

INNOVACIÓN SOSTENIBLE Y ECONOMÍA CIRCULAR EN EL PROCESAMIENTO INDUSTRIAL DE ALIMENTOS: REVISIÓN INTEGRATIVA CON ÉNFASIS EN BOLIVIA

Sustainable innovation and circular economy in industrial food processing: an integrative review with emphasis on Bolivia

Carmen Rosa Del Castillo Gutiérrez¹

RESUMEN

El procesamiento industrial de alimentos enfrenta una doble presión: incrementar la disponibilidad y la inocuidad y, simultáneamente, reducir impactos ambientales, pérdidas y desperdicio de alimentos. En Bolivia, esta problemática se acentúa por restricciones logísticas, heterogeneidad tecnológica y marcos normativos orientados a la gestión integral de residuos y a los derechos de la Madre Tierra. Este artículo desarrolla una revisión integrativa con orientación crítico-reflexiva, basada en evidencia científica y técnica publicada principalmente entre 2014 y 2025. Se revisaron 728 registros iniciales, de los cuales 51 fuentes fueron incluidas en la síntesis final. El análisis se organizó en cuatro ejes: rutas de circularidad, tecnologías sostenibles de procesamiento, medición de impactos e implementación en el contexto boliviano. Se discuten estrategias de reducción, reutilización, reciclaje y recuperación, así como tecnologías emergentes como altas presiones hidrostáticas, campos eléctricos pulsados, plasma frío y separación por membranas. El análisis muestra que la circularidad no es automática: requiere evaluación mediante análisis de ciclo de vida, gobernanza, trazabilidad, inocuidad y viabilidad económica. Se propone una agenda aplicable a Bolivia basada en indicadores mínimos, proyectos piloto territoriales y articulación entre industria, municipios y academia.

Palabras clave: economía circular, sostenibilidad, agroindustria, procesamiento de alimentos, valorización de subproductos, Bolivia.

ABSTRACT

Industrial food processing faces a dual pressure: increasing availability and food safety while reducing environmental impacts, food losses, and waste. In Bolivia, this challenge is intensified by logistic constraints, technological heterogeneity, and policy frameworks focused on integrated waste management and the rights of Mother Earth. This article presents an integrative review with a critical-reflective orientation, based on scientific and technical evidence published mainly between 2014 and 2025. A total of 728 initial records were identified, and 51 sources were included in the final synthesis. The analysis was organized into four axes: circularity pathways, sustainable processing technologies, impact measurement, and implementation in the Bolivian context. Reduction, reuse, recycling, and recovery strategies are discussed, together with emerging technologies such as high-pressure processing, pulsed electric fields, cold plasma, and membrane separations. The analysis shows that circularity is not automatic; it requires life-cycle assessment, governance, traceability, food safety, and economic feasibility. A Bolivia-oriented agenda is proposed, based on minimum indicators, territorial pilot projects, and coordination among industry, municipalities, and academia.

Keywords: circular economy, sustainability, food processing, agroindustry, by-product valorization, Bolivia.

Artículo de revisión

DOI: <https://doi.org/10.53287/pgss4658kx51k>

Recibido: 13/05/2026

Aceptado: 21/06/2026

¹ Docente, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. <https://orcid.org/0000-0001-6062-3398>. crdel@umsa.bo

INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad en la industria alimentaria ha transitado de un atributo “deseable” hacia una condición de competitividad y de licencia social para operar. En términos globales, el desperdicio de alimentos en venta minorista y consumo alcanza magnitudes comprometedoras para las metas climáticas y de seguridad alimentaria (United Nations Environment Programme, 2024; Parfitt et al., 2010; Kummu et al., 2012). De forma complementaria, el indicador 12.3.1 de los ODS (Food Loss Index) refleja pérdidas a lo largo de la cadena antes del comercio minorista, subrayando que el problema no se reduce al hogar (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023). En Bolivia, la discusión se inserta además en un marco normativo que prioriza prevención, aprovechamiento y disposición final ambientalmente segura (Ley N° 755, 2015; Decreto Supremo N° 2954, 2016), y en principios de armonía con la Madre Tierra (Ley N° 071, 2010; Ley N° 300, 2012).

El enfoque de economía circular (EC) propone mantener productos y materiales en uso, diseñar para eliminar residuos y regenerar sistemas naturales. Sin embargo, su aplicación en alimentos presenta particularidades: a) la materia orgánica es biodegradable, pero su degradación implica pérdidas de valor sin captura ni uso; b) la inocuidad limita la reutilización y exige trazabilidad; y c) la “circularidad” puede entrar en tensión con el rol protector de envases y con la seguridad microbiológica. Por ello, la innovación sostenible requiere integrar tecnologías de proceso, gestión de residuos, rediseño de productos y medición de impactos mediante análisis de ciclo de vida (ACV) (International Organization for Standardization, 2006a, 2006b; Joint Research Centre, European Commission, 2010).

El objetivo de este artículo consiste en revisar críticamente la evidencia científica y técnica publicada entre 2014 y 2025 sobre innovación sostenible y economía circular aplicada al procesamiento industrial de alimentos. Se pone énfasis en la valorización de subproductos y en su pertinencia para el contexto boliviano.

En la agenda global, la meta 12.3 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propone reducir a la mitad el desperdicio de alimentos per cápita y disminuir pérdidas a lo largo de las cadenas, lo que exige medición consistente y comparabilidad (United Nations, 2015; FLW Protocol, 2016). En paralelo, marcos de política pública como el Nuevo Plan de Acción de Economía Circular de la Unión Europea, han impulsado estrategias de prevención de residuos y diseño de productos, incluyendo envases y sistemas alimentarios (European Commission, 2020). Los

informes de la FAO han sistematizado rutas y recomendaciones para reducir pérdidas y desperdicio, enfatizando la gobernanza, la infraestructura y los mercados (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019).

METODOLOGÍA

Se desarrolló una revisión integrativa con orientación crítico-reflexiva. Se incorporaron elementos del esquema PRISMA 2020 con fines de transparencia metodológica; sin embargo, la revisión no se plantea como una revisión sistemática estricta, sino como una síntesis narrativa estructurada de literatura científica, técnica y normativa relevante.

Fuentes de información y bases de datos

Para identificar la literatura internacional, regional y normativa, se consultaron bases de datos multidisciplinarias y portales académicos: Scopus, Web of Science, SciELO, Google Scholar, Dialnet, Redalyc y Latindex. La búsqueda se delimitó al periodo 2014-2025 y se actualizó hasta el cierre de la revisión. Se admitieron fuentes anteriores cuando tuvieron valor fundacional, normativo o metodológico, como normas ISO, lineamientos de ACV y documentos marco sobre pérdidas y desperdicio de alimentos.

Estrategia de búsqueda y operadores

Para las búsquedas se emplearon operadores booleanos (AND/OR) y truncamientos (*), adaptando términos a cada plataforma. Las ecuaciones combinaron términos en español e inglés, por ejemplo: ("economía circular" OR "circular economy") AND (agroindustria OR "food processing" OR "industrial food") AND (residu* OR subproducto* OR "food waste" OR by-product* OR valorization) AND (Bolivia OR "América Latina" OR "Latin America"). Para tecnologías se añadieron términos como: ("high pressure processing" OR HPP OR "pulsed electric field*" OR PEF OR "cold plasma" OR ultrasound OR membranes). La Tabla 1 reporta la estrategia de búsqueda, los criterios de selección y el volumen de fuentes revisadas. El cribado generó 140 textos completos potencialmente recuperables; de ellos, 12 no pudieron obtenerse debido a acceso restringido, enlaces no disponibles, información bibliográfica incompleta o ausencia del documento en repositorios abiertos. Por tanto, 128 textos completos fueron evaluados para la elegibilidad.

Tabla 1. Resumen de la estrategia de búsqueda, criterios de selección y volumen de fuentes revisadas.

Elemento	Descripción
Bases y portales consultados	Scopus, Web of Science, SciELO, Google Scholar, Dialnet, Redalyc y Latindex.
Estrategia de búsqueda	Combinación de términos en español e inglés relacionados con economía circular, procesamiento de alimentos, residuos/subproductos, valorización y tecnologías sostenibles; uso de operadores booleanos (AND/OR) y truncamientos (*); periodo principal 2014-2025; búsqueda actualizada hasta el cierre de la revisión.
Criterios de inclusión	Artículos revisados por pares, revisiones, libros académicos, reportes técnicos, normas y documentos institucionales vinculados con economía circular, sostenibilidad, valorización de subproductos, tecnologías de procesamiento, inocuidad o análisis de ciclo de vida (ACV). Se admitieron algunas fuentes previas por su valor normativo o fundacional.
Criterios de exclusión	Duplicados, documentos sin respaldo metodológico mínimo, notas de prensa sin sustento técnico, fuentes sin acceso a datos verificables y estudios sin relación directa con el procesamiento industrial de alimentos o la gestión de subproductos.
Número de fuentes revisadas	Registros identificados 728; duplicados eliminados 226; registros cribados 502; registros excluidos por título/resumen: 362; textos completos buscados para recuperación 140; textos completos no recuperados 12; textos completos evaluados 128; textos completos excluidos con razones 78; fuentes incluidas en la síntesis final 50. Los textos no recuperados correspondieron a acceso restringido, enlaces no disponibles, información bibliográfica incompleta o documentos no localizables en repositorios abiertos.

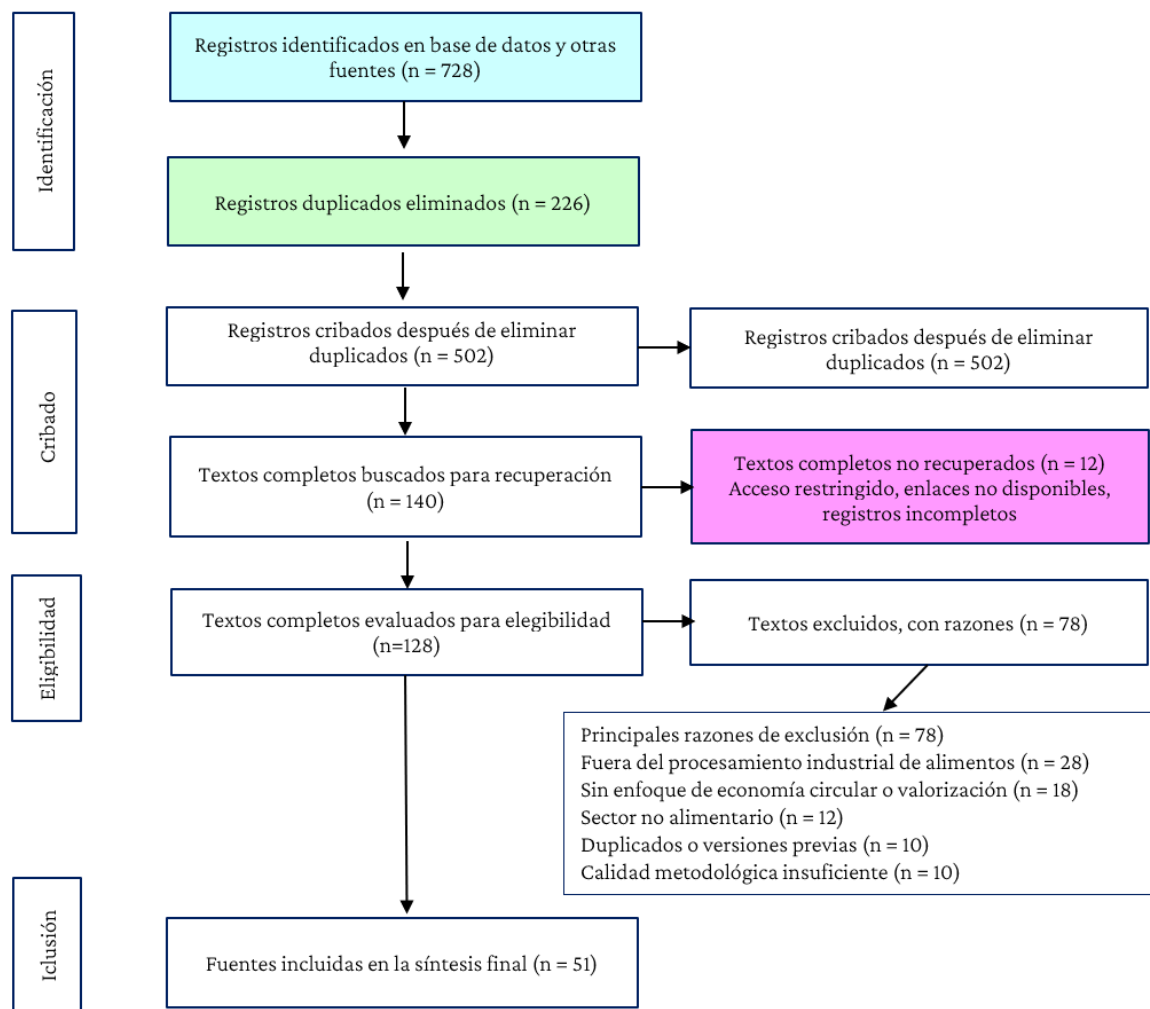


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA metodológico de la revisión. Adaptación propia basada en PRISMA 2020 para revisiones (Page et al., 2021). Los 12 textos completos no recuperados se justificaron por acceso restringido, enlaces no disponibles, información bibliográfica incompleta o ausencia del documento en repositorios abiertos.

Criterios de selección, extracción y síntesis

Los registros se organizaron en una matriz de extracción con los siguientes campos: autor/año, país o región, tipo de estudio, materia prima o residuo, tecnología o estrategia circular, resultados clave, limitaciones e implicancias para Bolivia. La síntesis se construyó por triangulación entre evidencia empírica, revisiones, normas y documentos institucionales. Para reducir el riesgo de sesgo, se priorizaron fuentes revisadas por pares y documentos de organismos técnicos reconocidos. Las limitaciones principales de esta revisión son la heterogeneidad de los estudios incluidos, la escasa disponibilidad de datos industriales bolivianos y la imposibilidad de realizar metaanálisis por la diversidad de métodos e indicadores reportados.

ECONOMÍA CIRCULAR (EC) EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA

Las definiciones de EC varían, pero convergen en el cierre de ciclos de materiales y energía y en la reducción de extracción primaria (Kirchherr et al., 2017). En alimentos, la EC se materializa en decisiones de diseño (procesos, productos, envases) y en estrategias de gestión de subproductos. La literatura también discute su relación —no siempre equivalente— con sostenibilidad, señalando riesgos de enfoques centrados solo en eficiencia material (Geissdoerfer et al., 2017). En búsquedas regionales realizadas en portales iberoamericanos (Dialnet, s. f.; Redalyc, s. f.), se observa un aumento de publicaciones sobre valorización de subproductos y sobre modelos de negocio circulares, aunque con evidencia desigual de escalamiento industrial y con escasa estandarización de indicadores. Tipologías de estrategias circulares y discusiones sobre modelos de negocio muestran que la implementación requiere combinar medidas de diseño, logística inversa y políticas habilitantes (Ghisellini et al., 2016; Reike et al., 2018; Stahel, 2016). Como señalan los debates críticos, se reconoce que la circularidad puede tener límites termodinámicos, riesgos de devolución y tensiones con objetivos sociales si no se acompaña de políticas adecuadas y cambios en los patrones de consumo (Korhonen et al., 2018; Murray et al., 2017; Bocken et al., 2016).

Un punto crítico es evitar el “greenwashing circular”, declarar circularidad sin medir impactos netos ni resolver externalidades (p. ej., emisiones por transporte, consumo de agua o riesgos de inocuidad). Por ello, el ACV y la contabilidad de flujos (material/energía) son instrumentos centrales (International Organization for Standardization, 2006b; Joint Research Centre, European

Commission, 2010). Además, la EC en alimentos debe dialogar con objetivos de seguridad alimentaria y restricciones sanitarias (International Organization for Standardization, 2018).

En términos operativos, muchas propuestas de EC siguen la lógica de “diseñar para eliminar residuos” y “mantener materiales en uso”, pero en alimentos esto exige traducir principios en jerarquías de destino del excedente, prevenir, redistribuir para consumo humano, reprocesar/incrementar la vida útil, alimentación animal, compostaje/biogás y, como última opción, disposición final. Reportes internacionales resaltan que alcanzar la meta ODS 12.3 implica beneficios climáticos y de seguridad alimentaria, pero requiere instrumentos de política, medición y acuerdos público-privados (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2025; United Nations Environment Programme, 2024).

El enfoque de la Fundación Ellen MacArthur ha enfatizado la circularidad como estrategia de diseño sistémico, incluyendo el sistema alimentario y su vínculo con la regeneración de suelos, la reducción de pérdidas y el rediseño de envases (Ellen MacArthur Foundation, 2013, 2019). Sin embargo, la transferencia de estas agendas a países con alta informalidad y brechas de infraestructura, como Bolivia, requiere adaptar instrumentos y priorizar soluciones territoriales de bajo costo y alta escalabilidad.

El enlace entre economía circular y bioeconomía es particularmente relevante en alimentos porque los flujos orgánicos pueden convertirse en ingredientes de mayor valor, bioenergía o enmiendas para suelos, en lugar de perderse como residuos de baja utilidad. Trabajos sobre valorización de residuos de manufactura alimentaria muestran que la jerarquía de opciones (prevención → reutilización → reciclaje/recuperación) debe evaluarse por los impactos netos y no solo por “evitar la disposición final” (Mirabella et al., 2014). Además, la urgencia climática refuerza la necesidad de reducir pérdidas y emisiones asociadas al sistema alimentario (IPCC, 2023).

En Bolivia, la aplicación de estos enfoques debe considerar la escala real de las plantas, la disponibilidad de servicios de tratamiento, los costos de transporte y la capacidad de asegurar inocuidad y trazabilidad. Por ello, la valorización de subproductos debe priorizar primero flujos con volumen estable, baja variabilidad y demanda identificable, antes de promover inversiones intensivas en capital.

IMPLEMENTACIÓN EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA – REDUCCIÓN DE RESIDUOS

La reducción comienza en el diseño del proceso: mejorar rendimientos, minimizar mermas y estabilizar la

calidad de la materia prima. A escala global, la evidencia sobre pérdidas y desperdicio demanda enfoques diferenciados por etapa: el Food Loss Index (índice de pérdida alimentaria) capta pérdidas “antes de la venta al por menor”, mientras el Food Waste Index (índice de desperdicio alimentario) captura desperdicio y consumo (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023; United Nations Environment Programme, 2024). En plantas, medidas de reducción incluyen control estadístico, mantenimiento preventivo, rediseño de operaciones unitarias y digitalización para trazabilidad y control de calidad. En enfoques sistémicos, la reducción se vincula con gobernanza de cadenas y acuerdos entre actores para la redistribución y la mejora de la infraestructura postcosecha (HLPE-FSN, 2014). La jerarquía de prevención y destinos del excedente ha sido discutida en reuniones como la “food waste hierarchy” (jerarquía de gestión de residuos alimentarios), útil para ordenar decisiones y evitar soluciones que solo desplazan impactos (Papargyropoulou et al., 2014; Gustavsson et al., 2011).

REUTILIZACIÓN Y RECICLAJE

En alimentos, la reutilización directa está limitada por inocuidad; sin embargo, existen espacios para recirculación interna de corrientes (p. ej., agua de proceso con tratamiento adecuado) y reutilización de calor. El reciclaje y la recuperación se enfocan en subproductos, pulpas, cáscaras, bagazos, lactosuero, entre otros. Revisiones sobre valorización de residuos de manufactura alimentaria describen rutas para obtener ingredientes funcionales (fibra, pectinas, compuestos fenólicos) y bioproductos (bioenergía, enmiendas orgánicas), destacando que la sostenibilidad depende de energía, insumos y destino final (Mirabella et al., 2014; Joint Research Centre, European Commission, 2010).

DESAFÍOS ACTUALES EN EL PROCESAMIENTO INDUSTRIAL DE ALIMENTOS

Los desafíos se agrupan en cuatro frentes: 1) inocuidad y calidad (riesgo microbiológico y químico); 2) energía y agua; 3) logística y cadena de frío; y 4) gobernanza de residuos. En Bolivia, a estos se suman la heterogeneidad tecnológica entre plantas y la articulación aún incipiente entre industria, municipios y sistemas de gestión integral de residuos (Ley N° 755, 2015; Norma Boliviana NB 742-760, 1996). Además, el desempeño del sector se ve condicionado por choques climáticos que repercuten en la disponibilidad de materias primas y la industria de alimentos (INE, 2024). En el plano de inocuidad, los principios generales del Codex Alimentarius complementan los sistemas de gestión (International Organization for Standardization, 2018) y orientan requisitos para cadenas de exportación (Codex Alimentarius Commission, 2020).

IMPLEMENTACIÓN DE PRINCIPIOS DE ECONOMÍA CIRCULAR

Implementar la economía circular (Figura 2) requiere traducir principios en decisiones de inversión y gobernanza. Una ruta pragmática para Bolivia, es iniciar con proyectos de bajo costo y alto retorno (mejoras de eficiencia, segregación en origen, acuerdos de donación de excedentes), y luego avanzar hacia biorefinería y tecnologías intensivas en capital cuando exista mercado y trazabilidad. Experiencias de recuperación y redistribución de alimentos (p. ej., bancos de alimentos) muestran cobeneficios de reducción de emisiones y mejora de acceso, aunque requieren coordinación con cadenas de suministro y normas sanitarias (Banco de Alimentos de Bolivia, 2024). En paralelo, la normativa boliviana promueve prevención y aprovechamiento, creando base para instrumentos económicos y responsabilidades extendidas (Ley N° 755, 2015; Decreto Supremo N° 2954, 2016).



Figura 2. Modelo conceptual de economía circular en el procesamiento industrial de alimentos. El modelo integra reducción, valorización de subproductos, inocuidad, medición (ACV) y gobernanza territorial (elaboración con base en FAO, 2023).

TECNOLOGÍAS SOSTENIBLES EN EL PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS

Las tecnologías emergentes prometen reducir temperatura, tiempo y uso de aditivos, pero su sostenibilidad debe evaluarse con ACV y con criterios de inocuidad y aceptación del consumidor. Entre las más estudiadas destacan (Tabla 2): a) procesamiento por altas presiones (HPP), b) campos eléctricos pulsados (PEF), c) plasma frío (CP), d) ultrasonido de alta intensidad y separaciones por membranas. En HPP, estudios recientes reportan extensión de vida útil con menor degradación sensorial en varias matrices, aunque con desafíos en costos de capital y en validaciones específicas por producto (Balasubramaniam et al., 2015; Khouryieh, 2025; EFSA Panel on Biological Hazards [BIOHAZ], 2022). En PEF, la evidencia muestra eficacia para la inactivación microbiana en líquidos y beneficios como la mejora de la extracción y la transferencia de masa, con brechas en la estandarización

y la comunicación al consumidor (Ghoshal, 2023). El plasma frío emerge como alternativa no térmica para descontaminación superficial y mejora funcional, pero aún requiere control de especies reactivas y claridad regulatoria (Yawut et al., 2024).

Más allá del desempeño técnico, la adopción industrial depende de factores como costo de capital, compatibilidad con líneas existentes, capacidad de validación microbiológica, percepción del consumidor, financiamiento y claridad regulatoria; estos elementos suelen determinar si una tecnología transita de piloto a operación continua (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2025). En el caso de HPP, evaluaciones de eficacia y seguridad han sido discutidas en informes científicos y revisiones especializadas, subrayando que el diseño de validaciones debe ser específico por producto y patógeno objetivo (EFSA Panel on Biological Hazards [BIOHAZ], 2022; Khouryieh, 2025; Balasubramaniam et al., 2016).

Tabla 2. Comparación sintética de tecnologías convencionales y alternativas con potencial de sostenibilidad.

Tecnología	Ventaja potencial	Limitación crítica	Aplicaciones típicas	Notas de circularidad
Pasteurización térmica	Alta confiabilidad sanitaria	Mayor energía/posible daño nutricional	Leche, jugos, salsas	Puede integrarse con recuperación de calor.
HPP	Proceso no térmico; mantiene calidad	CAPEX alto; validación por producto	Jugos, cárnicos listos, purés	Menor desperdicio por vida útil; evaluar energía.
PEF	Eficiente en líquidos; mejora extracción	Limitado en sólidos heterogéneos	Jugos, lácteos, pretratamientos	Reduce pérdidas; puede bajar solventes en extracción.
Plasma frío	Descontaminación superficial	Control de ROS/RNS; escalamiento	Frutas/verduras, envases	Puede reducir mermas postcosecha; evaluar insumos.
Membranas	Recuperación de solutos/agua	Fouling; limpieza química	Suero, jugos clarificados	Clave para recirculación de agua y concentración.

La evidencia sugiere beneficios potenciales, pero la comparación final exige unidad funcional y límites del sistema (International Organization for Standardization, 2006b).

Ejemplos de los itinerarios representativos de valorización de subproductos en agroindustria alimentaria se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Itinerarios representativos de valorización de subproductos en agroindustria alimentaria.

Subproducto	Itinerarios	Producto(s)	Referencias (ejemplos)
Cáscaras/pulpas de frutas	Extracción verde / secado	Pectina, fibra, polifenoles, harinas	Mirabella et al., 2014
Bagazos y orujos	Fermentación / digestión anaerobia	Bioetanol, biogás, compost	Mirabella et al., 2014; Zhang et al., 2014; Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2013
Lactosuero	Membranas / bioprocesos	Concentrados proteicos, lactosa, bebidas	Ganju y Gogate, 2017; Joint Research Centre, European Commission, 2010
Residuos urbanos orgánicos	Compostaje / biogás	Enmienda orgánica; energía	Zhang et al., 2014; Norma Boliviana NB 742-760, 1996; Decreto Supremo N° 2954, 2016
Biomasa de quinua	Ingredientes/insumos; alimentación animal	Harinas, fibras; coproductos	Canales et al., 2020

CONTEXTO BOLIVIANO – OPORTUNIDADES Y BRECHAS

Bolivia presenta oportunidades relevantes para la economía circular en el ámbito alimentario por su diversidad agroecológica y por cadenas con identidad territorial (quinua, papa, café, cacao, lácteos, frutas amazónicas). En quinua, estudios sobre bioeconomía y productividad muestran cómo innovaciones en procesamiento pueden cambiar la organización sectorial, pero también revelan tensiones socioambientales y la necesidad de prácticas regenerativas en el Altiplano (Canales et al., 2020). El desafío es mover la conversación desde “valorización” como idea hacia modelos de negocio con trazabilidad, estándares de inocuidad y mercados estables.

Como línea de acción, cadenas como lácteos, quinua, papa, frutas tropicales, café, cacao y bebidas pueden servir como pilotos por su generación de corrientes orgánicas relativamente identificables. En lácteos, el lactosuero permite evaluar separación por membranas y desarrollo de ingredientes; en frutas, las cáscaras y pulpas pueden orientarse a fibra, pectinas o compuestos bioactivos; y en

residuos orgánicos municipales, el compostaje o la biodigestión requieren segregación en origen y acuerdos logísticos. Estas rutas deben validarse caso por caso mediante indicadores de rendimiento, calidad, inocuidad, costos y reducción real de impactos.

En gestión de residuos, el marco boliviano (Ley N° 755 y su reglamento) establece responsabilidades y promueve prevención y aprovechamiento; sin embargo, la implementación depende de capacidades municipales, infraestructura y financiamiento. Normas técnicas como la Norma Boliviana NB 742-760 (1996) y guías sectoriales orientan el diseño y planificación del manejo de residuos sólidos, incluyendo fracciones orgánicas. Para la industria alimentaria, esto implica trabajar con municipios, rutas de recolección diferenciadas y opciones de tratamiento (compostaje, biodigestión), evitando que el residuo orgánico termine en rellenos sin captura de biogás (Norma Boliviana NB 742-760, 1996; Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2013). La Tabla 4 menciona indicadores mínimos para monitorear la circularidad y sostenibilidad en plantas agroindustriales.

Tabla 4. Indicadores para monitorear circularidad y sostenibilidad en plantas agroindustriales

Dimensión	Indicador	Unidad	Observación
Materiales	Rendimiento de materia prima y tasa de merma	%	Monitoreo por línea y estacionalidad.
Residuos	Fracción valorizada vs dispuesta	%	Desagregar orgánico, envases, peligrosos.
Energía	Intensidad energética por unidad funcional	kWh/kg o kWh/L	Considerar recuperación de calor.
Agua	Consumo neto y porcentaje de recirculación	L/kg; %	Incluir calidad del efluente.
Clima	Huella de carbono (alcances 1–3)	kg CO ₂ e/kg	Reportar supuestos; evitar comparaciones sin ACV.
Inocuidad	No conformidades / retiros	N/año	Circularidad sin inocuidad es inviable.

Los resultados revisados muestran que la EC en alimentos es técnicamente factible, pero institucionalmente exigente. La tentación de adoptar “soluciones tecnológicas” sin gobernanza y medición puede generar desplazamiento de impactos. Por ejemplo, extraer polifenoles con solventes y energía elevada para luego declarar un subproducto “valorizado”. De ahí la importancia de ACV y de límites del sistema evidentes (International Organization for Standardization, 2006b; Joint Research Centre, European Commission, 2010). Asimismo, la circularidad debe conversar con seguridad alimentaria y con la función de protección del envase (Ellen MacArthur Foundation, 2017; Geueke et al., 2018); sustituir materiales sin evaluar desperdicio inducido por menor vida útil puede aumentar impactos netos (United Nations Environment Programme, 2024).

En Bolivia, la agenda debe priorizar tres aspectos: 1) medición mínima y datos abiertos sectoriales (materiales, agua, energía, mermas); 2) proyectos territoriales de aprovechamiento de orgánicos articulados con municipios, de acuerdo con la Ley N° 755 y el Decreto Supremo N° 2954 (Ley N° 755, 2015; Decreto Supremo N° 2954, 2016); y 3) escalamiento selectivo de tecnologías no térmicas y de separación, comenzando por pilotos en cadenas con mercado y volumen, como lácteos, jugos y derivados de quinua. Finalmente, el enfoque de “Vivir Bien” sugiere que la innovación sostenible no solo se mida por eficiencia, sino por su capacidad de sostener sistemas de vida y empleo digno (Ley N° 300, 2012).

CONCLUSIONES

La economía circular constituye un marco útil para rediseñar el procesamiento industrial de alimentos, siempre que se acompañe de medición de impactos, trazabilidad, inocuidad y gobernanza territorial. La revisión muestra que la valorización de subproductos puede generar beneficios ambientales y económicos, pero su sostenibilidad depende de la escala, la energía utilizada, los insumos requeridos, el mercado final y la seguridad del producto obtenido. Por lo cual, el análisis de ciclo de vida y la definición clara de límites del sistema son condiciones necesarias para evitar declaraciones de circularidad sin sustento. Las tecnologías emergentes, como HPP, PEF, plasma frío y separación por membranas, presentan potencial para reducir mermas y extender la vida útil, aunque su adopción en Bolivia exige evaluación de costos, capacidades técnicas, regulación e infraestructura. En el contexto boliviano, se recomienda iniciar con indicadores mínimos de circularidad, pilotos territoriales en cadenas con volumen y demanda identificable, y mecanismos de articulación entre industria, municipios y academia. Esta

agenda permitiría avanzar hacia una agroindustria más sostenible sin descuidar la inocuidad, la viabilidad económica ni los principios de protección de los sistemas de vida establecidos en el marco normativo nacional.

BIBLIOGRAFÍA

- Balasubramaniam, V. M., Barbosa-Cánovas, G. V., & Lelieveld, H. L. M. (2015). Principles and application of high pressure-based technologies in the food industry. *Annual Review of Food Science and Technology*, 6, 435-462. <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-food-022814-015539>
- Balasubramaniam, V. M., Martínez-Monteagudo, S. I., & Gupta, R. (Eds.). (2016). *High pressure processing of food: Principles, technology and applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3234-4>
- Banco de Alimentos de Bolivia. (2024). Memoria anual 2024. <https://www.bab.org.bo/memorias/memoria-anual-2024.pdf>
- Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C., & van der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(5), 308-320. <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124>
- Canales, N., Gomez, J., Fielding, M., & Dugarte, M. (2020). The potential of quinoa in Bolivia's bioeconomy. Stockholm Environment Institute. <https://www.sei.org/publications/potential-quinoa-bolivias-bioeconomy/>
- Codex Alimentarius Commission. (2020). General principles of food hygiene (CXC 1-1969, Rev. 2020). FAO/WHO. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6866dc55-d2c0-48dd-a528-a4d634f1b0b4/content>
- Decreto Supremo N° 2954, Reglamento General de la Ley N° 755 de Gestión Integral de Residuos. (2016). Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia. https://sea.gob.bo/digesto/CompendioII/N/142_L_755.pdf
- Dialnet. (s. f.). Dialnet: Portal de difusión de la producción científica hispana. Fundación Dialnet/Universidad de La Rioja. <https://dialnet.unirioja.es/>
- EFSA Panel on Biological Hazards (BIOHAZ). (2022). The efficacy and safety of high pressure processing of food. *EFSA Journal*, 20(3), e07128. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2022.7128>
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the circular economy* (Vol. 1): Economic and business rationale for an accelerated transition. Ellen MacArthur Foundation. <https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/4384c08da576329c/original/Towards-a-circular-economy-Business-rationale-for-an-accelerated-transition.pdf>
- Ellen MacArthur Foundation. (2017). *The new plastics economy: Rethinking the future of plastics*. Ellen MacArthur Foundation. <https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/55619973d1df5d58/original/The-New-Plastics-Economy-Rethinking-the-future-Catalysing-action.pdf>
- Ellen MacArthur Foundation. (2019). *Completing the picture: How the circular economy tackles climate change*. Ellen MacArthur Foundation. <https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/5af2367338ec98e6/original/Completando-la-imagen-Co-mo-la-economi-a-circular-ayuda-a-afrontar-el-cambio-climatico.pdf>

- European Commission. (2020). Communication from the Commission to the European Parliament, The Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the regions. A new Circular Economy Action Plan. For a cleaner and more competitive Europe. (COM/2020/98 final). European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2020:98:FIN>
- FLW Protocol. (2016). Food loss and waste accounting and reporting standard. World Resources Institute. https://flwprotocol.org/wp-content/uploads/2017/05/FLW_Standard_final_2016.pdf
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2019). The State of Food and Agriculture 2019: Moving forward on food loss and waste reduction. FAO. <https://www.fao.org/3/ca6030en/ca6030en.pdf>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). Food Loss Index (SDG 12.3.1): Metadata and methodology. FAO. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/f87cd0ce-5336-4462-90fe-fd7ffa078068/content>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Geueke, B., Groh, K., & Muncke, J. (2018). Food packaging in the circular economy: Overview of chemical safety aspects for commonly used materials. *Journal of Cleaner Production*, 193, 491–505. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.005>
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Ghoshal, S. (2023). Comprehensive review on pulsed electric field in food preservation: Gaps in current studies for potential future research. *Heliyon*, 9(6), e17532. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17532>
- Ganju, S., & Gogate, P. R. (2017). A review on approaches for efficient recovery of whey proteins from dairy industry effluents. *Journal of Food Engineering*, 215, 84–96. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.07.021>
- Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., van Otterdijk, R., & Meybeck, A. (2011). Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention. FAO. <https://www.fao.org/3/i2697e/i2697e.pdf>
- HLPE-FSN (High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition). (2014). Food losses and waste in the context of sustainable food systems. HLPE. <https://www.fao.org/3/i3901e/i3901e.pdf>
- INE (Instituto Nacional de Estadística). (2024). A septiembre de 2024, Bolivia crece 2,14% (Nota de prensa). INE. <https://elmundo.com.bo/bolivia-reporto-un-crecimiento-del-214-a-septiembre-de-2024/>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2023). Climate change 2023: Synthesis report. IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- International Organization for Standardization. (2006a). ISO 14040:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework. ISO. <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- International Organization for Standardization. (2006b). ISO 14044:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines. ISO. <https://www.iso.org/standard/38498.html>
- International Organization for Standardization. (2018). ISO 22000:2018 Food safety management systems—Requirements for any organization in the food chain. ISO. <https://www.iso.org/standard/65464.html>
- Joint Research Centre, European Commission (JRC). (2010). International reference life cycle data system (ILCD) handbook: General guide for life cycle assessment—Detailed guidance. Publications Office of the European Union. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC48157>
- Khouryieh, H. (2025). Impact of high pressure processing on the safety and quality of food products: A review. *Recent Advances in Food Nutrition & Agriculture*, 16(1), 31-40. <https://doi.org/10.2174/012772574X289005240215093457>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular economy: The concept and its limitations. *Ecological Economics*, 143, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
- Kummu, M., de Moel, H., Porkka, M., Siebert, S., Varis, O., & Ward, P. J. (2012). Lost food, wasted resources: Global food supply chain losses and their impacts on freshwater, cropland, and fertilizer use. *Science of the Total Environment*, 438, 477-489. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.092>
- Ley N° 071 (2010). Ley de Derechos de la Madre Tierra. <https://www.planificacion.gob.bo/uploads/marco-legal/Ley%20N%C2%B020071%20DERECHOS%20DE%20LA%20MADRE%20TIERRA.pdf>
- Ley N° 300. (2012). Ley N° 300 Marco de la Madre Tierra y Desarrollo Integral para Vivir Bien. https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/FAO-ountries/Bolivia/docs/Ley_300.pdf
- Ley N° 755 de Gestión Integral de Residuos. (2015). Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia. https://sea.gob.bo/digesto/CompendioII/N/142_L_755.pdf
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2013). Guía para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos: Mediante compostaje y lombricultura. Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico. <https://datos.siarh.gob.bo/biblioteca/104>
- Mirabella, N., Castellani, V., & Sala, S. (2014). Current options for the valorization of food manufacturing waste: A review. *Journal of Cleaner Production*, 65, 28-41. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.051>
- Murray, A., Skene, K., & Haynes, K. (2017). The circular economy: An interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. *Journal of Business Ethics*, 140(3), 369-380. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>
- Norma Boliviana NB 742-760. (1996). Residuos sólidos (serie NB 742 a NB 760). IBNORCA. https://redcompostaje.mmaya.gob.bo/files/biblioteca/05%20PLANIF%20NORMATIVA/02%20NB742-760_ResiduosSolidos.pdf

- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2025). Achieving food loss and waste reduction. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/edd99594-en>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Papargyropoulou, E., Lozano, R., Steinberger, J. K., Wright, N., & bin Ujang, Z. (2014). The food waste hierarchy as a framework for the management of food surplus and food waste. *Journal of Cleaner Production*, 76, 106-115. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.020>
- Parfitt, J., Barthel, M., & Macnaughton, S. (2010). Food waste within food supply chains: Quantification and potential for change to 2050. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 3065-3081. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0126>
- Redalyc. (s. f.). Redalyc: Sistema de Información Científica. Universidad Autónoma del Estado de México. <https://www.redalyc.org/>
- Reike, D., Vermeulen, W. J. V., & Witjes, S. (2018). The circular economy: New or refurbished as CE 3.0? Exploring controversies in the conceptualization of the circular economy through a focus on history and resource value retention options. *Resources, Conservation and Recycling*, 135, 246-264. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.027>
- Stahel, W. R. (2016). The circular economy. *Nature*, 531(7595), 435-438. <https://doi.org/10.1038/531435a>
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2024). Food waste index report 2024. UNEP. <https://wedocs.unep.org/items/dbe2cd4c-8384-4636-8359-5847f42b9711>
- United Nations. (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (A/RES/70/1). United Nations. <https://undocs.org/A/RES/70/1>
- Yawut, P., Mekwilai, P., Vichian, P., et al. (2024). Cold plasma technology: Transforming food processing for safety and sustainability. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18, 101383. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101383>
- Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., & Tan, T. (2014). Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 383-392. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.038>