2015–19	2020–25	Δ
heat transfer	22	30	43	+21
heat exchanger	23	27	42	+19
fouling resistance	6	10	22	+16
fouling	47	45	58	+11
calcium carbonate	0	9	10	+10
plate heat exchanger	4	6	12	+8
geothermal energy	0	0	7	+7
crystallization fouling	4	4	11	+7
numerical simulation	3	2	10	+7
CFD	3	4	10	+7
particulate fouling	0	6	7	+7
nanofluid	0	7	7	+7
machine learning	0	0	6	+6
organic Rankine cycle	0	0	5	+5

Nota: Tomado de Scopus. (2026)

El análisis diacrónico reveló tres dinámicas complementarias. Primero, un grupo de términos consolidados cuyo crecimiento acompaña la expansión general del corpus («fouling», «heat transfer», «heat exchanger»,

forma directa en la eficiencia de conversión de energía y en la huella de carbono del sector manufacturero.

3.7.2 Interpretación temática y comparación con literatura previa

El campo ha transitado desde un paradigma predominantemente experimental hacia uno dual donde simulación computacional e ingeniería de materiales coexisten con la investigación empírica. La consolidación de “CFD” y “numerical simulation” confirma la maduración de estos enfoques, mientras que la aparición exclusiva de “machine learning” en 2020–2025 ($n = 6$) indica un frente aún incipiente pero con trayectoria ascendente clara, consistente con Villa et al. (2025) e Ikram et al. (2024). La estabilización de “fouling mitigation” sugiere que las estrategias clásicas de mitigación han alcanzado su meseta de productividad investigativa.

En conjunto, estos patrones son coherentes con los marcos de transición sociotécnica (Geels, 2002) y de innovación basada en datos (Iansiti & Lakhani, 2020): el campo experimenta un desplazamiento de régimen desde la ingeniería empírica convencional hacia un nicho emergente anclado en la ciencia de datos, cuya consolidación dependerá de la articulación con agendas de eficiencia energética industrial (ODS 7) y de la disponibilidad de datos operativos en tiempo real provenientes de sensores IoT.

3.7.3 Implicaciones

A nivel teórico, los resultados documentan la transición desde estrategias de limpieza programada hacia enfoques proactivos basados en simulación y ciencia de materiales. A nivel metodológico, el estudio demuestra la viabilidad del análisis combinado Biblioshiny + VOSviewer para cartografiar campos interdisciplinarios de ingeniería. En el plano aplicado, la identificación de la desalinización, la recuperación de calor residual y los nanofluidos como clústeres activos orienta a investigadores hacia las brechas prioritarias, subrayando el potencial de intervenciones a microescala (recubrimientos anti-fouling, superficies nanoestructuradas) para reducir emisiones industriales. Concretamente, la emergencia del aprendizaje automático como frente incipiente ($n = 6$ artículos, 2020–2025) abre oportunidades para desplegar modelos LSTM o redes neuronales feedforward en sistemas de monitoreo continuo de intercambiadores en refinerías y plantas de desalinización, donde una reducción del 10–15 % en la resistencia de fouling no detectada puede traducirse en ahorros energéticos de entre 50000 y 200000 USD anuales por tren de intercambiadores. La integración con gemelos digitales, señalada como desafío en la sección primera, emerge como la frontera más prometedora para cerrar la brecha entre modelos predictivos y decisiones de mantenimiento en tiempo real.

3.7.4 Limitaciones y robustez

Se reconocen las siguientes limitaciones: (a) el uso exclusivo de Scopus introduce un sesgo de cobertura que podría subestimar la contribución de regiones con menor presencia en esta base; (b) la ausencia del campo de referencias en el CSV imposibilitó cocitación y acoplamiento bibliográfico; (c) la ecuación de búsqueda podría generar ruido u omisiones inherentes a todo estudio bibliométrico; (d) las decisiones de normalización mediante tesauro, aunque documentadas, implican juicios que podrían afectar la configuración de clústeres; (e) la asignación geográfica con full counting puede sobredimensionar la contribución de países con grandes instituciones; y (f) la complementación de Author Keywords faltantes (14,7 %) con Index Keywords podría introducir heterogeneidad semántica.

3.7.5 Líneas futuras de investigación

Se sugieren cinco líneas concretas derivadas de los hallazgos: (a) completar la estructura intelectual mediante exportación con referencias citadas, habilitando cocitación y acoplamiento bibliográfico; (b) ejecutar un estudio bibliométrico focalizado en la intersección fouling–inteligencia artificial, ampliando la ecuación con términos como «machine learning» y «predictive model»; (c) integrar Web of Science y Dimensions para mitigar el sesgo monofuente; (d) mapear explícitamente la contribución de las soluciones de mitigación al ODS 7; y (e) analizar la evolución temporal de los clústeres mediante burst de palabras clave y mapas estratégicos por periodos.

4. Conclusiones

El análisis bibliométrico de 682 artículos indexados en Scopus entre 2010 y 2025 permitió cartografiar la evolución, estructura y tendencias de la investigación sobre fouling por deposición de sales y sedimentos en intercambiadores de calor. El campo exhibe un crecimiento sostenido ($CAGR = 1,37 \%$), con una

intensificación a partir de 2018 que concentró el 43,7 % de la producción en el periodo 2020–2025. La estructura de fuentes responde a la ley de Bradford, con un núcleo de tres revistas: Applied Thermal Engineering, International Journal of Heat and Mass Transfer y Heat Transfer Engineering, que acumula el 31,7 % de los artículos. La producción de documentos científicos por parte de China y Estados Unidos es significativamente más alta que la de cualquier otro país. Dominan la producción con 334 y 142 colaboraciones, respectivamente, seguidos por Alemania con 82, que funciona como nodo de colaboraciones con países del Medio Oriente. Sin embargo, la colaboración internacional es escasa, representando un 22,9 % del total de la producción. El análisis de palabras clave en el tiempo mostró, de forma cuantitativa, la evolución de un paradigma experimental clásico, con énfasis en la cristales y resistencia térmica, a un paradigma dual que, en sus inicios, incorpora simulación (CFD, simulación numérica) y, en la actualidad, de forma incipiente, aprendizaje automático (aprendizaje automático, presente entre 2020 y 2025), confirmando la hipótesis planteada inicialmente.

El aprendizaje automático, como Keyword de autor, es escaso y evidencia una fragmentación del área del conocimiento que dificulta la integración entre ingeniería térmica y ciencia de datos. La generación de conocimiento atraviesa la recuperación de calor y la desalinización, de forma implícita, el ODS 7, sin embargo, esta vinculación no se ha sistematizado en la literatura. La ausencia del campo de referencias citadas en la exportación CSV constituyó la principal limitación técnica del estudio, pues imposibilitó los análisis de co-citación y acoplamiento bibliográfico. A esta restricción se suma el sesgo de cobertura inherente al uso exclusivo de Scopus como fuente de datos.

Declaración de disponibilidad de datos

Los datos incluidos en este artículo se han recopilado de Scopus. Estos están disponibles tanto en el artículo principal como en el material complementario y se han citado para garantizar la transparencia y la reproductibilidad de los resultados.

Declaración sobre el uso de IA generativa y tecnologías asistidas por IA en el proceso de redacción

Se declara el uso del modelo de lenguaje Claude (Anthropic, 2024) como asistente en el procesamiento de datos y generación de imágenes, conforme a las recomendaciones de Committee on Publication Ethics COPE (2023). Los autores asumen plena responsabilidad por el contenido, interpretación y conclusiones del artículo.

Declaración de contribución de los autores CRediT

Gianfranco Di Mattia-Castro: Administración del proyecto, Investigación, Conceptualización. **Víctor Moreno-Riquero:** Investigación, Conceptualización, Curación de datos, Redacción-borrador original. **José Navia Zamora:** Curación de datos, Investigación, Metodología, Software. **Marco Osorio-Trávez:** Curación de datos, Investigación, Metodología, Validación, Redacción-borrador original.

Declaración de conflictos de intereses

Los autores declaran que no tiene ningún interés financiero ni relación personal que pudiera influir en el trabajo descrito en este artículo.

5. Referencias

- Abuwatfa, W. H., Awad, M., & Al-Asheh, S. (2023). Machine intelligence for fouling prediction in heat exchangers for industrial and economic growth in Industry 4.0 landscape. *Chemical Engineering Research and Design*, 194, 150–165. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.04.012>
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis.

Journal of Informetrics, 11(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>

- Awais, M., & Bhuiyan, A. A. (2019). Recent advancements in impedance of fouling resistance and particulate depositions in heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 141, 580–603. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.07.011>
- Ben-Mansour, R., El-Ferik, S., Al-Naser, M., Qureshi, B. A., Eltoum, M. A. M., Abuelyamen, A., Al-Sunni, F., & Ben Mansour, R. (2023). Experimental/Numerical Investigation and Prediction of Fouling in Multiphase Flow Heat Exchangers: A Review. *Energies*, 16(6), 2812. <https://doi.org/10.3390/en16062812>
- Benzarti, Z., Arrousse, N., Serra, R., Cruz, S., Bastos, A., Tedim, J., Salgueiro, R., Cavaleiro, A., & Carvalho, S. (2023). Copper corrosion mechanisms, influencing factors, and mitigation strategies for water circuits of heat exchangers: Critical review. *Energies*, 16(6), 2812. <https://doi.org/10.3390/en16062812>
- Berce, P., Smith, J., & Li, Y. (2021). Effect of temperature and concentration on scale deposition on surfaces. *Applied Thermal Engineering*, 185, 116345. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116345>
- Bogojeski, M., Sauer, S., Horn, F., & Müller, K.-R. (2021). Forecasting Industrial Aging Processes with Machine Learning Methods. *Computers & Chemical Engineering*, 144, 107123. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107123>
- Bott, T. R. (1995). *Fouling of Heat Exchangers*. Elsevier Science. <https://doi.org/10.1016/B978-044489680-7/50000-1>
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
- Epstein, N. (1983). Thinking about heat transfer fouling: A 5×5 matrix. *Heat Transfer Engineering*, 4(1), 43–56. <https://doi.org/10.1080/01457638308939836>
- Garrett-Price, B. A., Smith, S. A., Watts, R. L., Knudsen, J. G., Marner, W. J., & Suitor, J. W. (1985). *Fouling of heat exchangers. Characteristics, costs, prevention, control, and removal*. <https://doi.org/10.1179/000705985798272551>
- Geels, F. W. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. *Research Policy*, 31(8–9), 1257–1274. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(02\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00062-8)
- Goswami, A., Pillai, S. C., & McGranaghan, G. (2023). Micro/nanoscale surface modifications to combat heat exchanger fouling. *Chemical Engineering Journal Advances*, 16, 100519. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.100519>
- Han, Y., Chen, X., & Wang, Q. (2020). Eulerian modeling of particle deposition and fouling in heat transfer systems. *Heat Transfer Engineering*, 41(12), 1012–1025. <https://doi.org/10.1080/01457632.2019.1613955>
- Helalizadeh, A., Müller-Steinhagen, H., & Jamialahmadi, M. (2005). Mathematical modelling of mixed salt precipitation during convective heat transfer and sub-cooled flow boiling. *Chemical Engineering Science*, 60(18), 5078–5088. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.03.040>
- Herz, A., Malayeri, M. R., & Müller-Steinhagen, H. (2021). A Review of Crystallization Fouling in Heat Exchangers. *Processes*, 9(8), 1356. <https://doi.org/10.3390/pr9081356>
- Iansiti, M., & Lakhani, K. R. (2020). *Competing in the Age of {AI}: Strategy and Leadership When Algorithms and Networks Run the World*. Harvard Business Review Press.
- Ikram, K., Djilali, K., Abdennasser, D., Al-Sabur, R., Ahmed, B., & Sharkawy, A.-N. (2024). Comparative analysis of fouling resistance prediction in shell and tube heat exchangers using advanced machine learning techniques. *Research on Engineering Structures and Materials*, 10(1), 253–270. <https://doi.org/10.17515/resm2023.858en0816>

- Ishiyama, E. M., Coletti, F., Macchietto, S., Paterson, W. R., & Wilson, D. I. (2010). Impact of deposit ageing on thermal fouling: Lumped parameter model. *AIChE Journal*, 56(2), 531–545. <https://doi.org/10.1002/aic.11985>
- Jackowski, F., Coletti, F., & Macchietto, S. (2021). Impact of non-uniform fouling on operating temperatures in heat exchanger networks. *Proceedings of the International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning*, 24–31. https://heatexchanger-fouling.com/wp-content/uploads/2021/09/24_Jackowski_F.pdf
- Jin, Y., Liu, Z., & Zhang, H. (2021). Predictive modeling of heat exchanger fouling dynamics using deep learning temporal attention mechanisms. *Energy*, 230, 120819. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120819>
- Kapustenko, P., Klemeš, J. J., & Arsenyeva, O. (2023). Plate heat exchangers fouling mitigation effects in heating of water solutions: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 179, 113283. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113283>
- Kern, D. Q., & Seaton, R. E. (1959). A theoretical analysis of thermal surface fouling. *British Chemical Engineering*, 4(5), 258–262.
- Kirby, A. (2023). Exploratory Bibliometrics: Using {VOSviewer} as a Preliminary Research Tool. *Publications*, 11(1), 10. <https://doi.org/10.3390/publications11010010>
- Martins, J., Gonçalves, R., & Branco, F. (2024). A bibliometric analysis and visualization of e-learning adoption using {VOSviewer}. *Universal Access in the Information Society*, 23(3), 1177–1191. <https://doi.org/10.1007/s10209-022-00953-0>
- Marzouk, S. A., Abou Al-Sood, M. M., El-Said, E. M. S., Younes, M. M., & El-Fakharany, M. K. (2023). Experimental and numerical investigation of a novel fractal tube configuration in helically tube heat exchanger. *International Journal of Thermal Sciences*, 187, 108175. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108175>
- Melesse, T. Y., Di Pasquale, V., & Riemma, S. (2020). Digital Twin Models in Industrial Operations: A Systematic Literature Review. *Procedia Manufacturing*, 42, 267–272. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.084>
- Moral-Muñoz, J. A., Herrera-Viedma, E., Santisteban-Espejo, A., & Cobo, M. J. (2020). Software tools for conducting bibliometric analysis in science: An up-to-date review. *Profesional de la Información*, 29(1), e290103. <https://doi.org/10.3145/epi.2020.ene.03>
- Müller-Steinhagen, H., Malayeri, M. R., & Watkinson, A. P. (2011). Heat exchanger fouling: Mitigation and cleaning strategies. *Heat Transfer Engineering*, 32(3–4), 189–196. <https://doi.org/10.1080/01457632.2010.503108>
- Nizam, M., Rahman, A., & Khalid, M. (2022). IoT-based sensor networks and advanced analytics for monitoring heat exchanger performance. *Sensors and Actuators A: Physical*, 341, 113570. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113570>
- Pääkkönen, T. M., Riihimäki, M., Simonson, C. J., Muurinen, E., & Keiski, R. L. (2012). Crystallization fouling of {CaCO₃} -- {A}nalysis of experimental thermal resistance and its uncertainty. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(23–24), 6927–6937. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.07.006>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., & others. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *Systematic reviews*, 10(1), 1–11.
- Pan, M., Bulatov, I., & Smith, R. (2016). Improving heat recovery in retrofitting heat exchanger networks with heat transfer intensification, pressure drop constraint, and fouling mitigation. *Applied Energy*, 161, 611–626. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.043>
- Peña, A. R., Cambronel, D. M., Ochoa, G. V., & Henríquez, L. V. (2022). Research Trends of Waste Heat

- Recovery Technologies: A Bibliometric Analysis from 2010 to 2020. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 12(5), 132–137. <https://doi.org/10.32479/ijeeep.13293>
- Shaikh, K., Newaz, K. M. S., Zubir, M. N. M., Wong, K. H., Khan, W. A., Abdullah, S., Alam, M. S., & Sugumaran, L. (2023). A review of recent advancements in the crystallization fouling of heat exchangers. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(22), 12369–12392. <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12544-z>
- Sundar, S., Rajagopal, M. C., Zhao, H., Kuntumalla, G., Meng, Y., Chang, H.-C., Shao, C., Ferreira, P., Miljkovic, N., Sinha, S., & Salapaka, S. (2020). Fouling modeling and prediction approach for heat exchangers using deep learning. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 159, 120112. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120112>
- United Nations. (2015). *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*.
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Villa, L., & Brusamarello, C. Z. (2025). Application of machine learning in monitoring fouling in heat exchangers in chemical engineering: A systematic review. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 103(2), 615–628. <https://doi.org/10.1002/cjce.25480>
- Wang, X., Wang, B., Yang, W., & Xu, Z. (2023). Anti-scale and anti-corrosion properties of PDA/PTFE superhydrophobic coating on metal surface. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 42(8), 4315–4321. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2023-0145>
- Yan, Z., Zhou, D., Zhang, Q., Zhu, Y., & Wu, Z. (2023). A critical review on fouling influence factors and antifouling coatings for heat exchangers of high-salt industrial wastewater. *Desalination*, 556, 116568. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116568>
- Zou, J., Hirokawa, T., An, J., Huang, L., & Camm, J. (2023). Recent advances in the applications of machine learning methods for heat exchanger modeling: a review. *Frontiers in Energy Research*, 11, 1260000. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1294531>
- Zupic, I., & Čater, T. (2015). Bibliometric Methods in Management and Organization. *Organizational Research Methods*, 18(3), 429–472. <https://doi.org/10.1177/1094428114562629>