



**REPÚBLICA DEL ECUADOR**  
**UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO**  
**FACULTAD DE POSGRADO**

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**INFORME DE INVESTIGACIÓN**  
**PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:**  
**MAGÍSTER BIOTECNOLOGÍA**

**TEMA:**

“Análisis bibliométrico de fitorremediación, fitorremediación y microrremediación  
aplicadas al tratamiento de efluentes de curtiembres (2004–2024)”

**Autor:**

Nelly Esther Flores Tapia

**Director:**

Director: Jorge Luis Vinueza Martínez, Mgs.

*Milagro, 2025*

## Derechos de Autor

Sr. Dr.

**Fabricio Guevara Viejó**

Rector de la Universidad Estatal de Milagro Presente.

Yo, **Nelly Esther Flores Tapia**, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de este informe de investigación, mediante el presente documento, libre y voluntariamente cedo los derechos de Autor de este proyecto de desarrollo, que fue realizada como requisito previo para la obtención de mi Grado, de **Magíster en Biotecnología**, como aporte a la Línea de Investigación **DESARROLLO SOSTENIBLE, TECNOLOGÍAS AMBIENTALES SUBLÍNEA GENERACIÓN DE ESTRATEGIAS PARA LA BIORREMEDIACIÓN** de conformidad con el Art. 114 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, concedo a favor de la Universidad Estatal de Milagro una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Conservo a mi favor todos los derechos de autor sobre la obra, establecidos en la normativa citada.

Así mismo, autorizo a la Universidad Estatal de Milagro para que realice la digitalización y publicación de este Proyecto de Investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

El autor declara que la obra objeto de la presente autorización es original en su forma de expresión y no infringe el derecho de autor de terceros, asumiendo la responsabilidad por cualquier reclamación que pudiera presentarse por esta causa y liberando a la Universidad de toda responsabilidad.

Milagro, 23 de junio del 2023



NELLY ESTHER FLORES  
TAPIA

Nelly Esther Flores Tapia

C.I.: 1716253305

## Aprobación del Tutor del Trabajo de Titulación

Yo, Jorge Luis Vinueza Martínez, en mi calidad de director del trabajo de titulación, elaborado por Nelly Esther Flores Tapia, cuyo tema es Análisis bibliométrico de fitorremediación, ficorremediación y micorremediación aplicadas al tratamiento de efluentes de curtiembres (2004–2024)”, que aporta a la Línea de Investigación **DESARROLLO SOSTENIBLE, TECNOLOGÍAS AMBIENTALES SUBLÍNEA GENERACIÓN DE ESTRATEGIAS PARA LA BIORREMEDIACIÓN**, previo a la obtención del Grado Magíster en Biotecnología. Trabajo de titulación que consiste en una propuesta innovadora que contiene, como mínimo, una investigación exploratoria y diagnóstica, base conceptual, conclusiones y fuentes de consulta, considero que el mismo reúne los requisitos y méritos necesarios para ser sometido a la evaluación por parte del tribunal calificador que se designe, por lo que lo APRUEBO, a fin de que el trabajo sea habilitado para continuar con el proceso de titulación de la alternativa de Informe de Investigación de la Universidad Estatal de Milagro.

Milagro, 08 de agosto del 2025



---

Jorge Luis Vinueza Martínez

C.I.: 0916860588

## Aprobación del tribunal calificador



### VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO FACULTAD DE POSGRADO ACTA DE SUSTENTACIÓN MAESTRÍA EN BIOTECNOLOGÍA

En la Facultad de Posgrado de la Universidad Estatal de Milagro, a los cuatro días del mes de agosto del dos mil veinticinco, siendo las 14:00 horas, de forma VIRTUAL comparece el/la maestrante, ING. FLORES TAPIA NELLY ESTHER, a defender el Trabajo de Titulación denominado " ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO DE FITORREMEDIACIÓN, FICORREMEDIACIÓN Y MICORREMEDIACIÓN APLICADAS AL TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE CURTIEMBRES (2004–2024)", ante el Tribunal de Calificación integrado por: ANDRADE ALBAN MARÍA JOSÉ, Presidente(a), Dra. NORIEGA VERDUGO DELIA DOLORES en calidad de Vocal; y, Ph.D. VALENZUELA COBOS JUAN DIEGO que actúa como Secretario/a.

Una vez defendido el trabajo de titulación; examinado por los integrantes del Tribunal de Calificación, escuchada la defensa y las preguntas formuladas sobre el contenido del mismo al maestrante compareciente, durante el tiempo reglamentario, obtuvo la calificación de: 100.00 equivalente a: EXCELENTE.

Para constancia de lo actuado firman en unidad de acto el Tribunal de Calificación, siendo las 15:00 horas.



ANDRADE ALBAN MARÍA JOSÉ  
ALBAN

ANDRADE ALBAN MARÍA JOSÉ  
PRESIDENTE/A DEL TRIBUNAL



DELIA DOLORES  
NORIEGA VERDUGO

Dra. NORIEGA VERDUGO DELIA DOLORES  
VOCAL



JUAN DIEGO  
VALENZUELA COBOS

Ph.D. VALENZUELA COBOS JUAN DIEGO  
SECRETARIO/A DEL TRIBUNAL



NELLY ESTHER FLORES  
TAPIA

ING. FLORES TAPIA NELLY ESTHER  
MAGISTER

## DEDICATORIA

*A mi familia por ser mi mas grande apoyo y para mi Pipa.*

## **Agradecimientos**

*Al culminar esta etapa académica, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que, de una u otra forma, han sido parte fundamental de este camino.*

*A mi padre y a mi madre, por su amor incondicional, por enseñarme con el ejemplo la importancia del esfuerzo, la honestidad y la perseverancia. Su apoyo constante ha sido el motor que me ha impulsado a seguir adelante incluso en los momentos más complejos.*

*A mi hermano, por su cercanía, sus palabras de aliento y su firme creencia en mis capacidades. A mis sobrinos, quienes con su ternura e inocencia me recordaron, día a día, que los logros también se celebran en familia y con sonrisas sinceras.*

*A mi familia en general, por su compañía silenciosa pero constante, por estar presentes en cada paso y celebrar conmigo cada avance. Cada palabra de ánimo, cada gesto de cariño y cada abrazo han sido una fuente invaluable de energía.*

*A mi director de tesis, por su guía académica rigurosa, por su paciencia y por brindarme las herramientas necesarias para avanzar con seguridad. Su compromiso con la excelencia y su acompañamiento en este proceso de investigación han dejado una huella indeleble en mi formación profesional.*

*A todos, gracias por caminar conmigo en este trayecto. Este logro es también de ustedes.*

## Resumen

Esta tesis analiza la evolución, características y vacíos temáticos en la literatura científica sobre el tratamiento de efluentes de curtiembres mediante fitorremediación, micorremediación y ficorremediación, en el periodo 2004–2024. Se empleó un enfoque bibliométrico basado en 92 documentos indexados en Scopus y Web of Science, procesados con Bibliometrix y VOSviewer para examinar redes de colaboración, palabras clave, fuentes y citas.

Los resultados muestran una concentración temática y geográfica en países como India, Pakistán y China, y en instituciones como el CSIR. Autores como Ali S., Ashraf S. y Calheiros C. se posicionan como los más influyentes. Las principales líneas de investigación se centran en la fitorremediación de cromo hexavalente con especies como *Eichhornia crassipes* y *Phragmites australis*, aunque emergen enfoques alternativos como la biosorción y el uso de microalgas y humedales construidos.

Se identifican vacíos relevantes: escasa validación en campo, baja integración de contaminantes múltiples y limitada articulación de aspectos sociales y normativos. Se concluye que, pese al crecimiento del campo, aún existen desafíos importantes para consolidar enfoques sostenibles, colaborativos y transdisciplinarios en la remediación biotecnológica de efluentes curtidores.

Palabras Claves: Tratamiento de efluentes de curtiembres – Fitorremediación – Micorremediación - Colaboración internacional - Enfoque transdisciplinario.

## Abstract

This thesis examines the evolution, characteristics, and thematic gaps in the scientific literature on the treatment of tannery wastewater using phytoremediation, mycoremediation, and phycoremediation (Saranya & Shanthakumar, 2021), covering the period from 2004 to 2024. A bibliometric approach was applied to 92 documents indexed in Scopus and Web of Science, analyzed using Bibliometrix and VOSviewer to explore collaboration networks, keywords, sources, and citation patterns.

The results reveal thematic and geographical concentration in countries such as India, Pakistan, and China, with leading institutions like the CSIR. Authors such as Ali S., Ashraf S., and Calheiros C. emerged as the most influential figures. Core research areas focus on phytoremediation of hexavalent chromium using species such as *Eichhornia crassipes* and *Phragmites australis*, while alternative approaches—such as biosorption, microalgae, and constructed wetlands—are gaining relevance.

Several research gaps were identified, including limited field validation, insufficient integration of multiple contaminants, and scarce incorporation of social and regulatory dimensions. Despite the field's growth, key challenges remain in developing sustainable, collaborative, and transdisciplinary approaches to the biotechnological remediation of tannery effluents.

**Keywords:** Tannery effluent treatment – Phytoremediation – Mycoremediation – International collaboration – Transdisciplinary approach

## Lista de Figuras

Figura 1. Metodología para obtener datos bibliográficos	48
Figura 2. Fases del Proceso Metodológico en una Investigación Bibliométrica	49
Figura 3. Diagrama de flujo PRISMA adaptado para el análisis bibliométrico sobre fitorremediación en aguas residuales de curtiembres	51
Figura 4. Ajuste de los datos observados con la Ley de Lotka en el campo de estudio analizado	64
Figura 5. Indicadores de impacto bibliométrico de los autores más relevantes donde (a) Comparación de H-index, G-index y M-index por autor, (b) Total de citas recibidas por cada autor	65
Figura 6. Evolución temporal de la productividad de los autores más relevantes en el campo de la fitorremediación aplicada a efluentes de curtiembres (2004–2024)	66
Figura 7. Mapa de colaboración entre autores en el campo de la fitorremediación, microrremediación y ficorremediación aplicadas al tratamiento de efluentes de curtiembres (2004–2024)	67
Figura 8. a) Instituciones con mayor número de publicaciones en técnicas de biorremediación aplicadas a efluentes de curtiembres (2004–2024) y b) Evolución temporal de la producción científica de las instituciones más relevantes (2004–2024)	69
Figura 9. Red de colaboración científica entre países y evolución temporal de publicaciones en fitorremediación de efluentes de curtiembres (2004–2024)	70
Figura 10. Evolución anual de publicaciones científicas en fitorremediación aplicada al tratamiento de aguas residuales de curtiembres	72
Figura 11. Resultados de citaciones promedio por año de publicaciones científicas en fitorremediación aplicada al tratamiento de aguas residuales de curtiembres	73
Figura 12. Mapa de coocurrencia de palabras clave de autor en estudios sobre tratamiento de efluentes de curtiembres, a) evolución temporal y b) evolución temporal	76
Figura 13. Revistas más productivas en el campo de la fitorremediación aplicada a efluentes de curtiembres (2004–2024)	77
Figura 14. Distribución de revistas según la Ley de Bradford para identificar el núcleo de producción científica	78
Figura 15. Impacto de las fuentes científicas basado en el índice H local (H-index)	79
Figura 16. Evolución temporal de la productividad por fuente científica (2004–2024)	80
Figura 17. Análisis temático de coocurrencias en estudios sobre fitorremediación de efluentes de curtiembres (2004–2024)	82
Figura 18. Análisis de densidad de coocurrencias en estudios sobre fitorremediación de efluentes de curtiembres (2004–2024)	83
Figura 19. Mapa de coautoría entre autores en el campo de la fitorremediación, microrremediación y ficorremediación aplicadas al tratamiento de efluentes de curtiembres (2004–2024)	84
Figura 20. Red de colaboración institucional en estudios sobre biorremediación de efluentes de curtiembres (2004–2024)	84

Figura 21. Documentos más citados en el campo de la remediación biotecnológica de efluentes de curtiembres (2006–2021), según número de citas globales 86

Figura 22. Relación entre antigüedad de publicación y número de citas globales en estudios sobre fitorremediación, micorremediación y ficorremediación (2006–2021) 87

## Lista de Tablas

Tabla 1. Variables del estudio bibliométrico	15
Tabla 2. Límites descarga líquidos al alcantarillado aguas residuales industriales	27
Tabla 3. Estrategia de búsqueda en Scopus y Web of Science para estudios sobre fitorremediación en efluentes de curtiembres (archivo scopus.bib, corte al 23 de marzo de 2025)	54
Tabla 4. Datos bibliográficos obtenidos y procesados en R	56
Tabla 5. Nivel de completitud de metadatos en la base de datos bibliográfica (2004–2024)	62
Tabla 6. Indicadores bibliométricos generales del corpus analizado	72

## Índice / Sumario

Introducción	1
CAPÍTULO I: El Problema de la Investigación	4
1.1. Planteamiento del problema	4
1.2. Delimitación del problema	6
1.3. Formulación del problema	6
1.4. Preguntas de Investigación	7
1.5. Objetivos	9
1.6. Hipótesis	10
1.7. Justificación	10
1.8. Alcance	11
1.9. Limitaciones	12
1.10. Declaración de las variables (Operacionalización)	13
CAPÍTULO II: Marco Teórico Referencial	17
2.1. Antecedentes Referenciales	17
2.1.1. Antecedentes Nacionales	17
2.1.2. Antecedentes Internacionales	18
2.2. Marco Conceptual	22
2.2.1. Proceso de curtiembre	22
2.2.2. Contaminantes comunes en efluentes de curtiembres	24
2.2.3. Marco normativo ambiental relevante	25
2.2.4. Definiciones básicas en procesos de descontaminación de aguas residuales	28
2.2.5. Tratamiento de aguas residuales industriales	29
2.2.6. Fitorremediación	30
2.2.7. Componentes del proceso de fitorremediación	30
2.2.8. Absorción y acumulaciones	31
2.2.9. Transformación	31
2.2.10. Volatilización	32
2.2.11. Interacción con microorganismos	32
2.2.12. Procesos durante la fitorremediación	32
2.2.13. Especies utilizadas en fitorremediación de efluentes	33
2.2.14. Aplicaciones de la fitorremediación en curtiembres	35
2.2.15. Modelos teóricos de fitorremediación	35
2.2.16. Cuantificación de la eficiencia y bioacumulación	36
2.2.17. Concepto de bibliometría	37
2.2.18. Enfoque cuantitativo del análisis de la literatura científica	37
2.3. Marco Teórico	40
2.3.1. Principales corrientes teóricas en bibliometría	40
2.3.2. Bases de datos científicas y herramientas de visualización bibliométrica	42
2.3.3. Diferencias en cobertura y criterios de selección	42
2.3.4. Visualización de redes y análisis bibliométrico	42
2.3.5. Técnicas y modelos de análisis bibliométrico	43
2.3.6. Aplicación de Análisis Bibliométrico en Investigación Ambiental y Tecnológica	44
CAPÍTULO III: Diseño Metodológico	46

3.1. Tipo y diseño de investigación	46
3.2. Población y muestra	47
3.3. Métodos, técnicas e instrumentos	47
3.3.1. Estrategia de búsqueda y selección de fuentes	49
3.3.2. Justificación de la estrategia de búsqueda y selección de palabras clave en Scopus y Web of Science	54
3.3.3. Selección y depuración de documentos científicos recuperados	55
3.4. Procesamiento y análisis de datos	55
3.5. Instrumentos de análisis	56
3.6. Procesamiento estadístico de la información	56
3.6.1. Caracterización general de la base de datos	58
3.6.2. Preparación de archivos y entorno	58
3.6.3. Conversión de los archivos a estructuras analizables	58
3.6.4. Integración y depuración de datos	59
3.7. Exportación para análisis visual y gestión externa	59
3.8. Análisis interactivo con Biblioshiny	60
3.9. Interpretación del entorno de trabajo en R	60
CAPÍTULO IV: Análisis e Interpretación de Resultados	61
4.1. Objetivo Específico 1	62
4.1.1. Productividad de autores	63
4.1.2. Impacto de autores	63
4.1.3. Producción por autor a lo largo del tiempo	65
4.1.4. Colaboración entre autores	66
4.1.5. Instituciones más relevantes	67
4.2. Objetivo Específico 2	70
4.2.1. Evolución temática y tecnológica en fitorremediación (RQ1)	70
4.2.2. Principales palabras clave y coocurrencias temáticas (RQ4)	73
4.2.3. Revistas científicas más relevantes en la difusión de estudios (RQ5)	76
4.2.4. Metodologías que se emplean con mayor frecuencia en los estudios analizados (RQ6)	79
4.3. Objetivo Específico 3.	85
4.3.1. Documentos más citados y qué características presentan los estudios más influyentes (RQ7)	84
4.3.2. Tendencias emergentes y los vacíos de conocimiento identificados en la literatura científica sobre el tema (RQ8)	86
CAPÍTULO V: Discusión, Conclusiones y Recomendaciones	89
5.1. Discusión	89
5.1.1. Identificación de los países, autores e instituciones con mayor productividad científica en el ámbito del tratamiento de efluentes de curtiembres mediante fitorremediación, ficorremediación y micorremediación.	89
5.1.2. Análisis de las palabras clave, coocurrencias temáticas y redes de colaboración para comprender las principales líneas de investigación y su evolución (2004–2024)	91
5.1.3. Tendencias emergentes, áreas de concentración temática y vacíos de investigación en la literatura científica relacionada con las técnicas biotecnológicas de remediación aplicadas a efluentes de curtiembres	93
5.2. Conclusiones	96
5.3. Recomendaciones	99

## Introducción

La contaminación generada por los efluentes de curtiembres constituye un problema ambiental persistente a nivel mundial, especialmente en países en desarrollo, donde las tecnologías de tratamiento resultan obsoletas o insuficientes para abordar la compleja composición de estos efluentes. Estos vertidos contienen altos niveles de metales pesados, compuestos orgánicos tóxicos y una carga significativa de materia orgánica, representando riesgos ecológicos, sociales, económicos y de salud pública. En Ecuador, la situación no es ajena, particularmente en zonas con intensa actividad curtiente como la provincia de Tungurahua, donde el vertido inadecuado de aguas residuales industriales continúa afectando cuerpos de agua y ecosistemas locales (Prieto-Benavides et al. 2023).

Los métodos tradicionales de tratamiento, tales como la adsorción con carbón activado (Mella et al., 2019), el uso de caolín (Mustapha, 2020), la cavitación (Korpe et al., 2019) y los biorreactores de membranas (Bui et al., 2021), aunque han sido ampliamente estudiados, a menudo resultan ineficaces o poco sostenibles para eliminar la totalidad de los contaminantes presentes en los efluentes curtidores. Diversos estudios recientes destacan esta ineficiencia, motivando la búsqueda de soluciones biotecnológicas más sostenibles como la biorremediación.

En este contexto, han emergido técnicas como la fitorremediación, la ficorremediación y la micorremediación, que representan alternativas ecológicas y económicamente viables. La fitorremediación utiliza plantas para absorber, acumular y transformar contaminantes. Por ejemplo, *Schoenoplectus americanus* ha demostrado eliminar cromo y fenoles en efluentes curtidores (Quevedo et al., 2024), mientras que especies como *Xanthium strumarium* L. muestran altos factores de bioacumulación de cromo

(Hasan et al., 2021).

Por su parte, la fitorremediación, basada en el uso de microalgas, permite reducir metales pesados y DQO, generando además biomasa útil para biocombustibles. Algas como *Nannochloropsis oculata* y *Chlorella vulgaris* han demostrado eficiencia en este proceso (Ankit & Korstad, 2022). Además, su integración con tecnologías como la ozonación o los reactores secuenciales por lotes ha incrementado la eficiencia en la remoción de contaminantes (Raffa & Shanthakumar, 2021).

La micorremediación, aunque menos aplicada en contextos curtidores, ha mostrado potencial en la degradación de contaminantes orgánicos complejos y metales pesados mediante el uso de hongos, complementando así los procesos de remediación vegetal y algal (Akhtar & Mannan, 2020).

Dada la creciente relevancia de estas tecnologías, esta investigación analizará la producción científica y tendencias de investigación en fitorremediación, fitorremediación y micorremediación de aguas residuales de curtiembres durante el período 2004–2024, con el fin de identificar patrones, enfoques metodológicos y vacíos de conocimiento que permitan orientar futuras investigaciones y aplicaciones sostenibles.

Para alcanzar este objetivo, se propone un análisis bibliométrico integral, el cual permite identificar la evolución de la producción científica, las redes de colaboración, las metodologías más utilizadas, así como las áreas temáticas emergentes. Este tipo de estudio es clave para establecer el estado del arte y guiar el desarrollo de nuevas estrategias que fortalezcan la sostenibilidad en la gestión de aguas industriales.

Este trabajo contribuye al campo de la biotecnología ambiental al sistematizar el conocimiento existente y proporcionar insumos valiosos para el desarrollo de políticas públicas y soluciones tecnológicas sostenibles. Este estudio plantea que el análisis

bibliométrico de la producción científica sobre fitorremediación de aguas residuales de curtiembres en los últimos veinte años mostrará un aumento significativo en la cantidad de publicaciones, reflejando un creciente interés académico en esta área. Asimismo, se espera identificar la consolidación de redes de colaboración entre países e instituciones líderes, así como una tendencia hacia el uso de tecnologías específicas y especies vegetales recurrentes, evidenciando patrones metodológicos predominantes y áreas aún poco exploradas que requieren mayor investigación para promover aplicaciones sostenibles.

El diseño teórico del estudio se basa en el uso de metodologías bibliométricas aplicadas a bases de datos científicas indexadas como Web of Science y Scopus. Se recopilarán datos bibliográficos, se aplicarán herramientas de análisis de redes científicas y métricas de coocurrencia, y se evaluarán críticamente los enfoques emergentes relacionados con la remediación biotecnológica de efluentes curtidores. Esta tesis se organiza en cinco capítulos. El Capítulo I expone el problema de investigación, la justificación, los objetivos y la hipótesis. El Capítulo II desarrolla el marco teórico sobre biorremediación y técnicas específicas. El Capítulo III describe la metodología bibliométrica utilizada. El Capítulo IV presenta el análisis e interpretación de resultados. Finalmente, el Capítulo V resume las conclusiones, discute los hallazgos y propone recomendaciones para futuras investigaciones en el área.

## **CAPÍTULO I: El Problema de la Investigación**

### **1.1. Planteamiento del problema**

La industria del curtido, presente en países como China, India, Italia y Brasil, es una de las mayores consumidoras de agua y generadoras de aguas residuales altamente contaminadas. Estas aguas contienen una compleja mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos, entre ellos sales de cromo, sulfuros, cloruros, tintes, solventes, proteínas y agentes curtientes, que son parcialmente retenidos durante el proceso industrial (Sforza et al., 2020). A nivel mundial, el tratamiento de estos efluentes representa un desafío ambiental significativo, ya que, pese a los avances tecnológicos, los métodos convencionales como la coagulación, floculación, tratamientos biológicos, membranas y procesos de oxidación avanzada presentan limitaciones en cuanto a eficiencia, costos operativos, generación de lodos tóxicos y capacidad para tratar aguas con alta salinidad y contaminantes persistentes. En muchos países, incluso tras el tratamiento, los efluentes no cumplen con los estándares regulatorios, lo que conlleva riesgos severos para los ecosistemas y la salud humana. La falta de integración tecnológica y la escasa implementación de estrategias de producción limpia agravan aún más el problema, haciendo urgente el desarrollo de métodos combinados, sostenibles y adaptables a distintas condiciones operativas (Zhao et al., 2022).

La contaminación producida por curtiembres es más notable especialmente en países en vías de desarrollo como Ecuador (Flores & Bastidas, 2023), donde se observa una marcada escasez de investigaciones sistemáticas y bibliométricas orientadas al análisis de técnicas biotecnológicas, como la fitorremediación, lo que limita el desarrollo de estrategias eficaces y sostenibles para el tratamiento de estos efluentes.

Entre las causas estructurales de esta problemática se encuentran la débil regulación ambiental, el escaso acceso a tecnologías de tratamiento avanzadas, y los altos costos operativos asociados a métodos convencionales como la coagulación, floculación y oxidación avanzada (Ming et al., 2022). Estas limitaciones impactan especialmente a las pequeñas y medianas empresas de curtiembre, que carecen de los recursos financieros y técnicos necesarios para adoptar soluciones sostenibles, perpetuando así el vertido de aguas contaminadas en cuerpos hídricos superficiales. Los efectos inmediatos de esta situación incluyen la toxicidad aguda para la biota acuática, la disminución de los niveles de oxígeno disuelto y la degradación de los ecosistemas. A largo plazo, se han documentado fenómenos como la bioacumulación de metales pesados en las cadenas tróficas, la pérdida de fertilidad de los suelos y la persistencia de contaminantes en los ambientes receptores (Ayala- González, et al., 2022). Además, se ha reportado que algunos de los contaminantes presentes en estas aguas residuales poseen efectos fitotóxicos y genotóxicos sobre especies vegetales empleadas en procesos de remediación (Yadav et al., 2019), lo que representa un desafío adicional para la implementación efectiva de tecnologías basadas en sistemas vivos.

Frente a este escenario, la fitorremediación se perfila como una técnica prometedora para el tratamiento de efluentes de curtiembres, especialmente por su bajo costo, sostenibilidad y capacidad de adaptación a diversas condiciones ambientales. Especies como *Terminalia arjuna*, *Prosopis juliflora*, *Populus alba*, *Eucalyptus tereticornis*, *Dendrocalamus strictus*, *Spirodela polyrrhiza*, *Spirogyra spp.* y *Chlorella spp.* (Gauje et al., 2022), han demostrado potencial en la remoción de contaminantes, así como microalgas y cianobacterias en diferentes configuraciones (Vijayaraj, Mohandass & Joshi, 2020; Urbina-Suarez et al., 2022). No obstante, persiste una

brecha importante en la literatura científica respecto a la optimización de estos procesos y su escalabilidad a nivel industrial.

En este contexto, se vuelve urgente la realización de estudios bibliométricos que permitan analizar de forma sistemática la evolución, concentración temática, colaboraciones institucionales y vacíos existentes en la producción científica sobre fitorremediación, ficorremediación y micorremediación aplicadas al tratamiento de efluentes de curtiembres. Esta aproximación facilitaría la planificación de estrategias integradas, basadas en evidencia, que respondan a los retos ambientales y socioeconómicos que enfrenta la región (Gebretekle et al., 2024).

### **1.2. Delimitación del problema**

Este estudio se delimita temáticamente al análisis de la producción científica relacionada con la aplicación de técnicas biotecnológicas de fitorremediación, ficorremediación y micorremediación en el tratamiento de aguas residuales generadas por la industria del curtido. Desde una delimitación geográfica, se considerará la literatura científica internacional con énfasis en contextos de países en vías de desarrollo, como el caso de Ecuador, donde la problemática ambiental derivada de los efluentes de curtiembres representa un reto crítico. En cuanto a la delimitación temporal, el análisis abarcará el periodo comprendido entre los años 2004 y 2024, con el objetivo de identificar las tendencias, enfoques metodológicos predominantes y vacíos de conocimiento en este campo.

### **1.3. Formulación del problema**

La industria curtidora es una de las actividades manufactureras con mayor impacto ambiental, debido a la generación de grandes volúmenes de aguas residuales altamente contaminadas con compuestos orgánicos tóxicos y metales pesados como el cromo. Estos efluentes representan una seria amenaza para la salud pública y la

sostenibilidad de los recursos hídricos. Aunque se han desarrollado distintos métodos físicos, químicos y biológicos para su tratamiento, en las últimas dos décadas las técnicas de biorremediación —específicamente la fitorremediación, ficorremediación y micorremediación— han ganado protagonismo como alternativas ecológicas, eficientes y de bajo costo, al aprovechar la capacidad natural de organismos vegetales, algas y hongos para remover contaminantes del medio acuático.

Sin embargo, a pesar del aumento de investigaciones sobre estos enfoques biotecnológicos, no existe hasta el momento una revisión bibliométrica sistemática que permita evaluar de manera integral la evolución del conocimiento científico sobre la aplicación de estas técnicas al tratamiento de efluentes de curtiembres entre los años 2004 y 2024. Esta falta de sistematización limita la identificación de tendencias globales, enfoques metodológicos predominantes, colaboración entre autores e instituciones, y vacíos temáticos que podrían orientar nuevas investigaciones y fortalecer su aplicación práctica.

En este contexto, surge la necesidad de realizar un análisis bibliométrico que permita mapear la evolución de la producción científica en este campo, identificar a los actores más influyentes, y explorar las temáticas emergentes con el fin de contribuir al desarrollo de estrategias de gestión ambiental más sostenibles en la industria del curtido.

#### **1.4. Preguntas de investigación**

En este contexto, se requiere un análisis sistemático y actualizado del panorama de investigación en la remediación de aguas residuales de curtiembres. No se ha consolidado un estado del arte integral que permita evaluar de manera cuantitativa las principales tendencias, los desafíos persistentes y las oportunidades de innovación en esta área.

A partir de esta delimitación temática y temporal, la investigación se orienta a responder la siguiente pregunta principal:

¿Cuáles son las tendencias, enfoques metodológicos y vacíos de conocimiento presentes en la producción científica sobre fitorremediación, ficorremediación y micorremediación de aguas residuales de curtiembres, según un análisis bibliométrico realizado entre 2004 y 2024?

En función de esta interrogante central, se plantean las siguientes preguntas específicas, RQ (por sus siglas en inglés Research Question), que estructuran y orientan el desarrollo del estudio:

RQ1: ¿Cuáles son las características bibliométricas generales de la producción científica sobre fitorremediación, ficorremediación y micorremediación aplicadas al tratamiento de efluentes de curtiembres durante el periodo 2004–2024?

RQ2: ¿Qué autores e instituciones concentran la mayor productividad científica en este campo de estudio?

RQ3: ¿Qué países presentan mayor volumen de publicaciones y cómo ha sido su evolución temática en el periodo analizado?

RQ 4: ¿Cuáles son las palabras clave más empleadas y qué coocurrencias temáticas permiten identificar las principales líneas de investigación?

RQ 5: ¿Cuáles son las revistas científicas más relevantes en la difusión de estudios sobre estas técnicas biotecnológicas aplicadas a efluentes de curtiembres?

RQ 6: ¿Qué metodologías se emplean con mayor frecuencia en los estudios analizados?

RQ7. ¿Cuáles son los documentos más citados y qué características presentan los estudios más influyentes?

RQ 8: ¿Cuáles son las tendencias emergentes y los vacíos de conocimiento identificados en la literatura científica sobre el tema?

Para responder a estas preguntas, esta investigación realizará un análisis bibliométrico de la literatura científica sobre la remediación de aguas residuales de curtiembres en los últimos 20 años, con el objetivo de identificar tendencias, evaluar avances tecnológicos y proponer oportunidades para el desarrollo de soluciones más eficientes y sostenibles. A través de este estudio, se busca proporcionar una base científica sólida para la optimización de estrategias de tratamiento, promoviendo la transición hacia una gestión más sostenible de los efluentes curtidores.

## **1.5. Objetivos**

### **Objetivo general**

Analizar bibliométricamente la producción científica (2004–2024) sobre fitorremediación, ficorremediación y micorremediación en el tratamiento de efluentes de curtiembres.

### **Objetivos específicos**

- Identificar los países, autores e instituciones con mayor productividad científica en el ámbito del tratamiento de efluentes de curtiembres mediante fitorremediación, ficorremediación y micorremediación.
- Analizar las palabras clave, coocurrencias temáticas y redes de colaboración para comprender las principales líneas de investigación y su evolución a lo largo del periodo 2004–2024.
- Determinar las tendencias emergentes, las áreas de concentración temática y los vacíos de investigación en la literatura científica relacionada con las técnicas biotecnológicas de remediación aplicadas a efluentes de curtiembres.

## **1.6. Hipótesis**

Existe una creciente producción científica entre 2004 y 2024 sobre fitorremediación, ficorremediación y micorremediación aplicadas al tratamiento de efluentes de curtiembres, caracterizada por la concentración temática en ciertos países, instituciones y autores, con redes de colaboración limitadas y vacíos de investigación en enfoques integrados y regiones subrepresentadas.

## **1.7. Justificación**

La presente investigación se justifica por su aporte significativo al análisis estructurado del conocimiento científico en torno a técnicas biotecnológicas sostenibles como la fitorremediación, ficorremediación y micorremediación, aplicadas al tratamiento de aguas residuales de curtiembres. Desde una perspectiva científica, el enfoque bibliométrico permite visualizar la evolución de la producción académica en las últimas dos décadas (2004–2024), identificar tendencias emergentes, metodologías predominantes, vacíos temáticos y actores clave como países, instituciones y autores más productivos. Esta sistematización del conocimiento contribuye al fortalecimiento de nuevas líneas de investigación en el campo de la remediación ambiental.

En el plano social y ambiental, el estudio cobra especial relevancia ante la urgente necesidad de encontrar soluciones efectivas frente a la contaminación generada por los efluentes de la industria curtidora, los cuales representan una amenaza persistente para los ecosistemas acuáticos y la salud humana, especialmente en países en vías de desarrollo. Las tecnologías biológicas revisadas, como el uso de plantas nativas, microalgas y hongos en sistemas naturales o integrados (por ejemplo, humedales construidos), ofrecen alternativas viables, de bajo costo y con menor impacto ambiental que los métodos tradicionales (Serrá et al, 2024).

En cuanto a su aplicabilidad, los resultados del análisis bibliométrico pueden servir de base para la toma de decisiones informadas por parte de autoridades ambientales, gestores de recursos hídricos, académicos e industrias, al proporcionar una guía clara sobre qué enfoques han sido más estudiados, qué contextos geográficos (Sameh, 2020), están más avanzados, y qué aspectos requieren mayor investigación o adaptación tecnológica. Asimismo, se promueve la cooperación científica internacional y la transferencia de tecnología hacia contextos locales que enfrentan limitaciones técnicas y económicas (Donthu, 2021).

Finalmente, esta investigación se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 6 (agua limpia y saneamiento), el ODS 9 (industria, innovación e infraestructura) y el ODS 13 (acción por el clima), al generar evidencia científica que impulsa la gestión sostenible del agua, promueve la innovación tecnológica ambiental y contribuye a enfrentar los desafíos del cambio climático desde una perspectiva basada en ciencia.

### **1.8. Alcance**

Esta investigación tiene como objetivo realizar un análisis bibliométrico exhaustivo sobre la producción científica relacionada con la fitorremediación, ficorremediación y microrremediación aplicadas al tratamiento de efluentes de curtiembres durante el periodo comprendido entre 2004 y 2024. El estudio abarcará la identificación de tendencias de investigación, principales actores (autores, instituciones y países), redes de colaboración, tecnologías empleadas, especies vegetales utilizadas y parámetros evaluados en los estudios.

Además, el análisis se enfocará en identificar vacíos de conocimiento que puedan orientar futuras investigaciones y aplicaciones sostenibles. La recopilación de datos se realizará a partir de bases de datos científicas reconocidas (como Scopus y Web

of Science utilizando herramientas bibliométricas como Bibliometrix y VOSviewer para el análisis cuantitativo y visual de la información recopilada.

Este análisis contribuirá a la identificación de patrones de colaboración, tecnologías emergentes y áreas de investigación menos exploradas, brindando una visión panorámica y detallada de los avances científicos en el campo de la biorremediación aplicada a la industria curtidora.

### **1.9. Limitaciones**

Esta investigación presenta una serie de limitaciones inherentes a la naturaleza del análisis bibliométrico y a las decisiones metodológicas adoptadas. En primer lugar, el estudio depende exclusivamente de fuentes de información indexadas en bases de datos específicas como Scopus y Web of Science, lo cual puede restringir la cobertura temática y geográfica de la producción científica considerada. Publicaciones no indexadas, literatura gris, estudios locales o trabajos publicados en otros idiomas sin traducción disponible podrían no ser incluidos, limitando así la representatividad total del panorama investigativo.

Asimismo, la estrategia de búsqueda basada en términos clave puede introducir sesgos en la recolección de datos, ya que la selección de palabras influye directamente en los resultados recuperados, y podrían presentarse duplicidades, omisiones o problemas de clasificación por errores en los metadatos de las bases de datos. Por otro lado, se priorizará el análisis de documentos en inglés y español, lo cual excluye literatura potencialmente valiosa en otros idiomas.

Desde una perspectiva metodológica, es importante señalar que el análisis bibliométrico se enfoca en indicadores cuantitativos como volumen de publicaciones, frecuencia de palabras clave y relaciones entre autores o instituciones, sin evaluar de forma directa la calidad metodológica, el rigor experimental o el impacto científico de

cada documento. Por tanto, los resultados deben interpretarse como tendencias generales de producción y colaboración científica, y no como juicios de valor sobre la calidad de los estudios individuales.

También debe considerarse que este estudio se delimita al periodo 2004–2024, lo cual implica que investigaciones relevantes realizadas antes de este intervalo no serán analizadas. Además, debido a la constante actualización de las bases de datos, estudios muy recientes o en proceso de publicación podrían no ser capturados por las herramientas utilizadas.

Finalmente, el uso de software especializado como Bibliometrix (R) y VOSviewer puede presentar limitaciones técnicas relacionadas con la calidad de los datos exportados, la correcta normalización de autores e instituciones y la interpretación adecuada de los mapas de coocurrencias o redes de colaboración.

#### **1.10. Declaración de las variables (Operacionalización)**

En el marco de esta investigación, se definió un conjunto de variables que permiten operacionalizar los componentes centrales del análisis bibliométrico, en concordancia con los objetivos específicos y las preguntas de investigación planteadas. La selección de estas variables responde a criterios metodológicos ampliamente utilizados en estudios bibliométricos y de cienciometría, con el fin de garantizar la validez, reproducibilidad y coherencia del análisis, ver Tabla 1.

Las variables se agruparon en dos categorías principales: variables dependientes, que reflejan las dinámicas observadas en la producción científica (frecuencia, evolución temporal, actores clave, parámetros evaluados y vacíos temáticos); y variables independientes, relacionadas con los enfoques tecnológicos, biológicos y metodológicos empleados en el tratamiento de aguas residuales provenientes de curtiembres mediante fitorremediación, ficorremediación y micorremediación.

Cada variable fue definida conceptualmente y traducida a una definición operacional que especifica los criterios de medición, los indicadores utilizados y los instrumentos de recolección correspondientes. Para ello, se emplearán herramientas especializadas como Bibliometrix (R) y VOSviewer, así como procedimientos de análisis de contenido de tipo cualitativo para la codificación manual de tecnologías, especies vegetales y parámetros técnicos.

En particular, variables complejas como tecnologías de fitorremediación fueron desagregadas en subcategorías con el propósito de aumentar la especificidad y profundidad del análisis. Se identifican así distintas estrategias, tales como humedales construidos, biofiltros vegetales, fitobalsas flotantes y sistemas fitoextractores, lo que permitirá distinguir patrones de aplicación y frecuencia de uso en diferentes contextos geográficos y temporales.

Las variables producción científica, evolución temporal, actores principales y redes de colaboración permiten cumplir con el objetivo de identificar a los países, autores e instituciones con mayor relevancia en el ámbito de estudio, así como comprender la distribución y dinámica del conocimiento producido durante el periodo 2004–2024.

A través de las variables palabras clave, tendencias de investigación y vacíos de conocimiento, se analizan las coocurrencias temáticas, las metodologías más empleadas y las áreas emergentes o insuficientemente exploradas, cumpliendo con los objetivos orientados a identificar líneas temáticas predominantes y oportunidades de desarrollo científico.

Finalmente, las variables tecnologías de fitorremediación, especies vegetales utilizadas y parámetros evaluados aportan al entendimiento técnico del campo de estudio, facilitando el análisis de la aplicabilidad, eficiencia y sostenibilidad de las técnicas biotecnológicas utilizadas en el tratamiento de efluentes de curtiembres.

Tabla 1. Variables del estudio bibliométrico

Variable	Tipo de variable	Definición conceptual	Definición operacional	Indicador	Instrumento/ Técnica de recolección
Producción científica	Dependiente	Volumen de investigaciones publicadas sobre fitorremediación, fitorremediación y micorremediación aplicadas a efluentes de curtiembres.	Número total de publicaciones indexadas en Scopus, WoS y Google Scholar entre 2004 y 2024, clasificadas por tipo de documento y año.	Conteo anual de publicaciones.	Extracción desde bases de datos y análisis de frecuencia.
Evolución temporal	Dependiente	Variación cronológica en la producción científica.	Distribución temporal de publicaciones segmentadas por quinquenios intervalos anuales. Visualización mediante gráficos de líneas y curvas de crecimiento.	Tasa de crecimiento por periodo; distribución por año.	Análisis temporal con Bibliometrix.
Actores principales	Dependiente	Principales productores de conocimiento en el área (autores, instituciones, países).	Ranking de autores, instituciones y países por número de publicaciones, citas e índice de colaboración. Separación clara entre cada dimensión.	Listado de autores, instituciones y países con mayor producción.	Análisis de productividad y citación con VOSviewer y Bibliometrix.
Redes de colaboración	Dependiente	Vínculos de coautoría o afiliación entre actores del campo científico.	Mapas de coautoría entre autores e instituciones, generados a partir de datos de afiliación o co-firmas en publicaciones.	Nodos y conexiones en mapas de red.	Análisis de redes bibliométricas (VOSviewer).
Tecnologías de fitorremediación	Independiente	Conjunto de métodos y sistemas usados en estudios de remediación (e.g., humedales, biofiltros, fitoextractores).	Clasificación detallada de tecnologías mencionadas en los estudios revisados. Desglose por tipo de sistema (humedales, biofiltros, flotantes, etc.).	Frecuencia y diversidad tecnológica.	Codificación manual en revisión de contenido.
Especies vegetales utilizadas	Independiente	Plantas usadas para el tratamiento de efluentes curtidora, agrupadas por función ecológica.	Identificación y categorización de especies (arbustivas, acuáticas, macrófitas) empleadas en los estudios revisados.	Número de especies por categoría funcional.	Análisis de contenido temático.

<b>Variable</b>	<b>Tipo de variable</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Definición operacional</b>	<b>Indicador</b>	<b>Instrumento/ Técnica de recolección</b>
Parámetros evaluados	Dependiente	Indicadores de eficiencia en estudios de remediación (físico-químicos o biológicos).	Registro de parámetros como Cr, DQO, DBO, SST, pH, evaluados en los estudios. Identificación de técnicas de medición (e.g., espectrofotometría, ICP-MS, etc.).	Frecuencia de evaluación por parámetro.	Extracción manual desde artículos.
Tendencias de investigación	Dependiente	Temas predominantes, líneas emergentes y evolución temática en el campo.	Análisis de coocurrencia de palabras clave, clustering temático y evolución de términos a lo largo del tiempo. Uso de algoritmos de agrupamiento (e.g., Louvain, K-means).	Tópicos emergentes y su crecimiento relativo.	Software Bibliometrix y VOSviewer.
Vacíos de conocimiento	Dependiente	Áreas subrepresentadas o poco estudiadas en la literatura sobre fitorremediación aplicada a curtiembres.	Identificación de temáticas con menos de 3 publicaciones en 20 años o sin publicaciones recientes (últimos 5 años), considerando áreas geográficas o metodológicas.	Temas con baja densidad de publicaciones.	Análisis de frecuencia y ausencia temática.

## **CAPÍTULO II: Marco Teórico Referencial**

### **2.1. Antecedentes Referenciales**

#### **2.1.1. Antecedentes Nacionales**

Durante el periodo 2019–2025, se han desarrollado diversas investigaciones en América Latina orientadas al tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria curtidora, una de las actividades con mayor carga contaminante en la región. Estos estudios, mayoritariamente difundidos a través de la base de datos SciELO, reflejan un interés creciente por el desarrollo de soluciones sostenibles que integren procesos biológicos, físico-químicos y tecnológicos adaptados a las condiciones socioambientales del contexto regional.

En este sentido, se destacan investigaciones recientes como la remoción de cromo (VI) mediante biomasa vegetal en reactores biológicos secuenciales (Camacllanqui-Huamanlazo, 2025), la bioadsorción con macrófitas como *Pistia stratiotes* (Medina et al., 2024), y el empleo de biopolímeros para el tratamiento de efluentes curtidores (Basurto-Flores & Medina-Guerrero, 2023). Otras tecnologías innovadoras evaluadas incluyen humedales artificiales, cavitación hidrodinámica, y oxidación avanzada con ozono y catalizadores metálicos.

Sin embargo, en el caso particular de Ecuador, la producción científica indexada en bases de datos como SciELO es limitada. Hasta la fecha, solo se ha identificado un artículo directamente relacionado con el tratamiento de aguas residuales de curtiembres en esta base. La mayor parte de los estudios nacionales sobre esta problemática se encuentra dispersa en literatura gris, especialmente en tesis de pregrado y posgrado elaboradas en universidades ecuatorianas como la Universidad Central del Ecuador, la Universidad de Cuenca, la Escuela Politécnica Nacional y la Universidad Técnica de Ambato, entre otras. Estos trabajos, aunque valiosos por su

componente aplicado, carecen en muchos casos de visibilidad y validación académica internacional.

Adicionalmente, otras fuentes de divulgación científica regional, como el repositorio Latindex, no contienen registros adicionales, pero en su mayoría con enfoques limitados al análisis químico básico o diagnóstico ambiental. Esta situación evidencia la necesidad de fortalecer la producción científica nacional en el área de tecnologías emergentes para el tratamiento de efluentes industriales.

### **2.1.2. Antecedentes Internacionales**

A nivel internacional, los enfoques basados en fitorremediación, ficorremediación y micorremediación han emergido como alternativas sostenibles para el tratamiento de aguas residuales industriales, incluyendo aquellas provenientes de la industria del curtido. Estas metodologías se distinguen por su carácter ecoamigable y su capacidad para remover contaminantes orgánicos e inorgánicos mediante el uso de organismos vivos como plantas, microalgas y hongos, respectivamente (Ajayan et al, 2015).

Estudios recientes destacan mecanismos como la rizorremediación y las interacciones planta-microorganismo como herramientas clave para mejorar la absorción y transformación de metales pesados en medios contaminados. No obstante, su implementación enfrenta limitaciones como la baja biodisponibilidad de algunos contaminantes y la tolerancia de las especies vegetales a ambientes tóxicos. Para superar estas barreras, se han propuesto estrategias como la ingeniería genética y el uso de consorcios microbianos que potencian la actividad de las plantas (Sharma et al., 2021; Yuliasni et al., 2023).

La ficorremediación, por su parte, emplea microalgas para eliminar nutrientes, metales pesados y otros contaminantes presentes en aguas residuales. Este enfoque no solo permite la depuración del efluente, sino que contribuye al secuestro de

carbono y a la obtención de subproductos valiosos como biocombustibles (Koul et al., 2021; Kaloudas et al., 2021; Priyadharshini et al., 2021). Se han evaluado sistemas de estanques abiertos, especialmente viables en países en desarrollo, por su bajo costo operativo; sin embargo, los fotobiorreactores, aunque más eficientes, representan una opción costosa y de mayor complejidad técnica para escalamiento industrial (Rambabu et al., 2022). Las líneas futuras de investigación se orientan al desarrollo de cepas hiperacumuladoras mediante herramientas biotecnológicas para mejorar la selectividad y la capacidad de remoción de contaminantes (Danouche et al., 2021).

La micorremediación, si bien menos representada en la literatura consultada, ha sido reconocida por su eficacia en la degradación de compuestos orgánicos complejos y la inmovilización de metales pesados mediante el uso de hongos. Estos organismos fúngicos pueden desarrollar mecanismos enzimáticos altamente especializados, capaces de transformar contaminantes recalcitrantes en compuestos menos tóxicos o asimilables (Mahboob, 2022).

En países con industrias del cuero desarrolladas, se han incorporado tecnologías biológicas, físico-químicas e híbridas que permiten una remoción eficaz de contaminantes como metales pesados, nutrientes y compuestos orgánicos recalcitrantes, promoviendo además la reutilización de subproductos; por ejemplo, Ozonización combinada con ficorremediación es una de las estrategias más destacadas consiste en la combinación de ozonización con ficorremediación. Esta metodología ha demostrado eficiencias superiores al 84 % en la reducción de la DQO, 97 % en la remoción de cromo y eliminación completa de fosfatos, al mismo tiempo que permite la producción de biomasa útil, lo cual mejora su viabilidad económica (Saranya & Shanthakumar, 2020).

Procesos avanzados de oxidación (AOPs) y cavitación, ambos procesos avanzados de oxidación, como el uso de cavitación acústica e hidrodinámica, permiten la generación de radicales hidroxilos capaces de degradar contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos. Estas tecnologías, especialmente cuando se combinan, han demostrado altos niveles de eficiencia en la descomposición de compuestos persistentes, con un menor impacto ambiental (Korpe & Rao, 2021).

Bioaumentación con bacterias resistentes al cromo es otra innovación biotecnológica relevante es la aplicación de cepas bacterianas resistentes al cromo, como *Bacillus sp.* y *Enterobacter aerogenes*, en procesos de bioaumentación. Estos microorganismos han alcanzado eficiencias de hasta el 96 % en la remoción de Cr(VI), especialmente cuando se incrementa la concentración celular (Elkarrach et al., 2020).

Biorremediación con hongos en biorreactores tales como *Penicillium citrinum*, en sistemas de columna de burbujeo ha emergido como una alternativa rentable para curtiembres de pequeña escala. Este enfoque ha demostrado efectividad en la reducción de cromo y otros contaminantes mediante mecanismos enzimáticos fúngicos (Zapana-Huarache et al., 2020).

Un avance tecnológico de vanguardia incluye el uso de procesos fotocatalíticos (UV/TiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) integrados con adsorción, logrando una remoción total del 99.5 % de cromo. La incorporación de modelos predictivos basados en redes neuronales artificiales y algoritmos genéticos (ANN-GA) ha optimizado significativamente la eficiencia operativa (Yu et al., 2024).

Finalmente, la aplicación de consorcios de microalgas ha mostrado resultados prometedores en la reducción de DQO, DBO y metales pesados, posicionándose como una alternativa ecológica y autosustentable, especialmente útil en contextos

tropicales y subtropicales (De Cassia Campos Pena et al., 2019; Sarker et al., 2023). El tratamiento de efluentes de curtiembres a nivel mundial presenta una amplia diversidad de enfoques metodológicos. En países con infraestructura tecnológica consolidada, los procesos avanzados de oxidación, como la cavitación y la ozonización, se aplican frecuentemente en combinación con procesos biológicos, especialmente ficorremediación. Estos métodos han demostrado alta eficiencia en la degradación de contaminantes recalcitrantes y permiten la valorización de subproductos (Macías-Quiroga et al., 2021).

En regiones como Arequipa (Perú), se han implementado métodos de biorremediación utilizando bacterias y hongos autóctonos, así como sistemas de fitorremediación con microalgas y especies vegetales locales. Estas soluciones, al aprovechar recursos endógenos, resultan sostenibles y económicamente viables para contextos en vías de desarrollo (Morales-Paredes et al., 2025).

Tecnologías basadas en humedales artificiales han sido utilizadas para la remoción de cromo y otros contaminantes, integrando plantas y microorganismos capaces de transformar o inmovilizar compuestos tóxicos. Estos sistemas destacan por su bajo costo y compatibilidad con los objetivos de desarrollo sostenible (Younas et al., 2021).

En países asiáticos y europeos, los biorreactores con membranas —incluyendo configuraciones híbridas y modificadas— representan una tecnología avanzada en el tratamiento de efluentes curtidores. Estos sistemas permiten una alta eficiencia de remoción y reutilización del agua tratada, aunque su aplicación requiere inversiones elevadas (Moktadir et al., 2023).

En países en desarrollo, la digestión anaerobia ha sido promovida como parte de un modelo de bioeconomía circular. Aunque este método permite recuperar productos

como biogás y biofertilizantes, su eficiencia puede verse limitada por la toxicidad inherente del efluente curtidor (Mpopfu et al., 2021).

Avances recientes incluyen el desarrollo de sistemas integrados que combinan procesos como la floculación, oxidación fotocatalítica y filtración por membranas. Algunos de estos incorporan modelos predictivos basados en inteligencia artificial, como redes neuronales y algoritmos genéticos, para optimizar la operación del sistema (Kumar et al., 2023).

## **2.2. Marco Conceptual**

El presente marco conceptual establece los fundamentos clave que permiten comprender las categorías centrales de la investigación.

### **2.2.1. Proceso de curtiembre**

La industria del curtido de cuero comprende un conjunto de procesos fisicoquímicos diseñados para transformar pieles crudas en un material duradero, estable y resistente a la degradación biológica. Este proceso, conocido como curtido, implica el uso intensivo de productos químicos en distintas etapas, cada una de las cuales genera efluentes líquidos con características contaminantes particulares. La comprensión detallada de las etapas del proceso y la naturaleza del efluente resultante es esencial para implementar estrategias de manejo ambiental eficaces.

El proceso de curtido se divide, de forma general, en tres fases principales:

a) Operaciones de ribera (beamhouse): Esta etapa inicial incluye el remojo, el pelambre y el desencalado de las pieles. Durante estas operaciones se emplean compuestos alcalinos como la cal (CaO) y sulfuros, lo que genera efluentes con altos valores de demanda química de oxígeno (DQO), elevado pH y fuerte carga orgánica (Minozzo et al., 2024).

b) Curtido propiamente dicho: Consiste en la estabilización de las fibras de colágeno mediante el uso de agentes curtientes, siendo las sales de cromo (principalmente Cr(III)) los más utilizados en la industria tradicional. Los efluentes generados en esta fase presentan altas concentraciones de cromo, lo que representa un riesgo ambiental significativo debido a su toxicidad y persistencia (Ignatowicz & Dziadel, 2024).

c) Post-curtido (retanado, teñido y engrase): En esta etapa se utilizan colorantes, agentes reengrasantes y otros productos químicos que incrementan la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) y DQO. El efluente de esta fase es menos estandarizado y altamente variable en composición, lo que dificulta su tratamiento convencional (Hansen et al., 2020).

Los efluentes generados a lo largo del proceso de curtido presentan una composición compleja y diversa, entre cuyos principales contaminantes se destacan:

La contaminación por cromo derivada principalmente de la fase de curtido, puede alcanzar concentraciones de 2,81 a 3,11 g/dm<sup>3</sup>, representando una amenaza ambiental directa debido a su potencial bioacumulativo y su interferencia con procesos biológicos (Bhardwaj et al., 2023).

El uso de numerosos productos químicos en las distintas etapas del proceso contribuye a una baja biodegradabilidad de las aguas residuales, elevando significativamente la carga contaminante y altos niveles de DQO y SDT (Hansen et al., 2021).

Presencia de sales e inestabilidad del pH: Las etapas alcalinas, como el desencalado, generan efluentes con altos niveles de sales (cloruros, sulfatos) y amplias variaciones de pH, lo que afecta negativamente la eficiencia de los tratamientos biológicos (Klein et al., 2021).

La mezcla de residuos de origen proteico, grasas y productos químicos limita la actividad microbiana y dificulta los procesos de depuración convencionales, especialmente en tratamientos biológicos aeróbicos (Minozzo et al., 2024).

### **2.2.2. Contaminantes comunes en efluentes de curtiembres**

Las aguas residuales generadas por la industria del curtido representan una fuente significativa de contaminación ambiental debido a su compleja composición química, la cual incluye metales pesados, compuestos orgánicos recalcitrantes y altas concentraciones de sales y sólidos disueltos (Tejada-Meza et al., 2023). A continuación, se describen los principales contaminantes identificados en la literatura científica reciente:

#### **Metales pesados**

El cromo (Cr) es el metal pesado más prevalente en los efluentes de curtiembres, presente principalmente en las formas Cr(III) y Cr(VI). Esta última es altamente tóxica y representa un riesgo severo tanto para la salud humana como para los ecosistemas acuáticos y terrestres (Nur-E-Alam et al., 2020).

Además del cromo, también se detectan concentraciones significativas de plomo (Pb) y zinc (Zn), los cuales contribuyen al perfil tóxico global del efluente curtidor y pueden bioacumularse en organismos acuáticos (Dey et al., 2024).

#### **Compuestos orgánicos recalcitrantes**

Los efluentes curtidores contienen niveles elevados de compuestos fenólicos, tales como fenol, bisfenol F, p-cresol y clorocresol, cuyas concentraciones suelen superar los límites permisibles para descargas industriales y presentan una elevada persistencia ambiental (Yuan et al., 2021). Otros contaminantes orgánicos identificados incluyen ácido benzoico, benzeneacetamida, resorcinol y ftalato de dibutilo, todos ellos relacionados con

efectos fitotóxicos, citotóxicos y genotóxicos, según estudios realizados con bioindicadores como *Vigna radiata* y *Allium cepa* (Haq et al., 2019).

### **Sales y sólidos disueltos**

El contenido de sólidos disueltos totales (TDS) y sólidos suspendidos totales (TSS) en las aguas residuales de curtiembre es considerablemente alto, lo que evidencia una elevada carga contaminante (Sawalha et al., 2019). Asimismo, los iones cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) y sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) están comúnmente presentes en concentraciones elevadas, incrementando la salinidad y la corrosividad del efluente, lo que dificulta su reutilización y tratamiento posterior (Singh et al., 2024; Mustapha et al., 2019).

### **2.2.3. Marco normativo ambiental relevante**

Las aguas residuales generadas por la industria del curtido contienen una diversidad de contaminantes, entre ellos metales pesados como el cromo, compuestos orgánicos recalcitrantes y sales inorgánicas. Debido a su elevada toxicidad y persistencia, estos efluentes representan una amenaza significativa para los ecosistemas acuáticos y la salud pública. En este contexto, los estándares regulatorios nacionales y las directrices internacionales son fundamentales para controlar y reducir los impactos asociados a su descarga.

### **Límites de descarga de efluentes (contexto nacional e internacional)**

Los países establecen normativas específicas para regular las descargas de aguas residuales industriales. Por ejemplo, en Perú, las aguas residuales de curtiembre deben cumplir con los límites nacionales para parámetros como la demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST) y cromo antes de ser vertidas en cuerpos de agua superficiales (Zapana et al., 2020). De manera similar, en Venezuela, se ha evaluado el uso de humedales

construidos como método de tratamiento para alcanzar los estándares nacionales de calidad del agua (Ramírez et al., 2019).

A nivel internacional, organizaciones como la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) han emitido lineamientos que promueven el uso de tecnologías avanzadas para garantizar que las descargas industriales, incluyendo las de curtiembres, se mantengan dentro de límites permisibles (Zhao & Chen, 2019; Kumar et al., 2023a).

### **Directrices internacionales y parámetros críticos**

Uno de los contaminantes más regulados en los efluentes curtidores es el cromo, cuyo contenido debe ser reducido significativamente para cumplir con los estándares de vertido. Se han documentado tecnologías como los humedales construidos que permiten remover eficazmente este metal hasta alcanzar los límites aceptables establecidos tanto por normativas nacionales como internacionales (García-Valero et al., 2020).

Además del cromo, los efluentes presentan elevadas concentraciones de DQO, sólidos disueltos totales (SDT) y otros contaminantes que limitan su biodegradabilidad. En este contexto, se recomiendan tecnologías como sistemas de membranas integradas y enfoques de cero vertidos para cumplir con normativas ambientales más estrictas y minimizar el impacto ambiental (Kumar et al., 2022).

### **Parámetros ambientales de control para descargas en la industria de curtiembre**

La industria de curtiembre, clasificada bajo el código CIU 1910 (*Curtido y adobo de pieles*), genera efluentes líquidos altamente contaminantes que requieren un monitoreo riguroso de sus características fisicoquímicas para cumplir con las normativas ambientales ecuatorianas. En este contexto, la Norma de Calidad

Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua (Anexo 1, Acuerdo Ministerial 097-A, reformado por el Acuerdo Nro. 254-2019), establece una serie de parámetros de control obligatorios que deben ser evaluados para asegurar una gestión ambientalmente responsable de los vertimientos industriales.

Los parámetros aplicables al sector de curtiembres incluyen tanto contaminantes orgánicos como inorgánicos, así como otros indicadores relacionados con la carga contaminante del efluente. Estos deben ser analizados mediante muestras compuestas representativas del caudal generado durante el proceso productivo (TULSMA, 2017).

A continuación, en la Tabla 2, se detallan los parámetros exigidos para el monitoreo ambiental de efluentes de curtiembre:

Tabla 2. Límites descarga líquidos al alcantarillado aguas residuales industriales, (TULSMA, 2017).

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo
Aceites y grasas	Solubles en hexano	mg/l	50,0
Aluminio	Al	mg/l	5,0
Arsénico total	As	mg/l	0,5
Cadmio	Cd	mg/l	0,02
Cloro Activo	Cl	mg/l	0,5
Cobre	Cu	mg/l	1,0
Compuestos fenólicos	Expresado como fenol	mg/l	0,5
Compuestos organoclorados	Organoclorados totales	mg/l	0,1
Cromo Hexavalente	Cr <sup>6+</sup>	mg/l	0,5
Demanda Bioquímica de Oxígeno	de DBO <sub>5</sub>	mg/l	250,0
Demanda Química de Oxígeno	de DQO	mg/l	1000,0
Fósforo Total	P	mg/l	15,0
Hierro total	Fe	mg/l	25,0
Manganeso total	Mn	mg/l	10,0
Materia flotante	Visible		Ausencia
Mercurio (total)	Hg	mg/l	0,01
Níquel	Ni	mg/l	2,0
Nitrógeno Total Kjeldahl	N	mg/l	60,0
Plomo	Pb	mg/l	0,5

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo
Potencial de hidrógeno	pH		6–9
Selenio	Se	mg/l	0,5
Sólidos Sedimentables	S	ml/l	20,0
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/l	220,0
Sólidos totales	ST	mg/l	1600,0
Sulfatos	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/l	400,0
Sulfuros	S	mg/l	1,0
Temperatura	°C	°C	<45,0
Tensioactivos	Activas al azul de metileno	mg/l	2,0

#### 2.2.4. Definiciones básicas en procesos de descontaminación de aguas residuales

**Ficorremediación** es el proceso biotecnológico mediante el cual microalgas o macroalgas son utilizadas para remover nutrientes, metales pesados y otros contaminantes de aguas residuales a través de mecanismos como absorción, acumulación y transformación bioquímica (Tiwari et al, 2023).

**Micorremediación** es el uso de hongos (principalmente filamentosos) para degradar, transformar o inmovilizar contaminantes presentes en suelos y aguas, gracias a su capacidad enzimática y su alta tolerancia a ambientes tóxicos (Siddiquee et al., 2022).

**Biosorción** (*biosorption*) es un proceso pasivo mediante el cual materiales biológicos como algas, hongos o bacterias muertas adsorben metales pesados u otros contaminantes presentes en soluciones acuosas (Mustafá, 2021).

**Eliminación de nutrientes** (*nutrient removal*) hace referencia a la remoción de compuestos como nitrógeno y fósforo en aguas residuales, con el fin de prevenir la eutrofización y mejorar la calidad del efluente tratado (Tchobanoglous et al., 2014).

**Humedales construidos** (*constructed wetlands*) son sistemas artificiales diseñados para imitar las funciones ecológicas de los humedales naturales, permitiendo el

tratamiento de aguas residuales a través de procesos físicos, químicos y biológicos (Vymazal, 2011).

La biotecnología ambiental (*environmental biotechnology*) es una rama de la biotecnología que se enfoca en la aplicación de sistemas biológicos y tecnológicos para solucionar problemas ambientales como la contaminación y la gestión de residuos (Gavrilescu, 2004).

**Remediación** (*remediation*) consiste en el proceso de limpieza o descontaminación de medios ambientales afectados por sustancias peligrosas, mediante métodos físicos, químicos o biológicos (EPA, 2020).

**Bioacumulación** (*bioaccumulation*) describe el fenómeno por el cual los organismos vivos acumulan sustancias químicas tóxicas, como metales pesados, en concentraciones superiores a las del medio circundante (Newman, 2015).

**Estrés oxidativo** (*oxidative stress*) ocurre cuando existe un desequilibrio entre la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y la capacidad antioxidante del organismo para neutralizarlas, lo que puede provocar daño celular (Sies, 2020).

**Toxicidad** (*toxicity*) se define como el grado en que una sustancia puede causar daño a un organismo vivo, dependiendo de la dosis y el tiempo de exposición (Casarett & Doull, 2008).

### 2.2.5. Tratamiento de aguas residuales industriales

El tratamiento de efluentes curtidores incluye métodos químicos, físicos, avanzados y biológicos. Entre ellos, los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) —como la ozonización o la cavitación— se destacan por generar radicales hidroxilos ( $\bullet\text{OH}$ ) que degradan compuestos orgánicos complejos con alta eficiencia (Saravanan et al, 2022).

Además, los sistemas integrados de membranas, la fotocatalisis, la floculación, y los procesos secuenciales como electrocoagulación y fotólisis UV ofrecen alternativas tecnológicamente viables para mejorar la calidad del efluente tratado. No obstante, muchos de estos sistemas son costosos o generan residuos secundarios como lodos, lo cual limita su implementación en regiones de bajos recursos. Por ello, han ganado atención las estrategias basadas en principios de sostenibilidad, bajo costo y recuperación de recursos (Kumar et al., 2024).

#### **2.2.6. Fitorremediación**

Entre los métodos biológicos, la fitorremediación es una técnica ecológica y rentable que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar, transformar y degradar contaminantes presentes en el suelo, sedimentos y agua (Yaashikaa et al., 2022). Este método es especialmente eficaz en el tratamiento de aguas residuales contaminadas (Charvalas et al., 2021) con compuestos orgánicos e inorgánicos, incluyendo metales pesados, productos farmacéuticos y otros micropoluentes (Autade et al., 2021). El proceso de fitorremediación incluye varios mecanismos como la fitoextracción, fitodegradación, fitoacumulación, fitovolatilización y rizofiltración, los cuales permiten a las plantas absorber y detoxificar los contaminantes (Rai et al., 2021).

#### **2.2.7. Componentes del proceso de fitorremediación**

La fitorremediación es una tecnología ambientalmente sustentable que emplea plantas para remover, acumular, transformar y volatilizar contaminantes presentes en suelos y cuerpos de agua (Thakur et al., 2023). Estos procesos están mediados por una serie de mecanismos fisiológicos y bioquímicos que permiten a las especies vegetales interactuar con los contaminantes, reducir su toxicidad y contribuir a la recuperación de los ecosistemas afectados.

### **2.2.8. Absorción y acumulación**

Las plantas absorben contaminantes, como metales pesados y compuestos orgánicos, principalmente a través del sistema radicular. Este proceso está regulado por proteínas transportadoras que permiten la translocación de los contaminantes desde las raíces hacia otras partes de la planta, como tallos y hojas, donde son almacenados (Pasricha et al., 2022).

En particular, ciertas especies vegetales denominadas hiperacumuladoras son capaces de tolerar y almacenar concentraciones excepcionalmente altas de metales en sus tejidos, especialmente en las partes aéreas. Este fenómeno ocurre mediante mecanismos como la unión a la pared celular, la quelación intracelular y el almacenamiento en vacuolas (He et al., 2020).

### **2.2.9. Transformación**

Una vez absorbidos, los contaminantes pueden ser transformados bioquímicamente dentro de los tejidos vegetales. Estas transformaciones incluyen reacciones de reducción, metilación y glucosilación, que permiten detoxificar compuestos tóxicos como antibióticos, metales o xenobióticos, y facilitar su compartimentalización (Wang et al., 2024a).

Adicionalmente, las plantas activan mecanismos de defensa enzimática (como las peroxidasas, catalasas y glutatión transferasas) y no enzimática (por ejemplo, antioxidantes), que mitigan el estrés oxidativo generado por la presencia de contaminantes y contribuyen a su biotransformación (Zheng et al., 2021).

.  
.  
..

### **2.2.10. Volatilización**

Algunas especies vegetales pueden convertir determinados contaminantes en formas volátiles menos tóxicas y liberarlas al ambiente en estado gaseoso. Este proceso, conocido como fitovolatilización, representa una vía de remoción útil para compuestos como mercurio, selenio y algunos solventes orgánicos. Aunque menos documentado que otros mecanismos, forma parte integral de las estrategias de fitorremediación en sistemas complejos (Bortoloti & Baron, 2022).

### **2.2.11. Interacción con microorganismos**

Los microorganismos asociados a las plantas, como los endófitos y las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), desempeñan un papel fundamental en la mejora de la eficiencia del proceso de fitorremediación. Estas bacterias pueden incrementar la absorción de metales y la tolerancia al estrés mediante la secreción de agentes quelantes, la producción de hormonas de crecimiento y la modificación de la disponibilidad de nutrientes y contaminantes en la rizósfera (Manoj et al., 2019).

### **2.2.12. Procesos durante la fitorremediación**

La efectividad de la fitorremediación radica en la diversidad de procesos que las plantas pueden activar para remover o transformar los contaminantes, los cuales se clasifican de la siguiente manera:

#### **Fitoextracción**

Las plantas absorben los contaminantes presentes en el suelo o el agua a través de sus raíces, translocándolos hacia los tejidos aéreos (tallos y hojas). Posteriormente, estas partes pueden ser cosechadas y tratadas de manera segura. Este mecanismo es altamente utilizado para la remoción de metales pesados como el cromo y el cadmio (Irshad et al., 2021).

#### **Fitoestabilización**

En este proceso, las plantas inmovilizan los contaminantes en la matriz del suelo mediante mecanismos físicos y químicos, reduciendo su movilidad y biodisponibilidad. De esta forma, se previene la diseminación del contaminante hacia cuerpos de agua subterráneos o su incorporación en la cadena trófica (Nguyen et al., 2023).

### **Fitovolatilización**

Consiste en la absorción de contaminantes por parte de la planta y su posterior liberación a la atmósfera en forma gaseosa menos tóxica, luego de haber sido transformados metabólicamente en compuestos volátiles. Este mecanismo es observado particularmente en contaminantes como el mercurio, el selenio y algunos compuestos orgánicos (Nguyen et al., 2023).

### **Rizodegradación (o fitorrizodegradación)**

Las raíces de las plantas liberan compuestos exudados que estimulan la actividad de microorganismos en la rizósfera. Esta interacción favorece la biodegradación de contaminantes orgánicos complejos, como los hidrocarburos y pesticidas, transformándolos en productos menos tóxicos o inocuos (Meki et al., 2022).

### **2.2.13. Especies utilizadas en fitorremediación de efluentes**

Entre las especies más estudiadas y aplicadas en este contexto se destacan las macrófitas *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua), *Typha domingensis* y *Vetiveria zizanioides* (pasto vetiver), reconocidas por su adaptabilidad y efectividad en diferentes sistemas de tratamiento.

Asimismo, plantas acuáticas flotantes como *Salvinia molesta* y *Pistia stratiotes* han demostrado una notable capacidad de absorción y bioacumulación de contaminantes, lo que se atribuye a su rápida tasa de crecimiento, elevada tolerancia a condiciones

adversas y eficiencia en la captación de metales y nutrientes (Mustafa & Hayder, 2020).

### ***Eichhornia crassipes***

Esta macrófita flotante ha sido objeto de múltiples investigaciones por su notable capacidad para eliminar nutrientes como el nitrógeno amoniacal, fosfatos, y contaminantes orgánicos provenientes de aguas residuales textiles e industriales (Perdomo et al., 2019; Ting et al., 2020; Adelodun et al., 2021; Rasool et al., 2023; Intriago et al, 2024).

Adicionalmente, ha demostrado una alta capacidad de bioacumulación de metales pesados como cadmio (Cd), cromo (Cr) y plomo (Pb), lo que la convierte en una herramienta eficaz para el tratamiento de aguas contaminadas con metales (Kodituwakku & Yatawara, 2020).

Las condiciones óptimas para maximizar su eficiencia incluyen un pH cercano a 8.5 y un tiempo de retención hidráulico (HRT) de aproximadamente 8.5 días (Ting et al., 2020; Ntakiyiruta et al., 2020).

### ***Typha domingensis***

Si bien la evidencia específica para *Typha domingensis* es limitada en comparación con otras especies, estudios relacionados con su congénere *Typha angustifolia* han demostrado una capacidad relevante para remover nitratos, amonio y otros nutrientes presentes en lixiviados y aguas residuales (K.R.S & Yatawara, 2021). Por sus características fisiológicas y su adaptabilidad a ambientes anóxicos, esta planta emergente es frecuentemente utilizada en humedales construidos para el tratamiento terciario de aguas residuales.

### ***Vetiveria zizanioides (Chrysopogon zizanioides)***

El pasto vetiver ha sido reconocido por su notable capacidad para la remoción de metales pesados, especialmente cromo hexavalente (Cr(VI)), alcanzando remociones completas bajo condiciones ácidas controladas (Masinire et al., 2021). Además de su eficiencia en fitoextracción, esta especie es versátil en sistemas de fitoestabilización, lo que la hace adecuada para una amplia gama de aplicaciones en efluentes industriales.

#### **2.2.14. Aplicaciones de la fitorremediación en curtiembres**

Los humedales construidos, como aplicación directa de la fitorremediación, han demostrado eficacia en la eliminación de metales pesados, antibióticos y genes de resistencia. Su uso de macrófitas como *Eichhornia crassipes*, *Typha spp.* o *Vetiveria zizanioides* ha sido ampliamente documentado por su alta capacidad de adaptación y acumulación (McCorquodaleBauer et al., 2023; Dadebo et al., 2024).

Asimismo, se han incorporado microalgas como agentes de remediación por su habilidad de absorber metales y nutrientes mientras generan productos de valor añadido como biocombustibles o biopolímeros, lo cual permite una valoración de la biomasa residual (Devi et al., 2023).

Aunque la fitorremediación presenta múltiples ventajas —bajo costo, sostenibilidad, compatibilidad ecológica—, enfrenta desafíos como la biodisponibilidad limitada de los contaminantes, la resiliencia fisiológica de las especies vegetales, y la necesidad de mejorar la eficiencia mediante ingeniería genética o consorcios simbióticos (Kurade et al., 2021).

En este contexto, el desarrollo de modelos predictivos, el monitoreo de la respuesta vegetal ante micropoluentes emergentes y la integración de tecnologías complementarias (coagulación, floculación, fotocátalisis) constituyen líneas

estratégicas para incrementar el rendimiento del proceso y avanzar hacia una gestión circular de los recursos contaminados (Polińska et al., 2021).

### **2.2.15. Modelos teóricos de fitorremediación**

La fitorremediación constituye una tecnología verde que emplea plantas para remover contaminantes del medio ambiente, particularmente metales pesados en suelos y aguas residuales. Para comprender y optimizar este proceso, resulta esencial el uso de modelos teóricos y métodos de cuantificación de eficiencia y bioacumulación, los cuales permiten evaluar el comportamiento de las especies vegetales bajo distintas condiciones de contaminación. Los modelos empleados para describir el transporte y acumulación de metales en plantas pueden clasificarse en tres grandes enfoques:

**Modelos de aprendizaje automático (Machine Learning):** Estos modelos permiten predecir la eficiencia de extracción de metales considerando variables como las propiedades del suelo, las características del metal (por ejemplo, el radio iónico) y la familia vegetal involucrada. La inteligencia artificial ayuda a identificar factores críticos que influyen en la bioacumulación y el rendimiento del proceso (Shi et al., 2022).

**Modelos de proteínas transportadoras:** Se enfocan en los mecanismos de absorción, translocación y retención de metales pesados a través de proteínas específicas presentes en las membranas celulares. Comprender estos mecanismos es clave para mejorar la eficiencia del proceso de fitoextracción (Yang et al., 2021).

**Modelos bioquímicos y moleculares:** Integran los procesos fisiológicos, moleculares y simbióticos involucrados en la captación de metales, destacando el papel de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), micorrizas y herramientas de ingeniería genética para potenciar la capacidad remediadora de las plantas (Raza et al., 2020).

### **2.2.16. Cuantificación de la eficiencia y bioacumulación**

La eficacia de la fitorremediación se evalúa a través de diversos índices cuantitativos, entre los que destacan:

**Índice de bioconcentración (BCF):** Relación entre la concentración de metal en el tejido vegetal y en el sustrato.

**Índice de bioacumulación (BAF):** Evaluación de la capacidad de acumulación total de metales en la biomasa vegetal.

**Índice de translocación (TF):** Relación entre la concentración del metal en la parte aérea y la raíz, útil para determinar la eficiencia del transporte interno (Liu et al., 2020; Elshamy et al., 2019).

**Estudios de remoción porcentual,** que miden la cantidad de metal removido por unidad de biomasa vegetal. Por ejemplo, especies como *Brassica juncea* y *Brassica napus* han demostrado una notable capacidad de bioacumulación en residuos como lodos de depuradora (Salinitro et al., 2021).

### **2.2.17. Concepto de bibliometría**

La bibliometría es un enfoque cuantitativo utilizado para el análisis de la producción científica. Esta disciplina, derivada de la cienciometría, se centra en el estudio estadístico de publicaciones académicas, citas, coautorías y palabras clave, con el fin de evaluar la productividad, el impacto y la evolución del conocimiento en una determinada área de investigación. Su aplicación permite identificar patrones de publicación, tendencias emergentes, vacíos temáticos y actores relevantes dentro del ecosistema científico.

### **2.2.18. Enfoque cuantitativo del análisis de la literatura científica**

El análisis bibliométrico permite cartografiar el estado del arte en un campo específico del conocimiento, mediante la identificación de palabras clave, la frecuencia de

citación y la evolución temporal de temas de investigación (Oliveira et al., 2019; Baidya & Saha, 2024). Esta técnica es especialmente útil para detectar lagunas temáticas, áreas emergentes y dinámicas de especialización, constituyéndose en una herramienta clave para la gestión de la investigación científica (Passas, 2024).

Asimismo, la bibliometría emplea métricas como el índice h, el número de citas y la producción por autor o institución para evaluar el desempeño científico. Estas métricas, en conjunto, permiten estimar de forma objetiva el impacto de artículos, autores, revistas y países dentro de una disciplina (Savadatti et al., 2025).

Uno de los principales aportes de la bibliometría radica en su capacidad para identificar actores clave del conocimiento, tales como autores altamente citados, universidades líderes, redes de colaboración científica y países con mayor producción en un área determinada (Prahani et al., 2024; Chan & Nurrosyidah, 2025).

Además, el análisis de co-ocurrencia de palabras clave y redes de coautoría permite visualizar los paisajes científicos mediante herramientas como VOSviewer, CiteSpace o Biblioshiny, las cuales revelan clústeres temáticos, núcleos de investigación y líneas de desarrollo emergente (Nasser et al., 2025).

### **Indicadores bibliométricos clave**

Los indicadores bibliométricos constituyen herramientas fundamentales para el análisis de la producción científica, ya que permiten cuantificar la productividad investigativa, evaluar patrones de colaboración y estimar el impacto de las publicaciones dentro de la comunidad académica. Su aplicación proporciona una base objetiva para la toma de decisiones en investigación, planificación científica y formulación de políticas públicas.

### **Productividad científica**

Este indicador se mide comúnmente a través del número total de publicaciones generadas por un autor, grupo de investigación, institución o país, así como por la cantidad de citas recibidas. Representa un parámetro básico del rendimiento científico y permite identificar las principales fuentes productoras de conocimiento en un campo específico (Docampo & Bessoule, 2019; Chogthu et al., 2025).

### **Colaboración internacional**

La colaboración científica entre países e instituciones se analiza principalmente mediante redes de coautoría, las cuales permiten visualizar el grado de interconectividad entre investigadores y regiones. Este tipo de análisis es útil para identificar nodos clave de cooperación y evaluar el alcance internacional de la producción científica (Velez-Estevez, 2022).

### **Análisis de citación y co-citación**

Los índices de citación, como el índice h, índice e o índice h5, se utilizan para estimar la productividad e impacto de un investigador en función del número de veces que sus publicaciones han sido citadas. Por su parte, el análisis de co-citación permite identificar relaciones temáticas entre publicaciones al analizar la frecuencia con la que dos documentos son citados conjuntamente, revelando así áreas emergentes de investigación (García-Villar & García-Santos, 2021).

### **Redes de coautoría y co-ocurrencia de palabras clave**

Estos indicadores estructurales permiten representar gráficamente las relaciones entre autores y el uso conjunto de términos clave en la literatura científica. Herramientas como VOSviewer y Biblioshiny son frecuentemente empleadas para construir mapas de ciencia que visualizan comunidades de investigación, tendencias temáticas y evolución del conocimiento (Radha & Arumugam, 2021).

### **Otros indicadores complementarios**

Entre los indicadores a nivel de revista destacan el factor de impacto (IF), el Eigenfactor Score y el Scimago Journal Rank (SJR), los cuales evalúan la visibilidad y calidad de las revistas científicas en función del número de citas que reciben sus artículos.

Asimismo, los altmetrics o métricas alternativas se enfocan en la presencia y difusión en medios digitales, contabilizando menciones en redes sociales, visualizaciones, descargas y uso en gestores de referencias, lo que ofrece una visión complementaria del alcance de las publicaciones (Singh, 2022).

## **2.3. Marco Teórico**

### **2.3.1. Principales corrientes teóricas en bibliometría**

La bibliometría es una disciplina que aplica métodos cuantitativos para el estudio de la producción, organización y diseminación del conocimiento científico. Esta área se sustenta en principios teóricos fundamentales que explican los patrones de crecimiento, productividad y distribución de la ciencia, y que han evolucionado para dar lugar a indicadores contemporáneos utilizados en la evaluación de la investigación académica.

- **Teoría del crecimiento exponencial de la ciencia (Price):**  
Propuesta por Derek J. de Solla Price, esta teoría plantea que la ciencia se desarrolla con un crecimiento exponencial, reflejado en la cantidad acumulada de publicaciones científicas a lo largo del tiempo. Esta idea ha sido esencial para comprender la expansión sistemática del conocimiento y establecer marcos temporales de análisis longitudinal (Mukherjee et al., 2022).
- **Ley de Bradford,** describe la dispersión de los artículos científicos sobre un mismo tema en distintas revistas. Establece que existe un núcleo de revistas que concentran la mayoría de las publicaciones relevantes, seguido por zonas

periféricas de menor productividad. Esta ley es útil para identificar fuentes prioritarias en una disciplina (Mukherjee et al., 2022).

- **Ley de Zipf**, es aplicada al análisis de frecuencia de palabras, esta ley señala que unas pocas palabras clave aparecen con alta frecuencia, mientras que muchas otras son utilizadas con poca recurrencia. En bibliometría, permite detectar la estructura semántica dominante de un campo mediante el análisis de términos y su co-ocurrencia (Hassan & Duarte, 2024).
- **Ley de Lotka**, establece que un pequeño grupo de autores produce la mayor parte de las publicaciones científicas, mientras que la mayoría de los investigadores contribuye con pocos trabajos. Este principio permite modelar la distribución de la productividad autoral y entender el peso relativo de los investigadores dentro de un dominio (Mukherjee et al., 2022).
- **SJR (SCImago Journal Rank)**, uno de los indicadores contemporáneos que evalúa la influencia científica de las revistas, ponderando tanto el número de citas como la calidad de las fuentes que las emiten. Su lógica se alinea con la Ley de Bradford al destacar el papel de las revistas núcleo en la visibilidad científica (Souza, 2024).
- **Índice H**: que fue introducido por Hirsch, combina productividad e impacto, ya que un autor tiene índice h si ha publicado h artículos con al menos h citas cada uno. Este indicador está vinculado a la Ley de Lotka, al reflejar la persistencia y regularidad del rendimiento científico (Esfahani, 2021).
- **CiteScore**, que es similar al factor de impacto, calcula el promedio de citas recibidas por documento en un período determinado. Su aplicación se relaciona con la teoría de Price, al reflejar cómo el volumen creciente de literatura se traduce en visibilidad e impacto acumulativo (Spuzza, 2024).

### **2.3.2. Bases de datos científicas y herramientas de visualización bibliométrica**

Scopus, Web of Science y Google Scholar constituyen las principales bases de datos de citas científicas, cada una con diferencias notables en cobertura, criterios de selección y aplicaciones en estudios bibliométricos. El uso combinado de estas fuentes, junto con herramientas especializadas como VOSviewer, Bibliometrix, Biblioshiny y CiteSpace, permite una exploración y visualización profunda de la producción científica, la colaboración y las tendencias en investigación.

### **2.3.3. Diferencias en cobertura y criterios de selección**

Scopus se distingue por su amplia cobertura internacional y regional, incluyendo revistas científicas, actas de congresos y libros académicos. Su proceso de selección es riguroso, con actualizaciones y control de calidad continuos, lo que garantiza la fiabilidad de sus datos (Baas et al., 2020). Scopus cubre aproximadamente el 72% de la producción científica noruega, con una representación destacada en ciencias naturales, medicina y salud (Aksnes & Sivertsen, 2019). Además, ofrece perfiles detallados de autores e instituciones.

Web of Science (WoS), por su parte, se caracteriza por una mayor selectividad, enfocándose en revistas de alto impacto y prestigio. Su cobertura es ligeramente menor (69% de la producción científica noruega), pero es especialmente valorada en áreas de investigación básica y para la búsqueda retrospectiva de citas por su alta precisión (Stahlschmidt & Stephen, 2021; Gusenbauer, 2024).

### **2.3.4. Visualización de redes y análisis bibliométrico**

Para el análisis visual de la información bibliométrica, se emplean herramientas especializadas como:

- VOSviewer: Software orientado a la creación de mapas de ciencia a partir de datos de redes, ideal para visualizar estructuras de coautoría, co-citación y co-ocurrencia de palabras clave.
- Bibliometrix y Biblioshiny: Paquete y aplicación web en R, ampliamente utilizados para análisis bibliométricos completos, visualización de redes y evolución temática, con interfaces amigables para usuarios de R.
- CiteSpace: Enfocado en la detección y visualización de tendencias emergentes, clústeres temáticos y patrones en la literatura científica, especialmente útil en análisis de co-citación y evolución de palabras clave.

### **2.3.5. Técnicas y modelos de análisis bibliométrico**

Las técnicas bibliométricas permiten identificar estructuras temáticas y tópicos emergentes en diversas disciplinas. Entre las más relevantes se encuentran el análisis de co-citación, la co-ocurrencia de palabras clave y los modelos de agrupamiento, como los mapas temáticos y de densidad.

El análisis de co-citación permite detectar clústeres de documentos relacionados mediante el estudio de las veces que dos publicaciones son citadas conjuntamente, lo cual facilita la identificación de temas centrales y obras influyentes en un campo (Mora et al., 2019; Karanam et al., 2024; Kaushik et al., 2023).

Por su parte, el análisis de co-ocurrencia de palabras clave examina la frecuencia con la que ciertos términos aparecen juntos en los documentos, lo cual permite agrupar palabras clave en torno a ejes temáticos y detectar tendencias emergentes (Wijaya et al., 2023).

En cuanto a los modelos de agrupamiento, el mapeo temático genera diagramas estratégicos que clasifican las temáticas en función de su relevancia y desarrollo,

mientras que la visualización de densidad permite representar el grado de centralidad e intensidad de los tópicos (Hernández et al., 2022; Fernandez-Rodriguez & Alvarez, 2021).

Estas técnicas se aplican mediante herramientas como VOSviewer, Bibliometrix, Biblioshiny y CiteSpace, que permiten representar redes de coautoría, co-citación y co-ocurrencia, facilitando el análisis visual de la estructura y evolución de un campo de estudio. Los estudios bibliométricos actuales suelen integrar múltiples técnicas para ofrecer una visión integral del desarrollo científico, sus líneas históricas y sus posibles trayectorias futuras (Khan et al., 2023; Dharmani et al., 2021).

### **2.3.6. Aplicación de Análisis Bibliométrico en Investigación Ambiental y Tecnológica**

El análisis bibliométrico permite identificar temas emergentes, áreas de colaboración internacional, y dinámicas de crecimiento interdisciplinar, facilitando así una comprensión integral del estado del arte en estas áreas.

#### **Fitorremediación estudios bibliométricos**

Los estudios bibliométricos revelan un creciente reconocimiento de la fitorremediación como una alternativa sostenible para la remediación de sitios contaminados con metales pesados. Las investigaciones recientes se enfocan en la interacción planta-suelo-microorganismos, el uso de enmiendas orgánicas y la evaluación de la eficiencia en condiciones de campo, lo cual refleja un enfoque cada vez más aplicado y tecnológico. Esta línea de investigación se caracteriza por su naturaleza interdisciplinaria, con aportes significativos provenientes de las ciencias ambientales, ciencias de las plantas e ingeniería (Li et al., 2019).

A nivel global, se ha observado una tendencia hacia la integración de la fitorremediación con prácticas ingenieriles, lo que pone de relieve la necesidad de evaluar no solo la viabilidad técnica, sino también la factibilidad económica y la sostenibilidad a largo plazo de estas tecnologías (Keith et al., 2024).

### **Tratamiento de Aguas Residuales**

En el ámbito del tratamiento de aguas residuales, la fitorremediación ha cobrado relevancia por su capacidad para remover compuestos emergentes como productos farmacéuticos, productos de cuidado personal (PPCPs) y antibióticos Mandal et al., (2025). Las líneas de investigación más destacadas incluyen la absorción vegetal, la biodegradación microbiana asociada y el empleo de humedales construidos como sistemas de tratamiento natural. Especies acuáticas como *Salvinia molesta* y *Pistia stratiotes* son comúnmente utilizadas por su resistencia y alta capacidad de bioacumulación (Mohebi & Nazari, 2021).

### **Biotecnología Ambiental**

La fitorremediación también ha encontrado un espacio relevante dentro de la biotecnología ambiental, con énfasis en la ingeniería genética para mejorar las interacciones planta-microorganismo y potenciar la eficiencia de los procesos de remediación. Se destaca el uso de plantas acuáticas en sistemas de tratamiento de aguas residuales por su capacidad de asimilación y degradación de contaminantes (Hu et al., 2020).

## **CAPÍTULO III: Diseño Metodológico**

### **3.1. Tipo y diseño de investigación**

La presente investigación se trata de un análisis bibliométrico, estudio documental cuantitativo no experimental, complementado con elementos cualitativos de interpretación temática, constituyéndose en un estudio de tipo mixto con predominio cuantitativo. El análisis bibliométrico es clave en la investigación sobre descontaminación de aguas residuales, ya que permite identificar tendencias, patrones, actores relevantes y vacíos en el conocimiento sin intervención directa. Facilita la visualización de redes de colaboración, el reconocimiento de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial, y orienta nuevas líneas de estudio hacia temas críticos aún poco explorados, como los efluentes hospitalarios. Este enfoque fortalece la toma de decisiones estratégicas y promueve la innovación científica en un área fundamental para la sostenibilidad ambiental (Chen et al., 2022; Marçal et al., 2021; Zhao et al., 2020; Kumari et al., 2024).

Desde el punto de vista metodológico, se trata de una investigación de tipo descriptivo-documental y no experimental, ya que no se manipulan variables, sino que se realiza una observación sistemática de la producción científica registrada en bases de datos académicas. Se sigue un diseño longitudinal y retrospectivo, centrado en el análisis de fuentes secundarias publicados en el período 2004–2024.

Los métodos teóricos empleados incluyen el análisis-síntesis y la inducción-deducción y crítico-reflexivo, útiles para la construcción del marco conceptual, así como para interpretar los resultados del análisis bibliométrico. A nivel práctico, se aplica el método empírico de análisis documental, con apoyo en herramientas

computacionales especializadas como *Bibliometrix*, *VOSviewer* y *Biblioshiny* (Donthu et al., 2021; Vinueza-Martínez et al., 2024).

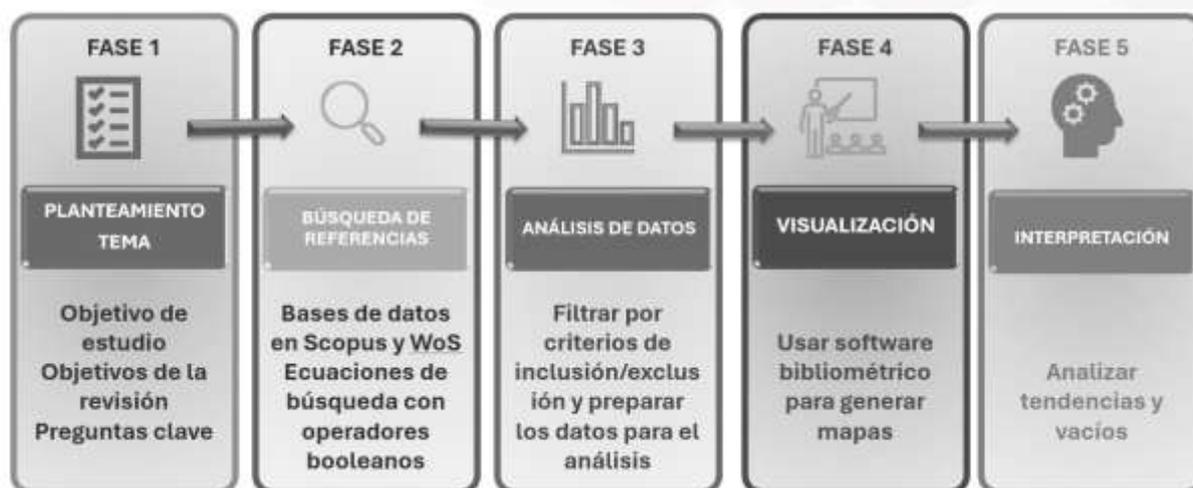


Figura 1. Metodología para obtener datos bibliográficos

### 3.2. Población y muestra

La población del presente estudio bibliométrico estuvo constituida por el conjunto de documentos científicos publicados entre los años 2004 y 2024, indexados en las bases de datos Scopus y Web of Science – Core Collection (WoS). Esta población comprende artículos científicos y de revisión que abordan la aplicación de técnicas de fitorremediación en el tratamiento de aguas residuales generadas por curtiembres.

### 3.3. Métodos, técnicas e instrumentos

Para el análisis de datos se emplean los siguientes métodos y técnicas:

Técnica de revisión bibliográfica sistemática, a partir de estrategias de búsqueda avanzadas en Scopus y WoS, utilizando operadores booleanos (AND, OR) y filtros temáticos y cronológicos.

Técnica bibliométrica, orientada a evaluar la productividad, citación, colaboración y evolución temática mediante indicadores cuantitativos como:

- Número de publicaciones por año.
- Índice h, índice m y citación promedio.

- Análisis de coautoría, co-citación y co-ocurrencia de palabras clave.
- Detección de autores, instituciones y países líderes.

Instrumentos: Archivos de exportación en formato BibTeX, RIS y CSV, utilizados para su tratamiento mediante software como:

- Bibliometrix R Package (versión 4.3.0)
- Biblioshiny (interfaz web)
- VOSviewer (visualización de redes científicas)
- Microsoft, Aplicaciones Microsoft 365 para empresas.

La validez de los datos está respaldada por el uso de fuentes confiables y actualizadas, mientras que la confiabilidad se garantiza mediante la replicabilidad de los criterios de inclusión, exclusión y procesamiento en entornos de código abierto.

La presente investigación se desarrolló conforme a una metodología bibliométrica estructurada en cinco fases: diseño del estudio, recolección de datos, análisis, visualización e interpretación. Se utilizó un enfoque cuantitativo-computacional con soporte en R y sus paquetes especializados (Ninkov, Frank, & Maggio, 2022).

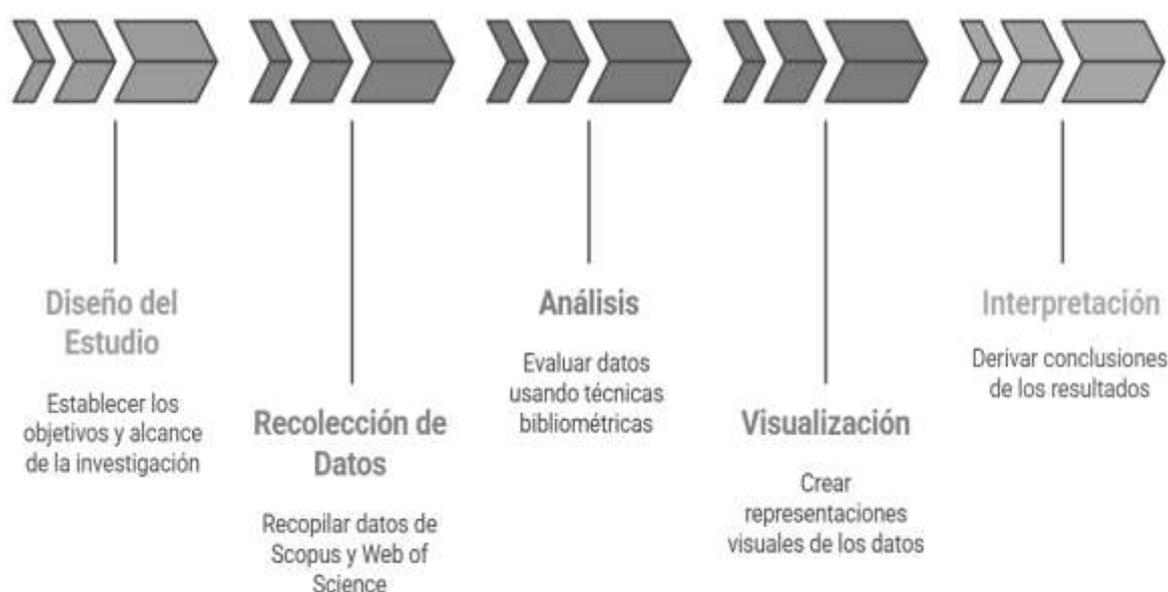


Figura 2. Fases del Proceso Metodológico en una Investigación Bibliométrica (elaboración propia con Napkin AI)

### 3.3.1. Estrategia de búsqueda y selección de fuentes

La estrategia de búsqueda sistemática, ver Figura 3, se desarrolló combinando cinco componentes clave:

- Contaminante o fuente de contaminación: “tannery”, “leather”, “tanning”.
- Tipo de residuo tratado: “wastewater”, “effluent”, “sewage”.
- Términos específicos de fitorremediación: “phytoremediation”, “phytoextraction”, “phytodegradation”, “phytostabilization”, “rhizofiltration”, entre otros.
- Organismos comúnmente utilizados en estudios de fitorremediación: *Eichhornia crassipes*, *Chrysopogon zizanioides*, *Lemna minor*, hongos micorrízicos arbusculares (AMF), entre otros.
- Resultados esperados o variables de interés: “chromium removal”, “metal removal”, “total chromium”.

Para definir la muestra de análisis, se aplicaron los siguientes criterios de inclusión:

- Tipo de documento: artículos científicos originales (article) y artículos de revisión (review).
- Idioma: inglés y español.
- Periodo de publicación: del 1 de enero de 2004 al 23 de marzo de 2025 (fecha de corte).

Los resultados obtenidos constituyen la muestra final para el análisis cuantitativo y cualitativo del estado del arte en la aplicación de la fitorremediación en efluentes de la industria del curtido, lo cual permite identificar tendencias, vacíos de investigación y especies vegetales más utilizadas en este campo.

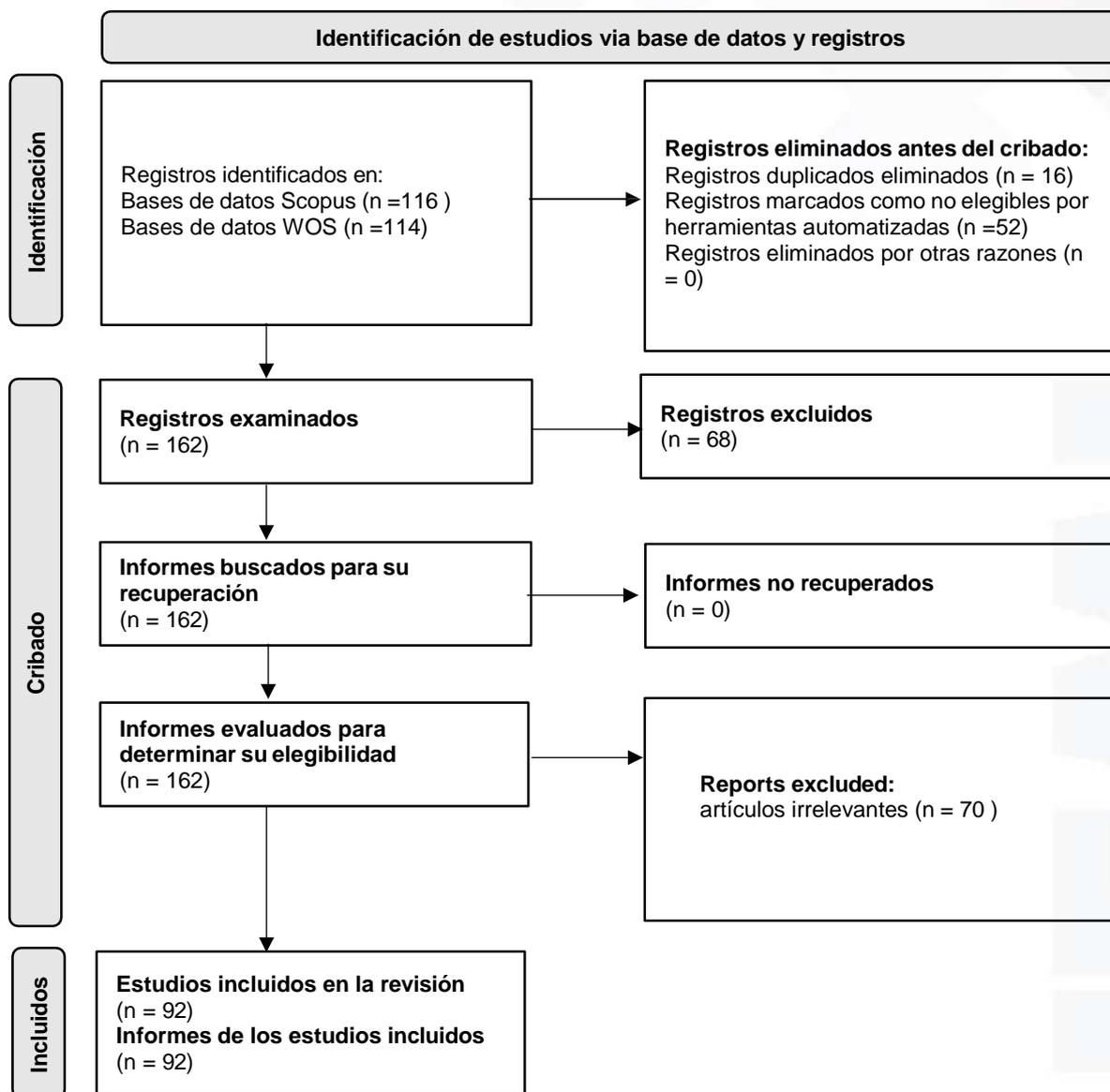


Figura 3. Diagrama de flujo PRISMA adaptado para el análisis bibliométrico sobre fitorremediación en aguas residuales de curtiembres. Elaboración propia.

La recolección de datos se realizó a partir de búsquedas avanzadas en las bases de datos Scopus y Web of Science (WoS), seleccionadas por su alta cobertura científica

y confiabilidad en los procesos de indexación. Las búsquedas se ejecutaron el 23 de marzo de 2025, siguiendo criterios replicables y con enfoque temático riguroso.

Se construyeron ecuaciones booleanas complejas, combinando términos relacionados con la fitorremediación y el tratamiento de efluentes de curtiembres. Se utilizaron componentes conceptuales y taxonómicos, incluyendo sinónimos y nombres científicos de especies vegetales empleadas en fitorremediación.

Para la recolección del corpus bibliográfico, se desarrollaron búsquedas avanzadas en las bases de datos Scopus y Web of Science Core Collection (WoS), seleccionadas por su cobertura amplia, confiabilidad en procesos de indexación y compatibilidad con herramientas bibliométricas. La búsqueda se ejecutó el 23 de marzo de 2025, asegurando criterios replicables y trazables.

### **Búsqueda en Scopus**

En la Tabla 3, se puede ver la consulta se ejecutó en el campo TITLE-ABS-KEY (título, resumen y palabras clave), con el objetivo de incluir únicamente documentos centrados temáticamente en la intersección entre fitorremediación y efluentes de curtiembres. La ecuación de búsqueda combinó componentes industriales, tecnológicos, biológicos y contaminantes diana mediante operadores booleanos, y se aplicaron los siguientes filtros:

- Rango temporal: 2004–2024 (`^PUBYEAR > 2003 AND PUBYEAR < 2025^``), abarcando dos décadas para identificar patrones de evolución científica.
- Tipo de documento: Artículos originales y de revisión (`^LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "re")``), seleccionando exclusivamente investigaciones con revisión por pares.

- Idioma: español e inglés (`LIMIT-TO (LANGUAGE, "English") OR LIMIT-TO (LANGUAGE, "Spanish") `), los cuales predominan en la literatura científica global y regional.

### **Búsqueda en Web of Science (WoS)**

En WoS, la búsqueda se realizó en el campo TS (Topic), que incluye título, resumen, palabras clave del autor y Keywords Plus. Se empleó una estrategia equivalente a la utilizada en Scopus, replicando los mismos componentes conceptuales, ver Tabla 3.

Se aplicaron los siguientes criterios de filtrado:

- Rango temporal: 2004–2024, seleccionando publicaciones indexadas dentro de este período.
- Tipo de documento: Artículos científicos y revisiones, asegurando un nivel adecuado de rigurosidad académica.
- Idioma: español e inglés, como lenguas relevantes para la visibilidad científica internacional.

**Tabla 3.** Estrategia de búsqueda en Scopus y Web of Science para estudios sobre fitorremediación en efluentes de curtiembres (archivo scopus.bib, corte al 23 de marzo de 2025)

CRITERIO	VALOR
Tópico SCOPUS	TITLE-ABS-KEY(((("tannery" OR "leather" OR "tanning") AND ("wastewater" OR "effluent" OR "sewage")) AND ("phytoremediation" OR "phytoextraction" OR "phytodegradation" OR "phytovolatilization" OR "phytostabilization" OR "rhizofiltration" OR "phyto-stimulation" OR "rhizo(sphere)degradation" OR "phyto-treatment" OR "phycoremediation") AND ("plant" OR "fungi" OR "algae" OR "Water hyacinth" OR "Eichhornia crassipes" OR "Duckweed" OR "Lemna minor" OR "Thlaspi caerulescens" OR "Arabidopsis helleri" OR "Lupinus" OR "Vicia" OR "Sulla" OR "Sesbania" OR "vetiver" OR "Chrysopogon zizanioides" OR "Robinia pseudoacacia" OR "Caragana arborescens" OR "Amorpha fruticosa" OR "Mycorrhizal fungi" OR "AMF" OR "Sunflower" OR "Helianthus annuus" OR "Indian Mustard" OR "Brassica juncea" OR "Cattail" OR "Typha" OR "Common Reed" OR "Phragmites australis" OR "metal removal" OR "chromium removal" OR "chromium reduction" OR "total chromium")) AND PUBYEAR > 2003 AND PUBYEAR < 2025 AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE,"ar" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE,"re" ) ) AND ( LIMIT-TO ( LANGUAGE,"English" ) OR LIMIT-TO ( LANGUAGE,"Spanish" ) )
Tópico Web of Science	(TS=("tannery" OR "leather" OR "tanning") AND TS=("wastewater" OR "effluent" OR "sewage") AND TS=("phytoremediation" OR "phytoextraction" OR "phytodegradation" OR "phytovolatalization" OR "phytostabilization" OR "rhizofiltration" OR "phyto-stimulation" OR "rhizo(sphere)degradation" OR "phyto-treatment" OR "phycoremediation") AND TS=("plant" OR "fungi" OR "algae" OR "Water hyacinth" OR "Eichhornia crassipes" OR "Duckweed" OR "Lemna minor" OR "Thlaspi caerulescens" OR "Arabidopsis helleri" OR "Lupinus" OR "Vicia" OR "Sulla" OR "Sesbania" OR "vetiver" OR "Chrysopogon zizanioides" OR "Robinia pseudoacacia" OR "Caragana arborescens" OR "Amorpha fruticosa" OR "Mycorrhizal fungi" OR "AMF" OR "Sunflower" OR "Helianthus annuus" OR "Indian Mustard" OR "Brassica juncea" OR "Cattail" OR "Typha" OR "Common Reed" OR "Phragmites australis" OR "metal removal" OR "chromium removal" OR "chromium reduction" OR "total chromium"))
Categoría	Industria fuente (curtiembre) Tipo de residuo o medio contaminado Técnicas de remediación (métodos biotecnológicos)
Tipo de documentos	Artículos y artículos de revisión
Lenguaje	Español e Inglés
Marco temporal	Enero 2019 a diciembre del 2024

### 3.3.2. Justificación de la estrategia de búsqueda y selección de palabras clave en Scopus y Web of Science

Con el objetivo de garantizar la exhaustividad, relevancia y precisión en la recopilación de publicaciones científicas para el análisis bibliométrico, se diseñó una ecuación de búsqueda avanzada en la base de datos Scopus, tomando en cuenta los términos más representativos y técnicamente válidos relacionados con la fitorremediación aplicada a efluentes de curtiembres.

Los términos se estructuraron en tres componentes temáticos principales:

a) Componente industrial y de fuente contaminante, incluye los términos "tannery", "leather" y "tanning", para capturar literatura relacionada con la industria curtidora. A estos se asociaron las palabras "wastewater", "effluent" y "sewage", como sinónimos de aguas residuales industriales.

b) Componente técnico de remediación, se incluyeron las principales técnicas reconocidas en la literatura de fitorremediación: "phytoremediation", "phytoextraction", "phytodegradation", "phytovolatilization", "phytostabilization", "rhizofiltration", "phyto-stimulation" y "rhizo(sphere)degradation". Se añadieron también términos relacionados como "bioaccumulation" y "phycoremediation", para abarcar estudios con algas o en condiciones acuáticas.

c) Componente biológico y de especies relevantes, se incorporaron nombres comunes y científicos de plantas comúnmente utilizadas en fitorremediación, como *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, *Typha*, *Phragmites australis*, *Vetiveria zizanioides*, *Brassica juncea*, entre otras. También se incluyeron grupos funcionales como "plant", "fungi", "algae", y términos asociados al objetivo del tratamiento como "metal removal", "chromium removal" y "total chromium".

### 3.3.3. Selección y depuración de documentos científicos recuperados

La consulta arrojó los siguientes documentos en Scopus y WoS:

- Scopus: 114 documentos
- Web of Science: 116 documentos
- Total, inicial combinado: 230
- Después de depuración de duplicados: 162 documentos únicos
- Eliminando automáticamente 52 documentos duplicados

Todos los documentos fueron exportados en formato xlsx, BibTeX (.bib) y texto plano (.txt) para su procesamiento posterior al 23 marzo 2025, como se puede ver en la Tabla 4.

Tabla 4. Datos bibliográficos obtenidos y procesados en R

Objeto	Observaciones	Variables	Descripción
MS	114	32	Datos bibliográficos de Scopus (scopus.bib)
MW	100	64	Datos bibliográficos de WoS (wos.txt)
M	162	71	Base combinada y depurada con datos únicos

### 3.4. Procesamiento y análisis de datos

Los archivos obtenidos fueron importados y convertidos a objetos legibles en R mediante el paquete bibliometrix, empleando las funciones `convert2df()` y `mergeDbSources()` para fusionar y depurar duplicados. Posteriormente, los datos fueron analizados en la interfaz Biblioshiny para realizar exploraciones visuales interactivas y exportar matrices de coautoría, co-citación y co-palabras clave (Ullah, Asghar, & Griffiths, 2023).

Se aplicaron los siguientes indicadores y técnicas:

- Productividad científica: número anual de publicaciones, tipo de documento y evolución temporal.
- Citación e impacto: índice h, índice g y citación media por autor.
- Colaboración científica: redes de coautoría entre autores, instituciones y países.
- Tendencias temáticas: análisis de co-ocurrencia de palabras clave, mapas de densidad y agrupamiento temático con algoritmos de Louvain y K-means.

La validez de los datos está garantizada por el uso de fuentes académicas indexadas y un protocolo reproducible. La confiabilidad se refuerza mediante el uso de entornos de código abierto y la documentación sistemática de los criterios de inclusión y exclusión (Martín-Martín et al., 2021).

### **3.5. Instrumentos de análisis**

- Bibliometrix R Package (versión 4.3.0): para el procesamiento analítico y estadístico.
- Biblioshiny (versión 1.7.5): para la exploración visual de redes.
- VOSviewer (versión 1.6.20): para la representación gráfica de mapas de co-citación, coautoría y palabras clave.

### **3.6. Procesamiento estadístico de la información**

El procesamiento de los datos se realizará mediante análisis estadístico descriptivo y multivariado, apoyado por R y Excel (Sari et al., 2023). Las operaciones incluirán:

- Tabulación de frecuencias absolutas y relativas.
- Análisis de tendencias anuales.
- Representación gráfica de indicadores de productividad y citación.
- Mapas de co-ocurrencia, co-citación y densidad temática.

Además, se emplearán análisis de redes para identificar comunidades científicas, relaciones entre autores e instituciones, y el posicionamiento de los temas

emergentes. En el presente análisis bibliométrico se emplearán diversos indicadores clave para evaluar el desarrollo de la investigación en el área de tratamiento de efluentes de curtiembres mediante biotecnologías como la fitorremediación, ficorremediación y micorremediación, en el periodo 2004–2024. Los indicadores seleccionados se agrupan en cuatro categorías principales:

- **Producción científica:** Se analizará el número de publicaciones por año, autores más productivos, instituciones líderes y países con mayor volumen de investigación, permitiendo identificar los núcleos de generación del conocimiento.
- **Impacto:** Se considerará el número de citas por documento, los autores más citados, y las revistas con mayor factor de impacto dentro del área, para determinar la relevancia académica de los trabajos publicados.
- **Colaboración:** Se evaluarán redes de coautoría entre investigadores, instituciones y países, con el fin de entender los patrones de cooperación científica y los flujos de conocimiento entre regiones.
- **Tendencias temáticas:** Se identificarán palabras clave frecuentes y su evolución en el tiempo, así como los temas emergentes mediante el análisis de coocurrencia y agrupamiento temático.

Según Öztürk, Kocaman, & Kanbach, (2024), para ilustrar estos indicadores, se utilizarán distintas visualizaciones bibliométricas, tales como:

- Mapas de red (network maps): Para representar relaciones de coautoría, coocurrencia de términos clave y vínculos entre instituciones
- Cronogramas (timelines): Para observar la evolución de temas de investigación y la aparición de nuevos focos temáticos.
- Diagramas de densidad (density maps): Para visualizar la concentración de publicaciones o citas en determinadas áreas temáticas.

- Diagramas de Sankey y burbuja: Para mostrar flujos de colaboración entre países e interacciones entre autores o disciplinas.
- Árboles de co-ocurrencia: Para analizar la estructura intelectual del campo a través de las referencias compartidas.

Estas herramientas serán generadas con el apoyo de software especializado como VOSviewer, Bibliometrix (RStudio) y Dimensions, con el objetivo de proporcionar una visión integral del panorama científico sobre la temática analizada.

### 3.6.1. Caracterización general de la base de datos

El procesamiento de los datos bibliográficos recolectados se llevó a cabo en el entorno estadístico R, mediante el uso del paquete especializado bibliometrix, diseñado para el análisis cuantitativo de literatura científica. Este procedimiento incluyó la importación de archivos, la conversión de formatos, la combinación de bases de datos, la eliminación de duplicados y la posterior exportación para análisis exploratorio y visual.

### 3.6.2. Preparación de archivos y entorno

Se utilizaron dos archivos de entrada:

- scopus.bib, correspondiente a los resultados exportados desde Scopus.
- wos.txt, correspondiente a los resultados exportados desde Web of Science (WoS), en formato “Full Record and Cited References”.

Estos archivos fueron referenciados en R mediante las variables DS y DW.

### 3.6.3. Conversión de los archivos a estructuras analizables

Los archivos fueron convertidos a *data frames* mediante la función `convert2df()`, especificando la base de datos de origen y el formato del archivo:

---

```
MW <- convert2df("wos.txt", dbsource = "wos", format = "plaintext")
```

---

---

```
MS <- convert2df("scopus.bib", dbsource = "scopus", format = "bibtex")
```

---

Esto generó dos objetos:

- MW: contiene 100 observaciones y 64 variables desde WoS.
- MS: contiene 114 observaciones y 32 variables desde Scopus.

#### 3.6.4. Integración y depuración de datos

La fusión de ambas fuentes se realizó mediante `mergeDbSources()`, con la opción `remove.duplicated = TRUE` para eliminar registros duplicados:

---

```
M <- mergeDbSources(MW, MS, remove.duplicated = TRUE)
```

---

El resultado fue un nuevo objeto, M, con 162 documentos únicos y 71 variables, consolidando los metadatos de ambas bases. Esto indica que fueron eliminados 52 registros duplicados durante la depuración.

#### 3.7. Exportación para análisis visual y gestión externa

El conjunto de datos depurado fue exportado en múltiples formatos para facilitar el análisis en diversas plataformas:

---

```
write.csv(M, "Combinado-wos-scopus.csv")    # Para biblioshiny  
write.xlsx(M, "Combinado.xlsx")            # Para procesamiento en Excel
```

---

Además, se exportaron versiones en formato `.bib` (BibTeX) y `.ris` para uso en gestores de referencias y visualización bibliométrica en VOSviewer:

---

```
export_to_bib(M, "Combinado-wos-scopus.bib")  
export_to_ris(M, "Combinado-VOSviewer.ris")
```

---

### **3.8. Análisis interactivo con Biblioshiny**

Para el análisis visual y exploratorio se utilizó la función `biblioshiny()`, que habilita una interfaz gráfica basada en navegador web, permitiendo explorar indicadores como la evolución anual de publicaciones, autores más productivos, redes de colaboración y co-ocurrencia de palabras clave (Kraus, 2022). Esta función abre una dirección local desde donde se accede al entorno interactivo.

### **3.9. Interpretación del entorno de trabajo en R**

Durante la sesión de trabajo, el entorno mostró los datos que se encuentran en la Tabla 4. Esta consolidación de datos permitió obtener un corpus sólido y depurado para el análisis bibliométrico. De los 114 documentos provenientes de Scopus y los 100 de Web of Science (WoS), se identificaron 52 coincidencias exactas en título, autor y año de publicación, las cuales fueron eliminadas automáticamente como duplicados. Como resultado, la base combinada preliminar en R quedó conformada por 162 artículos científicos y de revisión. Posteriormente, se realizó una depuración final manual en los archivos combinados en Excel, mediante una revisión individual de cada registro, eliminando aquellos documentos que no guardaban relación con el tema central de investigación y dos capítulos de libros que se encontraron en la base combinada. Este proceso resultó en la exclusión de 70 artículos irrelevantes, dejando un total de 92 documentos pertinentes, que fueron utilizados en el análisis bibliométrico con el apoyo de las herramientas *Bibliometrix*, *Biblioshiny* y *VOSviewer*, ver Figura 3.

## CAPÍTULO IV: Análisis e Interpretación de Resultados

Este capítulo presenta los resultados obtenidos a partir del análisis bibliométrico de la producción científica relacionada con las técnicas de fitorremediación, micorremediación y ficorremediación aplicadas al tratamiento de efluentes de curtiembres, durante el periodo 2004–2024.

Como paso inicial se comprobó la calidad de los registros bibliográficos, clasificando la completitud de los metadatos. El 100% de los documentos presentó información en campos esenciales como resumen (AB), afiliación institucional (C1), autor (AU), tipo de documento (DT), revista (SO), idioma (LA), año de publicación (PY), título (TI) y total de citas (TC). Los campos menos completos fueron WC (categorías temáticas, 70.65%) y CR (referencias citadas, 0%), ver Tabla 5, esto nos indica que los datos son suficientes para realizar un análisis bibliométrico completo (Lim, Kumar, & Donthu, 2024).

Tabla 5. Nivel de completitud de metadatos en la base de datos bibliográfica (2004–2024)

(0%) datos faltantes	(≤ 10%) datos faltantes	(10% < x ≤ 20%) Datos faltantes	(> 20%) Datos faltantes
AB (Abstract)	RP	DI	WC
C1 (Affiliation)	(Corresponding Author)	(DOI) – 10.87%	(Science Categories)
AU (Author)	2.17%		29.35%
DT (Document Type)	DE		CR
SO (Journal)	(Keywords) – 4.35%		(Cited References)
LA (Language)	ID		100%
PY (Publication Year)	(Keywords Plus) – 8.70%		
TI (Title)			
TC (Total Citation)			
Completitud Excelente	Completitud Buena	Completitud Aceptable	Completitud Deficiente

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis bibliométrico aplicado al estudio de las tecnologías de fitorremediación, micorremediación y ficorremediación en el tratamiento de efluentes de curtiembres durante el período 2004–2024. Cada uno de los apartados responde a las preguntas

de investigación (RQ) planteadas y se encuentra alineado con los objetivos específicos del trabajo, permitiendo así una evaluación integral del estado del conocimiento en el área. Los resultados se organizan temáticamente para mostrar la evolución histórica de la producción científica, la identificación de autores e instituciones clave, la distribución geográfica, las líneas de investigación predominantes, las revistas más influyentes, las metodologías utilizadas, las áreas temáticas vinculadas y, finalmente, las tendencias emergentes y vacíos de conocimiento detectados.

Esta estructura permite una presentación coherente y argumentada del corpus analizado, facilitando la interpretación de patrones, la validación de hipótesis y la posterior discusión de los hallazgos en relación con la literatura existente.

#### **4.1. Objetivo Específico 1: Identificar los países, autores e instituciones con mayor productividad científica en el ámbito del tratamiento de efluentes de curtiembres mediante fitorremediación, ficorremediación y micorremediación.**

**RQ2:** ¿Qué autores e instituciones concentran la mayor productividad científica en este campo de estudio?

**RQ3:** ¿Qué países presentan mayor volumen de publicaciones y cómo ha sido su evolución temática en el periodo analizado?

Estas preguntas permiten verificar si hay concentración temática en ciertos países e instituciones, tal como lo sugiere la hipótesis.

**Autores e instituciones que concentran la mayor productividad científica en este campo de estudio (RQ2).**

#### **4.1.1 Productividad de autores**

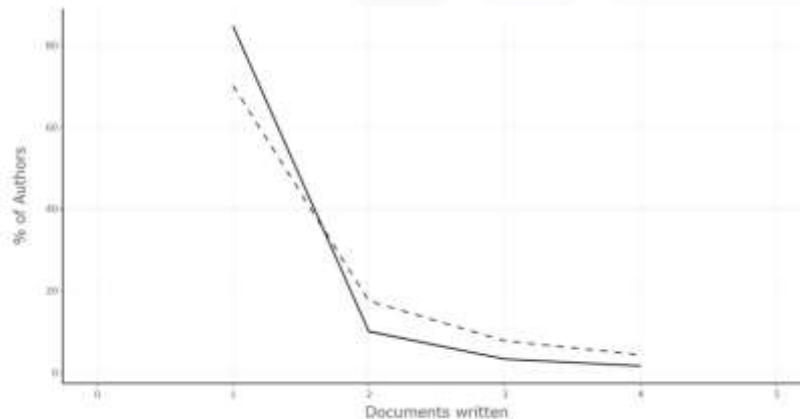


Figura 4. Ajuste de los datos observados con la Ley de Lotka en el campo de estudio analizado. Elaboración propia con la herramienta biblioshiny.

La Figura 4 evidencia un patrón característico de distribución de productividad científica entre autores, en coherencia con la Ley de Lotka donde más del 80 % de los autores del corpus analizado ha contribuido con una sola publicación, mientras que la proporción de autores disminuye de forma pronunciada a medida que se incrementa el número de documentos publicados (Aytac, Tran & Frye, 2025). Este comportamiento confirma que la producción científica en el campo de estudio se encuentra altamente concentrada: pocos autores generan múltiples contribuciones, mientras que la mayoría participa de manera ocasional o puntual.

#### **4.1.2 Impacto de autores**

En la Figura 5 se representa el cruce entre productividad e impacto con el fin de identificar a los autores más destacados en el campo. Aunque el 80 % de los autores cuenta únicamente con una publicación, sobresalen Ali S., Ashraf S. y Calheiros C., quienes registran cuatro publicaciones cada uno y presentan indicadores elevados de impacto (número de citas, H-index, G-index y M-index), como se observa en la Figura

5a. En particular, Ali S. y Ashraf S. superan las 150 citas, mientras que Rangel A., Castro P. y Calheiros P. acumulan más de 400 citas, lo que resalta tanto su volumen de producción científica como su nivel de influencia (Figura 5b). En conjunto, Ali S., Ashraf S. y Calheiros C. se posicionan como los autores más influyentes del área de estudio, no solo por su productividad, sino también por la calidad y el impacto de sus contribuciones.

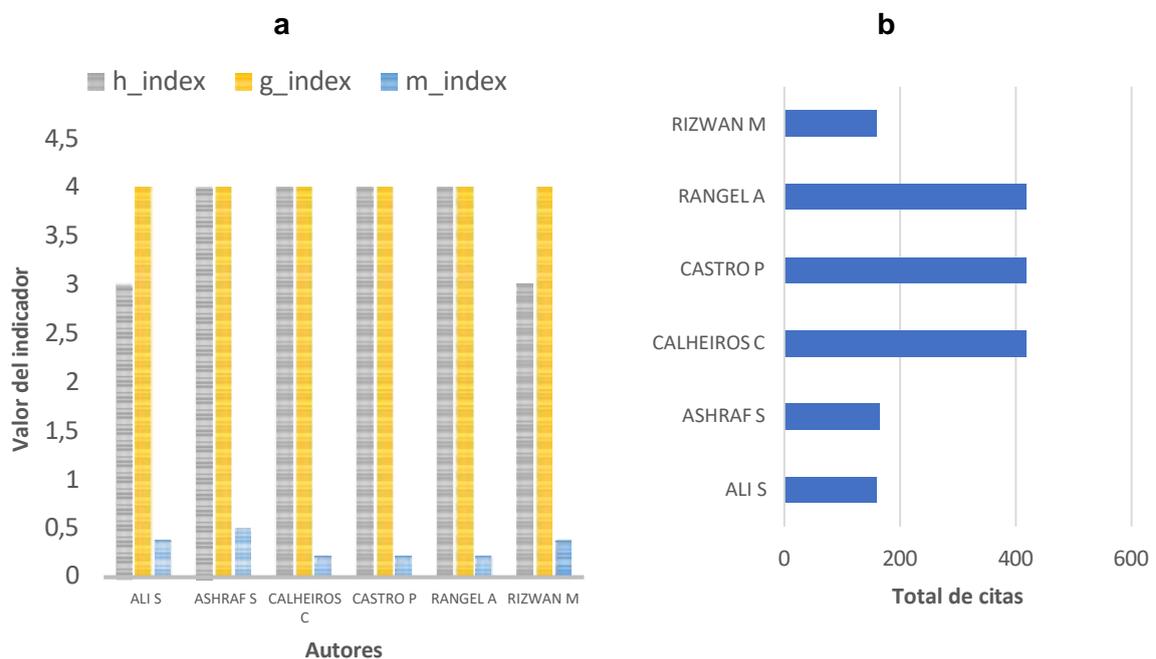


Figura 5. Indicadores de impacto bibliométrico de los autores más relevantes donde (a) Comparación de H-index, G-index y M-index por autor, (b) Total de citas recibidas por cada autor. Elaboración propia con Biblioshiny

### 4.1.3 Producción por autor a lo largo del tiempo

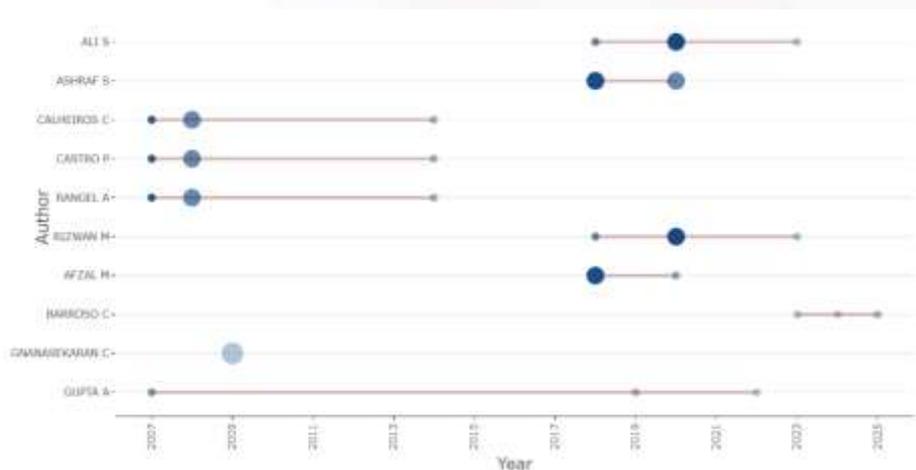


Figura 6. Evolución temporal de la productividad de los autores más relevantes en el campo de la fitorremediación aplicada a efluentes de curtiembres (2004–2024).

Elaboración propia con Biblioshiny

La Figura 6, presenta la distribución temporal de la productividad científica de los autores más relevantes en el estudio. Se observa que autores como Ali S. y Ashraf S. mantienen una producción continua entre 2018 y 2023, destacando por la intensidad del color de los nodos, lo cual refleja un alto número de citas. Calheiros C., Castro P. y Rangel A. también muestran publicaciones concentradas en los años 2008 a 2013, aunque con menor continuidad en años recientes. Afzal M. y Rizwan M. presentan actividad principalmente entre 2019 y 2022. El gráfico revela que, si bien muchos autores tienen contribuciones aisladas, Ali S. y Ashraf S. sobresalen tanto por su número de publicaciones como por su impacto, lo que los posiciona como referentes en el campo. Asimismo, se identifican aportes emergentes de autores como Gupta A. y Barroso C. en los últimos años, lo cual sugiere una renovación en las líneas de investigación sobre biotecnologías ambientales aplicadas.

#### 4.1.4. Colaboración entre autores

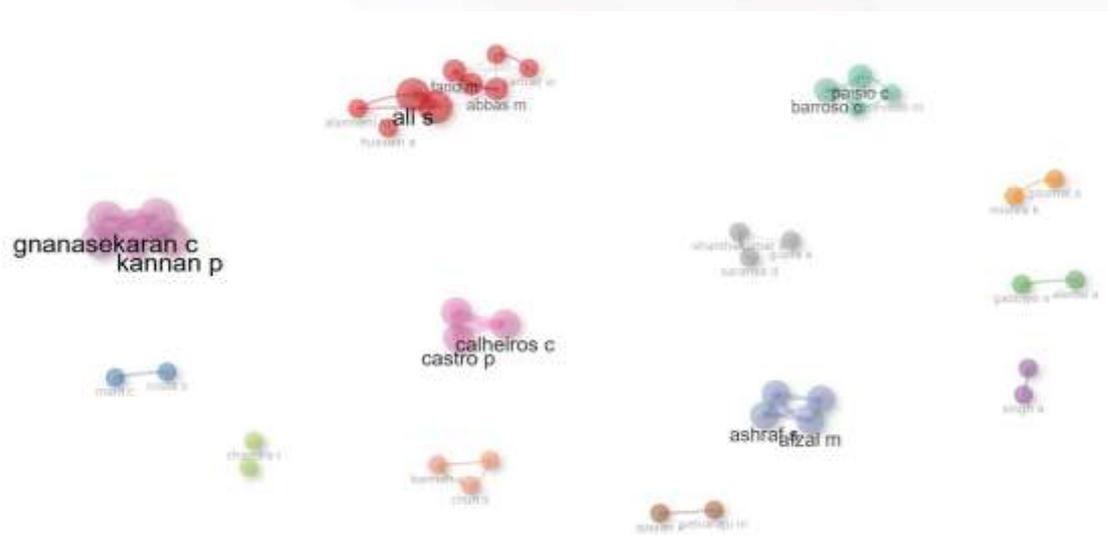


Figura 7. Mapa de colaboración entre autores en el campo de la fitorremediación, microrremediación y ficorremediación aplicadas al tratamiento de efluentes de curtiembres (2004–2024).

La Figura 7, presenta un mapa de colaboración entre autores elaborado con VOSviewer, donde se visualizan las redes de coautoría dentro del corpus bibliográfico analizado. En este mapa, cada nodo representa a un autor, y las conexiones (líneas) indican coautorías registradas en al menos un documento. Los colores diferencian clústeres de colaboración, lo cual permite identificar grupos de investigación que trabajan de forma conjunta y sostenida (Lim & Kumar, 2023).

Se destacan varios núcleos de colaboración claramente definidos. El clúster liderado por Ali S agrupa a autores como Farid M, Abbas M y Alyemini M, reflejando una intensa cooperación entre estos investigadores. Otro grupo significativo lo conforman Gnanaselkaran C y Kannan P, quienes aparecen como autores centrales dentro de su clúster. Asimismo, Ashraf S y Afzal M conforman otro grupo con alto nivel de coautoría, lo que sugiere un equipo consolidado en publicaciones científicas en este campo.

En contraste, también se identifican clústeres pequeños y redes de colaboración limitadas a dos o tres autores, como en el caso de Mantz C y Costa S, o Chun S y Kannan M. Estos grupos pueden representar colaboraciones puntuales o equipos de investigación en desarrollo. Esto nos permite observar que la producción científica está distribuida entre varios grupos de investigadores, con algunas redes más consolidadas que otras (Hussain et al., 2019). Esta estructura sugiere la existencia de comunidades académicas especializadas con líneas de investigación afines, aunque aún con oportunidades para fomentar una mayor colaboración interdisciplinaria e interinstitucional a nivel global.

#### **4.1.5. Instituciones más relevantes**

La Figura 8a presenta una conjugación de imágenes de las instituciones con mayor número de publicaciones científicas en el campo de la fitoremediación, micorremediación y ficorremediación aplicadas al tratamiento de efluentes de curtiembres durante el período 2004–2024. En el gráfico de barras (izquierda), se observa que el Council of Scientific and Industrial Research (CSIR) de India lidera la producción científica con un total de 13 artículos, seguido por el Government College University Faisalabad y la Tamil Nadu Agricultural University, ambas con 7 publicaciones cada una. Instituciones como la University of Agriculture Faisalabad y la University of Madras también tienen una presencia destacada, con 5 documentos registrados.

Adicionalmente, en la Figura 8b, muestra la evolución temporal de la producción científica de las cinco instituciones más productivas. Se evidencia un crecimiento sostenido en el número de publicaciones del CSIR desde 2006, con un incremento notorio entre 2016 y 2021, alcanzando una meseta de 13 publicaciones en los últimos años. La University of Madras muestra una participación estable desde 2008, sin

incremento en su productividad reciente. En contraste, universidades como la University of Agriculture Faisalabad, el Government College University Faisalabad y la Tamil Nadu Agricultural University evidencian una incorporación más reciente (desde 2016 en adelante), pero con un crecimiento significativo en sus publicaciones, lo que indica una ampliación del interés institucional hacia estas técnicas biotecnológicas.

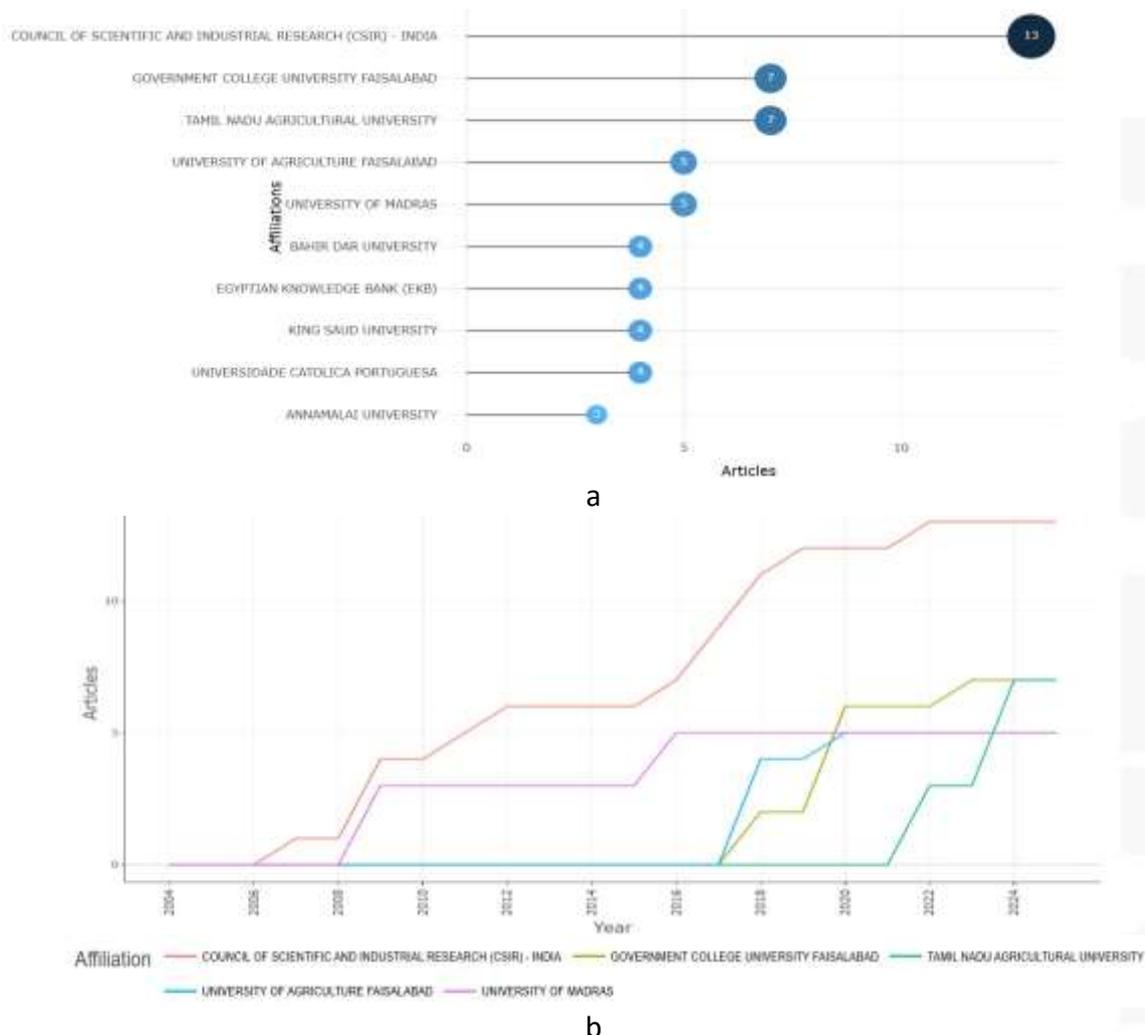


Figura 8. a) Instituciones con mayor número de publicaciones en técnicas de biorremediación aplicadas a efluentes de curtiembres (2004–2024) y b) Evolución temporal de la producción científica de las instituciones más relevantes (2004–2024). Elaboración propia con biblioshiny.

La distribución geográfica de estas instituciones refleja una alta concentración en países del sur de Asia, particularmente India y Pakistán, lo que sugiere una

regionalización del conocimiento y posibles condiciones ambientales o industriales que motivan la investigación sobre tratamiento de efluentes de curtiembres.

### Países con mayor volumen de publicaciones y su evolución temática (RQ3)

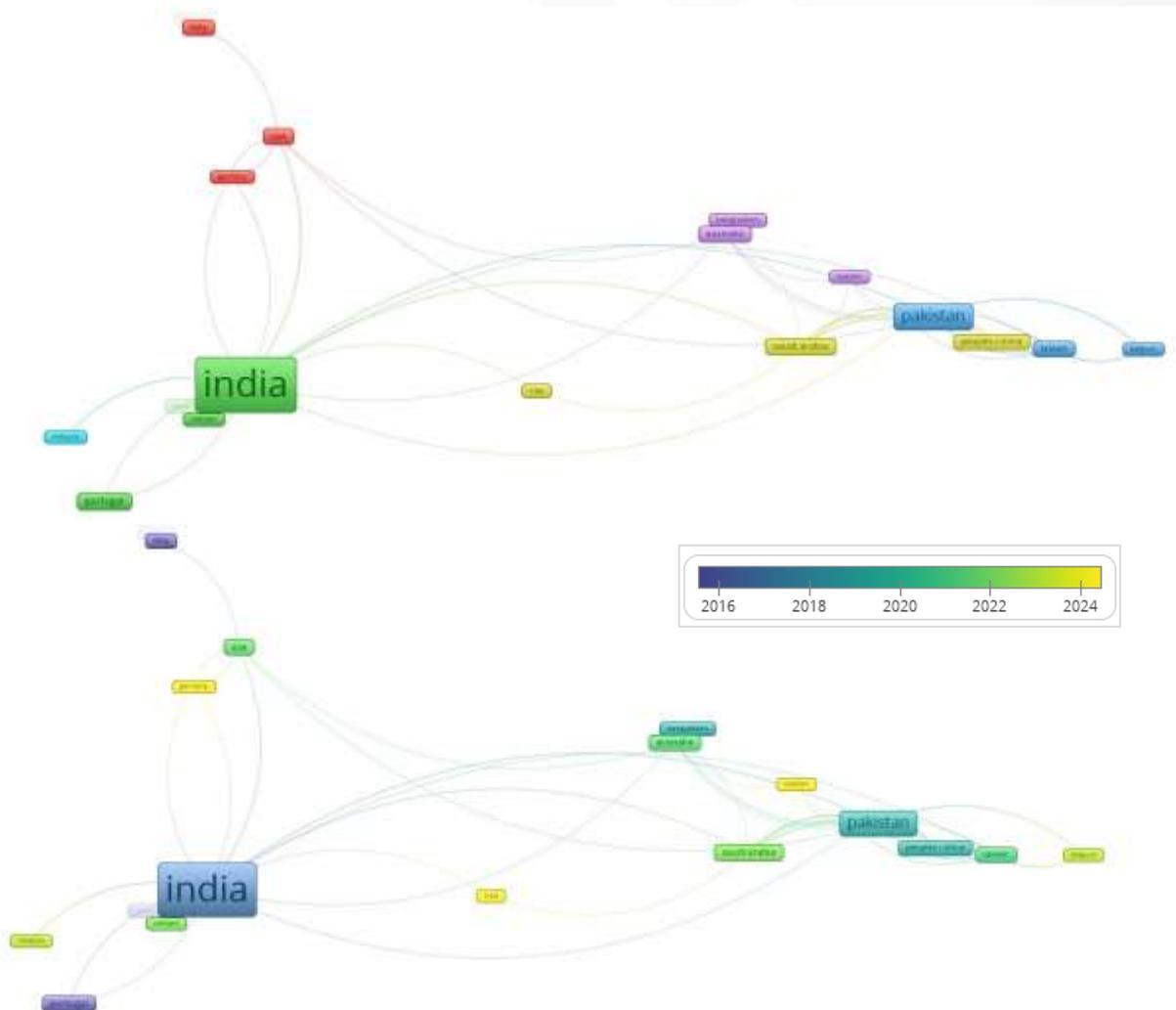


Figura 9. Red de colaboración científica entre países y evolución temporal de publicaciones en fitorremediación de efluentes de curtiembres (2004–2024).

En la Figura 9 es evidente que India emerge como el principal nodo de producción científica, seguido por Pakistán, China, Arabia Saudita y Taiwán. La evolución temporal indica que países como Irak y Arabia Saudita han incrementado su participación en años recientes. Esto corrobora lo visto en la Figura 8a, en la que se muestra las instituciones con mayor publicación son instituciones que pertenecen a los países con mayor índice de publicaciones. La colaboración científica internacional

se manifiesta en redes consolidadas entre estos países, conectando con otras regiones como Europa y Oceanía.

#### **4.2. Objetivo Específico 2: Analizar las palabras clave, coocurrencias temáticas y redes de colaboración para comprender las principales líneas de investigación y su evolución a lo largo del periodo 2004–2024.**

RQ1: ¿Cuáles son las características bibliométricas generales de la producción científica sobre fitorremediación, ficorremediación y micorremediación aplicadas al tratamiento de efluentes de curtiembres durante el periodo 2004–2024?

RQ4: ¿Cuáles son las palabras clave más empleadas y qué coocurrencias temáticas permiten identificar las principales líneas de investigación?

RQ5: ¿Cuáles son las revistas científicas más relevantes en la difusión de estudios sobre estas técnicas biotecnológicas aplicadas a efluentes de curtiembres?

RQ6: ¿Qué metodologías se emplean con mayor frecuencia en los estudios analizados?

Estas RQs permitirán examinar el desarrollo de líneas temáticas, la estructura de colaboración científica y la posible concentración en ciertos enfoques metodológicos, apoyando la afirmación de que las redes de colaboración son limitadas.

##### **4.2.1 Evolución temática y tecnológica en fitorremediación (RQ1)**

En la Tabla 6, Figuras 10 y 11, se evidencia un crecimiento sostenido en la producción científica anual, con una tasa de crecimiento del 5,37%. A partir del año 2019, se consolida una tendencia ascendente más pronunciada, alcanzando su punto máximo en 2024 con 13 publicaciones. El corpus muestra una edad promedio de 7,66 años, lo que sugiere una combinación equilibrada de estudios recientes y fundacionales.

Asimismo, el promedio de citas por documento (40,37) refleja un impacto académico relevante en el campo.

Tabla 6. Indicadores bibliométricos generales del corpus analizado

Indicador	Valor
Periodo de tiempo	2004–2025
Fuentes (Revistas, Libros, etc.)	60
Documentos	92
Tasa de crecimiento anual (%)	5,37 %
Edad promedio de los documentos	7,66 años
Citas promedio por documento	40,37
Referencias	0
Palabras clave Plus (ID)	676
Palabras clave de autor (DE)	263
Total de autores	356
Autores de documentos de autor único	1
Documentos de autor único	1
Coautores por documento	4,72
Porcentaje de coautorías internacionales	20,65
Artículo	82
Artículo; capítulo de libro	0
Artículo de revisión	10
Revisión; capítulo de libro	0

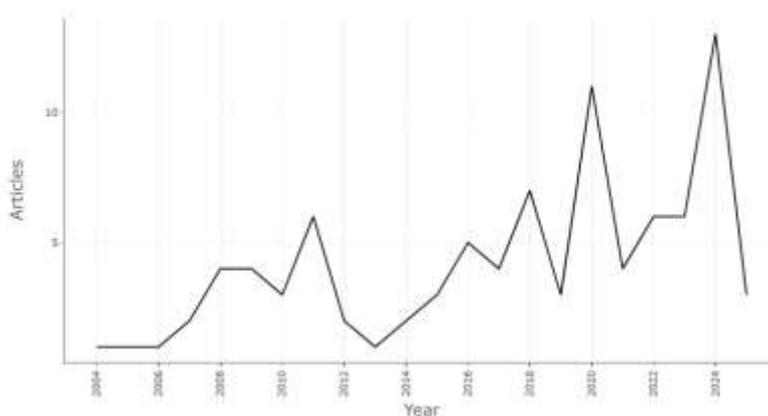


Figura 10. Evolución anual de publicaciones científicas en fitorremediación aplicada al tratamiento de aguas residuales de curtiembres. Fuente: análisis bibliométrico realizado con Bibliometrix/Biblioshiny.

En la Figura 10, se evidencia gran variación en el promedio anual de citas, con picos notables en los años 2013 y 2021, donde se registraron los valores más altos de

impacto (alrededor de 37 y 46 citas respectivamente). Estos picos podrían estar asociados a la publicación de artículos de alta relevancia en esos años o a temáticas emergentes con gran visibilidad científica. En contraste, en la Figura 11, se observa que en la mayoría de los años el promedio de citas por documento se mantiene bajo, con una media inferior a 10 citas por año en muchos casos, lo que sugiere que solo algunos artículos han tenido un impacto sobresaliente. En los últimos años (2023–2024), el promedio de citas ha sido bajo, posiblemente debido al poco tiempo de exposición, menos de 8 años, de las publicaciones más recientes, lo cual es esperable en análisis de citación.

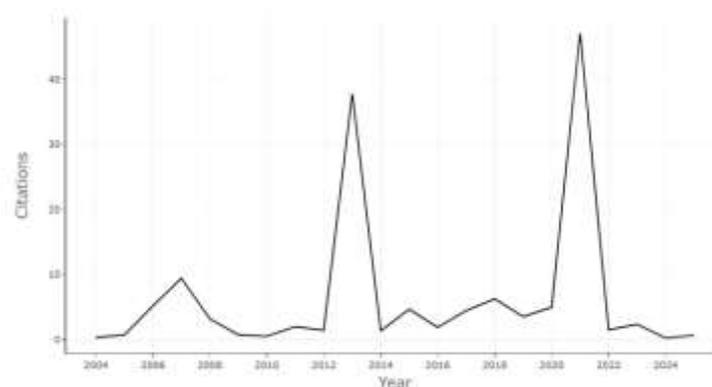


Figura 11. Resultados de citaciones promedio por año de publicaciones científicas en fitorremediación aplicada al tratamiento de aguas residuales de curtiembres.

Fuente: análisis bibliométrico realizado con Bibliometrix/Biblioshiny.

La Figura 11 muestra la evolución de las citas anuales recibidas por los documentos incluidos en el corpus bibliográfico analizado, correspondiente al periodo 2004–2024. Se destacan dos picos principales de citación: el primero en el año 2013, con aproximadamente 37 citas, y el segundo en 2021, con un máximo de 46 citas. Estos picos indican la existencia de documentos altamente influyentes publicados en años previos, que concentraron gran parte de las referencias durante esos periodos. Es probable que se trate de estudios de revisión o investigaciones pioneras que marcaron un punto de inflexión en la evolución del conocimiento en este campo.

Entre los años 2004 y 2010, la actividad citaciones fue baja, aunque se observa un leve incremento en 2007. Posteriormente, la tendencia general muestra una alta variabilidad, con varios años de baja citación intercalados con picos esporádicos. Cabe resaltar que, aunque se han publicado documentos en años recientes (2022–2024), el nivel de citación es aún reducido, probablemente debido al corto tiempo transcurrido desde su publicación y al efecto de maduración de las citas.

Este comportamiento sugiere que la visibilidad e impacto de los estudios en este campo no es uniforme, y que ciertos artículos se consolidan como referentes mientras otros pasan desapercibidos, reflejando una dinámica de citación desigual.

#### **4.2.2. Principales palabras clave y coocurrencias temáticas (RQ4)**

A través del análisis de coocurrencia de palabras clave, se identificaron los conceptos centrales y su interrelación dentro del corpus analizado. Las palabras clave con mayor frecuencia y centralidad son “phytoremediation” (fitorremediación), “chromium” (cromo), “tannery effluent” (efluente de curtiembre) y “heavy metals” (metales pesados) (Gebru et al., 2024). Estas coocurrencias reflejan con claridad que la línea de investigación más consolidada está centrada en el uso de la fitorremediación como estrategia principal para la inmovilización, extracción o transformación de contaminantes metálicos, con énfasis en el cromo hexavalente, uno de los compuestos más tóxicos presentes en los efluentes industriales del curtido (Hasan et al., 2021).

Otros conceptos complementarios como “biosorption”, “bioaccumulation”, “oxidative stress”, “toxicity”, y “constructed wetlands” (humedales construidos) revelan la ampliación de las estrategias empleadas (Ajibade et al., 2023), integrando procesos combinados que incluyen la biorretención, el estrés oxidativo inducido en las plantas y el uso de sistemas ecosistémicos controlados para la remoción de contaminantes.

El segundo gráfico incorpora la dimensión temporal, representando con una escala de color el año promedio de aparición de cada término. Las tonalidades azul oscuro indican un uso más temprano (alrededor de 2014), mientras que el amarillo representa términos más recientes (cerca de 2020). Se evidencia que mientras términos como *“chromium”*, *“phytoremediation”* y *“tannery wastewater”* han mantenido una presencia sostenida en el tiempo, otros como *“biosorption”*, *“nutrient removal”* y *“constructed wetlands”* reflejan una tendencia emergente en los estudios más recientes, lo cual sugiere un giro hacia enfoques más integrados y ecosistémicos (Quevedo et al., 2025; Arshad et al., 2024).

Es importante aclarar que el término *“phytoremediation”* se refiere exclusivamente al uso de plantas para la remoción, degradación o estabilización de contaminantes presentes en suelos o cuerpos de agua, mientras que expresiones como *“environmental biotechnology”* o *“remediation”* fueron excluidas del análisis interpretativo por ser demasiado amplias o no suficientemente definidas en los metadatos de los artículos. Para el uso de conceptos complementarios o sinónimos, se ha tomado en cuenta la necesidad de una definición explícita, la cual ha sido incorporada en el marco conceptual correspondiente (sección 2.3) (Di Gregorio et al., 2015).

Este análisis permite concluir que las investigaciones recientes en el campo se están orientando hacia combinaciones tecnológicas que integran fitorremediación, ficorremediación y humedales artificiales, en respuesta a la complejidad de los contaminantes presentes en los efluentes de curtiembres y a la búsqueda de soluciones más sostenibles y eficientes.

Este doble enfoque mostrado —por frecuencia, Figura 12a y por evolución temporal, Figura 12b — resulta clave para identificar no solo los núcleos conceptuales

consolidados, sino también las tendencias emergentes que configuran nuevas áreas de investigación en torno a la remediación biotecnológica de efluentes de curtiembres.

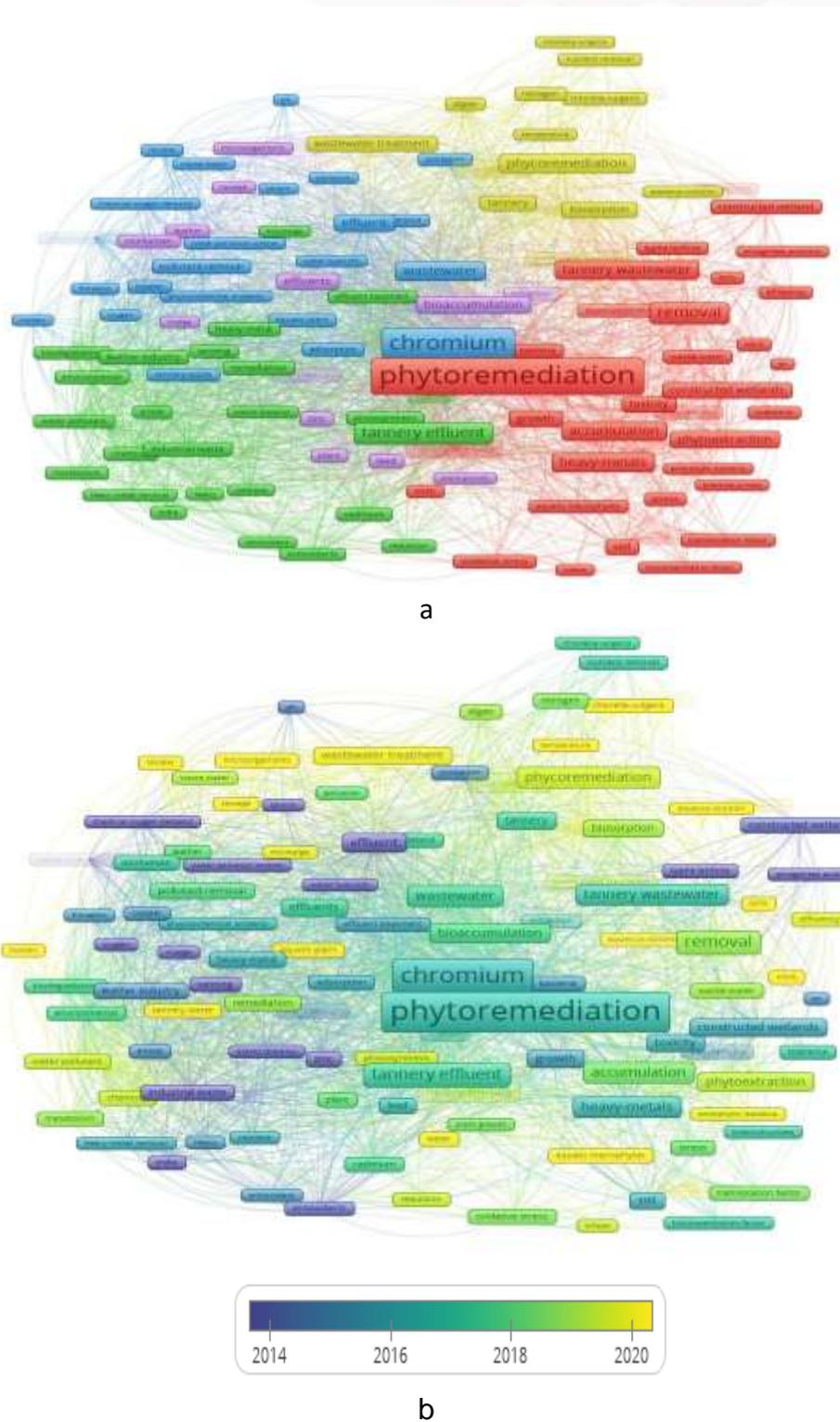


Figura 12. Mapa de coocurrencia de palabras clave de autor en estudios sobre tratamiento de efluentes de curtiembres, a) evolución temporal y b) evolución temporal. Elaboración propia con VosViewer.

### 4.2.3. Revistas científicas más relevantes en la difusión de estudios (RQ5)

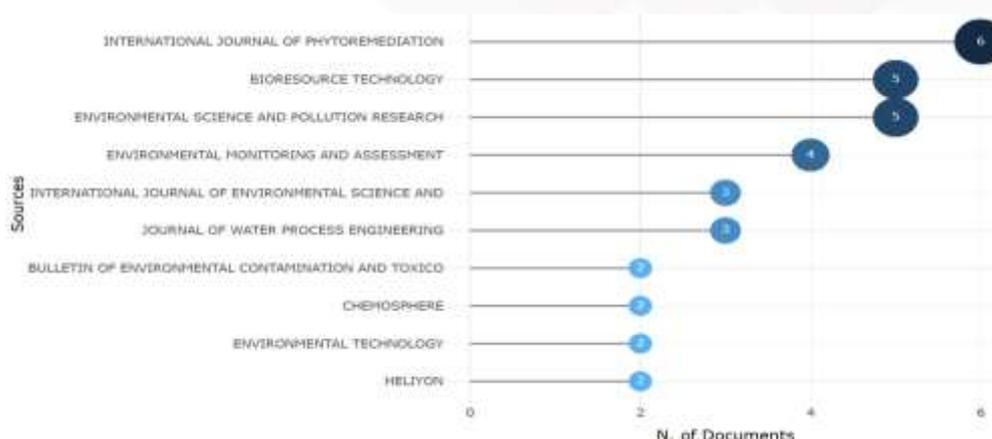


Figura 13. Revistas más productivas en el campo de la fitorremediación aplicada a efluentes de curtiembres (2004–2024). Elaboración propia con Biblioshiny.

El International Journal of Phytoremediation encabeza la lista con 6 publicaciones, consolidándose como el principal canal de difusión especializado en procesos de remediación vegetal de contaminantes. Esta revista concentra investigaciones aplicadas al uso de plantas para la descontaminación de suelos y aguas, lo que guarda plena coherencia con el eje temático del presente estudio (Scopus, 2025).

Le siguen dos revistas de alto impacto y enfoque multidisciplinario: Bioresource Technology y Environmental Science and Pollution Research, ambas con 5 documentos. La primera es reconocida por su enfoque en tecnologías sostenibles y valorización de residuos, mientras que la segunda abarca una amplia gama de temas ambientales, (Scopus, 2025) incluyendo evaluación de contaminantes y métodos de tratamiento. Su participación en la difusión de investigaciones sobre efluentes de curtiembres refleja la transversalidad del tema y su vínculo con agendas científicas orientadas a la sostenibilidad.

Otras revistas como Environmental Monitoring and Assessment (4 publicaciones), el International Journal of Environmental Science and Technology, y el Journal of Water

Process Engineering (3 publicaciones cada una) también aportan de manera significativa al campo, sobre todo desde una perspectiva analítica (Scopus, 2025), de evaluación de riesgos y tratamiento de aguas residuales. Esto sugiere un creciente interés por la validación empírica de las tecnologías aplicadas.

En la parte inferior del gráfico, con 2 artículos cada una, se ubican revistas como Chemosphere, Environmental Technology, Heliyon y el Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. Aunque con menor volumen, estas fuentes aportan diversidad temática y cobertura interdisciplinaria (Scopus, 2025), ampliando el espectro de audiencias a las que llegan estas investigaciones.

En conjunto, el análisis evidencia que la producción científica en este campo no se restringe a una única fuente, como se ve en la Figura 13, sino que se distribuye entre revistas especializadas y multidisciplinarias, lo que refuerza el carácter transversal y emergente de la biotecnología ambiental como solución para problemas industriales complejos como los efluentes de curtiembres.

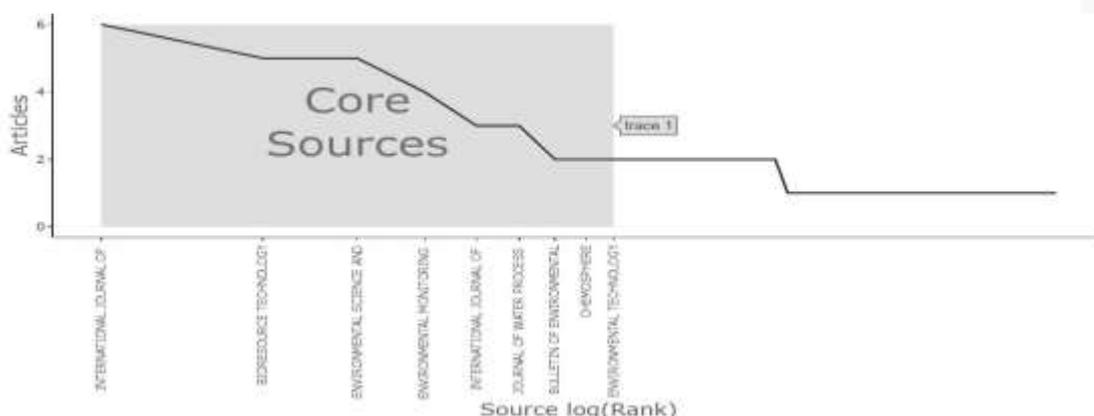


Figura 14. Distribución de revistas según la Ley de Bradford para identificar el núcleo de producción científica. Elaboración propia con Bibliometrix y Biblioshiny R.

En la Figura 14, se aplica la Ley de Bradford para identificar las revistas núcleo en el campo de estudio, fuera del núcleo, la producción se dispersa en revistas con menor frecuencia, lo que refleja la naturaleza interdisciplinaria y en expansión del tema

investigado (Desai, Veras & Gosain, 2018). La zona sombreada representa las fuentes que concentran la mayor parte de los artículos publicados sobre fitorremediación, microrremediación y ficorremediación en efluentes de curtiembres. Se destacan como revistas núcleo: *International Journal of Phytoremediation*, *Bioresource Technology*, *Environmental Science and Pollution Research*, entre otras. Estas concentran el mayor volumen de publicaciones y son clave para la disseminación del conocimiento en este campo.

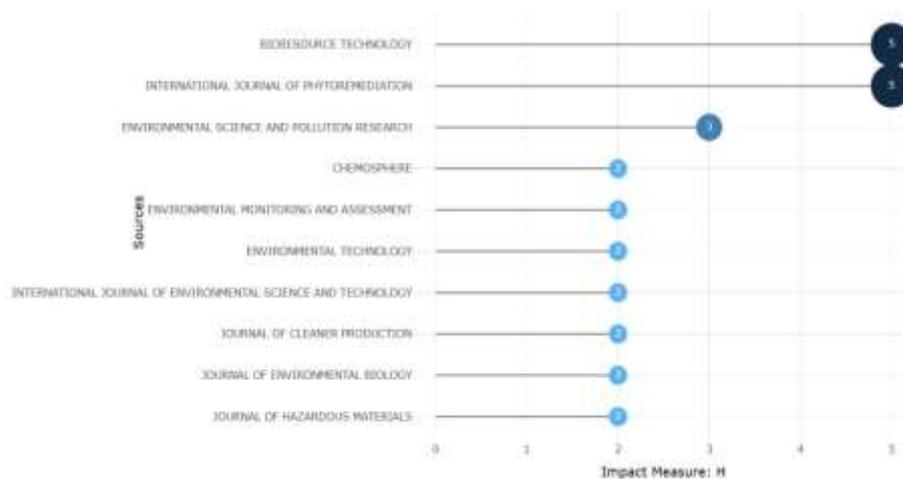


Figura 15. Impacto de las fuentes científicas basado en el índice H local (H-index).  
Fuente: Elaboración propia con Bibliometrix y Biblioshiny en R.

La Figura 15, muestra el índice h (H-index) de las fuentes más relevantes. Bioresource Technology y el International Journal of Phytoremediation lideran con un valor h de 5, seguidas por Environmental Science and Pollution Research (h = 3). Este indicador refleja la capacidad de estas revistas para concentrar publicaciones con alto número de citas, lo que las posiciona como canales estratégicos para la difusión científica de alto impacto (Lazarides et al, 2023).

Mientras que la Figura 16, evidencia la acumulación temporal de publicaciones por fuente. Se observa que Bioresource Technology tuvo un inicio temprano y estable desde 2005, Figura 17 (línea roja), mientras que revistas como Environmental Science

and Pollution Research y Chemosphere muestran una incorporación más reciente, pero con crecimiento sostenido. En los últimos años, también han ganado protagonismo revistas como Environmental Monitoring and Assessment (amarillo), el Journal of Water Process Engineering (rosado) y el International Journal of Environmental Science and Technology (celeste), ampliando el espectro editorial hacia áreas de ingeniería, monitoreo y tecnología ambiental. Esta tendencia confirma que el campo de estudio ha pasado de un enfoque concentrado en unas pocas revistas especializadas a una presencia más amplia y diversificada, lo que refleja tanto el crecimiento temático como su creciente relevancia científica e interdisciplinaria.

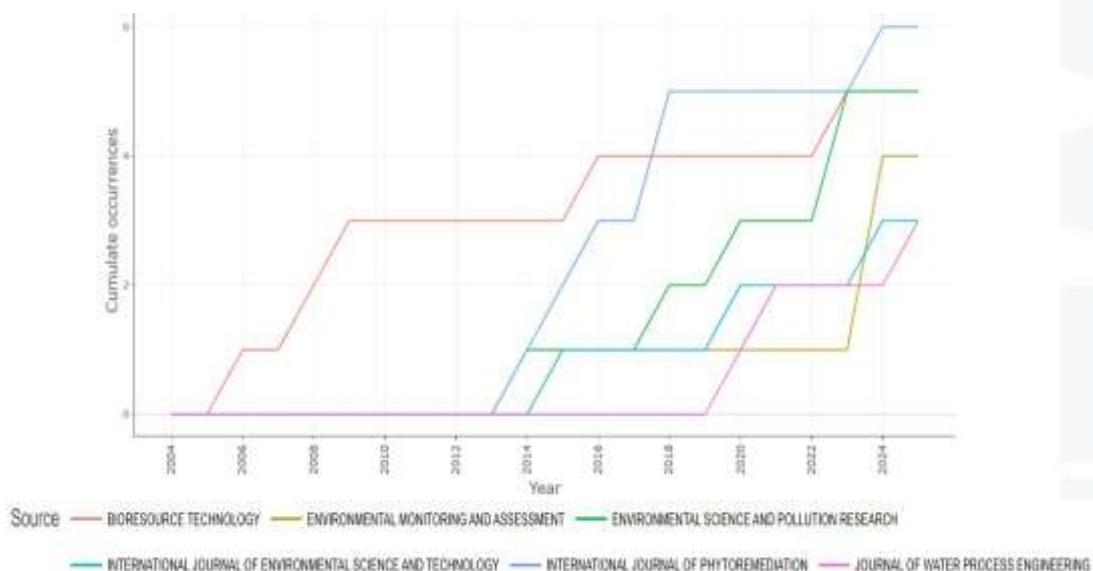


Figura 16. Evolución temporal de la productividad por fuente científica (2004–2024). Fuente: Elaboración propia con Bibliometrix y Biblioshiny en R.

#### 4.2.4. Metodologías que se emplean con mayor frecuencia en los estudios analizados (RQ6)

El análisis temático y colaborativo de la producción científica relacionada con la fitorremediación, microrremediación y tratamiento de efluentes de curtiembres revela

una estructura consolidada en torno a ciertos conceptos clave y una expansión progresiva en términos de colaboración institucional e internacional. Diversas visualizaciones generadas mediante herramientas bibliométricas permiten interpretar la evolución del campo en las últimas dos décadas. El mapa temático (Figura 17, tipo Callon) clasifica las palabras clave en función de su centralidad (relevancia temática) y densidad (desarrollo interno). En este gráfico se destacan como temas motores — altamente relevantes y desarrollados— los términos *phytoremediation*, *bioremediation* y *wastewater*, los cuales conforman el núcleo conceptual más robusto del área. Sin embargo, no aparece *mycorremediación* ni *ficorremediación* dado las pocas publicaciones sobre el tema en relación a la descontaminación del agua residual de curtiembres. En paralelo, temas como *chromium*, *tannery effluent* y *constructed wetlands* aparecen en el cuadrante de temas básicos: poseen alta relevancia, pero un desarrollo interno más limitado, lo que sugiere que, si bien son ampliamente abordados, aún presentan potencial para exploraciones más profundas. Por otro lado, palabras clave como *antioxidant enzymes*, *pollutant degradation* y *water hyacinth* aparecen en la categoría de temas emergentes o en declive, lo que indica líneas de investigación incipientes o con menor consolidación reciente. Finalmente, términos como *oxidative stress*, *photosynthesis* y *antioxidants* se sitúan como temas de nicho, generalmente asociados a estudios específicos sobre el impacto fisiológico en especies vegetales utilizadas en procesos de remediación.

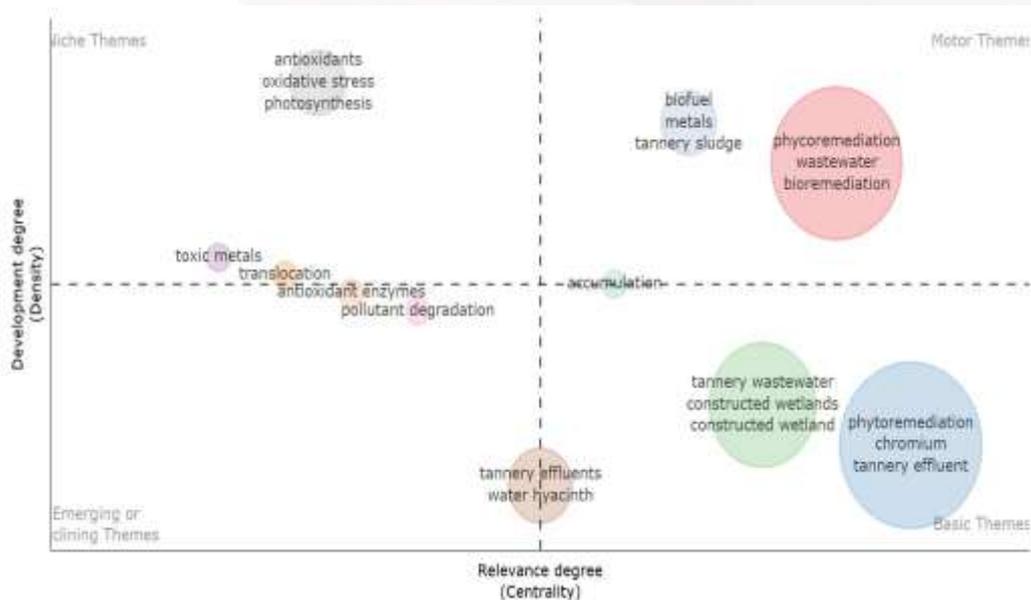


Figura 17. Análisis temático de coocurrencias en estudios sobre fitorremediación de efluentes de curtiembre (2004–2024)

La representación de densidad de palabras clave refuerza estos hallazgos, que se muestra en la Figura 18, mostrando una alta concentración semántica en torno a *phytoremediation*, *chromium*, *bioremediation* y *tannery effluent*. Estos términos son los más frecuentes y conectados dentro del corpus, indicando que la literatura actual se centra mayoritariamente en el uso de plantas para la remoción de cromo y otros metales pesados en aguas residuales de origen industrial. En zonas menos densas del mapa se encuentran conceptos como *biosorption*, *oxidation*, *algae*, *microalgae* y *toxicity*, lo cual sugiere un interés emergente por integrar procesos fisicoquímicos y biológicos complementarios a la fitorremediación convencional. Interesante notar que no se reflejan los términos de micorremediación que no tienen más que tres publicaciones en todo el cuerpo analizado.





Figura 19. Mapa de coautoría entre autores en el campo de la fitorremediación, micorremediación y ficorremediación aplicadas al tratamiento de efluentes de curtiembres (2004–2024).

Esto refleja un aumento sostenido de las colaboraciones internacionales en Asia. No obstante, aún se observan limitaciones en la articulación entre comunidades científicas, lo cual representa una oportunidad para fomentar redes de colaboración más amplias. Al mismo tiempo, la presencia de líneas emergentes y de nicho —como el uso de enzimas antioxidantes, especies acuáticas específicas o microalgas— sugiere una apertura hacia enfoques más integradores, que combinan la biotecnología vegetal con otros sistemas de tratamiento natural o asistido.

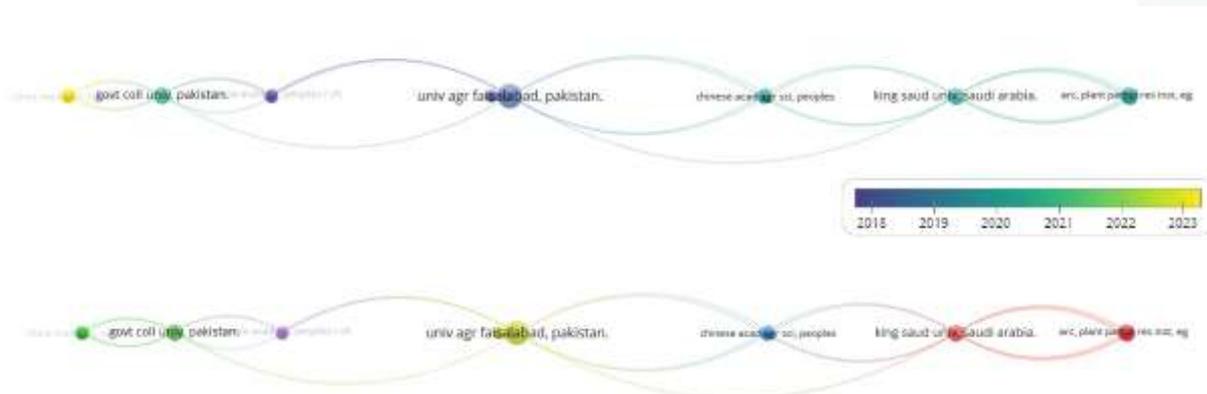


Figura 20. Red de colaboración institucional en estudios sobre biorremediación de efluentes de curtiembres (2004–2024).

**4.3. Objetivo Específico 3. Determinar las tendencias emergentes, las áreas de concentración temática y los vacíos de investigación en la literatura científica relacionada con las técnicas biotecnológicas de remediación aplicadas a efluentes de curtiembres.**

RQ7: ¿Cuáles son los documentos más citados y qué características presentan los estudios más influyentes?

RQ8: ¿Cuáles son las tendencias emergentes y los vacíos de conocimiento identificados en la literatura científica sobre el tema?

Estas preguntas buscan identificar si los enfoques integrados están subrepresentados y si existen vacíos en regiones específicas, lo cual permitiría validar directamente la hipótesis propuesta.

#### **4.3.1. Documentos más citados y qué características presentan los estudios más influyentes (RQ7)**

El análisis de citas globales permite identificar los documentos más influyentes en el área de fitorremediación y tratamiento de efluentes de curtiembres. La primera Figura 21, muestra el ranking de los 20 artículos más citados dentro del corpus analizado. Destacan tres documentos que superan con amplitud las 150 citas: el trabajo de Saravanan et al. (2021) publicado en Chemosphere, con 738 citas; el artículo de Lofrano et al. (2013) en Science of the Total Environment, con 491 citas; y el estudio de Calheiros et al. (2007) en Water Research, con 251 citas. Estos artículos representan contribuciones seminales al campo, tanto por su antigüedad como por su capacidad de generar nuevas investigaciones, se consolidan como referentes obligatorios en revisiones y estudios posteriores.

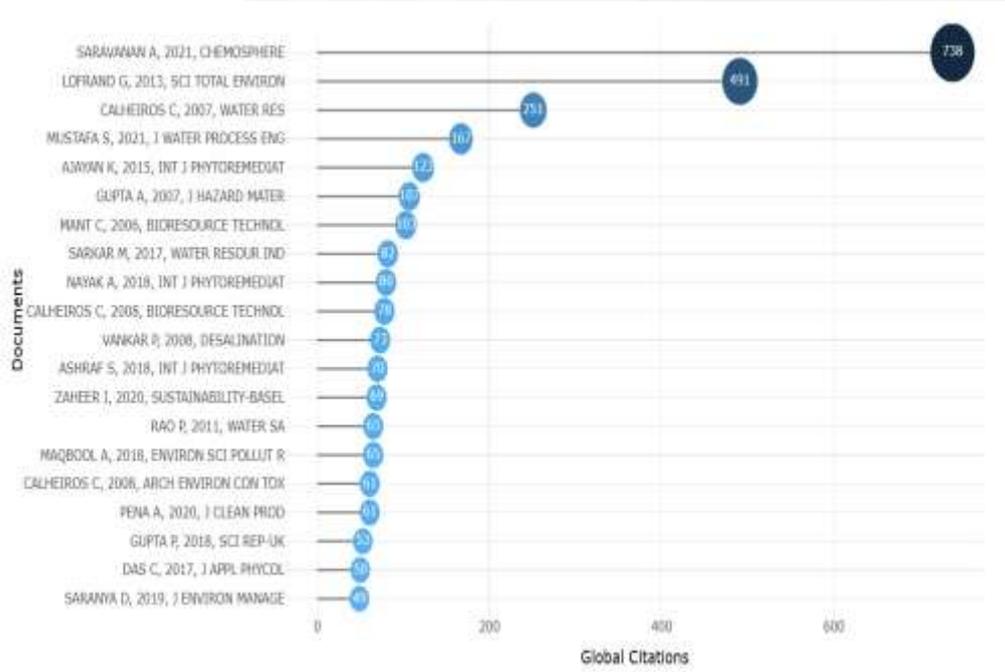


Figura 21. Documentos más citados en el campo de la remediación biotecnológica de efluentes de curtiembres (2006–2021), según número de citas globales

La Figura 22 permite observar la distribución temporal de las citas. Aunque existe una producción continua desde 2004, los picos de citación se concentran principalmente en los años 2013 y 2021, coincidiendo con la publicación de los artículos mencionados anteriormente. A partir de 2015, se observa una mayor cantidad de publicaciones con niveles moderados de citación, lo que sugiere una ampliación temática, pero aún con un impacto más limitado en términos de citas acumuladas (Greener, 2022). Este comportamiento es característico de campos en consolidación, donde pocos documentos concentran una alta influencia, mientras que la mayoría presentan un impacto menor pero creciente (Moral-Muñoz et al., 2020). En conjunto, los datos evidencian una estructura de citación desigual, en la que ciertos estudios clave dominan la visibilidad científica, mientras otros empiezan a ganar relevancia en la literatura más reciente.

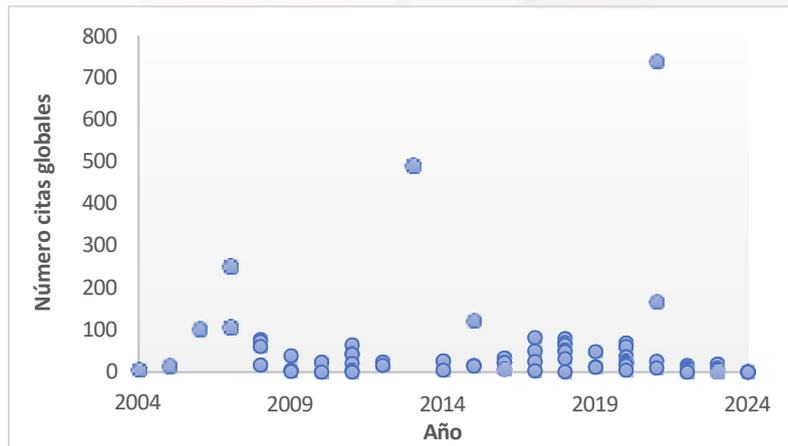


Figura 22. Relación entre antigüedad de publicación y número de citas globales en estudios sobre fitorremediación, micorremediación y ficorremediación (2006–2021)

#### 4.3.2. Tendencias emergentes y los vacíos de conocimiento identificados en la literatura científica sobre el tema (RQ8)

Del conjunto de visualizaciones analizadas, se desprenden varias tendencias emergentes que delinear el rumbo actual de la investigación en tecnologías biotecnológicas aplicadas al tratamiento de efluentes de curtiembres. A través del mapa temático de Callon, se observa que conceptos como *biosorption*, *accumulation*, *constructed wetlands* y *enzimas antioxidantes* comienzan a posicionarse como ejes novedosos de estudio. Si bien aún presentan baja densidad o centralidad, su presencia en las zonas de temas emergentes o en desarrollo indica un potencial de crecimiento temático, especialmente en la búsqueda de soluciones integradas que combinen procesos naturales y biológicos con enfoques de ingeniería ambiental.

Asimismo, los mapas de densidad semántica y coocurrencia de palabras clave muestran un incremento en la exploración de microalgas, biosorción, estrés oxidativo y uso de especies específicas como *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*. Estos enfoques reflejan una apertura hacia métodos no convencionales de remediación, incluyendo la *ficorremediación* y el uso de *enzimas vegetales*. Este hallazgo se refuerza en el mapa de temas de nicho, donde aparecen términos como *oxidative*

*stress*, *photosynthesis* y *antioxidants*, lo que sugiere un interés creciente por comprender los mecanismos fisiológicos y moleculares subyacentes en las especies utilizadas.

Desde el enfoque colaborativo, los mapas de coautoría y redes institucionales evidencian una baja conexión entre grupos de investigación (Husaeni & Nandiyanto, 2021), lo cual limita el intercambio de metodologías y resultados. Aunque se han consolidado algunas alianzas internacionales (principalmente entre Pakistán, China y Arabia Saudita), la escasa colaboración entre clústeres de autores indica un vacío en la integración académica global, especialmente entre regiones altamente productivas y aquellas con condiciones industriales similares, pero baja representación científica. Existe muy poca representación en Sudamérica, solo aparecen países como Argentina y Brasil que no presentan colaboraciones Inter países. En cuanto a los vacíos de conocimiento, se identifica una ausencia de estudios longitudinales sobre el comportamiento real de contaminantes específicos en condiciones de campo, así como una limitada evaluación de la eficacia a largo plazo de sistemas como humedales construidos o consorcios vegetales mixtos. Además, pese al reconocimiento del cromo como el principal contaminante tratado, hay pocos trabajos que aborden la interacción entre múltiples contaminantes (ej. metales pesados + compuestos orgánicos) en efluentes complejos, lo que representa un nicho crítico a cubrir.

También se detecta una subrepresentación de enfoques transdisciplinarios que integren aspectos sociales, económicos y regulatorios en la implementación de tecnologías verdes (Gutiérrez-Salcedo et al., 2017). Las publicaciones analizadas tienden a centrarse en aspectos técnico-científicos, pero hay poca evidencia de

estudios que incorporen análisis de costo-efectividad, aceptabilidad social o barreras normativas, lo que constituye un vacío relevante en contextos de países en desarrollo. Finalmente, el análisis de citas globales evidencia que, si bien algunos estudios han alcanzado alta visibilidad, la mayoría de los artículos recientes aún no acumulan un volumen significativo de citas, lo que sugiere que muchas líneas de investigación aún están en fases tempranas de consolidación o no han logrado captar suficiente atención en la comunidad científica internacional (Abdelwahab et al., 2025).

En conjunto, los resultados permiten afirmar que la literatura actual muestra un creciente dinamismo con líneas emergentes prometedoras, pero también con vacíos conceptuales, metodológicos y colaborativos que deben ser abordados para lograr una gestión sostenible, eficiente y científicamente robusta de los efluentes de curtiembres mediante soluciones biotecnológicas.

## **CAPÍTULO V: Discusión, Conclusiones y Recomendaciones**

### **5.1. Discusión**

#### **5.1.1. Identificación de los países, autores e instituciones con mayor productividad científica en el ámbito del tratamiento de efluentes de curtiembres mediante fitorremediación, ficorremediación y micorremediación.**

Los resultados obtenidos permiten verificar que existe una alta concentración de producción científica tanto a nivel de autores como de instituciones, lo cual es consistente con lo planteado por la Ley de Lotka, que establece que la mayoría de los autores publican una sola vez, mientras que un número reducido genera múltiples contribuciones. En este estudio, más del 80 % de los autores identificados en el corpus bibliográfico han publicado un solo artículo, lo que coincide con investigaciones similares en otros campos tecnológicos emergentes como la bioenergía y la construcción sostenible (Zheng & Yan, 2025).

Por otro lado, se observó que autores como Ali S., Ashraf S. y Calheiros C. no solo se destacan por el número de publicaciones, sino también por el impacto medido en citas, índices H, G y M. Este hallazgo está en línea con los estudios de Putra et al. (2025), quienes encontraron que, en campos interdisciplinarios como la fitorremediación, un núcleo reducido de autores concentra la mayoría de las citas y lidera las redes de colaboración. Esta concentración de la autoría también ha sido reportada por Sabour et al. (2025) en el contexto de la micorremediación aplicada a suelos contaminados.

En cuanto a la evolución temporal, autores como Ali S. y Ashraf S. muestran una producción científica sostenida en el periodo 2018–2023, lo cual es indicativo de una consolidación de su línea de investigación. Mientras tanto, la aparición de nuevos autores como Gupta A. y Barroso C. sugiere un proceso de renovación dentro del

campo. Este fenómeno ha sido identificado en la literatura como un indicador de madurez y transición temática en áreas ambientales, tal como lo señalan Barathi et al. (2020) al analizar la evolución de equipos de investigación en tratamientos de efluentes industriales y durante la eliminación de amonio durante el tratamiento de aguas residuales (Hong et al, 2024).

Respecto a las instituciones más productivas, el análisis muestra un predominio claro del *Council of Scientific and Industrial Research (CSIR)* de India, seguido por universidades de Pakistán y del sur de Asia. Esta regionalización del conocimiento ha sido discutida por Fazila et al. (2023), quienes explican que los países del sur asiático han intensificado la investigación en tecnologías biológicas debido a la presión regulatoria y la presencia histórica de industrias curtidoras. Además, el enfoque creciente en sostenibilidad ha llevado a que estas instituciones lideren proyectos financiados internacionalmente (Acharya et al., 2023).

Finalmente, el análisis de países revela que India, Pakistán y China lideran en volumen de publicaciones, mientras que naciones como Irak y Arabia Saudita muestran una expansión en años recientes. Esto refleja una mayor integración de países de Medio Oriente en redes globales de conocimiento ambiental, lo cual ha sido subrayado por El-Ramady et al. (2022) como una tendencia emergente en el ámbito de la biotecnología verde.

En resumen, los resultados respaldan la hipótesis de que existe una concentración temática y geográfica en ciertos autores, instituciones y países. Al mismo tiempo, se observa una incipiente diversificación que podría fortalecer la colaboración internacional y fomentar nuevas líneas de investigación interdisciplinaria en el tratamiento de efluentes curtidores mediante herramientas biotecnológicas sostenibles.

### **5.1.2. Análisis de las palabras clave, coocurrencias temáticas y redes de colaboración para comprender las principales líneas de investigación y su evolución (2004–2024)**

La evolución del campo de la fitorremediación, ficorremediación y micorremediación en el tratamiento de aguas residuales de curtiembres ha mostrado un crecimiento sostenido a lo largo de dos décadas, con una tasa anual del 5,37 % y un impacto relevante medido por el promedio de 40,37 citas por documento. Este crecimiento sostenido coincide con la tendencia global de consolidación de la biotecnología ambiental como una de las principales herramientas para la remediación de efluentes industriales (Fan et al., 2023). La Figura 10 muestra un punto de inflexión a partir del año 2019, con un aumento significativo en la producción, lo cual podría estar relacionado con el creciente interés por soluciones sostenibles y el impulso de las políticas de economía circular.

Los picos de citación en 2013 y 2021, Figura 11, reflejan que ciertos artículos han marcado hitos en el desarrollo conceptual del campo. Este comportamiento también ha sido evidenciado en otros estudios bibliométricos sobre tecnologías ambientales emergentes, donde artículos de revisión o metodológicos concentran el mayor número de citas y actúan como nodos de referencia en la red académica (Huang et al., 2023). Sin embargo, el hecho de que la mayoría de los documentos recientes tengan baja citación indica que aún se encuentran en fase de exposición y maduración, lo cual es coherente con lo planteado por el modelo de vida útil de los documentos científicos.

El análisis de palabras clave ha permitido identificar los conceptos dominantes en la investigación, siendo “phytoremediation”, “chromium” y “tannery effluent” los más frecuentes. Esto confirma que la línea de investigación más consolidada gira en torno

a la remoción de metales pesados, en particular el cromo, mediante el uso de especies vegetales. Investigaciones recientes han reafirmado la efectividad de la fitorremediación en la eliminación de cromo hexavalente, destacando especies como *Eichhornia crassipes* y *Phragmites australis* por su alta tasa de acumulación y adaptabilidad a ambientes contaminados (Abdel-Shafy et al., 2024; Solanki et al., 2024).

Asimismo, se observó una tendencia emergente hacia estrategias más integradas como biosorción, sistemas de humedales artificiales y el uso combinado de plantas y microalgas, lo que sugiere una transición del enfoque unidimensional hacia abordajes ecosistémicos. En estudios recientes, los enfoques híbridos han mostrado mayor eficiencia en la reducción de carga contaminante y mayor estabilidad en condiciones variables de pH y carga orgánica, lo que amplía sus posibilidades de implementación en ambientes reales (Abdelrahman et al., 2023; Wang et al., 2023).

Respecto a las revistas más relevantes, el *International Journal of Phytoremediation* y *Bioresource Technology* encabezan la producción, según la Ley de Bradford y el índice H local. Este hallazgo refuerza la importancia de estos canales editoriales como fuentes de referencia para investigadores en remediación vegetal. La diversificación de revistas —con títulos emergentes en ingeniería ambiental, procesos de tratamiento de aguas y toxicología— sugiere una expansión disciplinar que permite abordar el problema desde múltiples enfoques técnicos y científicos (Zhang et al., 2023).

Finalmente, los mapas de redes de coautoría muestran una estructura fragmentada entre autores, con algunos núcleos consolidados - Gnanaselkaran C y Ali S -, pero con baja interconexión global. Este patrón ha sido ampliamente documentado en estudios bibliométricos sobre ciencias ambientales, donde las barreras idiomáticas y la escasa financiación conjunta limitan el intercambio metodológico entre regiones

(Patra & Mishra, 2024). No obstante, la red institucional revela una articulación más activa, con universidades de Asia, como la *University of Agriculture Faisalabad* y la *Chinese Academy of Sciences*, que han establecido alianzas con centros en Arabia Saudita, Egipto y China, evidenciando un creciente interés por la cooperación transnacional.

### **5.1.3. Tendencias emergentes, áreas de concentración temática y vacíos de investigación en la literatura científica relacionada con las técnicas biotecnológicas de remediación aplicadas a efluentes de curtiembres**

El análisis de los documentos más citados en el corpus en la Figura 21, muestra una clara concentración de influencia en pocos estudios clave. Por ejemplo, el artículo de Saravanan et al. (2021), con más de 700 citas, domina el panorama, seguido por Lofrano et al. (2013) y Calheiros et al. (2007), lo cual refuerza la idea de que ciertos trabajos seminales actúan como nodos centrales en la evolución de este campo. Este patrón es característico de disciplinas en consolidación, donde se observan estructuras de citación altamente desiguales, como también lo evidencian estudios bibliométricos recientes en ciencias ambientales (Sardana et al., 2024). La preeminencia de estos estudios se explica no solo por su antigüedad o calidad metodológica, sino por su capacidad para proponer enfoques integradores, como la combinación de tecnologías verdes y procesos de ingeniería química.

La Figura 22 confirma que, aunque la producción científica ha aumentado desde 2015, muchas publicaciones aún no logran un alto impacto citacional, lo cual puede estar relacionado con su novedad o con una limitada difusión internacional o por el poco interés en el campo de estudio, también se puede intuir que muchas de los avances se realizan a nivel industrial que no es publicado. Wang et al. (2024b) afirman que, en campos interdisciplinarios como la biotecnología ambiental, el impacto de una

publicación depende tanto de su relevancia científica como de su inserción en redes colaborativas y canales de alto factor de impacto. Esta condición subraya la importancia de posicionar nuevos trabajos en revistas clave y en consorcios de coautoría transnacionales.

En cuanto a las tendencias emergentes, el análisis temático revela que conceptos como *biosorption*, *constructed wetlands*, *oxidative stress* y *antioxidant enzymes* están ganando espacio en la literatura reciente, aunque aún se ubican en zonas de baja densidad (Figuras 17 y 18). Este fenómeno es consistente con lo descrito por Shrestha et al. (2023), quienes destacan que el avance de nuevas líneas de investigación frecuentemente se inicia en la periferia temática antes de alcanzar centralidad científica. Las técnicas basadas en microalgas, por ejemplo, están comenzando a desarrollarse con mayor detalle, especialmente por su capacidad de adaptarse a ambientes extremos y contribuir a la bioacumulación eficiente de metales pesados y nutrientes.

Además, se observa un creciente interés en el uso de indicadores fisiológicos y moleculares en plantas como mecanismo de evaluación de eficacia, lo que se refleja en la aparición de términos como *photosynthesis*, *oxidative stress* y *antioxidants*. Este giro hacia lo fisiológico sugiere una convergencia entre biología vegetal y ecotoxicología aplicada, tendencia documentada recientemente en investigaciones sobre fitotoxicidad inducida por efluentes industriales (Zhou et al., 2023).

Respecto a los vacíos de conocimiento, se destaca la falta de estudios longitudinales y de campo que evalúen el desempeño real de sistemas de remediación bajo condiciones variables, así como la escasa atención a la interacción sinérgica entre contaminantes múltiples (por ejemplo, metales pesados y compuestos orgánicos). Esta deficiencia ha sido señalada por Koshy et al. (2024), quienes argumentan que la

mayoría de los estudios se desarrollan en condiciones de laboratorio, limitando su aplicabilidad. Además, se ha detectado una subrepresentación de estudios enfocados en regiones de Latinoamérica, lo que contrasta con el fuerte protagonismo de países del sur de Asia y Medio Oriente.

También se identifican importantes vacíos metodológicos y colaborativos. Las redes de coautoría en la Figura 19, muestran una baja conexión entre clústeres de investigación, limitando el intercambio de técnicas y enfoques. Como indican Lin & Huang (2023), la colaboración interinstitucional no solo mejora la producción científica, sino que también eleva la calidad de los resultados mediante la combinación de infraestructuras, experiencia técnica y diversidad contextual. Esta fragmentación colaborativa, especialmente marcada entre países con problemas ambientales similares, representa una barrera para la transferencia de conocimiento y la validación transregional de soluciones.

Finalmente, se evidencia una ausencia de enfoques transdisciplinarios que integren variables sociales, regulatorias y económicas en el diseño e implementación de tecnologías verdes. El tratamiento de efluentes de curtiembres no solo es un problema ambiental, sino también una cuestión de gobernanza, justicia ambiental y viabilidad económica. La falta de estudios que incluyan indicadores de aceptabilidad social o análisis de costo-beneficio limita la adopción real de estas tecnologías en contextos de países en desarrollo.

- .
- .
- .
- .
- .

## 5.2. Conclusiones

- El análisis bibliométrico permitió identificar una marcada concentración de la producción científica en pocos países, siendo India, Pakistán y China los actores más prominentes en términos de volumen de publicaciones, número de instituciones activas y liderazgo de autores. Este patrón refleja una regionalización del conocimiento, posiblemente asociada a la densidad industrial de curtiembres en estas regiones y a políticas públicas orientadas a la remediación ambiental.
- En cuanto a los autores, se confirma la validez de la Ley de Lotka, pues más del 80 % de los investigadores solo tiene una publicación registrada, mientras que unos pocos concentran el impacto y la producción. Autores como Ali S., Ashraf S. y Calheiros C. destacan no solo por su productividad, sino también por el alto número de citas, índices H y G elevados, y continuidad en su línea de investigación. Estos datos sugieren una estructura piramidal del conocimiento, donde líderes científicos actúan como nodos centrales para la difusión y consolidación de nuevas investigaciones.
- Asimismo, las redes de colaboración muestran clústeres regionales cohesionados, pero baja conectividad global, lo cual limita el intercambio intercontinental de metodologías, especies vegetales nativas y experiencias de implementación. Se concluye que, aunque existe una masa crítica de investigadores y centros productivos, la cooperación internacional interdisciplinaria aún es incipiente, lo que restringe la generación de soluciones adaptadas a contextos diversos.

- Las palabras clave más frecuentes —como phytoremediation, chromium, tannery effluent y heavy metals— evidencian que la línea más consolidada en el campo es el uso de plantas para la eliminación de cromo hexavalente en efluentes de curtiembre. Sin embargo, los análisis de coocurrencia y evolución temporal de términos también revelan la aparición de nuevas estrategias, como biosorption, constructed wetlands, bioaccumulation y oxidative stress, lo cual sugiere una transición hacia enfoques más complejos e integradores.
- Las visualizaciones temáticas muestran que, si bien hay un núcleo conceptual sólido, se están abriendo espacios para líneas de investigación emergentes, incluyendo el uso de microalgas (ficorremediación), enzimas vegetales, especies acuáticas nativas y tecnologías híbridas. Estas tendencias indican un cambio de paradigma desde la remediación vegetal convencional hacia soluciones ecosistémicas que combinan biotecnología, ingeniería y ecología aplicada.
- Las redes de coautoría, sin embargo, revelan una estructura fragmentada, con múltiples grupos de investigación trabajando de forma aislada. Esto, sumado a la baja tasa de coautoría internacional (20,65 %), sugiere que el campo aún enfrenta desafíos estructurales en términos de colaboración y transferencia de conocimiento entre regiones. La multiplicidad de revistas involucradas en la diseminación del conocimiento —desde títulos altamente especializados como International Journal of Phytoremediation hasta revistas multidisciplinarias como Bioresource Technology— refleja la transversalidad temática y el carácter emergente del campo, aunque también exige mayor articulación editorial.

- Los resultados permiten identificar con claridad las principales tendencias emergentes en el campo: el uso de microalgas, especies acuáticas como *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*, enzimas antioxidantes y análisis moleculares de estrés oxidativo inducido. Estas nuevas líneas de investigación aún muestran baja densidad y centralidad temática, pero apuntan hacia un enriquecimiento metodológico del campo con enfoques más precisos y adaptables a diferentes contextos.
- En contraste, se evidencian vacíos críticos de conocimiento como la escasez de estudios a largo plazo o en condiciones reales de campo, la limitada exploración de contaminantes combinados, la poca integración de variables sociales, económicas y regulatorias en los estudios, la subrepresentación de América Latina en la producción científica y en las redes de colaboración internacional.
- Además, el análisis bibliométrico confirma que la mayoría de los documentos recientes aún no han alcanzado un volumen significativo de citas, lo que evidencia que muchas líneas están en fase temprana de desarrollo. Este comportamiento es común en campos emergentes, pero destaca la necesidad de impulsar publicaciones estratégicas en revistas de alto impacto y fomentar la visibilidad internacional.
- La estructura actual sugiere que, para avanzar hacia un modelo de remediación biotecnológica sostenible y replicable, es necesario fortalecer los enfoques transdisciplinarios, incorporando análisis de costo-beneficio, evaluación de impacto social y viabilidad técnica en escenarios reales.
- En conjunto, el análisis bibliométrico de la literatura científica sobre fitorremediación, micorremediación y ficorremediación en el tratamiento de

efluentes de curtiembres permite afirmar que el campo ha experimentado un crecimiento constante, una diversificación temática significativa y una creciente consolidación institucional. No obstante, aún enfrenta retos importantes relacionados con la fragmentación de redes de colaboración, la falta de validación empírica en campo y la ausencia de enfoques transversales que integren la dimensión social y normativa.

- Se concluye que las tecnologías biotecnológicas tienen un potencial comprobado para mitigar los impactos ambientales de la industria del cuero, pero su efectividad a gran escala dependerá de la convergencia de ciencia, política, ingeniería y comunidad en el desarrollo de soluciones contextualmente adaptadas y económicamente sostenibles.

### **5.3. Recomendaciones**

A partir de los vacíos de conocimiento identificados en el análisis bibliométrico, se proponen las siguientes líneas de investigación como posibles estudios futuros relacionados a combinaciones de especies vegetales y microalgas son más eficientes para el tratamiento simultáneo de metales pesados y compuestos orgánicos en efluentes de curtiembres, aceptación social de humedales creados para descontaminación de aguas de curtiembres y análisis de costos de los procesos a aplicarse.

Impulsar investigaciones de carácter experimental que validen en campo los resultados de laboratorio, considerando variables como caudal, clima, tipo de suelo y biodiversidad local.

Fomentar el uso de análisis ómicos (genómica, transcriptómica, metabolómica) para comprender mejor los mecanismos de remediación vegetal y microalgal.

Diseñar y escalar sistemas híbridos que combinen humedales construidos, filtros verdes y sistemas de biorreactores con plantas acuáticas o algas, priorizando especies locales.

Incluir parámetros de mantenimiento, vida útil y regeneración de biomasa como parte integral de los diseños tecnológicos.

Estimular la creación de redes regionales de investigación y transferencia de tecnología entre universidades, gobiernos y sectores industriales del cuero.

Integrar estrategias de capacitación técnica para operadores de curtiembres sobre tecnologías limpias y remediación biológica.

Incluir a las comunidades en los procesos de diseño y monitoreo de proyectos piloto, evaluando su percepción, expectativas y conocimientos sobre tecnologías verdes.

Desarrollar programas de educación ambiental vinculados a la industria del cuero, para fortalecer la conciencia sobre el manejo de residuos y el uso sostenible del agua.

### **Limitaciones del estudio**

Dependencia de los metadatos disponibles: el análisis bibliométrico se basó en artículos indexados en bases de datos como Scopus y Web of Science. Esto excluye literatura gris, estudios locales o publicaciones en revistas no indexadas que podrían ofrecer enfoques valiosos desde países con menor visibilidad científica.

Sesgo lingüístico: la mayoría de los documentos analizados están escritos en inglés, lo que puede haber dejado fuera aportes significativos en otros idiomas, especialmente de América Latina.

Limitaciones del software utilizado: aunque herramientas como Biblioshiny, VOSviewer y R son robustas, presentan restricciones en la categorización semántica

automática de términos, lo que puede generar ambigüedad en algunos clústeres temáticos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelrahman, H., Shehata, S. A., & Abdel-Moneim, A. M. (2023). Phytoremediation efficiency of mixed macrophyte-algae systems in removing chromium and other heavy metals from industrial effluents. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 258, 115044. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115044>
- Abdel-Shafy, H. I., El-Khateeb, M. A., & Mansour, M. S. (2024). Treatment of tannery wastewater using integrated phytoremediation system. *Environmental Technology & Innovation*, 34, 103294. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103294>
- Abdelwahab, S. I., Taha, M. M. E., Farasani, A., Abdullah, S. M., Moshi, J. M., Alshahrani, A. F., Khamjan, N. A., Khired, Z. A., Assiri, A., Alqassmi, A. M., Alhusayni, A. M., Ibrahim, I. A. A., Alshahrani, S., & Hassan, W. (2025). Bibliometric analysis: A few suggestions (Part Two). *Current Problems in Cardiology*, 50(1), 102982. <https://doi.org/10.1016/j.cpcardiol.2025.102982>
- Acharya, A., Pérez, E., Maddox-Mandolini, M., & De La Fuente, H. (2023). The status and prospects of phytoremediation of heavy metals. ArXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.14288>
- Adelodun, A., Olajire, T., Afolabi, N., Akinwumiju, A., Akinbobola, E., & Hassan, U. (2021). Phytoremediation potentials of Eichhornia crassipes for nutrients and organic pollutants from textile wastewater. *International Journal of Phytoremediation*, 23, 1333 - 1341. <https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1895719>
- Ajayan, K. V., Selvaraju, M., Unnikannan, P., & Sruthi, P. (2015). Phycoremediation of tannery wastewater using microalgae Scenedesmus species. *International journal of phytoremediation*, 17(10), 907-916. <https://doi.org/10.1080/15226514.2014.989313>

- Ajibade F, Ajala O, Demissie H, Lasisi K, Ajibade T, Adelodun B, Kumar P, Nwogwu N, Ojo A, Olanrewaju O, & Adewumi J. (2023). Utilization of constructed wetlands for dye removal: a concise review. *Recent advancements in wastewater management: implications and biological solutions*, 9, 227-246.  
<https://doi.org/10.1016/bs.apmp.2022.11.004>
- Akhtar, N., & Mannan, M. A. U. (2020). Mycoremediation: Expunging environmental pollutants. *Biotechnology reports*, 26, e00452.  
<https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00452>
- Aksnes, D., & Sivertsen, G. (2019). A Criteria-based Assessment of the Coverage of Scopus and Web of Science. *Journal of Data and Information Science*, 4, 1 - 21.  
<https://doi.org/10.2478/jdis-2019-0001>
- Ankit, K., & Korstad, J. (2022). Phycoremediation: Use of Algae to Sequester Heavy Metals. *Hydrobiology*, 1(3), 288-303.  
<https://doi.org/10.3390/hydrobiology1030021>
- Arshad, R., AL-Huqail, A. A., Alghanem, S. M. S., Alsudays, I. M., Farid, M., Sarfraz, W., Abbas, M., Asam, Z. U. Z., Khalid, N., Yong, J. W. H., & Abeer, A. H. A. (2024). Phyto-treatment of tannery industry effluents under combined application of citric acid and chromium-reducing bacterial strain through *Lemna minor* L.: A lab scale study. *Heliyon*, 10(16), e36309.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36309>
- Autade, G., et al. (2021). Treatment of wastewater by using phytoremediation technique: Review. *International Journal of Advance Scientific Research and Engineering Trends*, <https://doi.org/10.51319/2456-0774.2021.4.0011>

- Ayala-González, D., Rivera-Amaya, J., Barajas-Solano, A., & Machuca-Martínez, F. (2022). Evaluation of the Light/Dark Cycle and Concentration of Tannery Wastewater in the Production of Biomass and Metabolites of Industrial Interest from Microalgae and Cyanobacteria. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w14030346>
- Aytac, S., Tran, C. Y., & Frye, N. (2025). Lotka's law of scientific productivity across the research disciplines: A review. *Science & Technology Libraries*, 1–13. <https://doi.org/10.1080/0194262X.2025.2503941>
- Baas, J., Schotten, M., Plume, A., Côté, G., & Karimi, R. (2020). Scopus as a curated, high-quality bibliometric data source for academic research in quantitative science studies. *Quantitative Science Studies*, 1, 377-386. [https://doi.org/10.1162/qss\\_a\\_00019](https://doi.org/10.1162/qss_a_00019)
- Baidya, A., & Saha, A. (2024). Exploring the research trends in climate change and sustainable development: A bibliometric study. *Cleaner Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100720>
- Barathi, A., Priya, C., & Raghavan, S. (2020). Microbial bioremediation of tannery effluents: A critical review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(11), 3782–3790. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.911.455>
- Basurto-Flores, N., & Medina-Guerrero, N. (2023). Evaluación técnico-económica del uso de biopolímeros para el tratamiento de aguas residuales de curtiembres. *Revista de Ciencias Ambientales*, 57(2), e18199. <https://doi.org/10.15359/rca.57-2.2>
- Bhardwaj, A., Kumar, S., & Singh, D. (2023). Tannery effluent treatment and its

environmental impact: A review of current practices and emerging technologies. *Water Quality Research Journal*, 58(2), 128–152. <https://doi.org/10.2166/wqrj.2023.002>

Bortoloti, G., & Baron, D. (2022). Phytoremediation of toxic heavy metals by brassica plants: a biochemical and physiological approach. *Environmental Advances*. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100204>

Bui, X. T., Dang, B. T., Nguyen, T. T., Nguyen, V. T., Tran, D. P., Nguyen, P. T., & Show, P. L. (2021). Influence of organic loading rates on treatment performance of membrane bioreactor treating tannery wastewater. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101810. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.10181>

Calheiros, C. S. C., Rangel, A. O. S. S., & Castro, P. M. L. (2007). Constructed wetland systems vegetated with different plants applied to the treatment of tannery wastewater. *Water Research*, 41(8), 1790-1798. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.01.012>

Camacllanqui-Huamanlazo, A. O. (2025). Remoción de cromo (VI) de agua residual de curtiembre empleando biomasa orgánica vegetal en un reactor biológico secuencial aerobio. *Revista de Ciencias Ambientales*, 59(1), e20534. <https://doi.org/10.15359/rca.59-1.7>

Casarett, L. J., & Doull, J. (2008). *Toxicology: The Basic Science of Poisons*. McGraw-Hill Education. <https://www.mheducation.com/highered/mhp/product/casarett-doull-s-toxicology-basic-science-poisons-9th-edition?pd=search>

Chan, C., & Nurrosyidah, A. (2025). Democratizing Artificial Intelligence for Social

Good: A Bibliometric–Systematic Review Through a Social Science Lens. *Social Sciences*. <https://doi.org/10.3390/socsci14010030>

Charvalas, G., Solomou, A., Giannoulis, K., Skoufogianni, E., Bartzialis, D., Emmanouil, C., & Danalatos, N. (2021). Determination of heavy metals in the territory of contaminated areas of Greece and their restoration through hyperaccumulators. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 3858 - 3863. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11920-8>

Chen, Y., Lin, M., & Zhuang, D. (2022). Wastewater treatment and emerging contaminants: Bibliometric analysis. *Chemosphere*, 133932. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133932>

Chogthu, B., R., Naik, A., & Venkata, S. (2025). Comprehensive analysis of Saudi Arabia's research output: a bibliometric study (2013--2022). *F1000Research*. <https://doi.org/10.12688/f1000research.160450.1>

Dadebo, D., et al. (2024). Phytoremediation of laundry wastewater using *Pistia stratiotes* and recycling of spent plant biomass for sustainable biomethane production. *Bioresource Technology Reports*. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101855>

Danouche, M., Ghachtouli, E., & Arroussi, E. (2021). Phycoremediation mechanisms of heavy metals using living green microalgae: physicochemical and molecular approaches for enhancing selectivity and removal capacity. *Heliyon*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07609>

- Dharmani, P., Das, S., & Prashar, S. (2021). A bibliometric analysis of creative industries: Current trends and future directions. *Journal of Business Research*, 135, 252–267. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.06.037>
- De Cassia Campos Pena, A., Bertoldi, C., Fontoura, J., Trierweiler, L., & Gutterres, M. (2019). Consortium of Microalgae for Tannery Effluent Treatment. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2019170518>
- Desai, N., Veras, L., Gosain, A., (2018). Using Bradford's law of scattering to identify the core journals of pediatric surgery. *The Journal of surgical research*; 229. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2018.03.062>
- Devi, A., et al. (2023). Microalgae: A green ecofriendly agent for bioremediation of tannery wastewater with simultaneous production of valueadded products. *Chemosphere*, 139192. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139192>
- Dey, P., Lincy, K., & Osborne, J. (2024). An insight on the plausible biological and non-biological detoxification of heavy metals in tannery waste: A comprehensive review. *Environmental research*, 119451. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119451>
- Docampo, D., & Bessoule, J. (2019). A new approach to the analysis and evaluation of the research output of countries and institutions. *Scientometrics*, 119, 1207 - 1225. <https://doi.org/10.1007/s11192-019-03089-w>
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. (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>.

Elkarrach, K., Merzouki, M., Biyada, S., & Benlemlih, M. (2020). Bioaugmentation process for the treatment of tannery effluents in Fez, Morocco: An eco-friendly treatment using novel chromate bacteria. *Journal of Water Process Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101589>

El-Ramady, H., Abdalla, N., Fawzy, Z., et al. (2022). Green biotechnology of *Pleurotus ostreatus* L.: A sustainable strategy for myco-remediation and bio-fermentation. *Sustainability*, 14(6), 3667. <https://doi.org/10.3390/su14063667>

Elshamy, M., Heikal, Y., & Bonanomi, G. (2019). Phytoremediation efficiency of *Portulaca oleracea* L. naturally growing in some industrial sites, Dakahlia District, Egypt. *Chemosphere*, 225, 678-687. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.099>

EPA. (2020). Remediation technologies. U.S. Environmental Protection Agency. Recuperado de [https://www.epa.gov.translate.google/emergency-response-research/cleanup-and-remediation?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=tc](https://www.epa.gov.translate.google/emergency-response-research/cleanup-and-remediation?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc)

Esfahani, F., Daneshmand, M., Srinivasan, V., Thomo, A., & Wu, K. (2021, July). Truss decomposition on large probabilistic networks using h-index. In Proceedings of the 33rd International Conference on Scientific and Statistical Database Management (pp. 145-156). <https://doi.org/10.1145/3468791.3468817>

Fan, Y., Liu, J., & Yang, Z. (2023). Trends and developments in environmental biotechnology: A bibliometric analysis from 2000 to 2022. *Journal of Cleaner Production*, 395, 136327. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136327>

- Fazila, A., Khan, A., Malik, S., & Hussein, R. (2023). Regional concentration in environmental biotechnology in South Asia. *Environmental Research Letters*, 18(4). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acd500>
- Fernandez-Rodriguez, M., & Alvarez, L. (2021). Microgels and Nanogels at Interfaces and Emulsions: Identifying Opportunities From a Bibliometric Analysis. , 9. <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.754684>
- Flores-Tapia, N. E., & Bastidas, D. (2023). Actualidad de tratamientos y procesos de reciclaje de los residuos industriales de curtiembres en Ecuador y el mundo. *Revista Tecnológica - ESPOL*, 35(1), 66-87. <https://doi.org/10.37815/rte.v35n1.983>
- García-Valero, A., Martínez-Martínez, S., Faz, Á., Terrero, M. A., Muñoz, M. Á., Gómez-López, M. D., & Acosta, J. A. (2020). Treatment of WASTEWATER from the Tannery Industry in a Constructed Wetland Planted with *Phragmites australis*. *Agronomy*, 10(2), 176. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020176>
- García-Villar, C., & García-Santos, J. (2021). Bibliometric indicators to evaluate scientific activity. *Radiología*. <https://doi.org/10.1016/j.rx.2021.01.002>
- García-Villar, C., & García-Santos, J. (2021). Bibliometric indicators to evaluate scientific activity. *Radiología*, 63, 228-235. <https://doi.org/10.1016/J.RXENG.2021.01.002>
- Gauje, B., Yusufu, W. N., Chia, M. A., et al. (2022). Simultaneous phytoremediation of tannery effluent and production of fatty acids rich biomass by *Chlorella sorokiniana*. *Journal of Applied Phycology*, 34, 929–940. <https://doi.org/10.1007/s10811-022-02683-5>

- Gavrilescu, M. (2004). Environmental biotechnology: achievements, opportunities and challenges. *Dynamic Biochemistry, Process Biotechnology and Molecular Biology*, 1(1), 1–25.
- Gebretekle, B., Gebretsadik, T., Mekonnen, K., & Asgedom, A. (2024). Insights on phytoremediation of chromium from tannery wastewater contaminated soil. *International journal of phytoremediation*, 1-9. <https://doi.org/10.1080/15226514.2024.2366252>.
- Gebbru, B. G., Gebretsadik, T. T., Mekonnen, K. N., & Asgedom, A. G. (2024). Insights on phytoremediation of chromium from tannery wastewater contaminated soil. *International Journal of Phytoremediation*, 26(12), 1923–1931. <https://doi.org/10.1080/15226514.2024.2366252>
- Greener, S. (2022). Evaluating literature with bibliometrics. *Interactive Learning Environments*, 30, 1168 - 1169. <https://doi.org/10.1080/10494820.2022.2118463>.
- Gusenbauer, M. (2024). Beyond Google Scholar, Scopus, and Web of Science: An evaluation of the backward and forward citation coverage of 59 databases' citation indices. *Research synthesis methods*. <https://doi.org/10.1002/jrsm.1729>
- Gutiérrez-Salcedo, M., Martínez, M. Á., Moral-Muñoz, J. A., Herrera-Viedma, E., & Cobo, M. J. (2017). Some bibliometric procedures for analyzing and evaluating research fields. *Applied Intelligence*, 48(5), 1330–1344. <https://doi.org/10.1007/s10489-017-1105-y>
- Hansen, É., Aquim, P., & Gutterres, M. (2021). Environmental assessment of water, chemicals and effluents in leather post-tanning process: A review. *Environmental*

Impact Assessment Review. <https://doi.org/10.1016/J.EIAR.2021.106597>

Hansen, É., De Aquim, P., Hansen, A., Cardoso, J., Ziulkoski, A., & Gutterres, M. (2020). Impact of post-tanning chemicals on the pollution load of tannery wastewater. *Journal of environmental management*, 269, 110787. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110787>

Haq, I., Kumari, V., Kumar, S., Raj, A., Lohani, M., & Bhargava, R. N. (2016). Evaluation of the phytotoxic and genotoxic potential of pulp and paper mill effluent using *Vigna radiata* and *Allium cepa*. *Advances in Biology*, 2016(1), 8065736. <https://doi.org/10.1155/2016/8065736>

Hasan, S., Akber, M., Bahar, M., Islam, M., Akbor, M., Siddique, M., & Islam, M. (2021). Chromium Contamination from Tanning Industries and Phytoremediation Potential of Native Plants: A Study of Savar Tannery Industrial Estate in Dhaka, Bangladesh. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 106, 1024 - 1032. <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03262-z>

Hassan, W., & Duarte, A. E. (2024). Bibliometric analysis: A few suggestions. *Current Problems in Cardiology*, 49(8), 102640. <https://doi.org/10.1016/j.cpcardiol.2024.102640>

He, W., Megharaj, M., Wu, C., Subashchandrabose, S., & Dai, C. (2020). Endophyte-assisted phytoremediation: mechanisms and current application strategies for soil mixed pollutants. *Critical Reviews in Biotechnology*, 40, 31 - 45. <https://doi.org/10.1080/07388551.2019.1675582>

- Hernández, I., Guardado, R., & Gálvez, C. (2022). Industrial clusters: A scientific review mapping. *Iberoamerican Journal of Science Measurement and Communication*. <https://doi.org/10.47909/ijsmc.143>
- Hong, C.Y., Muda, K., Basri, H.F. et al. Discovering research evolution and emerging trends in ammonium wastewater treatment technologies: a bibliometric analysis. *Environ Dev Sustain* 26, 21877–21911 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03562-w>
- Hu, H., Li, X., Wu, S., & Yang, C. (2020). Sustainable livestock wastewater treatment via phytoremediation: Current status and future perspectives. *Bioresource technology*, 315, 123809. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123809>
- Huang, H., Xu, J., Zhao, M., & Cao, J. (2023). Highly cited papers and their impact in environmental remediation research: A bibliometric review. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(3), 4501–4516. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22612-0>
- Husaeni, D., & Nandiyanto, A. (2021). Bibliometric Using Vosviewer with Publish or Perish (using Google Scholar data): From Step-by-step Processing for Users to the Practical Examples in the Analysis of Digital Learning Articles in Pre and Post Covid-19 Pandemic. *ASEAN Journal of Science and Engineering*. <https://doi.org/10.17509/ajse.v2i1.37368>.
- Hussain, R., et al. (2019). A study on the physicochemical characteristics of Tannery Waste Water at Tiruchirappalli district. *International Journal of Research in Pharmaceutical Sciences*. <https://doi.org/10.26452/ijrps.v10i3.1489>
- Ignatowicz, K., & Dziadel, M. (2024). Determination of the Composition of Wastewater from Individual Processes of Leather Tanning Production in a Small Plant.

Journal of Ecological Engineering. <https://doi.org/10.12911/22998993/174833>

Intriago, L. M. R., Intriago, H. R. R., Palomeque, P. G., Solano, J. L. C., & Delgado, I. R. (2024). Efecto fitorremediador de Lemna minor y Eichhornia crassipes en parámetros físicos y químicos en aguas residuales domésticas. South Florida Journal of Development, 5(2), 688–696. <https://doi.org/10.46932/sfjdv5n2-021>

K.R.S, P., & Yatawara, M. (2021). Phytoremediation of partially treated MSW leachate by selected free floating and emergent macrophytes in subsurface vertical flow constructed wetlands. Environmental Technology & Innovation. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101928>

Kaloudas, D., Pavlova, N., & Penchovsky, R. (2021). Phycoremediation of wastewater by microalgae: a review. Environmental Chemistry Letters, 19, 2905 - 2920. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01203-0>

Karanam, M., Krishnanand, L., Manupati, V., & Nudurupati, S. (2024). Emerging themes and future research directions in the cold supply chain: a bibliometric and co-citation analysis. Benchmarking: An International Journal. <https://doi.org/10.1108/bij-11-2023-0771>

Kaushik, V., Tewari, S., Sahasranamam, S., & Hota, P. (2023). Towards a precise understanding of social entrepreneurship: An integrated bibliometric–machine learning based review and research agenda. Technological Forecasting and Social Change. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122516>

Keith, B., Lam, E., Montofré, Í., Zetola, V., & Bech, J. (2024). The scientific landscape of phytoremediation of tailings: a bibliometric and scientometric analysis.

International journal of phytoremediation, 1-19.

<https://doi.org/10.1080/15226514.2024.2373427>

Khan, A., Z., Li, M., Zhi, L., Hu, W., & Yang, X. (2023). From traditional to emerging technologies in supporting smart libraries. A bibliometric and thematic approach from 2013 to 2022. *Library Hi Tech*. <https://doi.org/10.1108/lht-07-2023-0280>

Klein, R., Hansen, É., & De Aquim, P. (2021). Water reuse in the post-tanning process: minimizing environmental impact of leather production. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 85 1, 474-484. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.620>

Kodituwakku, K., & Yatawara, M. (2020). Phytoremediation of Industrial Sewage Sludge with *Eichhornia crassipes*, *Salvinia molesta* and *Pistia stratiotes* in Batch Fed Free Water Flow Constructed Wetlands. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 104, 627 - 633. <https://doi.org/10.1007/s00128-020-02805-0>

Korpe, S., & Rao, P. (2021). Application of advanced oxidation processes and cavitation techniques for treatment of tannery wastewater—A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2021.105234>

Korpe, S., Bethi, B., Sonawane, S. H., & Jayakumar, K. V. (2019). Tannery wastewater treatment by cavitation combined with advanced oxidation process (AOP). *Ultrasonics Sonochemistry*, 59, 104723. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104723>

- Koshy, L., Sruthi, T., & Ramasamy, E. V. (2024). Assessment of phytoremediation potential of emergent aquatic macrophytes in real tannery wastewater conditions. *Journal of Environmental Management*, 352, 120002. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.120002>
- Koul, B., Sharma, K., & Shah, M. (2021). Phycoremediation: A sustainable alternative in wastewater treatment (WWT) regime. *Environmental Technology & Innovation*. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102040>
- Kraus, S., Breier, M., Lim, W. M., Dabić, M., Kumar, S., Kanbach, D., ... & Ferreira, J. J. (2022). Literature reviews as independent studies: guidelines for academic practice. *Review of managerial science*, 16(8), 2577-2595.
- Kumar, A., T., Raj, D., Maiti, S., Maleva, M., & Borisova, G. (2022). Soil Pollution and Plant Efficiency Indices for Phytoremediation of Heavy Metal(loid)s: Two-Decade Study (2002–2021). *Metals*. <https://doi.org/10.3390/met12081330>
- Kumar, M. M., Goplakrishna, G. V. T., & Bathusha, M. I. (2024). Innovative Strategies for Tannery Wastewater Remediation with Sequential batch reactor and phycoremediation. *Global NEST Journal*. <https://doi.org/10.30955/gnj.05825>
- Kumar, R., Basu, A., Bishayee, B., Chatterjee, R., Behera, M., Ang, W., Pal, P., Shah, M., Tripathy, S., Ambika, S., Janani, V., Chakraborty, S., Nayak, J., & Jeon, B. (2023b). Management of tannery waste effluents towards the reclamation of clean water using an integrated membrane system: A state-of-the-art review. *Environmental research*, 115881. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115881>
- Kumar, V., & Kumar, S. (2023a). Insights on financial literacy: a bibliometric analysis.

Managerial Finance. <https://doi.org/10.1108/mf-08-2022-0371>

Kumari, S., Kumar, M., Agrawal, S., Kaushik, A., Hashem, A., Abd\_Allah, E., Kumar, A., & Garg, M. (2024). Research hotspot and trend analysis of heavy metals decontamination of wastewater in past two decades: A bibliometric analysis. *Journal of Hazardous Materials Advances*. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100532>

Kurade, M., Ha, Y., Xiong, J., Govindwar, S., Jang, M., & Jeon, B. (2021). Phytoremediation as a green biotechnology tool for emerging environmental pollution: A step forward towards sustainable rehabilitation of the environment. *Chemical Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2021.129040>

Lazarides, M. K., Lazaridou, I.-Z., & Papanas, N. (2023). Bibliometric analysis: Bridging informatics with science. *The International Journal of Lower Extremity Wounds*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1177/153473462311535>

Li, C., Ji, X., & Luo, X. (2019). Phytoremediation of Heavy Metal Pollution: A Bibliometric and Scientometric Analysis from 1989 to 2018. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16. <https://doi.org/10.3390/ijerph16234755>

Li, M., et al. (2022). Quantitative Analysis of the Research Development Status and Trends of Tannery Wastewater Treatment Technology. *Catalysts*. <https://doi.org/10.3390/catal12111317>

Lim, W. M., & Kumar, S. (2023). Guidelines for interpreting the results of bibliometric analysis: A sensemaking approach. *Global Business and Organizational Excellence*, 43(1), 17–26. <https://doi.org/10.1002/joe.22229>

- Lim, W. M., Kumar, S., & Donthu, N. (2024). How to combine and clean bibliometric data and use bibliometric tools synergistically: Guidelines using metaverse research. *Journal of Business Research*, 182, 114760. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2024.114760>
- Lin, X., & Huang, C. (2023). Research collaboration in green environmental technologies: A bibliometric analysis of trends and patterns. *Technological Forecasting and Social Change*, 190, 122425. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122425>
- Liu, Z., Chen, B., Wang, L., Urbanovich, O., Nagorskaya, L., Li, X., & Tang, L. (2020). A review on phytoremediation of mercury contaminated soils. *Journal of hazardous materials*, 400, 123138. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123138>
- Lofrano, G., Meriç, S., Zengin, G. E., & Orhon, D. (2013). Chemical and biological treatment technologies for leather tannery chemicals and wastewaters: A review. *Science of The Total Environment*, 461-462, 265-281. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.004>
- Macías-Quiroga, I. F., Henao-Aguirre, P. A., Marín-Flórez, A., Arredondo-López, S. M., & Sanabria-González, N. R. (2021). Bibliometric analysis of advanced oxidation processes (AOPs) in wastewater treatment: global and Ibero-American research trends. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 23791-23811. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11333-7>
- Mahboob, S., Lakshmi, M., Anand, M., Vijayalakshmi, S., Ranjitha, J., & Malik, J. A. (2022). Microalgae—A Promising Tool for Heavy Metal Remediation. In *Microbial and Biotechnological Interventions in Bioremediation and Phytoremediation*, Springer International Publishing, <https://doi.org/10.3390/hydrobiology1030021>

- Mandal, R., Bashir, Z., & Raj, D. (2025). Microbe-assisted phytoremediation for sustainable management of heavy metal in wastewater - A green approach to escalate the remediation of heavy metals. *Journal of environmental management*, 375, 124199. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124199>
- Manoj, S., Karthik, C., Kadirvelu, K., Arulselvi, P., Shanmugasundaram, T., Bruno, B., & Rajkumar, M. (2019). Understanding the molecular mechanisms for the enhanced phytoremediation of heavy metals through plant growth promoting rhizobacteria: A review. *Journal of environmental management*, 254, 109779. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109779>
- Marçal, J., Bishop, T., Hofman, J., & Shen, J. (2021). From pollutant removal to resource recovery: A bibliometric analysis of municipal wastewater research in Europe. *Chemosphere*, 284, 131267. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131267>
- Martín-Martín, A., Thelwall, M., Orduna-Malea, E., & López-Cózar, E. (2021). Google Scholar, Microsoft Academic, Scopus, Dimensions, Web of Science, and OpenCitations' COCI: a multidisciplinary comparison of coverage via citations. *Scientometrics*. <https://doi.org/10.1007/s11192-020-03690-4>
- Masinire, F., Adenuga, D., Tichapondwa, S., & Chirwa, E. (2021). Phytoremediation of Cr(VI) in wastewater using the vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*). *Minerals Engineering*, 172, 107141. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2021.107141>
- McCorquodaleBauer, K., et al. (2023). Critical review of phytoremediation for the removal of antibiotics and antibiotic resistance genes in wastewater. *The Science*

of the Total Environment. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161876>

Medina, L., Duré, G., McGahan, S., Kurita-Oyamada, H. G., Villagra Carrón, V., Blanco, C., & López Arias, T. (2024). Bioabsorción y traslocación de cromo trivalente en la macrófita flotante *Pistia stratiotes*. *Reportes Científicos de la FACEN*, 15(2), 67–75. <https://doi.org/10.18004/rcfacen.2024.15.2.067>

Meki, K., Liu, Q., Wu, S., & Yuan, Y. (2022). Plant- and microbe-assisted biochar amendment technology for petroleum hydrocarbon remediation in saline-sodic soils: A review. *Pedosphere*. [https://doi.org/10.1016/s1002-0160\(21\)60041-3](https://doi.org/10.1016/s1002-0160(21)60041-3)

Mella, B., Benvenuti, J., Oliveira, R. F., & Gutterres, M. (2019). Preparation and characterization of activated carbon produced from tannery solid waste applied for tannery wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 6811-6817. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04161-x>

Ming, I., Jia, X., Wang, J., Wang, Y., Chen, Y., Wu, J., Wang, Y., Shen, M., & Xue, H. (2022). Quantitative Analysis of the Research Development Status and Trends of Tannery Wastewater Treatment Technology. *Catalysts*. <https://doi.org/10.3390/catal12111317>.

Minozzo, O., Pistorello, E., Queiroz, V., Duarte, B., & Agustini, C. (2024). Synthetic Tannery Effluent Mixture Degradability Assessment. *Journal of the American Leather Chemists Association*. <https://doi.org/10.34314/s7h3dr10>

Mohebi, Z., & Nazari, M. (2021). Phytoremediation of wastewater using aquatic plants, A review. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*. <https://doi.org/10.22126/ARWW.2021.5920.1196>

- Moktadir, M., Maliha, M., F., Munmun, S., Alam, S., islam, M., & Rahman, M. (2023). Treatment of tannery wastewater by different membrane bioreactors: a critical review. *Environmental Advances*, <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100478>
- Mora, L., Deakin, M., & Reid, A. (2019). Combining co-citation clustering and text-based analysis to reveal the main development paths of smart cities. *Technological Forecasting and Social Change*. <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2018.07.019>
- Morales-Paredes, L., García-Chevesich, P., Romero-Mariscal, G., Arenazas-Rodríguez, A., Ticona-Quea, J., Tejada-Purizaca, T., Vanzin, G., & Sharp, J. (2025). Chromium Remediation from Tannery Wastewater in Arequipa, Peru: Local Experiences and Prospects for Sustainable Solutions. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su17031183>.
- Moral-Munoz, J., Herrera-Viedma, E., Santisteban-Espejo, A., & Cobo, M. (2020). Software tools for conducting bibliometric analysis in science: An up-to-date review. *El Profesional de la Información*. <https://doi.org/10.3145/epi.2020.ene.03>.
- Mpofu, A., Oyekola, O., & Welz, P. (2021). Anaerobic treatment of tannery wastewater in the context of a circular bioeconomy for developing countries. *Journal of Cleaner Production*, 296, 126490, <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126490>
- Mukherjee, D., Lim, W. M., Kumar, S., & Donthu, N. (2022). Guidelines for advancing theory and practice through bibliometric research. *Journal of business research*, 148, 101-115. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.04.042>

- Mustafa, H., & Hayder, G. (2020). Recent studies on applications of aquatic weed plants in phytoremediation of wastewater: A review article. *Ain Shams Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.05.009>
- Mustafa, S., Bhatti, H. N., Maqbool, M., & Iqbal, M. (2021). Microalgae biosorption, bioaccumulation and biodegradation efficiency for the remediation of wastewater and carbon dioxide mitigation: Prospects, challenges and opportunities. *Journal of Water Process Engineering*, 41, 102009. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102009>
- Mustapha, S., Ndamitso, M., Abdulkareem, A., Tijani, J., Mohammed, A., & Shuaib, D. (2019). Potential of using kaolin as a natural adsorbent for the removal of pollutants from tannery wastewater. *Heliyon*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02923>
- Mustapha, S., Tijani, J. O., Ndamitso, M. M., Abdulkareem, S. A., Shuaib, D. T., Mohammed, A. K., & Sumaila, A. J. S. R. (2020). The role of kaolin and kaolin/ZnO nanoadsorbents in adsorption studies for tannery wastewater treatment. *Scientific Reports*, 10(1), 13068. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69808-z>
- Naseer, M. N., Jaafar, J., Junoh, H., Zaidi, A. A., Kumar, M., Alqahtany, A., Jamil, R., Alyami, S. H., & Aldossary, N. A. (2022). Metal-Organic Frameworks for Wastewater Decontamination: Discovering Intellectual Structure and Research Trends. *Materials*, 15(14), 5053. <https://doi.org/10.3390/ma15145053>
- Newman, M. C. (2015). *Fundamentals of Ecotoxicology: The Science of Pollution*. CRC Press. <https://www.routledge.com/Fundamentals-of-Ecotoxicology-The->

Science-of-Pollution-Fifth-

Edition/Newman/p/book/9780815354024?srsIid=AfmBOoqFDEb6CAold4UQkb

J\_TMRjGgA8uvuzFwxJ8ZXclz3tQbjLUtb0

Nguyen, M., Lin, C., Nguyen, H., Hung, N., La, D., Nguyen, X., Chang, S., Chung, W., & Nguyen, D. (2023). Occurrence, fate, and potential risk of pharmaceutical pollutants in agriculture: Challenges and environmentally friendly solutions. *The Science of the total environment*, 165323. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165323>

Ninkov, A., Frank, J. R., & Maggio, L. A. (2022). Bibliometrics: Methods for studying academic publishing. *Perspectives on Medical Education*, 11(3), 173–176. <https://doi.org/10.1007/s40037-021-00695-4>

Ntakiyiruta, P., Briton, B., Nsavyimana, G., Adouby, K., Nahimana, D., Ntakimazi, G., & Reinert, L. (2020). Optimization of the phytoremediation conditions of wastewater in post-treatment by *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes*: kinetic model for pollutants removal. *Environmental Technology*, 43, 1805 - 1818. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1852445>

Nur-E-Alam, M., Mia, M., Ahmad, F., & Rahman, M. (2020). An overview of chromium removal techniques from tannery effluent. *Applied Water Science*, 10. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01286-0>

Oliveira, O., Da Silva, F., Juliani, F., Barbosa, L., & Nunhes, T. (2019). Bibliometric Method for Mapping the State-of-the-Art and Identifying Research Gaps and Trends in Literature: An Essential Instrument to Support the Development of Scientific Projects. *Scientometrics Recent Advances*.

<https://doi.org/10.5772/intechopen.85856>

Öztürk, O., Kocaman, R., & Kanbach, D. K. (2024). How to design bibliometric research: An overview and a framework proposal. *Review of Managerial Science*, 18, 3333–3361. <https://doi.org/10.1007/s11846-024-00738-0>

Pasricha, S., Mathur, V., Garg, A., Lenka, S., Verma, K., & Agarwal, S. (2021). Molecular mechanisms underlying heavy metal uptake, translocation and tolerance in hyperaccumulators-an analysis. *Environmental Challenges*. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100197>

Passas, I. (2024). Bibliometric Analysis: The Main Steps. *Encyclopedia*. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia4020065>

Patra, S. K., & Mishra, S. (2024). Mapping global collaboration in phytoremediation research: A bibliometric study. *Scientometrics*, 129(2), 889–912. <https://doi.org/10.1007/s11192-024-04719-w>

Perdomo, C., Salazar, A., Velasquez, M., & Patiño, A. (2019). State of art; the use of eichhornia crassipes in the industrial wastewater phytoremediation. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7021685>

Polińska, W., et al. (2021). Insights into the Use of Phytoremediation Processes for the Removal of Organic Micropollutants from Water and Wastewater: A Review. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w13152065>

Prahani, B., Rizki, I., Suprpto, N., Irwanto, I., & Kurtuluş, M. (2024). Mapping research on scientific creativity: A bibliometric review of the literature in the last 20 years. *Thinking Skills and Creativity*. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2024.101495>

- Prieto-Benavides, O., Urdánigo Zambrano, J. P., Sánchez Loor, M. N., & Sánchez Loor, N. C. (2023). Beneficios de las micorrizas arbusculares en técnicas de fitorremediación para descontaminación de suelos en Ecuador. *Revista Científica Pentaciencias*, 6(1). <https://doi.org/10.59169/pentaciencias.v6i1.980>
- Priyadharshini, D., Babu, S., Manikandan, S., Subbaiya, R., Govarathanan, M., & Karmegam, N. (2021). Phycoremediation of wastewater for pollutant removal: A green approach to environmental protection and long-term remediation. *Environmental pollution*, 290, 117989. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117989>
- Putra, B., Surachman, M., Darmawan, I.W.A. et al. Assessing phytoremediation strategies for gold mine tailings: a bibliometric and systemic review. *Environ Geochem Health* 47, 12 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10653-024-02317-4>
- Quevedo, M. R., González, P. S., Barroso, C. N., & Paisio, C. E. (2025). Microbe-assisted phytoremediation of domestic and tannery wastewater: In vitro application of a macrophyte mixture for contaminant removal. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(9), 7671-7682. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-06151-0>
- Quevedo, M., González, P., Barroso, C., & Paisio, C. (2024). *Schoenoplectus americanus* as a potential phytoremediator: in vitro assessment of its ability to remove contaminants in domestic and tannery wastewater. *Environmental technology*, 1-13. <https://doi.org/10.1080/09593330.2024.2343126>
- Radha, L., & Arumugam, J. (2021). The Research Output of Bibliometrics using Bibliometrix R Package and VOS Viewer. *Shanlax International Journal of Arts*,

Science and Humanities. <https://doi.org/10.34293/sijash.v9i2.4197>

Raffa, C. M., Chiampo, F., & Shanthakumar, S. (2021). Remediation of Metal/Metalloid-Polluted Soils: A Short Review. *Applied Sciences*, 11(9), 4134. <https://doi.org/10.3390/app11094134>

Rai, G., et al. (2021). Insights into decontamination of soils by phytoremediation: A detailed account on heavy metal toxicity and mitigation strategies. *Physiologia Plantarum*. <https://doi.org/10.1111/ppl.13433>

Rambabu, Avornyo, A., Gomathi, T., Thanigaivelan, A., Show, P., & Banat, F. (2022). Phycoremediation for carbon neutrality and circular economy: Potential, trends, and challenges. *Bioresource technology*, 128257. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128257>

Ramírez, S., Torrealba, G., Lameda-Cuicas, E., Molina-Quintero, L., Stefanakis, A. I., & Pire-Sierra, M. C. (2019). Investigation of pilot-scale constructed wetlands treating simulated pre-treated tannery wastewater under tropical climate. *Chemosphere*, 234, 496-504. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.081>

Rasool, S., Ahmad, I., Jamal, A., Saeed, M., Zakir, A., Abbas, G., Seleiman, M., & Caballero-Calvo, A. (2023). Evaluation of Phytoremediation Potential of an Aquatic Macrophyte (*Eichhornia crassipes*) in Wastewater Treatment. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su151511533>

- Raza, A., Habib, M., Kakavand, S., Zahid, Z., Zahra, N., Sharif, R., & Hasanuzzaman, M. (2020). Phytoremediation of Cadmium: Physiological, Biochemical, and Molecular Mechanisms. *Biology*, 9. <https://doi.org/10.3390/biology9070177>
- Sabour, M.R., Zeydabadinejad, Z. & Zarrabi, H. Bibliometric analysis of research trends on the utilization of adsorption methods for removing heavy metals from soil. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 22, 6387–6400 (2025). <https://doi.org/10.1007/s13762-024-06282-4>
- Salinitro, M., Montanari, S., Simoni, A., Ciavatta, C., & Tassoni, A. (2021). Trace Metal Accumulation and Phytoremediation Potential of Four Crop Plants Cultivated on Pure Sewage Sludge. *Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122456>
- Sameh, J., Wali, A., Buonerba, A., Zarra, T., Belgiorno, V., Naddeo, V., & Ksibi, M. (2020). Efficient and sustainable treatment of tannery wastewater by a sequential electrocoagulation-UV photolytic process. *Journal of water process engineering*, 38, 101642. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2020.101642>.
- Saranya, D., & Shanthakumar, S. (2020). An integrated approach for tannery effluent treatment with ozonation and phycoremediation: A feasibility study. *Environmental research*, 183, 109163. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109163>
- Saranya, D., & Shanthakumar, S. (2021). Insights into the influence of CO<sub>2</sub> supplement on phycoremediation and lipid accumulation potential of microalgae: An exploration for biodiesel production. *Environmental Technology and Innovation*, 23, 101596. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2021.101596>

- Saravanan, A., Senthil Kumar, P., Jeevanantham, S., Karishma, S., Tajsabreen, B., Yaashikaa, P. R., & Reshma, B. (2021). Effective water/wastewater treatment methodologies for toxic pollutants removal: Processes and applications towards sustainable development. *Chemosphere*, 280, 130595. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130595>
- Saravanan, A., Deivayanai, V. C., Kumar, P. S., Rangasamy, G., Hemavathy, R. V., Harshana, T. & Alagumalai, K. (2022). A detailed review on advanced oxidation process in treatment of wastewater: Mechanism, challenges and future outlook. *Chemosphere*, 308, 136524. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136524>
- Sardana, D., Gupta, V., & Kumar, S. (2024). A bibliometric review of sustainability research in developing countries: Scope, structure and future directions. *Journal of Cleaner Production*, 426, 139894. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139894>
- Sari, P. A., Soeprobowati, T. R., & Warsito, B. (2023). A bibliometric overview of scientific research on phytoremediation of heavy metals and artificial neural network in past two decades. *E3S Web of Conferences*, 448, 03004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202344803004>
- Sarker, S., Alter, T., Parveen, S., Uddin, M., Mondal, A., & Sujana, S. (2023). Microalgae-based green approach for effective chromium removal from tannery effluent: A review. *Arabian Journal of Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.105085>
- Savadatti, S., Srinivasan, K., & Hu, Y. (2025). A Bibliometric Analysis of Agent-Based Systems in Cybersecurity and Broader Security Domains: Trends and Insights.

IEEE Access, 13, 90-119. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3520583>

Sawalha, H., Alsharabaty, R., Sarsour, S., & Al-Jabari, M. (2019). Wastewater from leather tanning and processing in Palestine: Characterization and management aspects. *Journal of environmental management*, 251, 109596. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109596>

Scopus, (2025). Scopus Sources. Recuperado de: <https://www.scopus.com/sources.uri?zone=TopNavBar&origin=searchbasic>

Serrà, A., Artal, R., García-Amorós, J., Gómez, E., & Philippe, L. (2020). *Circular zero-residue process using microalgae for efficient water decontamination, biofuel production, and carbon dioxide fixation. Chemical Engineering Journal*, 388, 124278. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124278> [arxiv.org+15](https://arxiv.org/abs/1508.07243)

Sforza, E., Kumkum, P., Barbera, E., & Kumar, S. (2020). Bioremediation of industrial effluents: How a biochar pretreatment may increase the microalgal growth in tannery wastewater. *Journal of Water Process Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101431>.

Sharma, P., Pandey, A., Udayan, A., & Kumar, S. (2021). Role of microbial community and metal-binding proteins in phytoremediation of heavy metals from industrial wastewater. *Bioresource technology*, 326, 124750. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124750>

Shi, L., Li, J., Palansooriya, K., Chen, Y., Hou, D., Meers, E., Tsang, D., Wang, X., & Ok, Y. (2022). Modeling phytoremediation of heavy metal contaminated soils through machine learning. *Journal of hazardous materials*, 441, 129904. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129904>

- Shrestha, S., Joshi, S., & Bajracharya, R. M. (2023). Exploring the frontier topics in phytoremediation: A review based on topic modeling and science mapping. *Environmental Research*, 231, 116054. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116054>
- Siddiquee, S., Yusof, N. A., & Abdullah, N. (2022). Mycoremediation: Fungal bioremediation of pollutants. *Environmental Advances*, 8, 100195. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100195>
- Sies, H. (2020). Oxidative Stress: Concept and Some Practical Aspects. *Antioxidants*, 9(9), 852. <https://doi.org/10.3390/antiox9090852>
- Singh, H. (2022). Alternative research bibliometrics: It's about quality and not quantity. *Shoulder & Elbow*, 14, 121 - 122. <https://doi.org/10.1177/17585732211058453>
- Singh, K., Prasad, B., Kumar, A., Kumari, M., Dubey, D., Sillanpää, M., & Prasad, K. (2024). Hyphenated Fenton-column packed nMnO-modified wood biochar for tannery effluent treatment: Adsorption mechanism and reusability study. *Environmental research*, 118786. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118786>
- Solanki, R., Patel, R., & Chavda, N. (2024). Phytoremediation of chromium from industrial wastewater using aquatic macrophytes. *Journal of Water Process Engineering*, 59, 104192. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104192>
- Souza, C. L. de, Kuniyoshi, M. S., & Freitas, A. B. de G. (2024). Mapping the growth of ESG research: A bibliometric analysis using Bradford's, Lotka's, and Zipf's laws. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 18(10), 1–22. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n10-309>
- Stahlschmidt, S., & Stephen, D. (2021). From indexation policies through citation networks to normalized citation impacts: Web of Science, Scopus, and

Dimensions as varying resonance chambers. *Scientometrics*, 127, 2413 - 2431.

<https://doi.org/10.1007/s11192-022-04309-6>

Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. McGraw-Hill Education.

TejadaMeza, K., et al. (2023). Acute Ecotoxicity Potential of Untreated Tannery Wastewater Release in Arequipa, Southern Peru. *Sustainability*.

<https://doi.org/10.3390/su152115240>

Thakur, T., et al. (2023). Integrated Phytobial Remediation of Dissolved Pollutants from Domestic Wastewater through Constructed Wetlands. *Water*.

<https://doi.org/10.3390/w15223877>

Ting, W., Tan, I., Salleh, S., & Wahab, N. (2020). Ammoniacal nitrogen removal by *Eichhornia crassipes*-based phytoremediation: process optimization using response surface methodology. *Applied Water Science*, 10.

<https://doi.org/10.1007/s13201-020-1163-x>

Tiwari, S., Singh, R., Gupta, R., & Rai, A. K. (2023). Phycoremediation of wastewater: Current advances and future prospects. *Journal of Environmental Management*,

330, 117106. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117106>

TULSMA. (2017). *Anexo 1 del libro VI del TULSMA: Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua*. <https://www.ambiente.gob.ec>

Ullah, R., Asghar, I., & Griffiths, M. G. (2023). An integrated methodology for bibliometric analysis: A case study of Internet of Things in healthcare applications. *Sensors*, 23(1), 67. <https://doi.org/10.3390/s23010067>

Urbina-Suarez, N., Ayala-González, D., Rivera-Amaya, J., Barajas-Solano, A., &

- Machuca-Martínez, F. (2022). Evaluation of the Light/Dark Cycle and Concentration of Tannery Wastewater in the Production of Biomass and Metabolites of Industrial Interest from Microalgae and Cyanobacteria. *Water*, 14(3), 346. <https://doi.org/10.3390/w14030346>
- Velez-Estevez, A., García-Sánchez, P., Moral-Muñoz, J. A., & Cobo, M. J. (2022). Why do papers from international collaborations get more citations? A bibliometric analysis of Library and Information Science papers. *Scientometrics*, 127(12), 7517-7555.
- Vijayaraj, A., Mohandass, C., & Joshi, D. (2020). Microremediation of tannery wastewater by siderophore producing marine bacteria. *Environmental Technology*, 41, 3619 - 3632. <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1615995>.
- Vymazal, J. (2011). Constructed wetlands for wastewater treatment: five decades of experience. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 61–69.
- Wang, B., Xu, H., Liu, Y., Zhou, K., Li, X., Kong, D., Chen, J., He, Y., & Ji, R. (2024a). Unraveling phytoremediation mechanisms of the common reed (*Phragmites australis*) suspension cells towards ciprofloxacin: Xenobiotic transformation and metabolic reprogramming. *Water research*, 266, 122347. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122347>
- Wang, C., Deng, L., Zhang, Y., Zhao, M., Liang, M., Lee, L.-C., Chicaiza-Ortiz, C., Yang, L., & He, T. (2024b). Farmland phytoremediation in bibliometric analysis. *Journal of Environmental Management*, 351, 119971. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119971>

- Wang, Y., Jin, L., & Zhou, W. (2023). Constructed wetlands integrated with algae and floating plants for tannery wastewater treatment. *Chemosphere*, 337, 139570. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139570>
- Wang, C., Zhong, L., & Xu, J. (2024). The bidirectional relationship between collaboration network stability and technological innovation performance: The moderating effect of knowledge networks. *Creativity and Innovation Management*, 33(4), 799-817. <https://doi.org/10.1111/caim.12620>
- Wijaya, A., Setiawan, N., & Shapi'ai, M. (2023). Mapping Research Themes and Future Directions in Learning Style Detection Research: A Bibliometric and Content Analysis. *Electronic Journal of e-Learning*. <https://doi.org/10.34190/ejel.21.4.3097>
- Yaashikaa, P., Kumar, P., Jeevanantham, S., & Saravanan, R. (2022). A review on bioremediation approach for heavy metal detoxification and accumulation in plants. *Environmental pollution*, 119035. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119035>
- Yadav, A., Raj, A., Purchase, D., Ferreira, L., Saratale, G., & Bharagava, R. (2019). Phytotoxicity, cytotoxicity and genotoxicity evaluation of organic and inorganic pollutants rich tannery wastewater from a Common Effluent Treatment Plant (CETP) in Unnao district, India using *Vigna radiata* and *Allium cepa*. *Chemosphere*, 224, 324-332. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.124>
- Yang, Z., Yang, F., Liu, J., Wu, H., Yang, H., Shi, Y., Liu, J., Zhang, Y., Luo, Y., & Chen, K. (2021). Heavy metal transporters: Functional mechanisms, regulation, and application in phytoremediation. *The Science of the total environment*, 151099.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151099>

as, F., Bibi, I., Afzal, M., Al-Misned, F., Niazi, N. K., Hussain, K., Shahid, M., Shakil, Q., Ali, F., & Wang, H. (2023). Unveiling distribution, hydrogeochemical behavior and environmental risk of chromium in tannery wastewater. *Water*, 15(3), 391. <https://doi.org/10.3390/w15030391>

Younas, F., Niazi, N., Bibi, I., Afzal, M., Hussain, K., Shahid, M., Aslam, Z., Bashir, S., Hussain, M., & Bundschuh, J. (2021). Constructed wetlands as a sustainable technology for wastewater treatment with emphasis on chromium-rich tannery wastewater. *Journal of hazardous materials*, 422, 126926, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126926>

Yu, H., Tang, M., He, J., Liu, C., Wu, P., & Jiang, W. (2024). Intelligent treatment of tannery wastewater via H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> photocatalytic oxidation coupled adsorption process. *Journal of Water Process Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105378>

Yuan, T., Tazaki, A., Hashimoto, K., Hossain, A., Kurniasari, F., Ohgami, N., Aoki, M., Ahsan, N., Akhand, A., & Kato, M. (2021). Development of an efficient remediation system with a low cost after identification of water pollutants including phenolic compounds in a tannery built-up area in Bangladesh. *Chemosphere*, 280, 130959. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130959>

Yuliasni, R., Kurniawan, S., Marlina, B., Hidayat, M., Kadier, A., P., & Imron, M. (2023). Recent Progress of Phytoremediation-Based Technologies for Industrial

Wastewater Treatment. Journal of Ecological Engineering.  
<https://doi.org/10.12911/22998993/156621>

Zapana, J., Arán, D., Bocardo, E., & Harguinteguy, C. (2020). Treatment of tannery wastewater in a pilot scale hybrid constructed wetland system in Arequipa, Peru. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17, 4419 - 4430.  
<https://doi.org/10.1007/s13762-020-02797-8>

Zapana-Huarache, S., Romero-Sánchez, C., Gonza, A., Torres-Huaco, F., & Rivera, A. (2020). Design and testing of a cost-efficient bioremediation system for tannery effluents using native chromium-resistant filamentous fungi. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17, 3825-3834,  
<https://doi.org/10.1007/s13762-020-02726-9>

Zhang, Q., Liu, B., Li, X., & Deng, S. (2023). A bibliometric and visualization analysis of phytoremediation in wastewater treatment. *Sustainability*, 15(12), 9725.  
<https://doi.org/10.3390/su15129725>

Zhao, C., & Chen, W. (2019). A review for tannery wastewater treatment: some thoughts under stricter discharge requirements. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 26102-26111.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-019-05699-6>

Zhao, J., Wu, Q., Tang, Y., Zhou, J., & Guo, H. (2022). Tannery wastewater treatment: Conventional and promising processes, an updated 20-year review. *Journal of Leather Science and Engineering*, 4(10). <https://doi.org/10.1186/s42825-022-00082-7>

Zhao, L., Dai, T., Qiao, Z., Sun, P., Hao, J., & Yang, Y. (2020). Application of artificial intelligence to wastewater treatment: A bibliometric analysis and systematic

review of technology, economy, management, and wastewater reuse. *Process Safety and Environmental Protection*, 133, 169-182.  
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.11.014>

Zheng, L., & Yan, X. (2025). A review of buildings dynamic life cycle studies by bibliometric methods. *Energy and Buildings*, 332, 115453.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115453>

Zheng, Y., Sun, Z., Liu, Y., Cao, T., Zhang, H., Hao, M., Chen, R., Dzakpasu, M., & Wang, X. (2021). Phytoremediation mechanisms and plant eco-physiological response to microorganic contaminants in integrated vertical-flow constructed wetlands. *Journal of hazardous materials*, 424 Pt C, 127611.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127611>

Zhou, Y., Wang, C., & Liu, Q. (2023). Phytotoxicity assessment of chromium-contaminated tannery wastewater using biochemical and molecular plant markers. *Environmental Pollution*, 324, 121327.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121327>