

## 6. Innovación tecnológica verde mediante ingeniería de materiales sostenibles: integración de biopolímeros, sistemas metálicos y ética ambiental



MARIO ADRIÁN DE ATOCHA DZUL-CERVANTES\*

LUZ YAZMÍN VILLAGRÁN-VILLEGAS\*\*

CECILIA IRENE ANAYA-GONZÁLEZ\*\*\*

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.420.06>

### Resumen

La ingeniería de materiales es fundamental para la transición hacia modelos productivos sostenibles mediante la convergencia de biopolímeros, sistemas metálicos y marcos éticos-educativos. Este capítulo explora rutas de recuperación de biopolímeros, como almidones y celulosa, a partir de residuos agroindustriales, los cuales pueden utilizarse en aplicaciones de embalaje de alimentos o biomedicina, así como estrategias para diseño y reciclaje de aleaciones metálicas con bajo impacto. También se discuten estudios de caso del sureste mexicano y desafíos técnicos y socioeconómicos del reciclaje. Finalmente, se enfatiza la necesidad de una educación transdisciplinaria, derechos humanos y perspectiva de género como condición para la legitimidad social de las soluciones. El texto propone un marco integrado técnico-ambiental-ético para la sostenibilidad en un enfoque de materiales, tecnologías verdes y formación profesional orientada a la circularidad.

---

\* Doctor en Ciencias. Profesor en Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Calkiní, México. ORCID: 0000-0002-9095-7281; Scopus: 55635897700; Autor de Correspondencia. Correo electrónico: maadzul@itescam.edu.mx.

\*\* Doctora en Ingeniería de Sistemas. Profesora titular C en Universidad Veracruzana, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3860-2923> ; Scopus: 56110297700

\*\*\* Doctora en Psicología. Profesora asociado C en Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3478-6790>

**Palabras clave:** *materiales sostenibles, ingeniería en materiales, economía circular, ética y derechos.*

## Introducción

El incremento exponencial en la producción y uso de polímeros derivados del petróleo, la extracción intensiva de metales y la acelerada demanda de sus aplicaciones, tales como dispositivos biomédicos y embalajes, han generado daños ambientales y sociales que exigen soluciones inmediatas e integrales. Frente a ello surge el concepto de innovación tecnológica verde, entendido no solo como el reemplazo de materiales por alternativas “más limpias” y “ecoamigables”, sino como la reingeniería sistémica del ciclo de vida, la incorporación de métricas ambientales y la convergencia entre diseño material, procesos industriales y gobernanza social. Esta visión sistémica es ampliamente respaldada por diversos estudios recientes que abordan los retos y avances en polímeros biodegradables y en metales sostenibles, y que aboga por marcos tecnológicos que integren ciclo de vida, eficiencia energética y valorización de residuos (Verma et al., 2024).

Aunado a lo anterior, y para reforzar esta convergencia, se pueden distinguir tres vectores científicos que deben optimizarse para beneficio de los ecosistemas: 1) los biopolímeros y biocompuestos derivados de residuos agroindustriales, que ofrecen rutas de circularidad para embalaje y aplicaciones biomédicas; 2) los sistemas metálicos optimizados para reciclaje y eficiencia; y 3) las herramientas digitales que permiten optimizar procesos, predecir propiedades y reducir la incertidumbre en escalado industrial. Una investigación reciente destaca la necesidad de combinar avances experimentales (síntesis y caracterización y de materiales) con análisis de datos y estrategias de diseño acelerado para materializar soluciones sostenibles viables en la práctica (Jha et al., 2024).

No obstante, la transformación tecnológica no es exclusivamente técnica, también requiere de un componente educativo y ético que asegure que las innovaciones no reproduzcan desigualdades ni vulneren derechos ambientales. En la literatura, algunos autores que trabajan con la educación para el desarrollo sostenible y aprendizaje activo evidencian que

integrar contenidos de sostenibilidad en la formación de profesionales en el ámbito ingenieril y científico aumenta la adopción, la responsabilidad y la participación ciudadana en proyectos de innovación. Así mismo, al incluir la dimensión ética, como perspectivas de género, equidad y comunidades afectadas, eleva la legitimidad social de las tecnologías y posibilita marcos de gobernanza más justos. Por tanto, la innovación tecnológica verde pudiera considerarse, en esencia, interdisciplinaria, al involucrar ciencia de materiales, digitalización y pedagogías orientadas a la transformación socioambiental (Getachew et al., 2025).

Este capítulo busca articular las tres dimensiones anteriores en un enfoque aplicado, técnico, digital y social, primero, enfocando la estructura basada en la innovación tecnológica concreta, desde el desarrollo de materiales a través de sus procesos y análisis de sus aplicaciones, y, segundo, complementarlo con estrategias educativas y de inclusión para maximizar impacto y replicabilidad. En términos prácticos, el capítulo propone rutas metodológicas para la recuperación y formulación de materiales biodegradables a partir de residuos agroindustriales, la optimización de metales y aleaciones mediante modelado y técnicas de inteligencia artificial, y la incorporación de marcos éticos y pedagógicos que permitan la adopción responsable de estas tecnologías (Kamarudin et al., 2022; Verma et al., 2024).

Diversos estudios recientes sobre polímeros biodegradables documentan avances importantes, por ejemplo, mejoras en propiedades barrera y mecánicas mediante su procesamiento y el uso de refuerzos, procesos de extracción más eficientes y criterios de evaluación estandarizados de degradabilidad y migración para uso alimentario y biomédico. Estos desarrollos permiten plantear soluciones de embalaje activo/biodegradable y materiales biomédicos con perfiles de seguridad y funcionalidad crecientes; sin embargo, la investigación subraya la necesidad de validar escalabilidad y análisis de ciclo de vida para evitar sustituciones problemáticas, como el uso de materiales “biodegradables” que demandan condiciones industriales para degradarse. Integrar estas consideraciones técnico-ambientales con datos económicos y sociales es indispensable para proponer soluciones de alto valor en contextos reales (Kamarudin et al., 2022; Verma et al., 2024).

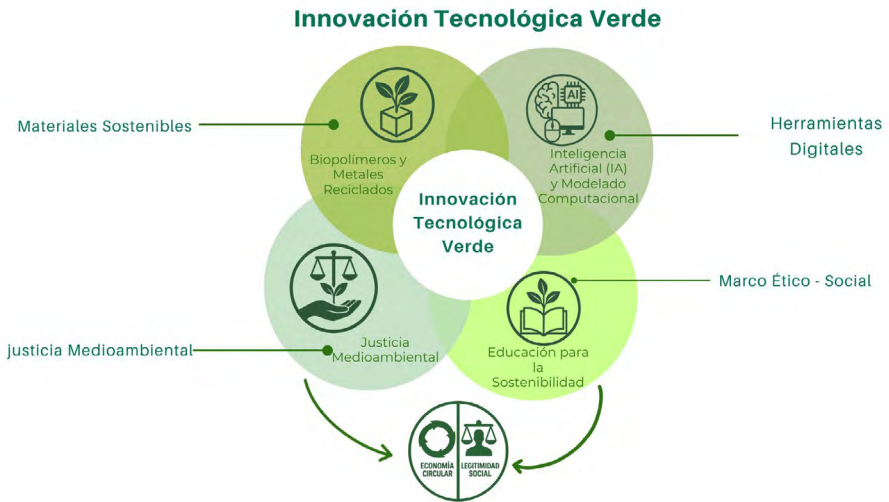
En el campo de los metales, las investigaciones contemporáneas insisten en que la producción de estos materiales es responsable de una porción significativa de emisiones industriales y consumo energético, y por ello el rediseño de aleaciones, la recuperación de residuos “chatarra”, la reutilización de metales, y la optimización de procesos son estrategias clave para la sostenibilidad. La literatura científica muestra además que la investigación en metales sostenibles debe orientarse a reducir la dependencia de recursos primarios, mejorar la reciclabilidad y explorar rutas de fabricación de bajo carbono (por ejemplo, mediante hidrógeno verde o procesos aditivos con alimentación reciclada). Estos objetivos requieren, a su vez, modelos predictivos y herramientas computacionales para seleccionar composiciones y tratamientos térmicos óptimos que maximicen la circularidad sin sacrificar desempeño (Jha et al., 2024; Tebaldo et al., 2024).

La convergencia entre polímeros y metales abre posibilidades innovadoras, materiales híbridos o soluciones complementarias en cadenas productivas, por ejemplo, embalajes con componentes funcionales metálicos reciclados o envases con sensores basados en metales reciclados, así como estrategias industriales donde residuos de una cadena alimentan otra, un principio de economía industrial simbiótica. Para que estas soluciones sean viables y éticas, deben estar acompañadas de educación contextualizada y políticas públicas que favorezcan la inclusión, la trazabilidad y la participación comunitaria en decisiones de adopción tecnológica (Olsson et al., 2022). La figura 6.1, esquematiza el marco conceptual integrado para la Innovación tecnológica verde mediante la ingeniería de materiales.

Finalmente, el propósito central del capítulo es mostrar una perspectiva, con evidencia experimental y conceptual a partir de reportes en la literatura científica, cómo el procesamiento y caracterización de materiales biodegradables a partir de residuos agroindustriales, así como el uso de sistemas metálicos reciclados, todo esto combinado con la optimización mediante inteligencia artificial (IA) y gobernanza ética, pueden constituir un modelo replicable de innovación tecnológica verde; y proponer un marco educativo y metodológico para formar profesionales capaces de operar en esa intersección. El capítulo ofrece además recomendaciones prácticas para evaluación del ciclo de vida, indicadores de sostenibilidad y estrategias de transferencia tecnológica hacia actores productivos, académicos y comunitarios.

Con ello se busca no solo aportar al conocimiento técnico, sino contribuir a la formación de ciudadanía ambiental a través del acceso universal al conocimiento, y a la legitimidad social de las tecnologías verdes.

Figura 6.1. Marco conceptual integrado para la innovación tecnológica verde mediante ingeniería de materiales



Fuente: elaboración propia, 2025.

## Materiales sostenibles como eje de la innovación tecnológica

En la actualidad, la sostenibilidad en el desarrollo de materiales no puede considerarse como una tendencia emergente, sino que debe consolidarse como el eje principal de la innovación tecnológica contemporánea, por ello, las estrategias de diseño, procesamiento y aplicación de materiales deben orientarse hacia la reducción de la huella ambiental, así como la maximización del “tiempo de vida útil” o “valor funcional” a lo largo del ciclo de vida de los materiales. La interacción entre los diferentes materiales, por ejemplo, biopolímeros, metales, cerámicos, refleja la importancia de la necesidad de una transición, que va desde la ingeniería de productos hasta la ingeniería de sistemas sostenibles.

Los cambios en innovación tecnológica implican rediseñar el proceso completo de los materiales, desde la materia prima, pasando por los diversos métodos de procesamiento, hasta el consumo y reciclaje o reutilización de los productos, con la finalidad de construir economías completamente circulares. En este sentido, se han reportado investigaciones recientes que demostraron que estos cambios en los materiales pueden reducir significativamente los daños al ecosistema, sin comprometer el desempeño estructural ni funcional. En este contexto, los materiales sostenibles pueden potencializar la innovación verde al integrar ciencia, ingeniería y responsabilidad social en beneficio del ecosistema y de la sociedad.

### **Tendencias en materiales verdes**

En los últimos años, el desarrollo de materiales sostenibles se ha consolidado como una estrategia efectiva con la finalidad de mitigar el impacto ambiental de estos procesos. Algunas investigaciones señalan que los biopolímeros provenientes de residuos agroindustriales, así como las aleaciones metálicas reciclables y los materiales híbridos, constituyen pilares importantes sobre los cuales se pudiera reestructurar la ingeniería de materiales en el contexto de economía circular. Estas tendencias serían útiles en respuesta a la necesidad de sustituir los recursos no renovables, minimizar los daños al ecosistema, por ejemplo, por emisiones de CO<sub>2</sub>, y extender la vida útil de los productos a través de la optimización de diseños y procesos.

Los biopolímeros han experimentado una expansión en áreas de investigación y sus aplicaciones, esto debido a su potencial para sustituir los polímeros convencionales en áreas como embalaje o biomedicina. Entre estos biopolímeros destacan la celulosa regenerada, el poli (ácido láctico) (PLA), el almidón termoplástico (TPS) y otros que pueden ser obtenidos de fuentes naturales y reciclables, y que han demostrado tener propiedades comparables a los polímeros convencionales, con ventajas adicionales como biodegradabilidad y baja toxicidad. Además, la tendencia actual apunta hacia compuestos híbridos reforzados con fibras naturales o nanopartículas, que mejoran propiedades mecánicas y térmicas

sin comprometer la biodegradabilidad. Este avance permite diseñar materiales de ingeniería con desempeño técnico y sostenibilidad ambiental simultáneos (Dutta y Sit, 2024).

Por otro lado, las aleaciones metálicas sostenibles representan otro vector fundamental. A medida que los sectores industriales enfrentan presiones para descarbonizar sus cadenas de suministro, el rediseño de los metales, ya sea mediante aleaciones recicladas, tratamientos térmicos de bajo consumo o procesos de hidrometalurgia limpia, se vuelve una prioridad estratégica. Investigaciones recientes muestran que las aleaciones de aluminio, magnesio y titanio reciclado presentan una alta relación resistencia-peso y un bajo impacto ambiental cuando se emplean métodos de fusión basados en energía renovable o hidrógeno verde. Asimismo, la integración de modelos de simulación y *machine learning* permite predecir propiedades mecánicas y reducir desperdicios en el diseño de nuevas composiciones metálicas (Zuo et al., 2024).

De manera complementaria, los materiales híbridos, es decir, aquellos que combinan matrices poliméricas con refuerzos como los metálicos o los cerámicos sostenibles, están emergiendo como soluciones multifuncionales para aplicaciones estructurales, electrónicas y biomédicas. Estos materiales permiten integrar propiedades sinérgicas, como alta resistencia, conductividad térmica controlada y capacidad de biodegradación parcial. En el campo biomédico, por ejemplo, se están desarrollando biocompuestos de PLA con nanopartículas metálicas provenientes de fuentes recicladas, con la finalidad de mejorar la bioactividad y sus propiedades, pero sin comprometer la biocompatibilidad. Este tipo de materiales podría sustituir implantes convencionales con alternativas específicas de acuerdo con las necesidades del usuario, y que además sean biodegradables y de bajo impacto ambiental (Buj-Corral et al., 2022).

Otra tendencia importante es el uso de herramientas digitales en el desarrollo de materiales verdes, por ejemplo, la combinación de inteligencia artificial o simulaciones multiescala está siendo utilizada para la predicción de propiedades y el diseño sostenible de materiales, además de que pueden reducir costos y tiempos de experimentación, permitiendo optimizar simultáneamente desempeño, reciclabilidad e impacto ambiental. En el contexto de la sostenibilidad, la IA también puede evaluar

la degradación de biopolímeros, así como el desgaste de aleaciones recicladas en diferentes aplicaciones, y generar modelos predictivos de comportamiento de acuerdo con esa aplicación (Agrawal et al., 2023).

## **La ingeniería de materiales y la economía circular**

La ingeniería en materiales es un factor clave de la economía circular, pero requiere de trabajo para lograrlo. Actualmente, la economía circular requiere de un modelo en el que los materiales deben diseñarse desde su origen para ser reutilizables o reciclables, lo que ayudaría a minimizar los desperdicios y, por ende, el daño al ecosistema al considerarse sistema donde el flujo de materiales tenga un ciclo cerrado. Estudios recientes demuestran que la innovación en materiales, sobre todo en el ámbito de los materiales reciclables, es esencial para que la economía circular sea viable en diversos sectores como el embalaje de alimentos o la biomedicina (Dumée, 2022).

Otro aspecto fundamental de la ingeniería en materiales y su interacción y transición hacia la economía circular es la vinculación entre la investigación y ciencia básica con el desarrollo tecnológico, y en específico, la industria; por ello, se deben desarrollar metodologías que integren el análisis del “tiempo de vida útil” de los materiales y la evaluación de su impacto ambiental. Esto permitiría cuantificar la circularidad de un material, desde su diseño y su proceso, así como comparar escenarios de producción, identificando factores clave y áreas de oportunidad, lo que permitiría mejorar la toma de decisiones en sus aplicaciones, promoviendo políticas de eficiencia y economía en beneficio de la sociedad y del ecosistema.

Adicionalmente, la integración de aspectos educativos, éticos y gubernamentales en el proceso ingenieril también es fundamental para lograr la transición de la ingeniería en materiales hacia una economía circular. Desde el punto de vista educativo para la sostenibilidad, la formación de profesionistas capaces de evaluar el impacto ambiental y social de sus diseños resulta fundamental. Autores han evidenciado que los programas académicos que incorporan proyectos de innovación verde y de aprendizaje-servicio logran incrementar significativamente la concientización del alum-

nado hacia el ecosistema y la adopción de prácticas sostenibles entre estudiantes de ingeniería (El Gamal et al., 2024).

Finalmente, la transición hacia una economía circular sostenible también depende de colaboraciones interdisciplinarias entre ingeniería, ciencias sociales y políticas públicas, por lo que las alianzas entre sectores industriales, académicos y comunitarios permiten diseñar materiales y procesos que no solo sean ambientalmente eficientes, sino también socialmente justos y responsables. Este enfoque colaborativo, que bien puede fundamentarse principalmente en la innovación tecnológica verde, refuerza la necesidad de que la ingeniería contemporánea opere con transparencia, equidad y responsabilidad ética, siendo estos pilares fundamentales para consolidar una economía verdaderamente regenerativa.

## **Biopolímeros a partir de residuos agroindustriales**

El aprovechamiento de residuos agroindustriales se ha convertido en una estrategia importante en la economía circular y la bioeconomía, ya que permite la transformación de subproductos orgánicos de bajo valor en materiales poliméricos funcionales. Este enfoque reduce la dependencia de polímeros sintéticos derivados del petróleo y disminuye las emisiones asociadas a su producción. En particular, residuos como cáscaras, bagazo, semillas de frutas y hortalizas, entre otros residuos del procesamiento agroalimentario, se han reportado como ricos en almidón, celulosa, lignina y proteínas, lo que representa una fuente renovable para la obtención de biopolímeros con aplicaciones en diversas industrias como las de embalaje de alimentos y la biomédica (Panda et al., 2024).

La valorización de estos residuos también contribuye al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), por ejemplo, los ODS 12 y 13, mediante la gestión responsable de los recursos y la disminución de la contaminación causada por los residuos derivados del petróleo. Sin embargo, la heterogeneidad de los residuos agrícolas requiere métodos de aislamiento y modificación, así como su optimización, para preservar la integridad estructural de los polímeros naturales y mejorar su procesamiento industrial, permitiéndoles competir con los polímeros sintéticos en diversas aplicaciones.

## Procesos de recuperación de biopolímeros a partir de residuos agroindustriales

Los biopolímeros derivados de residuos agroindustriales como almidones, celulosas o proteínas poseen propiedades mecánicas y térmicas que pueden optimizarse mediante mezclas, aditivos o el uso de refuerzo. La modificación física o química de matrices como el almidón termoplástico (TPS) o la celulosa microcristalina mejora su compatibilidad con otros polímeros biodegradables y permite ajustar sus tiempos de degradación.

La recuperación de biopolímeros a partir de residuos agroindustriales, tales como cáscaras, semillas, entre otros, se realiza típicamente mediante métodos como molienda húmeda y separación por centrifugación, seguido de lavados, decantación y secado; variantes incluyen extracción con soluciones ácidas o reductoras para mejorar el rendimiento y eliminar pigmentos y polisacáridos solubles. Otros procesos incorporan pasos enzimáticos, por ejemplo, con amilasas, para mejorar el rendimiento y reducir el uso de químicos, así como técnicas de optimización para mejorar propiedades como granulometría y cristalinidad. Estos parámetros son importantes para formulaciones que pudieran incluir el uso de plastificantes, compatibilizantes o refuerzos como celulosa o arcillas, con la finalidad de mejorar las propiedades del biocompuesto sin perder biodegradabilidad (Pech-Cohuo et al., 2024).

Otros biopolímeros que pueden ser extraídos de residuos agroindustriales incluyen la celulosa, que puede ser obtenida de paja, bagazo, cáscaras, entre otros. Este proceso comienza con un pretratamiento para eliminar hemicelulosa y lignina, entre estos métodos destacan los convencionales, que incluyen tratamientos alcalinos o ácidos y delignificación; sin embargo, las tendencias “verdes” favorecen el uso de solventes orgánicos, tratamientos con peróxido en condiciones suaves y procesos enzimáticos que reducen la carga química y mejoran la obtención de celulosa, mejorando su pureza y cristalinidad, y por ende, sus propiedades para aplicaciones en biocompuestos orientados al embalaje de alimentos o el ámbito biomédico.

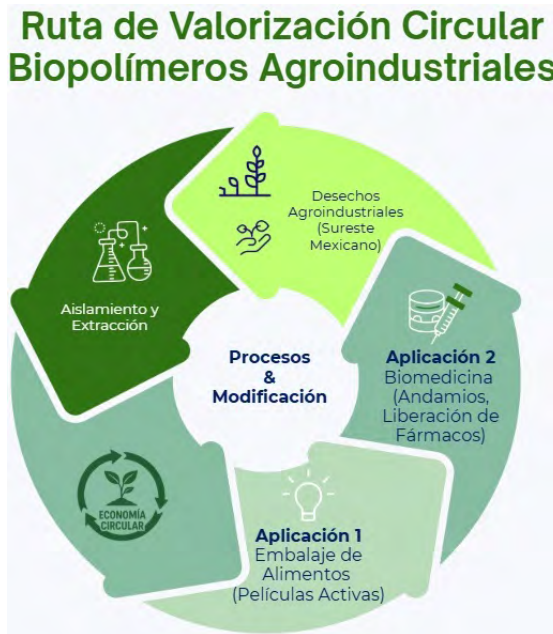
Otro biopolímero importante que puede obtenerse a partir de residuos agroindustriales es el ácido poliláctico (PLA). La ruta típica para la

obtención de este biopolímero a partir de residuos agroindustriales requiere diferentes etapas, como la hidrólisis o sacarificación de biomasa lignocelulósica, para obtener azúcares fermentables; posteriormente se fermenta en presencia de *Lactobacillus spp.* u otros para producir ácido láctico, el cual se purifica y se polimeriza ya sea por condensación o por síntesis por apertura de anillo del lacturo para obtener el PLA, que puede ser utilizado en diversas aplicaciones. Otros biopolímeros con múltiples aplicaciones son los polihidroxialcanoatos (PHA), que pueden producirse directamente por fermentación microbiana usando azúcares o ácidos volátiles procedentes de residuos provenientes de frutas, jugos, suero, entre otros, y que a partir de ellos pueden procesarse biocompuestos con propiedades mecánicas útiles y alta biodegradabilidad en ambientes naturales o industriales.

Es importante enfatizar que la selección del proceso depende del tipo de residuo, escalado y objetivo final, ya sea para la obtención de biopelículas, fibras, o andamios para biomedicina, o bien, para la industria del embalaje de alimentos. Así mismo, la integración de etapas “verdes”, así como la incorporación de análisis del “tiempo de vida” desde el diseño, aseguran que la recuperación de biopolímeros no solo sea técnicamente viable sino ambientalmente superior a rutas convencionales. En la figura 6.2 se puede observar un esquema de la ruta de valorización en economía circular de residuos agroindustriales para la obtención de biopolímeros para posibles aplicaciones en embalaje de alimentos y biomedicina.

Varios autores han reportado trabajos en los que se utilizan diversos residuos agroindustriales de frutas endémicas del sureste mexicano para aplicaciones de embalaje, lo cual demuestra la viabilidad de estos desperdicios, fomentando la economía circular y cuidado del ecosistema. Asimismo, la adición de refuerzos, como nanoarcillas, permite obtener biocompuestos con mayor estabilidad térmica y resistencia mecánica, sin comprometer la biodegradabilidad. Estas estrategias son congruentes con las tendencias actuales en ingeniería verde de materiales, donde la sostenibilidad se combina con la eficiencia funcional (Pech-Cohuo et al., 2024).

Figura 6.2. Esquema de la ruta de valorización en economía circular de residuos agroindustriales para la obtención de biopolímeros para sus posibles aplicaciones en embalaje de alimentos y biomedicina



Fuente: elaboración propia, 2025.

## Aplicaciones de biopolímeros obtenidos de residuos agroindustriales

La innovación tecnológica para el desarrollo de biocompuestos a partir de fuentes no convencionales de residuos agroindustriales puede basarse en el diseño de materiales de alto desempeño mediante técnicas de bajo impacto ambiental, su procesamiento o la adición de refuerzos naturales. En este contexto, las diversas investigaciones sobre la incorporación de arcillas en mezclas de almidón termoplástico (TPS) han demostrado que la adición de este tipo de refuerzos de origen natural y mineral mejoran las propiedades mecánicas, térmicas y de barrera, potenciando su aplicación en embalajes de alimentos sostenibles (Pech-Cohuo et al., 2024). De igual modo, se ha demostrado que la selección del método de aislamiento del almidón influye significativamente en su desempeño como

biopolímero, modificando sus propiedades y, por ende, la aplicación destinada, como es el caso del embalaje de alimentos (Dzul-Cervantes et al., 2024), lo que demuestra la viabilidad de integrar estos residuos locales en el desarrollo de biopolímeros, contribuyendo a la soberanía científica en el sureste mexicano, con potenciales aplicaciones en el área de embalaje alimentario.

En el ámbito biomédico, los biopolímeros derivados de residuos agroindustriales presentan un enorme potencial de aplicación. Su biocompatibilidad, biodegradabilidad y capacidad de funcionalización los hacen idóneos para aplicaciones como matrices para liberación controlada de fármacos, andamios para ingeniería de tejidos o cementos óseos modificados. Los avances recientes en biotecnología, ingeniería de materiales y química verde han permitido el aprovechamiento de biomasa residual como fuente de compuestos bioactivos y biopolímeros estructurales. Dentro de este grupo se encuentran la celulosa, la quitina, el colágeno, el ácido poliláctico (PLA) y los polihidroxicanoatos (PHA), todos ellos con propiedades funcionales que los hacen idóneos para aplicaciones industriales y médicas (Vinayak et al., 2022), así como la mejora en la bioactividad y la regeneración tisular, favoreciendo la integración entre materiales sintéticos y naturales (Govindarasu et al., 2025).

## Estudios y casos realizados

Las investigaciones sobre biopolímeros derivados de residuos agroindustriales se alinean con los principios de innovación tecnológica verde y economía circular, impulsando el desarrollo de materiales más seguros, reciclables y con impacto social. En el sureste mexicano, investigadores han trabajado con residuos de frutas tropicales y locales para generar biopolímeros con propiedades destinadas a diversas aplicaciones de ingeniería, contribuyendo al fortalecimiento del conocimiento científico regional. Entre las aportaciones más relevantes se encuentra la obtención y caracterización de biopolímeros de almidón, donde se concluyó que sus propiedades pueden optimizarse, en particular, los estudios sobre *Melicoccus bijugatus* Jacq. han demostrado que el método de aislamiento influye di-

rectamente en la cristalinidad, la resistencia mecánica y la estabilidad térmica del almidón termoplástico, consolidando su potencial para aplicaciones en empaques biodegradables (Dzul-Cervantes et al., 2024).

Asimismo, se han desarrollado biocompuestos con refuerzos naturales mejorando el desempeño del material sin comprometer su biodegradabilidad, en este sentido la incorporación de arcillas de la región en matrices de almidón termoplástico, donde la dispersión controlada del relleno incrementa la resistencia mecánica y la estabilidad térmica del material. Este enfoque resalta el uso de nanorrefuerzos, herramienta de ingeniería verde (Pech-Cohuo et al., 2024). Otros estudios mostraron que la celulosa obtenida a partir de residuos de plantas del sureste mexicano mejoraron las propiedades de almidones termoplásticos para diversas aplicaciones industriales (Pérez-Pacheco et al., 2024).

Por otro lado, los trabajos orientados a la biomedicina han revelado nuevas fronteras de aplicación para los biopolímeros. En este ámbito, la búsqueda global se centra en fuentes renovables de celulosa, quitina, colágeno y PLA para producir andamios y materiales funcionales en regeneración ósea y liberación controlada de fármacos. Investigaciones recientes recopilan estos avances, destacando las posibilidades de materiales biobasados utilizando lignina aislada de biomasa con fines biomédicos (George et al., 2024). Otras contribuciones demuestran el potencial de la nanocelulosa funcionalizada para aplicaciones en implantes y curación de heridas (Machado et al., 2024), así como el desarrollo de biopolímeros híbridos y composites poliméricos para dispositivos médicos y matrices osteoconductoras (Lalarukh et al., 2024).

Estos estudios a nivel mundial consolidan la visión de que los residuos agroindustriales constituyen una fuente estratégica para la ingeniería de materiales avanzados, integrando sostenibilidad, innovación tecnológica y responsabilidad ambiental; su aprovechamiento no solo reduce el daño al ecosistema, también estimula la creación de conocimiento inter y transdisciplinario, así como prácticas educativas orientadas al desarrollo sostenible, en este sentido, estos esfuerzos representan un modelo de convergencia entre ciencia e ingeniería de materiales, educación y compromiso ético con el ecosistema, reafirmando que la ingeniería verde es un factor clave para la transformación hacia una sociedad más resiliente y equitativa.

## Los sistemas metálicos para la innovación sostenible

La industria de los metales consume altas cantidades de energía y recursos no renovables, por lo que es indispensable rediseñar estos materiales orientados hacia una economía circular. En este contexto, el uso de materias primas recicladas, la optimización del uso de chatarra como materia prima secundaria y el desarrollo de aleaciones “verdes”, por ejemplo, deben ser formulados para cerrar su “ciclo de vida” y minimizar el daño al ecosistema. Un estudio reciente mostró que el uso de desechos metálicos (chatarra) en aleaciones de aluminio permite mantener sus propiedades mecánicas cuando se optimiza su procesamiento, incluso utilizando contenidos de chatarra de hasta el 80% (Korban et al., 2025). Además, la ciencia de los materiales indica que diseñar aleaciones en cuya composición se incluyan materiales chatarra, o que incluyan materiales reciclables, abre un gran potencial para la descarbonización del sector (Müller et al., 2025).

### Modelado y simulación computacional para optimizar propiedades y procesos en sistemas metálicos

La optimización de procesos metalúrgicos, incluyendo fundición, solidificación, tratamiento térmico y remanufactura, se ha beneficiado considerablemente del uso del modelado y la simulación computacional. Herramientas como la simulación del flujo de fundición, la predicción de la nucleación y el crecimiento de la microestructura, el análisis de la transferencia de calor y las simulaciones acopladas permiten anticipar defectos, optimizar las geometrías de los moldes, controlar las segregaciones y reducir el desperdicio de energía. Por ejemplo, estudios indican que los procesos de simulación pueden utilizarse para optimizar variables que mejoran la homogeneidad de las aleaciones (Raabe, 2023). El uso de modelos digitales también permite la evaluación de sistemas de producción virtuales, mejorando el ciclo de diseño y permitiendo una mayor agilidad en el desarrollo de materiales para optimizar el proceso de fabricación y

su aplicación (Li et al., 2024), permitiendo ampliar los procesos de aleaciones recicladas o remanufacturadas, donde los tiempos de prueba y los recursos pueden limitar su adopción industrial.

### **Estudios y desarrollos recientes en sistemas metálicos sostenibles**

En la literatura científica, se destacan estudios que combinan el uso de residuos de metales “chatarra” con diversos tratamientos para obtener aleaciones con propiedades similares a lo que no incluyen materiales reciclados. Por ejemplo, se ha documentado la incorporación de aluminio de alto desempeño, en donde los autores demostraron que utilizando porcentajes elevados, incluso de un 80% de “chatarra”, lograron reducir porosidad y mantener resistencia mecánica, en general, obteniendo propiedades adecuadas para aleaciones similares (Korban et al., 2025).

Otros autores abordan la imperante necesidad de integrar la sostenibilidad en la gestión de recursos minerales en el contexto del abastecimiento de metales necesarios para la generación de energía. Estos investigadores plantean que, ante la creciente demanda de metales críticos y la limitada disponibilidad de fuentes de obtención, es necesario rediseñar su proceso, desde la extracción hasta su reciclaje y reinserción en la cadena productiva para eficientizar su uso y reducir impactos ambientales y sociales. Así mismo, estos autores demuestran que los procesos para la obtención de metales se basan en modelos lineales que afectan al ecosistema y zonas subrepresentadas, por lo que es necesario promover una transición hacia un modelo circular en el que la extracción de metales, la recuperación secundaria y la optimización del uso sean conceptos fundamentales (Zhou, 2023).

En otra investigación, los autores trabajaron en la recuperación de metales a partir de catalizadores automotrices, residuos de circuitos impresos o baterías; estos autores examinaron diversos procesos de recuperación, evaluando su sostenibilidad, selectividad, rendimiento y compatibilidad ambiental. Los investigadores también enfatizaron que estas tecnologías ofrecen una vía complementaria y/o alternativa a la minería convencional, reduciendo la necesidad de extracción primaria e integrando los principios de economía circular. Asimismo, señalaron áreas de oportunidad como la minimización de residuos, el

uso de solventes “verdes”, la optimización de la recuperación de elementos valiosos en mezclas multimetálicas y la revalorización de subproductos. Los autores concluyeron que una perspectiva crítica sobre cómo el reciclaje avanzado de metales nobles debe ser concebido como parte esencial de una ingeniería metálica sostenible de alto valor (Zupanc et al., 2023).

## **Desafíos en el reciclaje de metales**

A pesar de la necesidad de generar materiales a partir de desperdicios, y fomentar la economía circular de los materiales metálicos, existen muchos desafíos por superar para alcanzar las propiedades óptimas, dependiendo de la aplicación de cada sistema. Una de las principales limitaciones del reciclaje metálico es la heterogeneidad y contaminación de los residuos, lo que imposibilita su reincorporación directa al ciclo productivo sin costosos tratamientos. Las aleaciones y los residuos contienen mezclas de metales, recubrimientos y polímeros que demandan separación física y química; además, las impurezas disminuyen las propiedades mecánicas y, por lo tanto, requieren procesos de separación energéticamente intensivos o pasos de purificación adicionales. A ello se puede agregar la dependencia geográfica y logística de flujos de residuos, mercados globales y fallas en la recolección selectiva, limitando la disponibilidad de corrientes limpias e incremento de costos (Raabe, 2023).

Aunado a lo anterior, a nivel técnico existen retos operativos y de proceso que limitan la eficiencia y la sostenibilidad de los procesos de recuperación. La separación selectiva y la recuperación de metales críticos en matrices mixtas continúa siendo un punto crítico, debido a que los métodos actuales necesitan solventes o reactivos que afectan la sostenibilidad del proceso. Además, la falta de tecnología e infraestructuras integradas impiden escalar soluciones prometedoras. Una investigación reciente propone un sistema híbrido como membranas selectivas o una disolución controlada, por ejemplo, para mejorar la selectividad, pero su adopción industrial requiere validación tecnológica y económica. En conjunto, estos retos técnicos y de infraestructura exigen innovación simultánea en química verde, ingeniería de procesos y políticas públicas. Finalmente, la economía del

reciclaje condiciona la viabilidad técnica de muchas rutas de reciclado, especialmente para metales críticos, donde el balance costo-beneficio es frágil. Estas situaciones demuestran que el desafío no es solo de carácter tecnológico, sino también sistémico, exigiendo rediseños para reciclabilidad, trazabilidad de materiales y políticas de costos ambientales (Zante et al., 2024).

## **Aspectos éticos y educativos**

La sostenibilidad en la ingeniería de materiales no puede comprenderse únicamente desde la eficiencia técnica o el desempeño funcional de los productos, también es indispensable integrar un proceso en el que se involucren valores éticos, educativos y sociales. En este sentido, los aspectos éticos y formativos desempeñan un papel fundamental en la configuración de una innovación tecnológica verde responsable y que permita anticipar sus impactos ambientales y humanos. Así mismo, el fortalecimiento de la educación en ingeniería de materiales con enfoques éticos, de derechos humanos y justicia ambiental permitiría orientar las investigaciones con equidad e inclusión. Este apartado ofrece una visión de cómo la ética aplicada, la educación para la sostenibilidad y la responsabilidad social constituyen aspectos clave para el diseño, desarrollo y adopción de materiales sostenibles, promoviendo un vínculo directo entre conocimiento científico, conciencia social y compromiso ambiental.

## **Fundamentos éticos y sociales de la innovación tecnológica verde**

La innovación tecnológica verde requiere ser entendida como un proceso técnico y social que necesita incorporar valores y derechos humanos desde las etapas iniciales del diseño hasta la aplicación y recuperación de los materiales. Esto implica mover la reflexión ética más allá de la responsabilidad profesional individual hacia prácticas de innovación e investigación responsables que habilitan la consideración explícita de impactos distributivos, riesgos y beneficios sociales. En este sentido, es indispensable formar ingenieros e ingenieras capaces de anticipar consecuencias socioambientales y puedan articular respuestas con actores afectados, esto como un requisito para evitar que soluciones

“verdes” reproduzcan desigualdades, por ejemplo, en comunidades extractivas o tecnológicas. De este modo, la ética aplicada a la ingeniería de materiales se vuelve práctica al incorporar una evaluación temprana del ciclo de vida de los materiales, criterios de trazabilidad, participación de comunidades y mecanismos de rendición que aseguren que la innovación contribuya a la justicia ambiental y al bienestar social (van Grunsven et al., 2024).

### **Derechos humanos, justicia ambiental y perspectiva de género en la ingeniería**

Incorporar una perspectiva de derechos humanos y justicia ambiental en la práctica ingenieril significa reconocer que las tecnologías materiales afectan de manera diferenciada a grupos sociales y que el género, la pobreza y la marginalidad mediatizan la vulnerabilidad ante impactos ambientales. Diversos autores en temas sobre género y sostenibilidad muestran que las políticas y tecnologías “neutras” reproducen desigualdades si no integran análisis de género y medidas proactivas, por ejemplo, el acceso equitativo a recursos energéticos o la participación en decisiones sobre implementación tecnológica. En ingeniería de materiales, esto traduce la necesidad de marcos de evaluación que incluyan indicadores de equidad y mecanismos participativos que permitan a comunidades y poblaciones subrepresentadas expresar requerimientos y objeciones, por ejemplo, en decisiones sobre plantas de reciclaje, biorrefinerías o diversas procesadoras. La consideración de derechos humanos en la fase de diseño y en las cadenas de suministro es indispensable para que la sostenibilidad y sustentabilidad no sea solo un atributo técnico, sino un compromiso social verificable (Widegren y Sand, 2021).

### **Inclusión y participación en la educación para la sostenibilidad**

La educación para la sostenibilidad debe concebirse como una práctica inclusiva que promueva la participación efectiva de comunidades, estudiantes y actores productivos en procesos formativos y proyectos de innovación. Algunas evidencias en educación ingenieril señalan que las metodologías

activas como el aprendizaje-servicio, proyectos comunitarios o laboratorios de innovación social, aumentan la comprensión crítica y la adopción responsable de tecnologías verdes. A pesar de que los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU y la UNESCO han destacado el papel esencial que debe alcanzar la ingeniería para los modelos sostenibles de desarrollo, es importante examinar el diseño, los rasgos y la esencia de las propuestas enfocadas en la sustentabilidad dentro del ámbito educativo en ingeniería. La inclusión, en este contexto, no se limita a la diversidad en el aula, sino a la integración de saberes locales, conocimientos indígenas y diversas perspectivas en el diseño curricular y en la evaluación de tecnologías. La creación de proyectos con actores locales favorece soluciones contextualizadas y mejora la legitimidad social de los productos y procesos desarrollados en el ámbito ingenieril. Además, la incorporación de indicadores de equidad, derechos y participación en la evaluación académica fomenta la formación de profesionales con competencias transversales para la sostenibilidad (Gutiérrez-Bucheli et al., 2022).

### **Estrategias pedagógicas para fomentar responsabilidad social y ambiental en la formación de ingenieros**

Para desarrollar competencias ético-ambientales en el alumnado que cursa programas educativos en el ámbito ingenieril, es necesario diversificar los métodos pedagógicos a través de diferentes direcciones, como (1) enfoques basados en proyectos reales, (2) escenarios de anticipación y responsabilidad, (3) aprendizaje interdisciplinario que reúna ingeniería, ciencias sociales y humanidades, y (4) evaluación que mida impacto social, inclusión y sostenibilidad del producto o proceso. Algunos estudios de caso en universidades europeas y anglosajonas muestran que cursos que combinan diseño de producto con evaluación de ciclo de vida, derecho ambiental y trabajo con comunidades aumentan la capacidad crítica y la acción responsable del alumnado. Es recomendable además institucionalizar espacios de formación docente sobre pedagogías críticas y crear métricas institucionales que midan no solo publicaciones científicas sino también impacto social y transferencia con comunidades. Estas estrategias pedagógicas contribuyen a formar

ingenieros con habilidades técnicas y éticas para operar en contextos de complejidad socioambiental (Ramachandran et al., 2024).

En el sureste mexicano, el Tecnológico Nacional de México campus Calkiní (Itescam), ubicado en el estado de Campeche, es una institución de educación superior que está comprometida con el cuidado al medio ambiente, la sostenibilidad y sustentabilidad del ecosistema, así como la formación integral del alumnado, por ello, en esa institución se han desarrollado diversas prácticas en donde el alumnado se preocupe por el cuidado de la infraestructura y el mobiliario escolar. Por ejemplo, dentro de las prácticas de la asignatura Corrosión y Degradación, perteneciente al plan de estudios del Programa Educativo de Ingeniería en Materiales del Itescam, el alumnado, liderado por el docente Dzul-Cervantes, participó en la restauración de estructuras metálicas que serán utilizadas para la divulgación de temas institucionales dentro del Itescam (figura 6.3) (Tecnm / Calkiní / Itescam, 2025).

Figura 6.3. Restauración de estructuras metálicas utilizadas en temas de divulgación en el Itescam



Fuente: elaboración propia.

En otra actividad, el alumnado, bajo la guía del docente Dzul-Cervantes, y dentro de las prácticas de la asignatura Corrosión y Degradación y Soldadura para Mantenimiento, pertenecientes al plan de estudios del Programa Educativo de Ingeniería en Materiales del Itescam (figura 6.4), llevó a cabo un proyecto de restauración de sillas escolares que habían

sido descartadas por su uso prolongado. Con esta actividad, el alumnado analiza que este esfuerzo no solo representa una acción concreta de reciclaje y economía circular, sino también una oportunidad educativa donde se aplican conocimientos reales sobre materiales, resistencia y procesos sustentables, todo desde una perspectiva de ingeniería con responsabilidad social (Calkiní, 2025).

Figura 6.4. Restauración de mobiliario escolar en desuso en el Itescam



Fuente: elaboración propia.

Estas acciones reflejan que, a nivel global, la educación en ingeniería y ciencias está evolucionando hacia un modelo orientado a la sostenibilidad, en el que la formación técnica se vincula con la responsabilidad ambiental y el compromiso social. Con este enfoque se impulsa la adopción de prácticas que favorecen el equilibrio ecológico al promover la innovación con sentido ético y fomentar en las nuevas generaciones una conciencia crítica sobre el impacto de la actividad humana en el entorno. Con estos aspectos, la educación continúa su transmisión de conocimientos científicos y tecnológicos, integrando valores y desarrollando competencias que permiten formar profesionistas capaces de contribuir al desarrollo sostenible y a la construcción de un futuro más equitativo y justo para la humanidad.

## Conclusiones y perspectivas

En este capítulo se ha mostrado una visión en la que la integración e interacción entre ciencia e ingeniería de materiales, sostenibilidad, innovación tecnológica y educación constituyen factores fundamentales para la transición

hacia una vinculación científica y tecnológica responsable y ambientalmente consciente y responsable. También se ha mostrado una perspectiva en la que la ingeniería verde debe entenderse como un proceso que optimiza el ciclo de vida de los materiales, desde la obtención de recursos hasta su reintegración en nuevas cadenas productivas. En este sentido, la ingeniería de materiales aparece como eje principal en la transición hacia modelos productivos sostenibles, por lo que no solo se deben desarrollar materiales que generen menor impacto al ecosistema, sino que también es necesario rediseñar integralmente su ciclo de vida.

Los biopolímeros derivados de residuos agroindustriales y los sistemas metálicos reciclados muestran viabilidad técnica y aportan rutas concretas a la circularidad, mientras que las herramientas digitales aceleran el diseño eficiente y la validación de procesos. Sin embargo, en este tránsito, es crucial que debe estar mediado por marcos éticos y educativos que garanticen equidad, inclusión y justicia ambiental. Así mismo, es indispensable la formación inter y transdisciplinaria que incorpore derechos humanos, perspectiva de género y participación comunitaria, para que las soluciones técnicas sean socialmente legítimas y no reproduzcan desigualdades. Además, las políticas gubernamentales responsables exigen trazabilidad, evaluación de impactos distributivos y mecanismos de rendición que vinculen ciencia, industria y comunidades.

De manera general, hacia el futuro, se pueden plantear tres prioridades: (1) integrar el análisis de ciclo de vida en todo desarrollo tecnológico, (2) fortalecer plataformas interdisciplinarias que conecten bioprocesos y metalurgia verde, y (3) formar profesionistas con competencias sostenibles. En este sentido, la ingeniería y la ciencia de materiales podría consolidarse como una herramienta humanizada, circular y resiliente, orientada al bienestar social y al equilibrio ecológico global.

## Referencias

- Agrawal, R., Majumdar, A., Kumar, A. y Luthra, S. (2023). Integration of artificial intelligence in sustainable manufacturing: current status and future opportunities. *Operations Management Research*, 16(4), 1720-1741.

- Buj-Corral, I., Sanz-Fraile, H., Ulldemolins, A., Tejo-Otero, A., Domínguez-Fernández, A., Almendros, I. y Otero, J. (2022). Characterization of 3D printed metal-PLA composite scaffolds for biomedical applications. *Polymers*, 14(13), 2754.
- Calkiní, T. N. d. M. c. (2025). Restauración de Sillas Escolares. Consultado el 7 de noviembre en <https://www.facebook.com/share/p/1Bd7pf4uS4/>
- Dumée, L. F. (2022). Circular materials and circular design—review on challenges towards sustainable manufacturing and recycling. *Circular economy and sustainability*, 2(1), 9-23.
- Dutta, D. y Sit, N. (2024). A comprehensive review on types and properties of biopolymers as sustainable bio-based alternatives for packaging. *Food Biomacromolecules*, 1(2), 58-87.
- Dzul-Cervantes, M., Canto-Rosado, J., Pérez-Pacheco, E., Ríos-Soberanis, C., Canto-Pinto, J., Estrada-León, R., Chim-Chi, Y., Moo-Huchin, V., Ortiz-Fernández, A. y Pérez-Padilla, Y. (2024). Effects of different isolation methods on TPS of *Melicoccus bijugatus* Jacq.: physicochemical and mechanical properties. *Polymer Bulletin*, 81(13), 12045-12063.
- El Gamal, G. A., Gomaa, A. M. y Daowd, M. (2024). Circular Economy in Engineering Education: Enhancing Quality through Project-Based Learning and Assessment. *Advanced Sciences and Technology Journal*, 1(2), 1-17.
- George, N., Adlakha, A., Mridula, Gupta, P. y Debroy, A. (2024). Biomedical Applications of Lignin Derived from Bio-Waste Materials. *Biopolymers for Biomedical Applications*, 333-372.
- Getachew, E. M., Taffese, W. Z., Espinosa-Leal, L. y Yehualaw, M. D. (2025). Machine learning applications in sustainable construction materials: A scientometrics review of global trends, themes, and future directions. *Sustainability*, 17(18), 8453.
- Govindarasu, M., Palanisamy, S., George Joy, J., Sharma, G., You, S. y Kim, J.-C. (2025). Advances of nanocellulose and cellulose-based derivatives for biomedical applications. *Cellulose*, 1-28.
- Gutierrez-Bucheli, L., Kidman, G. y Reid, A. (2022). Sustainability in engineering education: A review of learning outcomes. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129734.
- Instituto Tecnológico Superior de Calkinó [Tecnm - Calkiní - Itescam]. (21 de mayo de 2025). Conocimiento que transforma: estudiantes restauran estructuras metálicas. Facebook. <https://www.facebook.com/share/p/1AEZV1i36t/>
- Jha, S., Akula, B., Enyioma, H., Novak, M., Amin, V. y Liang, H. (2024). Biodegradable biobased polymers: a review of the state of the art, challenges, and future directions. *Polymers*, 16(16), 2262.
- Kamarudin, S. H., Rayung, M., Abu, F., Ahmad, S. b., Fadil, F., Karim, A. A., Norizan, M. N., Sarifuddin, N., Mat Desa, M. S. Z. y Mohd Basri, M. S. (2022). A review on antimicrobial packaging from biodegradable polymer composites. *Polymers*, 14(1), 174.
- Korban, P., Wąsik, A. y Leszczyńska-Madej, B. (2025). Advancing Sustainability in Alloy Production: The Role of Recycled Materials and Barbotage in Enhancing EN AC-46000 Castings. *Sustainability*, 17(11), 4755.
- Lalarukh, Hussain, S. M., Ali, S., Zahoor, A. F., Azmat, H., Nazish, N., Alshehri, M. A., Riaz,

- D., Naeem, E. y Mahrukh. (2024). Innovation of advanced polymers from seafood waste: Applications of chitin and chitosan. *Polymers for Advanced Technologies*, 35(6), e6471.
- Li, S., Li, C. y Wang, F. (2024). Computational experiments of metal corrosion studies: A review. *Materials Today Chemistry*, 37, 101986.
- Machado, B., Costa, S. M., Costa, I., Fangueiro, R. y Ferreira, D. P. (2024). The potential of algae as a source of cellulose and its derivatives for biomedical applications. *Cellulose*, 31(6), 3353-3376.
- Müller, D., Groves, D. I., Santosh, M. y Yang, C.-X. (2025). Critical metals: Their applications with emphasis on the clean energy transition. *Geosystems and Geoenvironment*, 4(1), 100310.
- Olsson, D., Gericke, N. y Boeve-de Pauw, J. (2022). The effectiveness of education for sustainable development revisited—a longitudinal study on secondary students' action competence for sustainability. *Environmental Education Research*, 28(3), 405-429.
- Panda, J., Mishra, A. K., Mohanta, Y. K., Patowary, K., Rauta, P. R. y Mishra, B. (2024). Exploring biopolymer for food and pharmaceuticals application in the circular bioeconomy: An agro-food waste-to-wealth approach. *Waste and Biomass Valorization*, 15(10), 5607-5637.
- Pech-Cohuo, S. C., Dzul-Cervantes, M. A. d. A., Pérez-Pacheco, E., Rosado, J. A. C., Chim-Chi, Y. A., Ríos-Soberanis, C. R., Cuevas-Carballo, Z. B., Uc-Cayetano, E. G., Can-Herrera, L. A. y Ortíz-Fernández, A. (2024). Effect of clays incorporation on properties of thermoplastic starch/clay composite bio-based polymer blends. *Scientific Reports*, 14(1), 19669.
- Pérez-Pacheco, E., Ríos-Soberanis, C. R., Mina-Hernández, J. H. y Moo-Huchin, V. M. (2024). Use of cellulose fiber from Jipijapa (Carludovicapalmata) as fillers in corn starch-based biocomposite film. *Iranian Polymer Journal*, 33(2), 157-168.
- Raabe, D. (2023). The materials science behind sustainable metals and alloys. *Chemical reviews*, 123(5), 2436-2608.
- Ramachandran, V., Roach, K. y Tilley, E. (2024). *Integrating Responsible Innovation into Engineering Education: Insights from Scenario Leads at UCL's Integrated Engineering Programme*. SEFI 2024-52nd Annual Conference of the European Society for Engineering, Proceedings: Educating Responsible Engineers.
- Tebaldo, V., Gautier di Confingo, G., Duraccio, D. y Faga, M. G. (2024). Sustainable recovery of titanium alloy: From waste to feedstock for additive manufacturing. *Sustainability*, 16(1), 330.
- Van Grunsven, J., Stone, T. y Marin, L. (2024). Fostering responsible anticipation in engineering ethics education: how a multi-disciplinary enrichment of the responsible innovation framework can help. *European journal of engineering education*, 49(2), 283-298.
- Verma, S. K., Prasad, A. y Katiyar, V. (2024). State of art review on sustainable biodegradable polymers with a market overview for sustainability packaging. *Materials Today Sustainability*, 26, 100776.

- Vinayak, A., Sharma, S. y Singh, G. B. (2022). Biopolymers from industrial waste. En *Biopolymers: Recent updates, challenges and opportunities* (pp. 129-149). Springer.
- Widegren, K. y Sand, J. (2021). *Gender and sustainability: an international research review*.
- Zante, G., Elgar, C. E., Hartley, J. M., Mukherjee, R., Kettle, J., Horsfall, L. E., Walton, A., Harper, G. D. y Abbott, A. P. (2024). A toolbox for improved recycling of critical metals and materials in low-carbon technologies. *RSC Sustainability*, 2(2), 320-347.
- Zhou, L. (2023). Towards sustainability in mineral resources. *Ore Geology Reviews*, 160, 105600.
- Zuo, L., Wang, C., He, P., Song, H., & Liu, J. (2024). Recycling potential and development strategies of high-tech metals for low-carbon energy technologies. *Journal of Cleaner Production*, 450, 141665.
- Zupanc, A., Install, J., Jereb, M. y Repo, T. (2023). Sustainable and selective modern methods of noble metal recycling. *Angewandte Chemie International Edition*, 62(5), e202214453.