

# Transdigit

revista científica



Volumen 6, Número 12: Julio-diciembre 2025

ISSN: 2683-328X

Sociedad de Investigación sobre Estudios Digitales S. C.

La revista científica Transdigital es una publicación semestral bajo el modelo de publicación continua editada por la Sociedad de Investigación sobre Estudios Digitales S.C. Hasta ahora, la revista ha sido indizada en: Latindex, Dialnet, ERIHPLUS, REDIB, EuroPub, LivRe, AURA, Academic Resource Index (Research Bib), BASE, MIAR, OpenAire-Explore, Google Scholar, Refseek, ROAD, Sherpa Romeo, Elektronische Zeitschriftenbibliothek, WorldCat, Dimensions, REBIUN, DARDO, Open Ukrainian Citation Index, Zeitschriften Datenbank y The University of Liverpool. Dirección oficial: Circuito Altos Juriquilla 1132. C.P. 76230, Querétaro, México. Tel. +52 (442) 301-3238. Página web oficial: [www.revista.transdigital.mx](http://www.revista.transdigital.mx). Correo electrónico: [revista@transdigital.mx](mailto:revista@transdigital.mx). Editor en jefe: Daniel Díaz-Rojas (ORCID: 0000-0002-9924-2733). Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2022-020912091600-102. International Standard Serial Number (ISSN): 2683-328X; ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (México). Responsable de la última actualización: Editor en jefe: Daniel Díaz-Rojas. Todos los artículos en la revista Transdigital están licenciados bajo Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0). Usted es libre de: Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato. Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material para cualquier propósito, incluso comercialmente. La persona licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia. Lo anterior, bajo los siguientes términos: Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante. No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.



# Transdigital

revista científica

ALTERNATIVAS SOSTENIBLES PARA  
LA REDUCCIÓN DEL CONSUMO  
DE AGUA EN EL PROCESO DE  
LAVADO DE MEZCLILLA:  
UN ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

SUSTAINABLE ALTERNATIVES FOR  
REDUCING WATER CONSUMPTION  
IN THE DENIM WASHING PROCESS:  
A BIBLIOMETRIC ANALYSIS



Angélica Granados Sánchez\*  
Tecnológico Nacional de México  
ORCID: 0009-0005-4878-4486



Iván Araoz Baltazar  
Tecnológico Nacional de México  
ORCID: 0000-0003-0394-2979



Israel Martínez Zarate  
Tecnológico Nacional de México  
ORCID: 0000-0002-7896-784X



## ALTERNATIVAS SOSTENIBLES PARA LA REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA EN EL PROCESO DE LAVADO DE MEZCLILLA: UN ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

### SUSTAINABLE ALTERNATIVES FOR REDUCING WATER CONSUMPTION IN THE DENIM WASHING PROCESS: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS

#### RESUMEN

El artículo analizó la evolución de alternativas sostenibles para reducir el consumo de agua en el proceso de lavado de mezclilla mediante un estudio bibliométrico. El objetivo fue identificar tendencias, actores clave y brechas de conocimiento que orienten decisiones tecnológicas y de investigación. La base de datos constó de 549 documentos indexados en *Scopus*, recuperados con una ecuación de búsqueda focalizada en mezclilla lavado. Los datos se procesaron con *Bibliometrix* y *VOSviewer*, considerando información general, producción anual, autores y fuentes más influyentes, estructura conceptual a partir de palabras clave y redes de colaboración entre países. Los resultados mostraron un campo maduro y en expansión, con una tasa de crecimiento anual positiva y alta colaboración entre autores. La estructura temática se organizó en tres grandes familias de soluciones: intervenciones enzimáticas para desengomado y acabado, tecnologías de lavado de bajo uso hídrico y esquemas de tratamiento y circularidad del agua basados en biorremediación y membranas. Se concluyó que la reducción del consumo de agua en el lavado de mezclilla es técnicamente viable a partir de paquetes integrados de proceso y gestión del recurso, aunque persisten vacíos en métricas estandarizadas, evaluaciones tecnoeconómicas y evidencia en contextos productivos de regiones con alta presión hídrica.

**Palabras clave:** mezclilla, consumo de agua, lavado de mezclilla, bibliometría, sostenibilidad industrial, circularidad del agua

#### ABSTRACT

This article analyzed the evolution of sustainable alternatives for reducing water consumption in the denim washing process through a bibliometric study. The aim was to identify trends, key stakeholders, and knowledge gaps to guide technological and research decisions. The database consisted of 549 documents indexed in *Scopus*, retrieved using a search equation focused on denim washing. The data were processed with *Bibliometrix* and *VOSviewer*, considering general information, annual output, most influential authors and sources, conceptual structure based on keywords, and collaborative networks between countries. The results showed a mature and expanding field, with a positive annual growth rate and high collaboration among authors. The thematic structure was organized into three main families of solutions: enzymatic interventions for desizing and finishing, low-water-use washing technologies, and water treatment and circularity schemes based on bioremediation and membranes. It was concluded that reducing water consumption in denim washing is technically feasible through integrated process and resource management packages, although gaps persist in standardized metrics, techno-economic assessments and evidence in productive contexts of regions with high water pressure.

**Keywords:** denim, water consumption, denim washing, bibliometrics, industrial sustainability, water circularity

## 1. INTRODUCCIÓN

El proceso de lavado en la industria del pantalón de mezclilla utiliza mucha agua y genera efluentes con alta carga contaminante. Esto tensiona la disponibilidad del recurso y el cumplimiento de normativas ambientales. En la última década, la presión regulatoria y las metas de sostenibilidad han impulsado la búsqueda de tecnologías y prácticas de bajo impacto hídrico, así como de esquemas de circularidad que permitan reutilizar el agua tratada dentro de la propia planta. Este doble enfoque, innovación de proceso y reciclaje/reúso de agua, estructura la evolución reciente del campo y explica la convergencia de soluciones que permiten disminuir de manera medible el consumo de agua y la huella ambiental del acabado de mezclilla.

En el ámbito de las tecnologías del proceso, diversos estudios comparan métodos convencionales con alternativas de menor uso hídrico, destacando el ozono y el láser por su capacidad de reducir tanto el volumen de agua como la carga química del proceso (Nahid-Ull-Islam et al., 2024). Además, las evaluaciones integrales señalaron que las variantes *sostenibles* alcanzan un menor impacto ambiental sin comprometer el desempeño cromático respecto de los procesos tradicionales, tanto en lavados oscuros, medios y claros, cumpliendo con parámetros de tono, uniformidad y solidez requeridos por la industria (Rahaman et al., 2025). A estas rutas se suman enfoques como *e-flow*, nanoburbujas, *NoStone* y sustitutos del permanganato de potasio, que reproducen efectos de envejecido/desteñido con menor intensidad de recursos.

De forma complementaria y aguas arriba del lavado, se documentaron avances en producción y aplicación de colorantes orientados a recortar consumos y arrastres desde el teñido. Entre ellos, la producción de índigo a partir de bacterias, la pulverización digital, el teñido asistido por microbios y el teñido con espuma de índigo, que reducen etapas húmedas y mejoran el control del baño (Periyasamy & Periyasami, 2023). En el pretratamiento de la tela, el desengomado enzimático con amilasa, los blanqueos enzimáticos y la mercerización bajo mejores técnicas disponibles se consideran alternativas más limpias frente a rutas puramente químicas (Eroğlu, 2023).

El segundo pilar es el tratamiento y la circularidad del agua. La literatura reportó esquemas híbridos de biorremediación y separación por membranas (ultrafiltración [UF]/nanofiltración [NF]) capaces de abatir de la demanda química de oxígeno (DQO) y el color hasta niveles compatibles con reúso en proceso, permitiendo esquemas de recirculación en los que el efluente tratado regresa al proceso. Asimismo, la demanda de agua fresca se limita a pérdidas y purgas, reduciendo la intensidad hídrica por prenda y aumentando la resiliencia del sistema.

En este contexto, este artículo analizó, mediante un estudio bibliométrico, la evolución de las alternativas sostenibles para reducir el consumo de agua en el lavado y el acabado de mezclilla, identificando tendencias, actores clave y brechas de conocimiento que orienten decisiones tecnológicas y de investigación. Para ello, se cartografiaron redes de citación, fuentes principales y publicaciones emergentes, y se sintetizan líneas tecnológicas que, en conjunto, muestran que la reducción del consumo de agua en el lavado de mezclilla es técnicamente

factible mediante la combinación de innovación de proceso y reciclaje/reutilización (Nahid-Ull- Islam et al., 2024; Rahaman et al., 2025; Periyasamy & Periyasami, 2023; Eroğlu, 2023).

## 1.1. Revisión de literatura

Esta revisión de literatura sintetizó la evidencia científica sobre cómo disminuir la intensidad hídrica del lavado y acabado de mezclilla y cómo avanzar hacia esquemas de recirculación en planta. El análisis se basó en un conjunto depurado de estudios centrados en mezclilla, otorgando prioridad a aquellos que informan métricas operativas comparables (litros por kilogramo [L/kg] de agua, DQO, color, tiempo de ciclo) y validación a escala industrial o piloto. Para favorecer una lectura orientada a decisiones, la evidencia se organiza en tres frentes complementarios: innovación de proceso, tratamiento/circularidad del agua y biotecnología enzimática. Cada apartado presentó un cuadro de síntesis que resume alcance, mecanismo y desempeño reportado; cuando una fuente no publica un valor cuantitativo, se indica no disponible (N/D) sin extrapolar.

## 1.2. Técnicas y procesos para reducir el consumo de agua

Se sintetizaron las técnicas y los procesos reportados en la literatura para reducir el consumo de agua y, en varios casos, también químicos y energía en el lavado/acabado de mezclilla. Se incluyeron procesos descritos en revisiones recientes. Por ejemplo, ozono, láser, *e-flow*, blanqueo enzimático, sustitutos al permanganato y esquemas tipo *NoStone*. Asimismo, se consideraron rutas de teñido y aplicación del color que recortan etapas húmedas. Por ejemplo, rociado digital y espuma de índigo lavado (Periyasamy & Periyasami, 2023; Khan & Jintun, 2021; Eroğlu, 2023).

Además, se incorporaron mediciones operativas. Por ejemplo, ahorros de agua por L/kg y reducción de tiempo de ciclo para paquetes de lavado sostenible frente al convencional (Rahaman et al., 2025). En este sentido, se utilizaron abreviaturas para hablar del índice de medición de impacto ambiental (EIM) para evaluar procesos de acabado y las mejores técnicas disponibles (BAT, por sus siglas en inglés) (Tabla 1).

**Tabla 1**

*Técnicas y procesos para reducir el consumo de agua en el lavado/acabado de mezclilla*

Autor	Enfoque del estudio	Tecnologías/Estrategias clave	Hallazgos cuantitativos
Periyasamy y Periyasami (2023).	Revisión integral de sostenibilidad en mezclilla (teñido y acabado).	Ozonizado, <i>e-flow</i> , blanqueo enzimático, acabado con agua y láser.  Rutas de teñido de menor impacto (espuma, rociado digital, microbiano, bio-índigo).	Para <i>e-flow</i> : -95% agua, -90% químicos, -40% energía vs. métodos húmedos convencionales (dato citado en la revisión).

**Tabla 1***Técnicas y procesos para reducir el consumo de agua en el lavado/acabado de mezclilla*

Autor	Enfoque del estudio	Tecnologías/Estrategias clave	Hallazgos cuantitativos
Khan y Jintun, (2021).	Revisión de problemas de sostenibilidad del lavado y tecnologías emergentes.	Lavado con láser, <i>waterjet</i> , nanoburbujas, ozono y <i>NoStone</i> . Alternativas al permanganato de potasio, mezclilla impresa digitalmente, y <i>software</i> EIM para evaluar procesos.	Ozono: blanqueo en ~15 min vs. 30-50 min convencional; requiere de dos a tres enjuagues vs. seis a siete en <i>stone/bleach</i> químico. EIM define bajo impacto hídrico como < 35 L/prenda.
Rahaman et al. (2025).	Comparación convencional vs. sostenible (lavado claro/medio/oscura) con métricas ambientales y cromáticas.	Paquetes de lavado sostenible frente a convencionales. Evaluación con criterios de impacto y desempeño.	Ahorro de agua: 3.9 L/kg (claro), 14.44 L/kg (medio), 19.4 L/kg (oscuro); ahorro de tiempo: 15.5-21.5 min/ciclo. Reducción de energía e impacto químico frente a convencional.
Nahid-Ull-Islam et al. (2024).	Estudio comparativo de ozono y ozono + láser frente a convencional usando EIM.	Lavado con ozono y desteñido láser (combinados) evaluados con EIM vs. rutas tradicionales.	Mejora del puntaje EIM respecto a procesos convencionales (la publicación no reporta L/kg específicos en el texto accesible).
Eroğlu (2023).	Revisión sobre producción/acabado sostenible: reducción de residuos, agua y energía; reciclaje y reúso.	Desengomado enzimático (amilasa), mercerización (BAT); blanqueo enzimático, ozono, láser, tecnologías de reducción de agua.	N/D (revisión narrativa; no aporta cifras comparativas directas de L/kg)

### 1.3. Técnicas y procesos para el tratamiento de aguas residuales

Se reunieron estrategias de tratamiento y circularidad aplicadas a efluentes de la industria de mezclilla con miras al reúso en proceso. Se detectaron dos casos representativos que ilustraron bien las rutas: (a) la *UF* orientada a recuperar índigo y clarificar el permeado, de modo que el agua tratada pueda reincorporarse al proceso (Buscio et al., 2015); (b) los *trenes híbridos* que combinan biorremediación con NF, con el objetivo de abatir la carga orgánica y la coloración hasta niveles compatibles con el reúso (Rendón-Castrillón et al., 2023); y (c) la *operación piloto de un biorreactor de membrana* (MBR, por sus siglas en inglés) para el tratamiento de agua residual mixta procedente de teñido, acabado y encolado en una planta productora de mezclilla (Yigit et al., 2009), como alternativa integrada de depuración con potencial de reúso.

El resto de los autores complementó el panorama de circularidad desde ángulos operativos y biotecnológicos. Nahar et al. (2024) evaluaron escenarios de abastecimiento, por ejemplo, el uso de 100% de agua tratada o mezcla con agua blanda, como estrategia explícita de conservación. Unuofin (2021) aportó un enfoque enzimático (producción y uso de lacasa a partir de salvado de trigo) para decoloración y biodesengomado, reduciendo cargas antes del tren final. Además, Gusakov et al. (2000) enfatizaron la gestión intraplanta (caracterización y segregación de corrientes candidatas a reúso). En conjunto, estas rutas promueven esquemas en los que el aporte de agua fresca se limita a purgas/pérdidas, condicionados a una operación que controle ensuciamiento de membranas y la calidad del agua recirculada (Tabla 2).

**Tabla 2**

*Procesos para el tratamiento de aguas residuales del proceso de lavado de la mezclilla*

Autor	Enfoque	Estrategias
Rendón-Castrillón et al. (2023).	Desarrolla un enfoque para tratar aguas residuales con índigo, mediante un tren híbrido orientado al reúso (biorremediación + NF).	Se compararon dos estrategias de bioaumentación: (R-1) microorganismos nativos del efluente y (R-2) lodos activados de planta municipal de tratamiento de aguas residuales. Ambas redujeron la DQO a 200 mg/L y lograron > 90 % de eliminación del color.  Posteriormente, se aplicó NF con membranas orgánicas para obtener un permeado de alta calidad para su reutilización en el lavado de mezclilla.
Nahar et al. (2024).	Evalúa el potencial de conservación de agua subterránea en una planta de mezclilla del distrito de Manikganj mediante reciclaje y reúso de efluentes.	Se analizaron dos modos de abastecimiento. En otras palabras, uso de 100% de aguas residuales tratadas y una mezcla de 10% de aguas residuales tratadas con agua blanda.
Buscio et al. (2015).	Evalúa el potencial de UF para el colorante índigo en efluentes de tintura.	Se ensayaron cuatro membranas de UF con el objetivo de retener/recuperar índigo y clarificar el permeado, mejorando la calidad del agua para su posible reúso.
Unuofin (2021).	Investiga el uso de salvado de trigo como sustrato para producir una lacasa y su aplicación en minimización de desechos y la gestión del agua.	La lacasa óptima se produjo por fermentación sumergida en medio con salvado de trigo (residuo industrial), y se aplicó a la decoloración de colorantes y al biodesengomado de mezclilla.
Gusakov et al. (2000).	Analiza la gestión sostenible de las aguas residuales en una planta textil en Turquía.	Se realizó una caracterización detallada de efluentes y se identificaron las corrientes a ser reutilizadas dentro de la planta.

**Tabla 2**

*Procesos para el tratamiento de aguas residuales del proceso de lavado de la mezclilla*

Autor	Enfoque	Estrategias
Yigit et al. (2009).	Tratamiento de agua residual mixta de alta carga procedente de teñido, acabado y encolado en una planta textil.	Implementación de un MBR a escala piloto para el tratamiento del efluente.

#### 1.4. Intervenciones enzimáticas para el lavado/acabado de mezclilla

Además, se compilaron las intervenciones enzimáticas aplicables al lavado/acabado de mezclilla y las etapas del proceso donde suelen emplearse: desengomado con amilasas, biopulido y bio-stone con celulasas (Madhu & Chakraborty, 2017; Shahid et al., 2016). Además de describir el enfoque de cada contribución y las estrategias específicas, se identificaron ejemplos experimentales en prenda/tejido, como el biolavado con celulasa inmovilizada frente a una enzima libre, que ilustran la viabilidad operativa sin recurrir a insumos agresivos (Yu et al., 2013). En conjunto, estas rutas buscan reducir el consumo de químicos y agua (Paul, 2015) (Tabla 3).

**Tabla 3**

*Enzimas y procesos para lavado/acabado de mezclilla*

Autor	Enfoque	Estrategias
Madhu y Chakraborty (2017).	Revisa tratamientos enzimáticos ambientalmente respetuosos en la industria textil y su aplicabilidad a etapas del procesamiento.	Uso de enzimas en múltiples etapas: desengomado (amilasas), biopulido y bio-stone de mezclilla (celulasas), blanqueo (lacasas/oxidoreductasas), tallado con pectinasas/lipasas; potencial para reducir químicos y agua frente a rutas convencionales.
Shahid et al. (2016).	Revisa biotecnología industrial con potencial de cumplir criterios clave de una producción textil más ecológica.	Panorama de aplicaciones emergentes de tecnología enzimática: procesos más suaves, menor consumo hídrico y energético, línea de investigación futuras para procesamiento textil sostenible.
Yu et al. (2013).	Estudio del biolavado de mezclilla con celulasa, comparando enzima nativa vs. celulasa inmovilizada en copolímero soluble – insoluble reversible.	Aplicación de celulasa inmovilizada para biolavado de mezclilla; enfoque en viabilidad/ estabilidad de la enzima inmovilizada y comparación con celulasa libre en desempeño de lavado.
Paul (2015).	Sintetiza técnicas de reducción ambiental en el lavado de mezclilla e integración con tratamiento/reúso.	Lavado enzimático y tecnologías de reducción de agua; inclusión de tratamientos de efluentes y reciclaje de residuos de mezclilla; perspectiva de implementación a escala industrial.

## 2. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

El estudio bibliométrico se diseñó con un enfoque descriptivo y exploratorio para analizar la evolución de las alternativas sostenibles orientadas a reducir el consumo de agua en el lavado y acabado de mezclilla, así como para identificar actores clave y brechas de conocimiento. El *corpus* se obtuvo de una colección indexada en *Scopus* de 549 documentos, que representa un conjunto de investigaciones de tamaño moderado que abarca desde 1974 hasta 2025, con un énfasis notable en artículos de revistas. La consulta y la depuración realizó el 28 de junio de 2025. La búsqueda se hizo sobre trabajos relacionados con la reducción del consumo de agua en el lavado y acabado de mezclilla (*denim*) utilizando una ecuación de búsqueda en título/resumen/palabras clave:

*TITLE-ABS-KEY (denim AND (wash OR washing OR laundry OR laundering)).*

Para el análisis de datos se utilizaron herramientas bibliométricas como *Bibliometrix* (R) y *VOSviewer*. Con 549 documentos, este conjunto de datos representa una colección manejable para un análisis exhaustivo. En primer término, se calcularon indicadores de producción científica como información general del *corpus*, evolución anual de publicaciones y citas; y se examinaron los autores, países y fuentes más productivos, a fin de identificar los actores y canales de difusión más relevantes en el campo. Posteriormente, se elaboró un mapa de coocurrencia de palabras clave, a partir del cual se identificaron los principales frentes temáticos vinculados con: (a) técnicas de reducción de consumo de agua en el lavado; (b) tratamiento y circularidad del agua residual; y (c) intervenciones enzimáticas para el acabado.

Con base en estos resultados, se seleccionaron los documentos más influyentes y representativos de cada frente temático para realizar una revisión de contenido que permitió construir tablas para sintetizar las alternativas tecnológicas sostenibles (Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3). Finalmente, se elaboró una tabla de síntesis (Tabla 4) que integra las estrategias identificadas, sus aportes prácticos y las brechas de investigación, proporcionando los insumos para la discusión crítica del campo.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Caracterización general del campo de estudio

Se encontraron documentos desde 1974 y hasta 2025, un periodo de 51 años indicó un campo de estudio consolidado y en constante evolución, por lo que el análisis de las tendencias a lo largo de este extenso periodo

puede revelar cambios significativos en el enfoque de la investigación, los métodos y los principales autores. El número de fuentes (226) indicó que la investigación se encuentra distribuida en una variedad moderada de publicaciones. El número de documentos encontrados en este periodo fue de 549, lo cual es un número manejable para el análisis de tendencias y obras influyentes. La tasa de crecimiento anual fue de 5.17% indicando un campo en constante expansión. Esto podría deberse a un interés creciente, al surgimiento de nuevas subdisciplinas o a avances en las metodologías de investigación.

La edad promedio de los documentos fue de 16.6 años, lo que sugiere que el campo está relativamente consolidado, pero no estancado. El promedio de citas por documento fue relativamente moderado (10.6). Este número debe considerarse en el contexto del campo, las publicaciones recientes tendrán un número menor de citas. El número de referencias (9,994) sugiere que los investigadores en este campo se basaron en gran medida en trabajos previos. La diferencia entre las palabras clave *Plus* (2,715, no presentadas en la figura, proporcionadas por *Scopus*) y las palabras clave del autor (942) sugirieron que los términos de indexación automática de *Scopus* abarcaron un espectro de conceptos más amplio que los identificados por los autores.

El elevado número de autores (1,098 frente a 549 documentos) sugirió un alto grado de colaboración, aunque existen 119 documentos de autoría única, el trabajo colaborativo parece ser más común, lo cual se ve reforzado por el indicador de 2.65 de coautores por documento (cada documento tiene aproximadamente 2.65 autores por documento). El 9.29% de índice de coautoría internacional sugirió un nivel moderado de colaboración global (Figura 1).

**Figura 1**  
*Información principal*

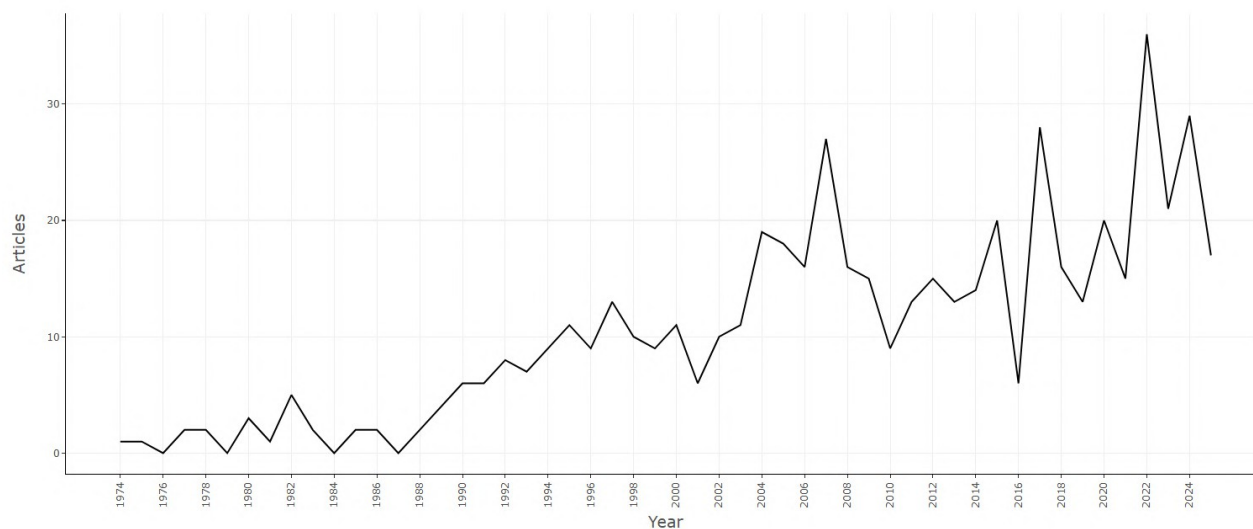


### 3.2. Evolución temporal de la producción y citación científica

El análisis de núcleo mínimo ofreció un indicador del tamaño que tiene dicho núcleo, su tendencia anual y tasa de crecimiento. Esto mostró la evolución temporal de la producción científica relacionada con las alternativas sostenibles para la reducción del consumo de agua en el proceso de lavado de mezclilla entre los años de 1974 a 2025 (Figura 2). En el periodo de 1974 a 2007 se observó un incremento gradual de las publicaciones alcanzando el pico máximo de publicaciones en 2007 con 27 artículos. Posteriormente, se detectó un decremento de publicaciones alcanzando el pico más bajo en 2016 con seis artículos y un nuevo impulso a partir de 2020 que culmina en 2022 con 36 publicaciones, cerrando en 2025 con 17 publicaciones. Este patrón sugiere ciclos de interés ligados a las innovaciones de proceso y la presión regulatoria por reducir consumo de agua y cargas contaminantes.

**Figura 2**

*Producción científica anual*

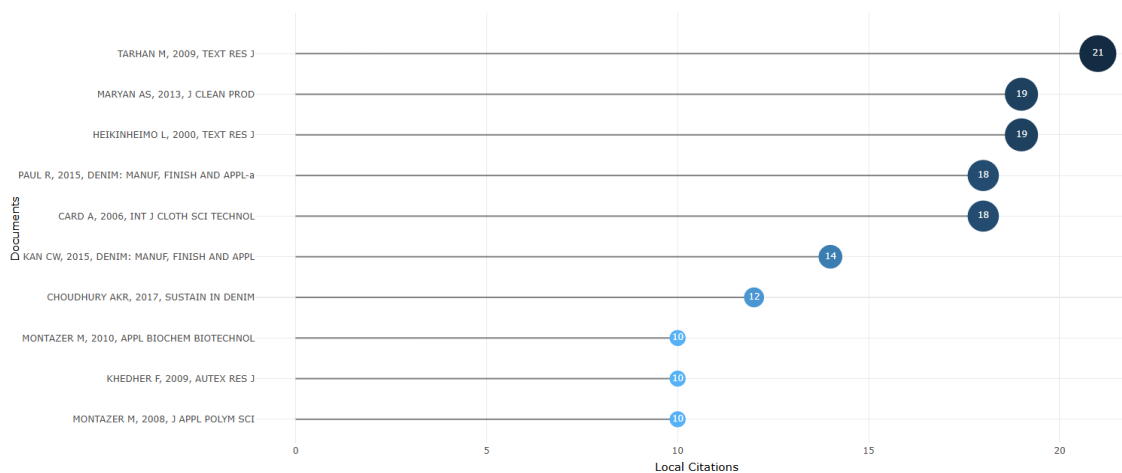


Además, se detectó que algunos artículos del *corpus* tienen un alto número de citas tanto locales como globales. Esto sugiere que fueron influyentes tanto dentro de su área de investigación específica como en la comunidad científica en general. Tarhan y Sarıışık (2009) tuvieron 21 citas locales y una citación normalizada de 7.88, lo que demostró que este artículo es altamente relevante para el *corpus*. Por otro lado, el artículo de Maryan y Montazer (2013) mostró buena relevancia local con 19 citas locales y una citación normalizada de 8.82, lo cual se considera muy alto. El artículo de Card et al. (2006) no tiene citas locales tan altas, pero su citación normalizada de 16 indicó que está excepcionalmente bien citado en comparación con otros artículos publicados en 2006. Lo

mismo que el artículo de Montazer y Sadeghian Maryan (2008). Por otro lado, el artículo Juciené et al. (2018) fue particularmente relevante por tener el valor de citas locales normalizadas más alto, aunque su nivel de citas locales sea bajo (Figura 3).

**Figura 3**

*Documentos locales más citados*

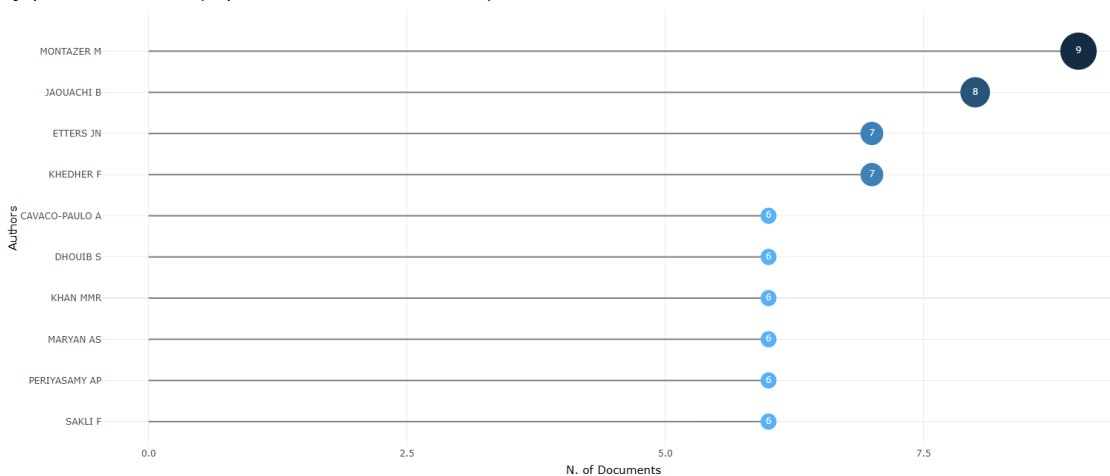


### 3.3. Actores y canales de difusión clave en el tema

Asimismo, se identificó el *top 10* de los autores más relevantes entre 1974 y 2025 (Montazer, con nueve artículos; y Jaouachi, con ocho artículos). La productividad no coincide necesariamente con el impacto: algunos autores menos prolíficos concentran más citas en estudios de referencia o de amplio uso metodológico. Los autores mencionados presentan alternativas para la reducción de consumo de agua en el proceso de lavado (Figura 4).

**Figura 4**

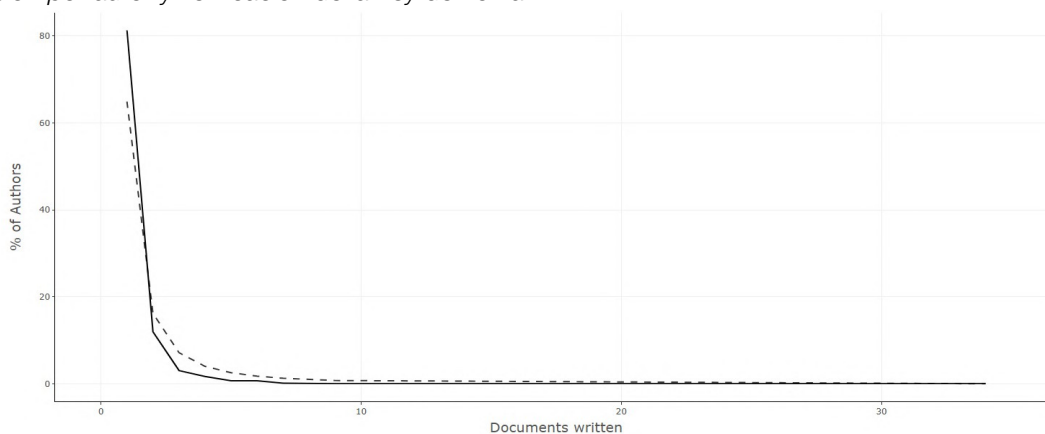
*Autores y productividad (top autores/documentos)*



Además, se observó la distribución de publicaciones por autor que se ajusta a la ley de Lotka. Esta se utiliza para hacer un análisis bibliométrico que mide cuántas publicaciones realizan los investigadores en un campo específico. Un pequeño número de autores publicó muchos artículos, pero la mayoría de autores publicó solo uno o dos artículos (Figura 5). Se identificó que 893 autores escribieron un artículo, 132 autores escribieron dos, 34 autores escribieron tres artículos, y 19 autores escribieron cuatro artículos. Este comportamiento confirmó la alta dispersión del campo y la función de pocos contribuyentes intensivos frente a una base amplia de aportaciones únicas.

**Figura 5**

*Distribución por autor y verificación de la Ley de Lotka*

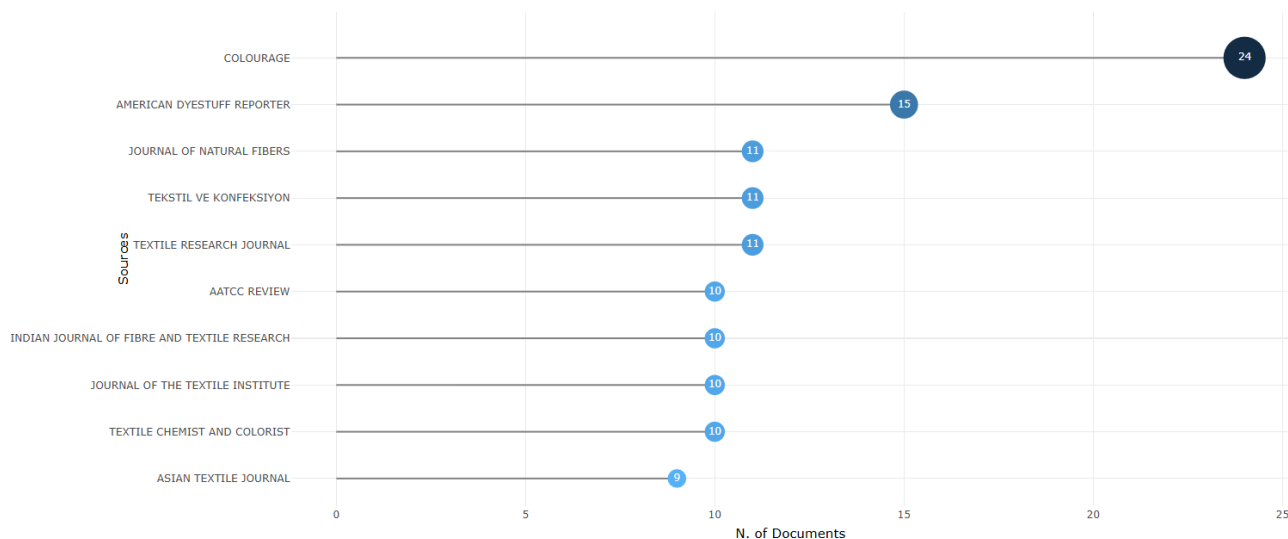


### 3.4. Frentes temáticos y alternativas tecnológicas para reducir el consumo de agua en el lavado y acabado de mezclilla

Entre las fuentes más relevantes (Figura 6) se encuentra *Colourage* con 24 artículos, los cuales fueron publicados entre 1993 y 2008. Aunque es la fuente que más publicaciones tiene, no es la más reciente. La revista *Colourage* es una revista técnica y comercial, que trata temas de colorantes y productos químicos, procesamiento húmedo de textiles, tecnología del color y noticias industriales relacionadas. Por otro lado, se observó que *American Dyestuff Reporter* publicó 15 artículos entre 1988 y 1999. Sin embargo, la *American Dyestuff Reporter* se combinó con *Textile Chemist and Colorist* (10 publicaciones entre los años 1977 a 1996) y, finalmente la publicación resultante estuvo indexada en *Scopus* bajo un nombre combinado, denominado *Textile Chemist and Colorist & American Dyestuff Reporter* (una publicación en el 2000). En la actualidad se conoce como la *Asociación Americana de Químicos y Coloristas Textiles* (AATCC, por sus siglas en inglés) *Journal of Research*.

Dentro del *corpus* estudiado, se encuentran publicaciones de la *AATCC Review* (11 publicaciones, una de ellas de conferencia, por lo que en el gráfico aparece con 10 publicaciones; en un periodo de 2002 a 2019) y, aunque no son la misma publicación, ambas están asociadas con la AATCC la cual desarrolla los métodos de ensayo que se utilizan en la industria textil para garantizar la calidad de los productos. Se considera de gran influencia en los temas que se abordaron (Figura 6).

**Figura 6**  
*Fuentes más relevantes*

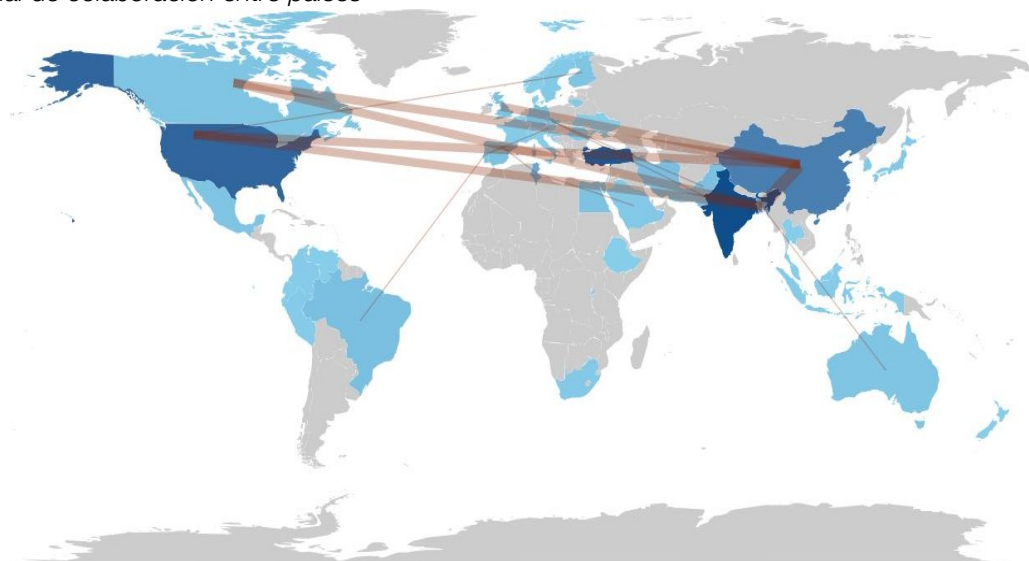




Además, se identificó que los Estados Unidos de América es un importante centro de producción científica, presentando el tono más oscuro, pues tiene la mayor producción de investigación. India y China también mostraron una producción de investigación significativa, evidente por sus tonos más oscuros, especialmente en comparación con otros países. Las líneas de conexión, que representa la coautoría, revelan patrones de colaboración. Destacan los vínculos de colaboración entre Estados Unidos y Europa, Estados Unidos y China, Estados Unidos de América e India, y China e India. Se observan menos conexiones con otros países, lo que podría significar una menor colaboración (Figura 8).

**Figura 8**

*Mapa mundial de colaboración entre países*



## 4. DISCUSIÓN

La bibliometría mostró que la reducción del consumo de agua en el lavado y el acabado de mezclilla es un campo maduro, pero en expansión, con un número acotado de documentos, tasa de crecimiento anual positiva y concentración en un conjunto limitado de fuentes especializadas. Este patrón fue coherente con otros estudios en ingeniería textil y sostenibilidad, donde la producción se organiza en torno a revistas técnicas y producción limpia, mientras que la agenda temática se fragmenta en sublíneas sobre proceso, tratamiento de efluentes y evaluación de impacto (Periyasamy & Periyasami, 2023; Eroğlu, 2023).

El mapa de coocurrencia de palabras clave confirmó esta estructura al distinguir clústeres centrados en enzimas y bioprocesos, tecnologías de bajo uso hídrico (ozono, láser, *e-flow*, nanoburbujas) y tratamiento/circularidad del agua, lo que refuerza la idea de un campo articulado en torno a tres grandes familias de soluciones (Madhu & Chakraborty, 2017; Shahid et al., 2016; Rendón-Castrillón et al., 2023). A su vez el mapa mundial de colaboración ubica a Estados Unidos, India y China como nodos principales, con menor participación de regiones productoras de América Latina, lo que coincide con los sesgos geográficos descritos en la literatura para otros segmentos del textil sostenible (Khan & Jintun, 2021; Periyasamy & Periyasami, 2023).

En el plano tecnológico, los resultados se enfocaron en una transición desde intervenciones enzimáticas hacia tecnologías de bajo uso hídrico y, más recientemente, hacia esquemas que integran cierre de ciclo de agua en planta. Los estudios sobre lavado sostenible reportaron reducciones significativas de consumo de agua, carga química y tiempo de proceso frente a rutas convencionales, manteniendo el desempeño cromático dentro de las tolerancias industriales (Rahaman et al., 2025; Nahid-Ull-Islam et al., 2024). Esta evidencia respaldó el posicionamiento de ozono, láser, *e-flow* y tecnologías afines como alternativas viables para disminuir la huella hídrica del acabado de mezclilla, en línea con los compendios de mejores técnicas disponibles que incorporan también biolavado, biopulido y sustitutos enzimáticos de etapas agresivas (Madhu & Chakraborty, 2017; Shahid et al., 2016; Paul, 2015; Periyasamy & Periyasami, 2023).

Del lado del tratamiento y reúso, el *corpus* mostró que los trenes híbridos que combinan biorremediación con membranas (UF, NF, MBR) logran niveles de remoción de color y DQO compatibles con diferentes esquemas de recirculación interna del agua (Rendón-Castrillón et al. 2023; Buscio et al., 2015; Yigit et al., 2009). Sin embargo, todavía son relativamente pocos los trabajos que documentan balances completos de agua y energía, costos de operación y manejo de concentrados. Esto limitó la comparabilidad entre alternativas y la toma de decisiones a escala industrial (Unuofin, 2021; Gusakov et al., 2000; Nahar et al., 2024). En conjunto, la bibliometría no solo confirmó la factibilidad técnica de reducir el consumo de agua a través de la combinación de mejoras de proceso y circularidad del recurso, sino que también pone en evidencia vacíos de información en métricas estandarizadas, evaluaciones tecnoeconómicas y diversidad geográfica de los estudios, aspectos que deberán abordarse en futuras investigaciones.

## 5. CONCLUSIONES

El análisis bibliométrico mostró que la investigación sobre alternativas sostenibles para reducir el consumo de agua en el lavado de mezclilla conforma un campo maduro y en expansión, organizado en torno a un núcleo moderado de documentos, autores y fuentes especializadas. A lo largo de más de cinco décadas se observó una evolución

temática que parte de intervenciones enzimáticas, incorpora tecnologías de bajo uso hídrico y, en años recientes, integra de manera más clara el tratamiento y la circularidad del agua en planta.

Los mapas de coocurrencia y colaboración concluyeron que las soluciones más prometedoras combinan tres frentes complementarios: procesos enzimáticos que suavizan y simplifican etapas de acabado, tecnologías de lavado con menor demanda hídrica y química, y trenes de tratamiento que posibilitan el reúso interno del agua. Esta convergencia evidenció que la reducción del consumo de agua en la industria del pantalón de mezclilla no depende de una única tecnología, sino de paquetes integrados de proceso y gestión del recurso.

Al mismo tiempo, la bibliometría pone en evidencia vacíos relevantes: se identificó una oferta limitada de estudios que documenten balances completos de agua y energía, costos de operación y desempeño a escala industrial en contextos diversos. También se observó una baja participación de regiones productoras de América Latina y otros territorios con alta presión hídrica, lo que restringe la disponibilidad de evidencia local para la toma de decisiones.

A partir de estos hallazgos, se propone que las futuras agendas de investigación prioricen la estandarización de métricas operativas, la evaluación tecnoeconómica y ambiental de paquetes tecnológicos integrados, así como el fortalecimiento de redes de colaboración en países productores de mezclilla. De esta manera, los resultados bibliométricos se convierten en una herramienta para orientar decisiones de inversión, regulación y desarrollo tecnológico dirigidas a disminuir de forma efectiva la intensidad hídrica del proceso de lavado de mezclilla.

## REFERENCIAS

- Buscio, V., Crespi, M., & Gutiérrez-Bouzán, C. (2015). Sustainable dyeing of denim using indigo dye recovered with polyvinylidene difluoride ultrafiltration membranes. *Journal of Cleaner Production*, 91, 201–207.
- Card, A., Moore, M. A., & Ankeny, M. (2006). Garment washed jeans: Impact of launderings on physical properties. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 18(1), 43–52. <https://doi.org/10.1108/09556220610637503>
- Eroğlu, N. S. (2023). Sustainability approaches in denim products and production processes. *Tekstil Ve Mühendis*, 30(132), 335–350. <https://doi.org/10.7216/teksmuh.1268723>

- Gusakov, A. V., Sinitsyn, A. P., Berlin, A. G., Markov, A. V., & Ankudimova, N. V. (2000). Surface hydrophobic amino acid residues in cellulase molecules as a structural factor responsible for their high denim-washing performance. *Enzyme and Microbial Technology*, 27(9), 664–671.
- Jucienė, M., Urbelis, V. V., Juchnevičienė, Ž., Sacevičienė, V., & Dobilaitė, V. (2018). The influence of laser treatment and industrial washing on denim fabric tension properties. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 30(4), 588–596. <https://doi.org/10.1108/IJCST-03-2017-0032>
- Khan, M. K. R., & Jintun, S. (2021). Sustainability issues of various denim washing methods. *Textile & Leather Review*, 4(2), 96-110. <https://doi.org/10.31881/tlr.2021.01>
- Madhu, A., & Chakraborty, J. (2017). Developments in application of enzymes for textile processing. *Journal of Cleaner Production*, 145, 114–133.
- Maryan, A. S., & Montazer, M. (2013). A cleaner production of denim garment using one step treatment with amylase/cellulase/laccase. *Journal of Cleaner Production*, 57, 320–326.
- Montazer, M., & Sadeghian Maryan, A. (2008). Application of laccases with cellulases on denim for clean effluent and repeatable biowashing. *Journal of Applied Polymer Science*, 110(5), 3121–3129. <https://doi.org/10.1002/app.28920>
- Nahar, N., Haque, M. S., & Haque, S. E. (2024). Groundwater conservation, and recycling and reuse of textile wastewater in a denim industry of Bangladesh. *Water Resources and Industry*, 31, 100249.
- Nahid-Ull-Islam, N. M., Hasan, S. M. M., Chowdhury, M. K. H., Sakib, N. S. I., Ahamed, N. S., Sayeed, N. M. A., & Akter, M. (2024). Sustainable approaches of ozone wash and laser fading over conventional denim wash. *Tekstilec*, 104–118. <https://doi.org/10.14502/tekstilec.67.2024011>
- Paul, R. (2015). Denim and jeans. En R. Paul Elsevier (Ed.) *Denim: Manufacture, Finishing and Applications* (pp. 1–11). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/b978-0-85709-843-6.00001-9>
- Periyasamy, A. P., & Periyasami, S. (2023). Critical Review on Sustainability in Denim: A Step toward Sustainable Production and Consumption of Denim. *ACS Omega*, 8(5), 4472–4490. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06374>
- Rahaman, M. T., Hasan, M. K., & Khan, M. S. H. (2025). Environmental impact measurement and chromatic performance evaluation of denim washing: a comparison to conventional and sustainable approaches for cleaner production. *Environmental Science and Pollution Research*, 32, 6110–6129.
- Rendón-Castrillón, L., Ramírez-Carmona, M., Ocampo-López, C., González-López, F., Cuartas-Urbe, B., & Mendoza-Roca, J. A. (2023). Treatment of water from the textile industry contaminated with indigo dye: A hybrid approach combining bioremediation and nanofiltration for sustainable reuse. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8, 100498.
- Shahid, M., Mohammad, F., Chen, G., Tang, R., & Xing, T. (2016). Enzymatic processing of natural fibres: white biotechnology for sustainable development. *Green Chemistry*, 18(8), 2256–2281. <https://doi.org/10.1039/c6gc00201c>
- 
- Granados Sánchez, A., Aroz Baltazar, I., & Martínez Zarate, I. (2025). Alternativas sostenibles para la reducción del consumo de agua en el proceso de lavado de mezclilla: Un análisis bibliométrico. *Transdigital*, 6(12), e550. <https://doi.org/10.56162/transdigital550>

Tarhan, M., & Sarışık, M. (2009). A comparison among performance characteristics of various denim fading processes. *Textile Research Journal*, 79(4), 301–309.

Unuofin, J. O. (2021). The Sustainable Production of a Novel Laccase from Wheat Bran by *Bordetella* sp. JWO16: Toward a Total Environment. *Catalysts*, 11(6), 677. <https://doi.org/10.3390/catal11060677>

Yigit, N., Uzal, N., Koseoglu, H., Harman, I., Yukseler, H., Yetis, U., Civelekoglu, G., & Kitis, M. (2009). Treatment of a denim producing textile industry wastewater using pilot-scale membrane bioreactor. *Desalination*, 240(1–3), 143–150.

Yu, Y., Yuan, J., Wang, Q., Fan, X., Ni, X., Wang, P., & Cui, L. (2013). Cellulase immobilization onto the reversibly soluble methacrylate copolymer for denim washing. *Carbohydrate Polymers*, 95(2), 675–680.



# Transdigital<sup>®</sup>

editorial

La Editorial *Transdigital* publica libros de carácter científico y académico. Se pueden publicar tesis de posgrado, una vez sometidas al sistema de evaluación de pares de doble ciego. Servicios:

- Gestión del International Standard Book Number (ISBN), del Digital Object Identifier (DOI) y del código de barras.
- Diseño gráfico
- Servicio de corrección de estilo y redacción.
- Dictaminación de la revisión por pares en doble ciego hecha por miembros del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNI) de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) de México.
- Alojamiento permanente del libro en la editorial *Transdigital* ([www.editorial.transdigital.mx](http://www.editorial.transdigital.mx))
- Distribución gratuita en *Dialnet*, *Google Books*, *Google Play* y *SCRIBD*.
- Distribución a precio mínimo en *Amazon Kindle* (cuota que pagan los lectores de *Kindle*).

La editorial *Transdigital* está en el Registro en el Padrón Nacional de Editores como agente editor Sociedad de Investigación sobre Estudios Digitales, S. C., con el Dígito Identificador 978-607-99594. Además, está afiliada a la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana (CANIEM) con el número 4069, de conformidad con el artículo 17 de la Ley de Cámaras Empresariales y sus Confederaciones en vigor. Y está en el Registro Nacional de Instituciones y Empresas Científicas y Tecnológicas (RENIECYT) de la SECIHTI de México con el folio: RENIECYT 2400068.



# Transdigital<sup>®</sup>

congreso virtual

El Congreso Virtual *Transdigital* se realiza anualmente de manera totalmente virtual ([www.congreso.transdigital.mx](http://www.congreso.transdigital.mx)). Este evento tiene el objetivo de reunir resultados parciales o finales de investigaciones empíricas, documentales o ensayos científicos sobre temas y desafíos que involucran a la tecnología y la transformación digital en sociedad.

Está dirigido a investigadores(as), docentes de todas las modalidades y niveles del sistema educativo, estudiantes de pregrado y posgrado, gestores(as) educativos(as), directivos(as) y demás profesionales interesados(as) en la investigación empírica y documental sobre el uso de la tecnología y la transformación digital en diversos ámbitos sociales, por ejemplo, la salud, el ocio, el turismo, las finanzas, la educación, el desarrollo comunitario, la industria, etcétera.

La inscripción por texto, con un máximo de tres autores(as) da el derecho de publicar la ponencia como capítulo de libro académico en la editorial *Transdigital*, una vez que ha sido admitida por el Comité Científico; además se otorgan certificados de ponencia y asistencia. Ese libro cuenta con International Standard Book Number (ISBN), Digital Object Identifier (DOI) y código de barras.

El Congreso Virtual *Transdigital* es una iniciativa que está inscrita en el Registro Nacional de Instituciones y Empresas Científicas y Tecnológicas (RENIECYT) de la SECIHTI de México con el folio: RENIECYT 2400068.



# Transdigital<sup>®</sup>

revista científica

La revista científica *Transdigital* es una publicación semestral bajo el modelo de publicación continua, de manera que se reciben textos durante todo el año. Es editada por la Sociedad de Investigación sobre Estudios Digitales S.C. Evalúa los textos con el sistema de pares de doble ciego. Se admiten Artículos de investigación y Ensayos científicos originales.

El proceso de publicación es expedito y, en promedio, los textos se publican tres meses después de que han sido recibidos. El Consejo científico y el Comité editorial se compone por distinguidas y distinguidos académicos de talla nacional e internacional. Cuenta con la Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2022-020912091600-102, International Standard Serial Number (ISSN) 2683-328X, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor.

Hasta ahora, está indizada en Latindex, Dialnet, ERIHPLUS, REDIB, EuroPub, LivRe, AURA, Academic Resource Index (ResearchBib), MIAR, OpenAire-Explore, Refseek, Sherpa Romeo, Elektronische Zeitschriftenbibliothek, ZDB Zeitschriften Datenbank, WorldCat, Dimensions, The University of Liverpool, Discovery, Erasmus University Rotterdam, Mir@bel, REBIUN, DARDO, UOCI, LatinRev, ROAD, Google Scholar, Crossref, Scite, Lens, Internet Archive, BASE, etc.

El costo de publicación puede ser consultado en: [www.revista.transdigital.mx](http://www.revista.transdigital.mx)