



CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

REVISTA INDUSTRIAL 4.0

ISSN-L 2958-0188

Edición Digital
Nro. 12

Noviembre/2025

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**



REVISTA INDUSTRIAL 4.0

**EDICIÓN DIGITAL N° 12
NOVIEMBRE - 2025**

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Maria Eugenia Garcia Moreno Ph. D.
Dr. Tito V. Estevez Martini
M.Sc Miguel Angel Calla Carrasco
M.Sc. Ing. Marcelo Ramirez Molina
Mg. Aldo Felipe Vargas Pacheco

Rectora
Vicerrector
Decano Facultad de Ingeniería
Vicedecano Facultad de Ingeniería
Director de Carrera Ingeniería Industrial

Revista Industrial 4.0
Edición Digital N°. 12 - Noviembre 2025
Impresa: ISSN 2958-017X
En Linea: ISSN-L 2958-0188

Comite Editor:

Mario Fermín Zenteno Benítez Ph.D.
Oswaldo Fernando Terán Modregón Ph.D.
M.Sc. Ing. Franz José Zenteno Benítez
M.Sc. Ing. Paula Mónica Lino Humerez
M.Sc. Ing. Lucio Grover Sanchez Eid
M.Sc. Ing. Fernando Floren Sanabria Camacho

Diseño Tapa Versión Impresa & Web:
Ing. Enrique Orosco Crespo

Imagen Tapa:
Universidad Mayor de San Andrés

Imprenta:
ITM LATINOAMÉRICA

Deposito Legal:
4 - 3 - 68 - 2020

Web:
<https://industrial.umsa.bo/revistaindustrial-40>
Email:
revistaindustrial4.0@umsa.bo

Av. Mcal. Santa Cruz N° 1175, Plaza del Obelisco
Mezzanine, Edificio Facultad de Ingeniería
Telf. 2205000-2205067, Int. 1402
Campus Universitario, Cota Cota - calle 30

PROLOGO

Revista "Industrial 4.0"

La producción científica en el campo de la ingeniería industrial ha trascendido la visión clásica de la optimización lineal de procesos para adentrarse en una dimensión de complejidad sistémica. En este volumen de la revista "Industrial 4.0", la Universidad Mayor de San Andrés presenta un conjunto de artículos que muestra, desde una perspectiva analítica, las múltiples facetas de la Ingeniería Industrial. La presente edición no es una mera colección de estudios aislados, sino una demostración de la convergencia necesaria entre la gestión estratégica de la innovación, la excelencia operativa y la sostenibilidad y ambiental.



En un primer nivel de análisis macro, la revista explora la arquitectura de los sistemas de innovación. Se presentan investigaciones que modelan la evolución de los ecosistemas emprendedores universitarios y la transición hacia infraestructuras de alta complejidad tecnológica, así como la conceptualización de la empresa universitaria. Estos trabajos dialogan fluidamente con estudios sobre la complejidad productiva, aportando marcos teóricos fundamentales para comprender las dinámicas de integración económica y el desarrollo de capacidades en entornos competitivos.

Descendiendo hacia la operatividad técnica y la eficiencia de los procesos, se presenta un escrutinio cuantitativo sobre la implementación de metodologías de Lean Six Sigma en el contexto de la Cuarta Revolución Industrial, complementado con evaluaciones financieras críticas sobre el Retorno de la Inversión (ROI) en la automatización. Esta sección se enriquece con análisis econométricos que correlacionan la digitalización de canales comerciales, específicamente en plataformas sociales, con la variabilidad de ingresos en el tejido de la manufactura a pequeña escala (MyPEs), evidenciando la simbiosis entre tecnología y rendimiento económico.

Finalmente, la publicación aborda con rigor científico el imperativo de la sostenibilidad y la economía circular. Se exponen hallazgos significativos en la revalorización de biomasa residual agroindustrial y se plantean revisiones sistemáticas sobre los marcos regulatorios y desafíos técnicos en la gestión de aceites lubricantes usados. De igual manera, se analizan las implicaciones ambientales del uso de biocombustibles en motores de combustión interna y la optimización integral del consumo energético. Estas investigaciones no solo proponen soluciones técnicas, sino que establecen las bases para una ingeniería responsable que responde a las leyes de la termodinámica y a la normativa ambiental vigente.

Así, esta edición de “Industrial 4.0” cumple su función primordial: servir como vehículo de difusión de conocimiento validado, fomentando un debate académico de alto nivel que vincula la teoría avanzada con la práctica ingenieril, consolidando el rol de la academia como generadora de soluciones complejas para una realidad empresarial en constante desarrollo.

Mg. Aldo Felipe Vargas Pacheco
DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

<https://doi.org/10.53287/ooii5785bc83w>

REVISIÓN SISTEMÁTICA DE AVANCES TECNOLÓGICOS, MARCOS REGULATORIOS Y DESAFÍOS PARA IMPULSAR LA REVALORIZACIÓN DE ACEITES LUBRICANTES USADOS HACIA UNA ECONOMÍA CIRCULAR

Johnny Ramiro Flores Rodriguez, PhD

Registro ORCID: 0000-0001-5336-6469

jrflores@umsa.bo

RESUMEN

La transición hacia una economía circular en la gestión de aceites lubricantes usados emerge como un imperativo global para reducir la extracción de recursos no renovables, mitigar emisiones y prevenir la contaminación de ecosistemas. Este trabajo realiza una revisión sistemática en línea con la metodología PRISMA 2020, analizando 111 artículos indexados en el periodo 2016 – 2025, con el propósito de identificar tecnologías, políticas y barreras en la valorización de los aceites lubricantes usados. Los resultados demuestran que métodos como el hidroprocesamiento y el de sistemas híbridos (destilación al vacío-pirólisis) permiten obtener aceites re-refinados con menos energía que aquellos que provienen de procesos convencionales, mientras que marcos regulatorios basados en Responsabilidad Extendida del Productor (REP), incrementan sustancialmente las tasas de reciclaje. Sin embargo, en países en desarrollo como Bolivia, la ausencia de normativas específicas, infraestructura y financiamiento, limita la adopción de estas prácticas, perpetuando vertidos ilegales que contaminan suelos y aguas. El análisis identifica barreras críticas como los costos iniciales elevados, resistencia organizacional en las PYMEs y baja conciencia ciudadana. Como contribución y aporte científico, se propone un marco integrado de políticas públicas en base a tres pilares: (1) armonización regulatoria internacional con estándares de trazabilidad digital; (2) incentivos fiscales y fondos verdes para tecnologías escalables; y (3) programas

educativos que vinculen el reciclaje con beneficios en salud (ODS 3) y reducción de la huella hídrica (ODS 6). De ahí que, estos hallazgos brindan una base empírica para que gobiernos, industria y la propia academia diseñen estrategias alineadas con los ODS, priorizando equidad y sinergias entre innovación y sostenibilidad.

Palabras clave: Economía Circular, Aceites Lubricantes Usados, Re-refinación, Políticas Públicas, ODS, Trazabilidad

ABSTRACT

The transition to a circular economy in managing used lubricating oils emerges as a global imperative to reduce fossil resource extraction, mitigate emissions, and prevent ecosystem contamination. This study conducts a systematic review following the PRISMA 2020 methodology, analyzing 111 indexed articles (2016 – 2025) to identify technologies, policies, and barriers in valorizing these wastes. The results demonstrate that methods such as hydroprocessing and hybrid systems (vacuum distillation-pyrolysis) enable the production of re-refined lubricants with lower energy consumption than conventional processes. At the same time, Extended Producer Responsibility significantly increases recycling rates. However, in developing countries like Bolivia, the absence of specific regulations, infrastructure, and financing limits the adoption of these practices, perpetuating illegal dumping that contaminates soils and water sources. The analysis identifies critical barriers: high upfront costs, organizational resistance SMEs, and low public awareness. As a central contribution, the study proposes an integrated public policy framework with three pillars: (1) international regulatory harmonization with digital traceability standards; (2) fiscal incentives and green funds for scalable technologies; and (3) educational programs linking recycling to health benefits (SDG 3) and water footprint reduction (SDG 6). The findings provide an empirical foundation for governments, industry, and academia to design strategies aligned with the SDGs, prioritizing equity and synergies between innovation and sustainability.

Keywords: Circular Economy, Used Oils, Re-refining, Public Policies, SDGs, Digital Traceability

1. INTRODUCCIÓN

La gestión de aceites lubricantes usados dentro de un modelo de economía circular se ha convertido en un eje estratégico para la sostenibilidad ambiental y la eficiencia

de recursos. Estos residuos, generados masivamente por la industria automotriz e industrial, suelen descartarse de forma inapropiada, contaminando suelos y cuerpos de agua. Comprender y optimizar los procesos de re-refinación y regulación de estos aceites no solo aporta al desarrollo de teorías sobre valorización de residuos, sino que tiene impacto directo en la reducción de emisiones de carbono y en la preservación de los recursos fósiles.

Las tecnologías actuales para el reciclaje de aceites usados incluyen procedimientos de destilación al vacío, extracción con solventes, hidroprocesamiento y utilización de membranas filtrantes, métodos que permiten restaurar la calidad del lubricante a niveles equivalentes o superiores al producto virgen (Cabrera-Escobar et al., 2025; Hussain et al., 2024). A nivel de políticas, directivas europeas y normativas EPA, se establecen marcos que priorizan la recolección y el re-refinado frente a la eliminación (Energy Sustainability, 2025; US EPA, 2025). Estas mejoras han demostrado aportar beneficios económicos significativos, como la reducción del consumo energético y la generación de nuevos empleos verdes. Asimismo, los beneficios ambientales, como la disminución de la huella de carbono y la prevención de derrames tóxicos, se constituyen en ventajas clave en materia de sostenibilidad. No obstante, a pesar de su potencial transformador, su implementación a nivel global aun presenta importantes desigualdades.

A pesar de los avances, aún no queda claro cómo las barreras regulatorias, económicas y sociales convergen para frenar la escala global de la economía circular para los aceites usados. En particular, la ausencia de marcos legales específicos en países como Bolivia y la falta de concienciación ciudadana limitan la recolección efectiva y la inversión en infraestructura de re-refinación. Esta contradicción entre tecnologías maduras y escasa implementación plantea un enigma crucial para diseñar estrategias integrales que realmente cierren el ciclo de los aceites lubricantes usados.

Por tanto, este estudio plantea el siguiente enunciado científico: ¿Cuáles son los principales obstáculos técnicos, regulatorios y socioeconómicos que impiden la adopción masiva de una economía circular en el reciclaje de aceites lubricantes usados, y qué estrategias integrales pueden superarlos? De este modo, contribuimos al campo una tipología de barreras y un conjunto de recomendaciones basadas en evidencia orientadas a armonizar tecnologías, políticas y prácticas sociales en favor

de la valorización de estos residuos.

En consecuencia, el propósito de este artículo es proporcionar una revisión sistemática, bajo lineamientos PRISMA 2020, de las tecnologías de re-refinación, las políticas públicas y las dinámicas de mercado que configuran la economía circular de aceites usados. A partir de ello, se propone un marco integrado de acción para académicos, reguladores y el sector empresarial, que promueva sinergias entre innovación técnica, regulación eficiente y conciencia social. De esta manera, se amplía la literatura sobre la gestión de residuos peligrosos y se ofrece una hoja de ruta para impulsar cadenas circulares sostenibles.

El artículo se organiza en cinco secciones: (1) Fundamentos conceptuales; (2) Relevancia de la investigación; (3) Estrategia metodológica; (4) Principales hallazgos; y por último (5) Conclusiones y recomendaciones.

2. FUNDAMENTOS CONCEPTUALES

La revisión sistemática de la gestión de aceites lubricantes usados, en el marco de los ODS, permite visibilizar una problemática ambiental y sanitaria de alta prioridad, derivada de prácticas inadecuadas de disposición, manejo y recuperación. Estos residuos, conformados por mezclas complejas de hidrocarburos, aditivos y contaminantes persistentes, representan una amenaza directa para los ecosistemas y la salud humana, especialmente en contextos donde los sistemas de recolección, almacenamiento, tratamiento y fiscalización son débiles, ineficientes o fragmentados. La relevancia de este tema se vincula directamente con los ODS 3 (Salud y bienestar), ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), ODS 12 (Producción y consumo responsable) y ODS 13 (Acción por el clima), que exigen enfoques integrales orientados a mitigar impactos, promoción de economías circulares y garantizar justicia ambiental (Fazzo et al., 2017; UNEP, 2015).

La evidencia científica muestra que tanto los países industrializados como aquellos de ingresos medios y bajos enfrentan desafíos estructurales y normativos en la gestión de aceites usados. Persiste una elevada incidencia de vertidos ilegales, prácticas informales de recolección sin trazabilidad, y una aplicación insuficiente de las normativas existentes. Estas deficiencias operativas comprometen la “calidad de los suelos, cuerpos hídricos e influencias directas al aire” (Flores, 2001, p. 14), lo que se traduce en riesgos concretos para la salud pública, incluyendo enfermedades

respiratorias, afecciones neurológicas, trastornos endócrinos y diversos tipos de cáncer asociados a la exposición prolongada a metales pesados y contaminantes orgánicos persistentes (Fazzo et al., 2017).

Frente a este escenario, emergen soluciones tecnológicas y estratégicas con alto potencial de transformación ambiental. El desarrollo de tecnologías avanzadas de tratamiento, como el re-refinado mediante destilación al vacío, procesos termoquímicos y técnicas de filtración molecular, permiten reducir significativamente la peligrosidad de estos residuos y recuperar componentes valiosos. De ahí que, cuando se insertan en un enfoque de economía circular, estas innovaciones contribuyen a cerrar el ciclo del producto, minimizando impactos ambientales y generando valor económico. En este contexto, la adhesión a instrumentos internacionales, como el Convenio de Basilea resulta clave para asegurar la trazabilidad de los residuos peligrosos y promover una gobernanza ambiental más estricta y efectiva (UNEP, 2015).

Por consiguiente, la gestión de aceites usados debe entenderse desde una perspectiva de responsabilidad social, debido a que su manejo adecuado no solo responde a exigencias ambientales, sino también a demandas crecientes por parte de la sociedad respecto a la conducta ética, sostenible y transparente del sector empresarial. Iniciativas como el ecoetiquetado, el uso de biolubricantes, y la implementación de sistemas de responsabilidad extendida del productor (REP), refuerzan el rol activo del sector privado en la transición hacia modelos productivos sostenibles y alineados con los ODS (Manu et al., 2025). No obstante, la adopción de estas prácticas sostenibles enfrenta barreras significativas de tipo financiero, tecnológico, organizacional y normativo. En muchos países, la informalidad, la falta de incentivos económicos, la escasa sensibilización ciudadana y la debilidad institucional limitan la implementación de soluciones integradas. Superar estos desafíos requiere un enfoque multisectorial que articule incentivos regulatorios, financiamiento verde, educación ambiental, cooperación interinstitucional y participación ciudadana activa. Solo mediante este tipo de articulación será posible avanzar hacia una gestión responsable de los aceites usados, que contribuya al cumplimiento de los ODS y a la protección integral del planeta y sus habitantes (Abas et al., 2022; Kwarto et al., 2024; Spina et al., 2024).

3. RELEVANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

La gestión adecuada de aceites lubricantes usados no solo constituye una necesidad ambiental apremiante, sino una responsabilidad transversal vinculada a múltiples dimensiones del desarrollo sostenible. La disposición inadecuada de estos residuos, mediante vertidos en cuerpos de agua, suelos o alcantarillados, alimenta una cadena de impactos negativos que intensifican la degradación ambiental, incrementan la toxicidad de matrices naturales y ponen en riesgo a comunidades expuestas. Numerosos estudios documentan las consecuencias sanitarias y ecológicas de estas prácticas, tanto en países desarrollados como en aquellos en vías de desarrollo, donde predomina la informalidad y el incumplimiento normativo (Fazzo et al., 2017).

Frente a esta problemática, el desarrollo e implementación de tecnologías limpias y procesos de reciclaje eficientes se posiciona como una estrategia clave de mitigación. Estas innovaciones permiten no solo reducir el volumen y peligrosidad de los residuos, sino también recuperar recursos energéticos y materiales, disminuyendo así la dependencia de recursos naturales no renovables. Paralelamente, marcos regulatorios robustos y mecanismos de fiscalización eficaces, son esenciales para controlar los movimientos transfronterizos de residuos peligrosos y fomentar la corresponsabilidad entre productores, gestores, consumidores y gobiernos.

Complementariamente, experiencias industriales en otras cadenas de valor, como la producción de aceite de oliva, ilustran cómo la medición de la huella hídrica, la eficiencia de recursos y la reducción de efluentes pueden ser extrapoladas al contexto de la industria de los aceites lubricantes. Estos aprendizajes, aplicados a través de iniciativas como el fomento de biolubricantes y la minimización de impactos hídricos, configuran rutas viables hacia una industria sostenible (Kwarto et al., 2022). En suma, el enfoque multidimensional de la gestión de aceites usados, que integra innovación tecnológica, cumplimiento normativo y responsabilidad social, constituye una estrategia imprescindible para avanzar hacia sistemas productivos sostenibles, resilientes e inclusivos. Solo mediante la articulación de estos elementos será posible consolidar un modelo de desarrollo verdaderamente alineado con los principios de sostenibilidad global y salud pública.

4. ESTRATEGIA METODOLÓGICA

La presente investigación adopta un enfoque de revisión sistemática rigurosa, guiado por las directrices PRISMA 2020, con el fin de asegurar la transparencia y calidad en cada fase del estudio, desde la formulación de objetivos hasta la síntesis de resultados (Alizadeh, 2022; Fazzo et al., 2017). Para identificar la literatura relevante en torno a la economía circular y la gestión de aceites lubricantes usados, se empleó una estrategia de búsqueda avanzada en bases de datos multidisciplinarias (UGC, ERA, DOAJ, PubMed, Crossref, entre otras), complementada con consultas en repositorios institucionales. Esta estrategia incorporó operadores booleanos y filtros temporales (2016 – 2025). En una primera fase, se recuperaron 176 estudios previos, de los cuales se seleccionaron 8 publicaciones relevantes. En una segunda fase, se identificaron 872 nuevos registros (507 en Scopus y 365 en WOS); tras eliminar duplicados e investigaciones no pertinentes, se consideraron 111 artículos para la revisión de títulos y resúmenes, seguida del análisis exhaustivo del texto completo (Feor et al., 2023; Vaaland & Heide, 2008).

Los criterios de elegibilidad se establecieron de acuerdo con PRISMA, priorizando la claridad en los diseños de estudio, la precisión de las mediciones y la identificación de sesgos potenciales (Fazzo et al., 2017; Nyiba, 2022). La selección se realizó de manera independiente, lo que permitió finalmente incluir 24 documentos que demostraron alta relevancia temática, solidez metodológica y pertinencia de resultados, alineándose con los indicadores planteados (Feor et al., 2023; US EPA, 2025).

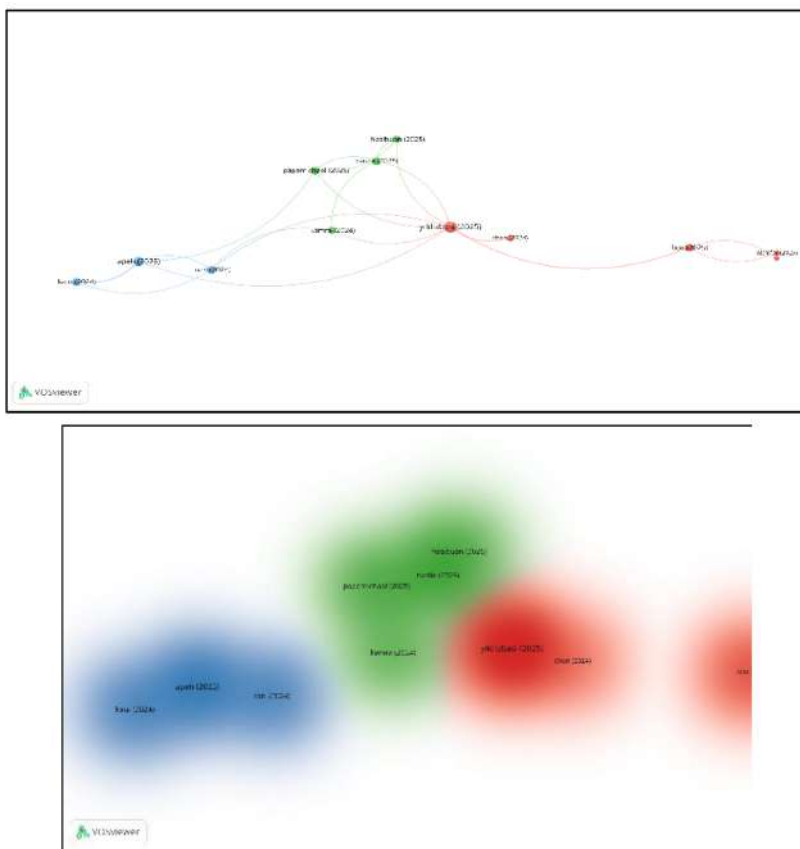
Para evaluar la calidad de los documentos seleccionados, se aplicó una escala de fiabilidad (baja, media, alta) basada en el rigor del diseño, el control de variables de confusión y la consistencia de los hallazgos (Bharti et al., 2024; Vaaland & Heide, 2008). Este análisis minucioso tiene por objeto minimizar riesgos como la falacia ecológica y refuerza la robustez de la evidencia recopilada (Kwarto et al., 2024). Al seguir estos protocolos, la revisión aporta una base empírica sólida que orienta la formulación de políticas públicas y prácticas industriales congruentes con los ODS y los principios de responsabilidad social.

5. PRINCIPALES HALLAZGOS: DE LOS DATOS A LA INTERPRETACIÓN

La transición hacia una economía circular en la gestión de aceites lubricantes

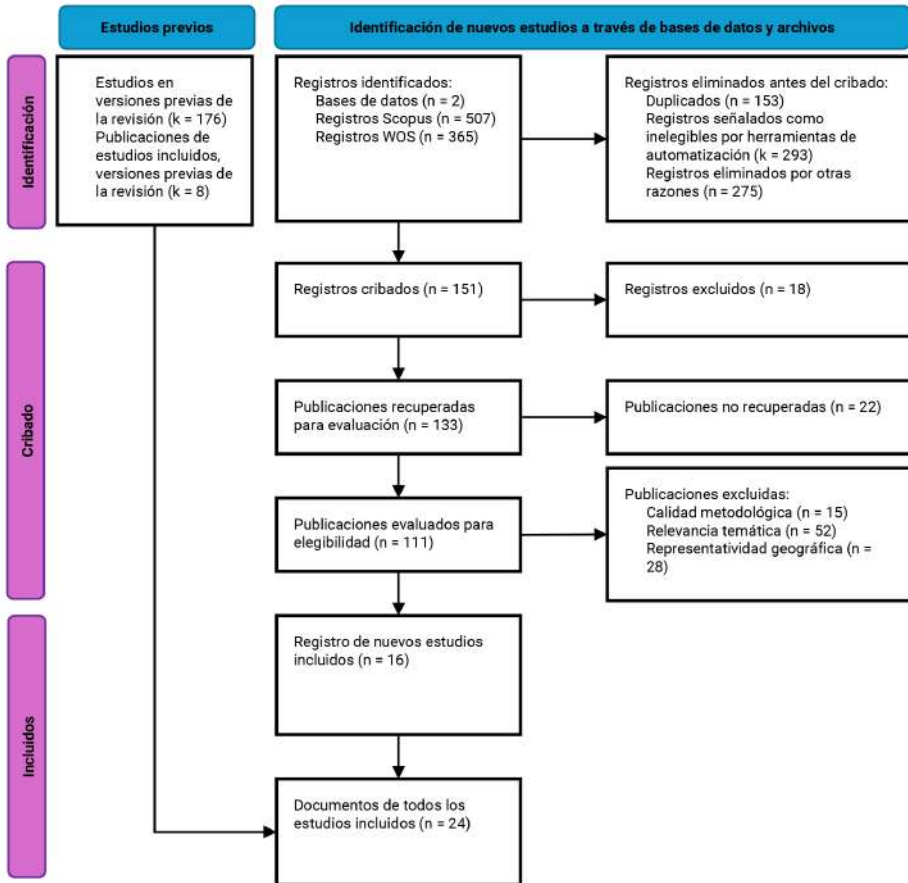
usados emerge como un imperativo global para reducir la extracción de recursos no renovables, mitigar emisiones y prevenir la contaminación de ecosistemas. En este sentido, la metodología utilizada combina el análisis bibliométrico y cualitativo, de ahí que mediante el uso de la herramienta VOSviewer, se mapearon redes temáticas clave de estudios previos, revelando clusters estratégicos como las de “tecnologías de re-refinación”, “políticas públicas”, “barreras y oportunidades” y de “responsabilidad social”, lo que permitió visualizar conexiones entre innovación técnica y sostenibilidad (Figura 1).

Figura 1: Análisis bibliométrico. (a) Visualización de red; (b) Visualización de densidad



Fuente : Elaboración propia en base a VOSviewer

Figura 2: Diagrama de flujo PRISMA 2020



Fuente : (Page et al., 2021). Esta obra está licenciada bajo CC BY 4.0. Para ver una copia de esta licencia, visite <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

A partir de análisis bibliométrico de estudios previos y con base en una revisión sistemática, se identificaron nuevas investigaciones que permiten identificar tecnologías, políticas y barreras asociadas a la valorización de estos residuos. El proceso de selección de estos registros, representado en el diagrama de flujo conforme a los lineamientos de la metodología PRISMA 2020 (Figura 2), se estructuró en tres fases clave: identificación, cribado e inclusión. De un total

de 872 registros iniciales extraídos de bases de datos científicas, se aplicaron criterios rigurosos de elegibilidad, las cuales incluyeron la calidad metodológica, la relevancia temática y la representatividad geográfica, lo que condujo a la selección de 24 investigaciones principales. Este flujo metodológico no solo garantiza la transparencia y la posibilidad de replicación del proceso, sino que también respalda su solidez científica al centrarse en investigaciones con diseños consistentes y una cobertura geográfica amplia, que incluye tanto contextos industrializados como países en vías de desarrollo. Los hallazgos más relevantes, junto con su análisis crítico, se presentan a continuación:

5.1. Tecnologías de re-refinación

La re-refinación de aceites lubricantes usados emplea métodos innovadores para eliminar impurezas y restaurar las propiedades funcionales del lubricante. Entre las técnicas más eficaces destacan la destilación al vacío, que, combinada con tratamientos químicos preliminares, separa fracciones del aceite según su punto de ebullición, optimizando pureza y rendimiento (Hussain et al., 2024), y la extracción con solventes, que utiliza compuestos de baja toxicidad para maximizar la eficiencia y reducir riesgos ambientales (Bamford, 2024; Cabrera-Escobar et al., 2025). Por otro lado, el hidroprocesamiento, mediante hidrógeno a altas presiones y temperaturas, elimina contaminantes y produce lubricantes premium con emisiones mínimas de subproductos (STLE, 2025), mientras que la tecnología de membranas ofrece filtración selectiva, alcanzando niveles de pureza superiores al 95% sin procesos químicos agresivos (Bamford, 2024). Los métodos híbridos, como la integración de pirólisis con destilación, maximizan la recuperación de recursos sin comprometer la calidad (Parekh et al., 2022), reflejando avances hacia soluciones integradas y sostenibles.

Estas tecnologías generan beneficios ambientales y económicos significativos. Al sustituir el consumo de aceites vírgenes, reducen hasta un 40% el consumo energético y disminuyen la huella de carbono, contribuyendo así a la conservación de recursos naturales (DNR, 2025; Masafee, 2025). Dado que estos procedimientos permiten transformar residuos en materias primas valiosas, fomentan modelos industriales circulares que integran la rentabilidad con la responsabilidad ambiental. Según Moses et al. (2023), este enfoque no solo fortalece la competitividad sectorial, sino que también avanza en el cumplimiento de los ODS, especialmente en lo que

respecta a producción responsable (ODS 12) y acción climática (ODS 13). De esta forma, la re-refinación se consolida como un eje estratégico para transitar hacia economías bajas en carbono y socialmente equitativas (PetroNaft, 2025), cerrando ciclos productivos y promoviendo sinergias entre innovación técnica y sostenibilidad global (Yildizbasi et al., 2025).

5.2. Políticas públicas y desafíos regulatorios

La transición hacia una economía circular en el sector de aceites lubricantes demanda una articulación estratégica entre políticas públicas, innovación tecnológica y compromiso industrial. Este enfoque integral no solo mitiga impactos ambientales, como la contaminación de suelos y cuerpos de agua, sino que también genera beneficios socioeconómicos alineados con los ODS, incluyendo empleos verdes y reducción de la dependencia de recursos no renovables (Kumar Dubey, 2024). Países líderes como los de la Unión Europea y Estados Unidos han establecido marcos normativos avanzados: en la UE, directivas estrictas priorizan la re-refinación sobre la eliminación, posicionando los aceites base reciclados como pilares de la descarbonización industrial (Energy Sustainability, 2025; PetroNaft, 2025). En EE.UU., la Agencia de Protección Ambiental (EPA) regula rigurosamente el ciclo completo del aceite usado (clasificación, transporte y tratamiento), fomentando prácticas circulares en toda la cadena de valor (Energy Sustainability, 2025). Sin embargo, en países en desarrollo como Bolivia, la ausencia de normativas específicas y la fragmentación institucional han creado vacíos regulatorios. Iniciativas como la aplicación del Reglamento para la construcción y Operación de Re-refinerías de Aceites Lubricantes Usados (DS 28099) fracasaron por falta de coordinación interinstitucional y una regulación efectiva, perpetuando vertidos ilegales y desincentivando inversiones en tecnologías sostenibles.

Para superar estas brechas, mecanismos como la Responsabilidad Extendida del Productor (REP) resultan esenciales. Este principio obliga a fabricantes a gestionar el ciclo de vida completo de sus productos, incluyendo residuos posconsumo, mediante programas de recolección y re-refinación (PetroNaft, 2025; Wagner Da Silva, 2020). Complementariamente, los incentivos financieros, como subvenciones, créditos fiscales y fondos verdes, han demostrado eficacia en países como Alemania y Japón, donde reducen hasta un 40% los costos iniciales en re-refinerías y aceleran la adopción de tecnologías limpias (Repsol, 2025). No obstante, persisten desafíos

globales, donde la fragmentación normativa entre regiones dificulta la trazabilidad y el comercio transfronterizo de lubricantes reciclados. Por ejemplo, estándares divergentes en la UE y Asia limitan la interoperabilidad de certificaciones, requiriendo armonización internacional y adopción de mejores prácticas globales (Energy Sustainability, 2025).

En síntesis, el éxito de la economía circular en este sector depende de tres pilares fundamentales: (1) gobernanza colaborativa que integre regulaciones específicas y una fiscalización robusta; (2) financiamiento innovador para democratizar el acceso a tecnologías; y (3) cooperación internacional que estandarice criterios y facilite mercados circulares. Estos esfuerzos, respaldados por marcos como la REP y alineados con los ODS, no solo cerrarían brechas en países en desarrollo, sino que también escalarían soluciones técnicas y económicamente viables, transformando residuos en recursos estratégicos para una industria sostenible.

5.3. Barreras y oportunidades

La transición hacia un modelo de economía circular en el sector de aceites usados se ve limitada por obstáculos internos y externos que requieren abordajes integrales. En el ámbito organizacional, la falta de alineación entre áreas y la resistencia al cambio frenan la adopción de prácticas circulares, especialmente cuando la alta dirección no establece incentivos claros ni lidera con el ejemplo (Feor et al., 2023; Valicor, 2025). A nivel financiero, el elevado costo inicial de tecnologías de re-refinación, sistemas de trazabilidad y gestión integral de residuos desincentiva la inversión, sobre todo en las PYMEs con acceso limitado a crédito y con baja tolerancia al riesgo (Nyiba, 2022; Spina et al., 2024). Estas barreras conjuntas refuerzan el modelo lineal de bajo costo, impidiendo que las soluciones circulares alcancen la escala necesaria para demostrar su viabilidad económica (Kamra et al., 2024).

Las limitaciones tecnológicas y políticas agravan el panorama. Muchas empresas, particularmente en economías en desarrollo, carecen de infraestructura y know-how para incorporar procesos avanzados de reciclaje, mientras que las tecnologías existentes no siempre se diseñan con criterios de reutilización (Nyiba, 2022; SBN, 2025). En el plano normativo, la ausencia de marcos claros y coherentes, sumada a la fragmentación institucional y la débil fiscalización, genera incertidumbre jurídica y desalienta tanto a inversores como a actores industriales (Kwarto et al., 2024; Spina et al., 2024). Para avanzar, es esencial fomentar la creación de ecosistemas

tecnológicos que integren diseño modular de productos y cadenas de valor habilitantes, así como impulsar políticas públicas estables que ofrezcan incentivos fiscales y faciliten el financiamiento de proyectos circulares (Papamichael et al., 2025).

Al mismo tiempo, existe una ventana de oportunidad para transformar estas barreras en motores de innovación y compromiso social. La superación de retos organizacionales y financieros pasa por la formación de alianzas estratégicas, redes de conocimiento y esquemas colaborativos que compartan riesgos y beneficios. A nivel político, la armonización de regulaciones y la implementación de mecanismos de REP pueden fortalecer la confianza y atraer capital. Finalmente, la sensibilización ciudadana y la educación ambiental resultan ser clave para modificar hábitos de consumo, valorizando los productos reciclados y empoderando al consumidor como agente activo de circularidad. Así, un enfoque holístico que articule tecnologías, políticas y cultura social permitirá convertir los desafíos en palancas de desarrollo sostenible.

5.4. Responsabilidad social en la gestión integral de aceites usados

La gestión de aceites usados se fundamenta hoy en un enfoque de responsabilidad social que reconoce este residuo como un recurso estratégico. Cada litro de aceite empleado puede transformarse en aproximadamente 0,63 litros de lubricante re-refinado, consumiendo apenas un tercio de la energía necesaria para procesar crudo virgen. Esta eficiencia energética y material refuerza los principios de la economía circular, donde el aprovechamiento máximo de los recursos impulsa la sostenibilidad y reduce la huella ambiental de las operaciones industriales.

El marco normativo refuerza este compromiso social y ambiental. Desde la regulación de la EPA en 1992, que prioriza el reciclaje frente a la disposición final, hasta las más recientes actualizaciones en la gestión de residuos peligrosos, las empresas deben cumplir rigurosos estándares en generación, transporte y tratamiento de aceites usados (García-Feijoo et al., 2020). Estas directrices no solo garantizan el respeto al medio ambiente, sino que también promueven la salud pública y la seguridad laboral, favoreciendo una cultura corporativa orientada a la transparencia y la rendición de cuentas (Chen et al., 2024).

Por lo tanto, el impacto de una gestión responsable de aceites usados trasciende

lo ambiental y fortalece el tejido social. Al aumentar las tasas de recolección y la aplicación de procesos de re-refinación, se disminuirían significativamente los vertidos que contaminan suelos y aguas, mejorando la calidad de vida de las comunidades (Tura et al., 2019). Estudios de caso demuestran que el etiquetado ecológico de lubricantes y el uso de biolubricantes no solo mitigan riesgos ambientales, sino que también generan confianza entre las partes interesadas (UNEP, 2015). Involucrar a proveedores, clientes y entidades gubernamentales en estas iniciativas impulsaría la participación ciudadana y consolidaría la reputación de las empresas como agentes de cambio responsable.

6. CONCLUSIONES

Este estudio, basado en una revisión sistemática bajo los lineamientos PRISMA 2020, analizó 872 publicaciones científicas en bases de datos multidisciplinarias, seleccionando 24 investigaciones de alta rigurosidad metodológica mediante criterios de inclusión estrictos (relevancia temática, calidad empírica y contexto geográfico). La metodología permitió identificar patrones globales y divergencias regionales en la gestión de aceites lubricantes usados, destacando tres contribuciones clave: (1) la eficacia probada de tecnologías como el hidroprocesamiento y métodos híbridos para lograr una re-refinación competitiva con productos vírgenes; (2) el impacto positivo de marcos regulatorios integrados en la adopción de modelos circulares; y (3) las brechas críticas en países en desarrollo, como Bolivia, donde la falta de normativas específicas y financiamiento limita su implementación. Estos hallazgos ofrecen una base empírica sólida para diseñar políticas públicas basadas en evidencia y alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 3, 6, 12 y 13).

Asimismo, los resultados subrayan que la armonización regulatoria internacional y la inversión en tecnologías escalables son pilares para superar barreras multidimensionales. Por un lado, políticas como los sistemas de trazabilidad digital y los incentivos fiscales para PYMEs, podrían replicarse en regiones con marcos débiles, adaptándose a realidades locales mediante alianzas público-privadas. El estudio demuestra que tecnologías emergentes, como la destilación al vacío acoplada a pirólisis, reducen el consumo energético frente al refinado convencional, justificando su inclusión en agendas de innovación industrial. No obstante, se identificaron limitaciones, como el sesgo geográfico hacia estudios de países

desarrollados y la escasa literatura cuantitativa sobre costos de implementación, lo que sugiere la necesidad de ampliar la investigación empírica en economías emergentes.

Finalmente, este trabajo aporta un marco estratégico para la transición circular, estructurado en tres ejes: (1) gobernanza colaborativa, mediante la creación de comités multisectoriales que integren reguladores, industria y academia; (2) financiamiento verde, con mecanismos como bonos de carbono o fondos rotatorios para infraestructura de re-refinación; y (3) educación ciudadana, mediante campañas que vinculen el reciclaje de aceites usados con beneficios tangibles en salud pública. Estas recomendaciones, respaldadas por datos comparativos y análisis de brechas de conocimiento, no solo responden a la urgencia ambiental de reducir la contaminación por hidrocarburos, sino que también ofrecen una hoja de ruta para equilibrar competitividad económica y sostenibilidad.

7. RECOMENDACIONES, DISCUSION FINAL Y DIRECCIONES FUTURAS

La transición hacia una economía circular en la gestión de aceites lubricantes usados demanda una agenda de investigación interdisciplinaria que integre dimensiones técnicas, socioeconómicas y regulatorias. En consecuencia, las futuras líneas de investigación deben priorizar evaluaciones empíricas rigurosas, midiendo variables como eficiencia energética, huella de carbono y retorno económico de tecnologías emergentes, para fundamentar decisiones basadas en evidencia. Asimismo, es imperativo desarrollar indicadores de circularidad sectoriales, como un Índice de Circularidad para Aceites Usados (C-AU), que monitoree avances en recolección, eficiencia tecnológica y reducción de impactos ambientales, adaptando marcos internacionales a contextos regionales.

Las PYMEs son actores clave en esta transición, especialmente en países en desarrollo, donde su flexibilidad e innovación pueden impulsar modelos circulares descentralizados. Sin embargo, su potencial se ve limitado por brechas técnicas y financieras. Programas de capacitación práctica en sostenibilidad, ecodiseño y gestión de residuos, junto con incentivos fiscales y acceso a fondos verdes, son esenciales para empoderar a estas empresas. Paralelamente, todos los esfuerzos deben vincularse explícitamente con los ODS, particularmente ODS 9 (industria innovadora), ODS 12 (producción responsable) y ODS 13 (acción climática),

promoviendo sinergias entre innovación tecnológica y equidad social en regiones con recursos críticos, como es el caso de América Latina y África.

Finalmente, se requiere un marco de políticas públicas integrado que combine la REP, con sistemas de trazabilidad digital y gobernanza colaborativa. Esto implica fortalecer infraestructuras de datos para monitoreo ambiental, fomentar alianzas público-privadas y diseñar mecanismos que incentiven la adopción de tecnologías escalables. En síntesis, las direcciones futuras deben orientarse a consolidar un ecosistema circular robusto y adaptativo, capaz de articular tecnologías emergentes, actores institucionales y compromisos sociales en una visión compartida de sostenibilidad e innovación.

8. REFERENCIAS

- Abas, A., Er, A. C., Tambi, N., & Yusoff, N. H. (2022). A systematic review on sustainable agricultural practices among oil palm farmers. *Outlook on Agriculture*, 51(2), 155–163. <https://doi.org/10.1177/00307270211021875>;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER
- Alizadeh, A. (2022). The Drivers and Barriers of Corporate Social Responsibility: A Comparison of the MENA Region and Western Countries. *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 909, 14(2), 909. <https://doi.org/10.3390/SU14020909>
- Bamford, B. (2024). Innovations In Used Oil Recycling: Pioneering Technologies. *Benzoil*. <https://benzoil.com.au/innovations-in-used-oil-recycling-pioneering-technologies/>
- Bharti, V., Obaideen, K., Azahari, D. H., & Amalia, R. (2024). Contribution of palm oil and soybean oil to sustainable development goals. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1379(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1379/1/012039>
- Cabrera-Escobar, C., Moreno-Gutiérrez, J., Rodríguez-Moreno, R., Pájaro-Velázquez, E., Calderay-Cayetano, F., & Durán-Grados, V. (2025). A Review on Global Recovery Policy of Used Lubricating Oils and Their Effects on the Environment and Circular Economy. *Environments* 2025, Vol. 12, Page 135, 12(5), 135. <https://doi.org/10.3390/ENVIRONMENTS12050135>
- Chen, G., Lim, M. K., Yeo, W. M., & Tseng, M. L. (2024). Net zero vs. carbon neutrality: supply chain management challenges and future research agenda. *International Journal of Logistics Research and Applications*. <https://doi.org/10.1080/13675567.2024.2359058>;JOURNAL:JOURNAL:C-

JOL20;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:CJOL20;WGROUP:STRING:PUBLICATION

- DNR. (2025). Used Oil | Missouri Department of Natural Resources. Missouri Department of Natural Resources. <https://dnr.mo.gov/waste-recycling/reduce-reuse-recycle/what-to-do-with-specific/used-oil>
- Energy Sustainability. (2025). Circular Lubricant Economy. Energy Sustainability. <https://energy.sustainability-directory.com/term/circular-lubricant-economy/>
- Fazzo, L., Minichilli, F., Santoro, M., Ceccarini, A., Della Seta, M., Bianchi, F., Comba, P., & Martuzzi, M. (2017). Hazardous waste and health impact: A systematic review of the scientific literature. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 16(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/S12940-017-0311-8/FIGURES/1>
- Feor, L., Clarke, A., & Dougherty, I. (2023). Social Impact Measurement: A Systematic Literature Review and Future Research Directions. *World* 2023, Vol. 4, Pages 816-837, 4(4), 816–837. <https://doi.org/10.3390/WORLD4040051>
- Flores, R. (2001). Gestión Integral del Aceite Usado: Diagnóstico. In SSHH (1st ed.). Superintendencia de Hidrocarburos. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.27249189.v1>
- García-Feijoo, M., Eizaguirre, A., & Rica-Aspiunza, A. (2020). Systematic Review of Sustainable-Development-Goal Deployment in Business Schools. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 440, 12(1), 440. <https://doi.org/10.3390/SU12010440>
- Kamra, J., Prakash Mani, A., Sharma, M., & Joshi, S. (2024). The Nexus between Green Supply Chain Management and Sustainability Performance in the Past Decade. *Sustainability* 2024, Vol. 16, Page 7474, 16(17), 7474. <https://doi.org/10.3390/SU16177474>
- Hussain, A. J., Al-Khafaji, Z. S., & Al Saffar, I. Q. (2024). New recycling method of lubricant oil and the effect on the viscosity and viscous shear as an environmentally friendly. *Open Engineering*, 14(1). https://doi.org/10.1515/ENG-2022-0521/ASSET/GRAPHIC/J_ENG-2022-0521_FIG_009.JPG
- Kumar Dubey, D. (2024). The study of the effects of improper hazardous waste disposal on ecosystems. *Indian Journal of Science*, 4(4), 130.136. https://www.researchgate.net/publication/385241984_THE_STUDY_OF_THE_EFFECTS_OF_IMPROPER_HAZARDOUS_WASTE_DISPOSAL_ON_

ECOSYSTEMS

- Kwarto, F., Nurafiah, N., Suharman, H., & Dahlan, M. (2022). The potential bias for sustainability reporting of global upstream oil and gas companies: a systematic literature review of the evidence. *Management Review Quarterly*, 74(1), 1. <https://doi.org/10.1007/S11301-022-00292-7>
- Kwarto, F., Nurafiah, N., Suharman, H., & Dahlan, M. (2024). The potential bias for sustainability reporting of global upstream oil and gas companies: a systematic literature review of the evidence. *Management Review Quarterly*, 74(1), 35–64. <https://doi.org/10.1007/S11301-022-00292-7/METRICS>
- Mannu, A., Almendras Flores, P., Briatico Vangosa, F., Di Pietro, M. E., & Mele, A. (2025). Sustainable production of raw materials from waste cooking oils. *RSC Sustainability*, 3(1), 300–310. <https://doi.org/10.1039/D4SU00372A>
- Masafee. (2025). Lubricant recycling and re-refining A key element in a circular economy. Masafee. <https://www.masafee-eg.com/lubricant-recycling-and-re-refining-a-key-element-in-a-circular-economy>
- Moses, K. K., Aliyu, A., Hamza, A., & Mohammed-Dabo, I. A. (2023). Recycling of waste lubricating oil: A review of the recycling technologies with a focus on catalytic cracking, techno-economic and life cycle assessments. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(6), 111273. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2023.111273>
- Nyiba, B. (2022). Recycling hazardous used oil responsibly is essential to protect our environment. The ROSE Foundation. <https://www.linkedin.com/pulse/recycling-hazardous-used-oil-responsibly-essential-protect->
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372. <https://doi.org/10.1136/BMJ.N71>
- Papamichael, I., Economou, F., Voukkali, I., Loizia, P., Stylianou, M., Naddeo, V., & Zorpas, A. A. (2025). A metaverse framework for sustainable waste management considering circular economy. *Chemical Engineering Journal*, 512, 162283. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2025.162283>
- Parekh, K., Gaur, R., & Shahabuddin, S. (2022). Recent Advances in Reclamation

- of Used Lubricant Oil. In Springer (Ed.), Tailored Functional Materials (Vol. 15, pp. 273–282). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2572-6_21
- PetroNaft. (2025). Re-Refined Base Oils: The Circular Economy Of Lubricant Production. PetroNaft Research Team. <https://www.petronaftco.com/re-refined-base-oils/>
- Repsol. (2025). Recycling oils to create more sustainable lubricants | Repsol. Repsol. <https://www.repsol.com/en/sustainability/sustainability-pillars/environment/circular-economy/our-projects/lubricants/index.cshtml>
- SBN. (2025). What are the barriers to achieving a waste-free environment? SBN Software. <https://sbnsoftware.com/blog/what-are-the-barriers-to-achieving-a-waste-free-environment/>
- Spina, D., Carbone, R., Pulvirenti, A., Rizzo, M., D'Amico, M., & Di Vita, G. (2024). What Gets Measured Gets Managed-Circular Economy Indicators for the Valorization of By-Products in the Olive Oil Supply Chain: A Systematic Review. *Agronomy* 2024, Vol. 14, Page 2879, 14(12), 2879. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY14122879>
- STLE. (2025). How re-refined oils could contribute to the circular economy of the future. Society of Tribologist and Lubrication Engineers. https://www.stle.org/files/TLTArchives/2021/08_August/Feature.aspx
- Tura, N., Hanski, J., Ahola, T., Stähle, M., Piiparinen, S., & Valkokari, P. (2019). Unlocking circular business: A framework of barriers and drivers. *Journal of Cleaner Production*, 212, 90–98. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.11.202>
- UNEP. (2015). Guidelines for environmentally sound management of used oils in the Mediterranean. UN Environment Programme. <https://www.unep.org/resources/report/guidelines-environmentally-sound-management-used-oils-mediterranean>
- US EPA. (2025). Managing Used Oil: Answers to Frequent Questions for Businesses. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/hw/managing-used-oil-answers-frequent-questions-businesses>
- Vaaland, T. I., & Heide, M. (2008). Managing corporate social responsibility: Lessons from the oil industry. *Corporate Communications*, 13(2), 212–225. <https://doi.org/10.1108/13563280810869622>

- Valicor. (2025). Transforming Used Oil into a Heavy Manufacturing. Valicor Environmental Services. <https://www.valicor.com/blog/transforming-used-oil>
- Wagner Da Silva, M. (2020). The Circular Economy in the Downstream Industry – Used Lubricating Oils Recycling. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/circular-economy-downstream-industry-used-lubricating-da-silva-mba>
- Yildizbasi, A., Celik, S. E., Arioz, Y., Chen, Z., Sun, L., & Ozturk, C. (2025). Exploring the synergy between circular economy and emerging technologies for transportation infrastructure: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 486, 144553. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2024.144553>



Carrera de Ingeniería Industrial 86 Años

**Facultad de Ingeniería
Universidad Mayor de San Andrés**

UMSA
UNIVERSIDAD DEL BICENTENARIO



UMSA
UNIVERSIDAD DEL BICENTENARIO



CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS