



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**CONSIDERACIONES PARA LA INTEGRACIÓN DE SUBPRODUCTOS
DE ORIGEN VEGETAL COMO ESTRATEGIA DE CONTRIBUCIÓN A
UN SISTEMA ALIMENTARIO SOSTENIBLE**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

QUÍMICA DE ALIMENTOS

PRESENTA

LAURA LYNNETTE GUERRERO JIMÉNEZ

TUTOR

MARÍA AMANDA GÁLVEZ MARISCAL



Ciudad Universitaria, CD.MX.

AÑO 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: LEAL LARA HERMILO
VOCAL: Profesor: BAEZ FERNÁNDEZ MARCOS FRANCISCO
SECRETARIO: Profesor: GÁLVEZ MARISCAL MARÍA AMANDA
1er. SUPLENTE: Profesor: NAVARRO OCAÑA ARTURO
2° SUPLENTE: Profesor: GARCÍA ARRAZOLA ROEB

SITIO DONDE SE DEARROLLÓ EL TEMA:

**LABORATORIO 312, DEPARTAMENTO DE ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA,
CONJUNTO E DE LA FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM**

ASESOR DEL TEMA:

MARÍA AMANDA GÁLVEZ MARISCAL

SUPERVISOR TÉCNICO:

LUZALLIE JASSO MATA

SUSTENTANTE:

LAURA LYNNETTE GUERRERO JIMÉNEZ

Contenido

Índice de Tablas.....	4
Índice de Figuras.....	5
Lista de Acrónimos y Siglas	6
Resumen.....	7
Objetivos	8
Objetivo general.....	8
Objetivos particulares.....	8
1. Antecedentes	9
2. Estatus global de la pérdida y el desperdicio de alimentos	17
2.1. Impacto medioambiental de la producción de alimentos, su consumo y su desperdicio.....	20
2.2. Economía circular, bioeconomía y sostenibilidad.....	23
2.2.1. Revisión de terminología: sostenibilidad y sustentabilidad	29
2.3. Análisis de terminología: pérdida, desperdicio, residuo de alimentos y propuesta del uso del término ‘subproducto’	33
3. Legislación y Antecedentes del Aprovechamiento de Subproductos Agroindustriales en México	41
4. Estrategias de manejo de residuos de alimentos y valorización de los subproductos en la industria alimentaria	44
4.1. Recuperación y valorización	50
5. Valorización: Definición de la estrategia, clasificación y compuestos objetivo ..	55
5.1. Integración	57
5.1.1. Estrategia de Recuperación Universal.....	59
5.1.2. Análisis del Ciclo de Vida	65
5.1.3. Clasificación y compuestos objetivo	68
5.2. Segmentación y coordinación	78
6. Compuestos bioactivos	80
6.1. Compuestos bioactivos presentes en subproductos de origen vegetal y sus aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética	83
6.2. Técnicas de extracción.....	86
7. Perspectivas.....	90
8. Discusión.....	93
9. Conclusiones.....	99
10. Bibliografía.....	102

Índice de Tablas

Tabla 1. Costos económicos (en USD) de la pérdida y el desperdicio de alimentos en diferentes países	19
Tabla 2. Posibles formas de valorización de subproductos orgánicos y sus fuentes de origen	52
Tabla 3. Tecnologías convencionales y emergentes capaces de ser aplicadas en el proceso de recuperación universal de cinco pasos	64
Tabla 4. Clasificación de los subproductos obtenidos en la industria de alimentos.	69
Tabla 5. Composición de los subproductos del procesamiento de cereales y sus respectivos compuestos objetivo con información de Galanakis, 2021	71
Tabla 6. Composición de los subproductos del procesamiento de raíces y tubérculos y sus respectivos usos o compuestos objetivo con información de Galanakis, 2021	73
Tabla 7. Compuestos bioactivos presentes en subproductos de frutas y vegetales	77
Tabla 8. Clasificación de compuestos bioactivos presentes en subproductos de origen vegetal y su funcionalidad en biomedicina	81
Tabla 9. Funcionalidad de distintos compuestos bioactivos en la formulación de productos de la industria alimentaria	84
Tabla 10. Posibles beneficios a la salud por el consumo de distintos compuestos bioactivos	85
Tabla 11. Fitoquímicos encontrados en subproductos obtenidos del procesamiento de frutas y vegetales	86
Tabla 12. Compuestos bioactivos recomendados para su extracción mediante el uso de distintas técnicas	89

Índice de Figuras

Figura 1. Representación de las emisiones de GEI provocadas por la producción de alimentos y la participación de cada sector	21
Figura 2. Jerarquía de Gestión de Residuos de Alimentos	28
Figura 3. Puntos clave para definir la problemática relacionada con la pérdida y/o residuo de alimentos	38
Figura 4. Esquema para la obtención de productos específicos de valorización dependiendo del subproducto de partida	58
Figura 5. Desarrollo de la Estrategia de Recuperación Universal	60

Lista de Acrónimos y Siglas

ACV: Análisis del Ciclo de Vida

BCS: Biorefinación como servicio

BPM: Buenas prácticas de manufactura

CDMX: Ciudad de México

CAMD: Computer-Aided Molecular Design

DA: Digestión anaeróbica

DOF: Diario Oficial de la Federación

EC: Economía circular

EPA: Environmental Protection Agency

FAO: Food and Agriculture Organization, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

GEI: Gases de Efecto Invernadero

HACCP: Hazard Analysis and Critical Control Points

LCA: Life Cycle Assessment

LCI: Life Cycle Inventory

LCIA: Life Cycle Impact Assessment

LECCDMX: Ley de Economía Circular de la Ciudad de México

LGEC: Ley General de Economía Circular

LGEEPA: Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

LGPGIR: Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos

MDS: Metas del Desarrollo Sostenible

NOM: Norma Oficial Mexicana

NMX: Norma Mexicana

ONG: Organización No Gubernamental

ONU: Organización de las Naciones Unidas

PGIR: Programa de Gestión Integral de Residuos para la Ciudad de México

pl: Punto isoeléctrico

PM: Peso Molecular

PNUMA: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

UE: Unión Europea

WFLDB: World food life cycle assessment database

Resumen

En la actualidad, la gestión mayormente aplicada a residuos de la industria de alimentos está constituida por sistemas de “un solo sentido”, como su desecho en vertederos, incineración y compostaje. La conciencia generada por parte de los consumidores acerca de los problemas medioambientales, la presión ejercida con legislaciones (Galanakis, 2021) y la introducción de conceptos de economía circular y bioeconomía, aumentan la necesidad de generar nuevos métodos para la reutilización de los residuos de alimentos. La reducción del desperdicio de alimentos puede contribuir a la mejora de la seguridad alimentaria, combatir el cambio climático ahorrando dinero y disminuyendo el impacto ambiental sobre la tierra, el agua, la biodiversidad y los sistemas de gestión de desechos. Sin embargo, la información que se tiene respecto al tema apenas está siendo explorada (PNUMA, 2021). Más allá de continuar llamando *residuo* a la materia obtenida después del proceso de transformación dentro de la industria alimentaria, se hace la sugerencia de denominarlo subproducto ya que puede ser integrado a un nuevo proceso aplicando estrategias de valorización. Por ejemplo, estos subproductos pueden ser redireccionados para la extracción de diferentes moléculas bioactivas como polifenoles, fibra dietaria, carbohidratos y proteínas (Ferri *et al.*, 2020) entre otros.

La extracción y purificación de compuestos bioactivos a partir de subproductos vegetales generados por la industria agroalimentaria, pueden ser una alternativa para su aprovechamiento en el desarrollo de alimentos funcionales, nutraceúticos y productos de cuidado personal, además de que contribuirían a mitigar el daño agroecológico que actualmente se presenta en la cadena de suministro de alimentos. Este texto pretende abrir el panorama a las industrias de alimentos, para definir un plan de acción y valorizar la materia orgánica vegetal resultante de sus procesos de transformación para obtener compuestos bioactivos; también se exploran los principales factores para su implementación asegurando la sustentabilidad y seguridad a través de la cadena de valor, y las perspectivas a futuro sobre la integración de subproductos obtenidos en la etapa post-procesamiento de alimentos.

Objetivos

Objetivo General

Proponer un plan de acción para la valorización de subproductos de origen vegetal generados después del procesamiento, para la obtención de compuestos bioactivos como aportación al desarrollo de un sistema alimentario sostenible.

Objetivos Particulares

1. Conocer los factores clave que deben ser considerados por las industrias alimentarias, desde el estado actual de la pérdida y el desperdicio de alimentos, su impacto ambiental, hasta un análisis de las legislaciones mexicanas, para desarrollar estrategias efectivas de valorización de subproductos de origen vegetal, adaptadas a las características específicas de cada caso.
2. Analizar los conceptos de economía circular, bioeconomía, sostenibilidad y sustentabilidad, y contextualizar su relevancia para la integración de subproductos de origen vegetal.
3. Explorar las estrategias existentes para el manejo de residuos de alimentos y la valorización de subproductos en la industria alimentaria, enfocándose en su contribución potencial a la sostenibilidad.
4. Revisar las metodologías de extracción más relevantes y su potencial aplicación en diversas industrias como posible vía de valorización de los subproductos de origen vegetal, para la extracción de compuestos bioactivos.
5. Mostrar las consideraciones a evaluar para una posible implementación industrial de la extracción de compuestos bioactivos, con un análisis de factores técnicos, económicos y ambientales, y las perspectivas a futuro para su uso sostenible en diversos sectores.

1. Antecedentes

La desertificación de tierras cultivables, la disminución en la disponibilidad de agua dulce y las pérdidas de biodiversidad son señales inequívocas de la degradación de los recursos naturales alrededor del mundo, lo cual genera preocupaciones críticas que ponen en riesgo la demanda de recursos futuros a nivel mundial. En los próximos 50 años el aumento de la población, sumando la creciente urbanización, traerá un rápido crecimiento en las industrias de procesamiento y las cadenas de suministro de alimentos alrededor del mundo.

De acuerdo con estudios generados por The Lancet Commissions (2019) la existencia de recursos disponibles, pero limitados para alimentar a la población mundial, la presión por el aprovechamiento de recursos naturales, y problemas medioambientales, ganarán una mayor atención en los próximos años. En particular, mantener un balance entre las demandas futuras y la disponibilidad de suministros sustentables será el mayor desafío, por lo que se han sugerido las siguientes acciones a tener en consideración (Galanakis, 2021):

- Los puntos de partida deben ser las investigaciones y descubrimientos disponibles junto con su aplicación de forma óptima y objetiva.
- La innovación en ciencia y tecnología.
- La reducción y prevención de la pérdida y el desperdicio de alimentos.
- Mejorar la interrelación del gobierno, la sociedad y el mercado con el sistema alimentario, de manera que se permita la inclusión de innovaciones en la producción de alimentos.
- Establecer dietas sustentables, mediante el aprovechamiento de subproductos útiles.

Un sistema alimentario se define como la suma de todos los elementos diversos y actividades que llevan a la producción y consumo de alimentos. En particular, reúne elementos como el medio ambiente, personas, recepción de materias primas, procesos, infraestructura, instituciones, las actividades relacionadas a la producción, procesamiento, distribución, transporte, preparación y consumo de alimentos, así como los impactos socioeconómicos y medioambientales (Galanakis

et al., 2022), además de los sectores ganadero y agrícola. Los sistemas alimentarios tienen el potencial de nutrir y mejorar la salud humana, y apoyar la sustentabilidad medioambiental; sin embargo, actualmente se encuentran amenazados (The Lancet Commissions, 2019).

El desperdicio de alimentos es un componente considerable de los problemas del sistema alimentario mundial (Thyberg *et al.*, 2016). Estudios realizados por The Drawdown Project (Hawken, 2017) y la Food and Agriculture Organization (FAO, 2019), mencionan que aproximadamente el 14% de los alimentos están siendo desperdiciados en el campo durante su producción; sin embargo, no incluye el desperdicio generado durante la comercialización alrededor del mundo. Existen diversos reportes en donde varían las estimaciones del desperdicio. El análisis realizado por Gibson en 2020 menciona cifras que van desde el 30% al 50%, o entre 1.2 y 2 mil millones de toneladas de alimentos desperdiciados desde la producción agrícola hasta el punto de consumo; a pesar de la discrepancia entre los estimados, la inevitable verdad es que todas son excesivamente altas. El desperdicio de alimentos ya sea generado a partir de pérdidas inevitables por las condiciones climáticas o plagas, hasta el desperdicio generado por malas prácticas, se compone de alimentos crudos o que pasaron por un proceso de transformación y/o manipulación como cáscaras de vegetales, recortes de carne, huesos y órganos, así como los alimentos caducados, en deterioro o simplemente lo que se deja en el plato después de comer (Gibson, 2020).

La pérdida y el desperdicio de alimentos en las etapas iniciales de producción es más alta en países con bajos y medianos ingresos, y se pueden deber a una mala calendarización de las cosechas, a la manipulación brusca o descuidada de los productos, o a la falta de medios para ingresar los productos a los mercados (The Lancet Commissions, 2019).

A pesar de que existen suficientes alimentos disponibles para alimentar a la población mundial, cerca del 11% sufre inseguridad alimentaria, lo que representa a más de 820 millones de personas, como se menciona en reporte de The Lancet Commissions, 2019. No se trata únicamente de los alimentos desperdiciados, sino que deben añadirse los recursos que se utilizaron para su producción, que también son perdidos o desperdiciados. De acuerdo con estimaciones a nivel global, en la

producción de alimentos se utiliza un 24% del total de los recursos de agua dulce, un 23% de la superficie cultivable y el 23% del uso de fertilizantes (Gibson, 2020). Si estos recursos alimentarios fueran manejados de mejor manera y se minimizaran los residuos, estos podrían ser utilizados para alimentar a la población necesitada, así como dirigir el exceso de alimentos a través de donaciones de caridad (Thyberg *et al.*, 2016).

En el contexto de materias primas, se desperdicia de un 45% a un 60% de las frutas y vegetales producidas mundialmente (Qi Lau *et al.*, 2021, Sagar *et al.*, 2018), mientras que la cifra es de alrededor de un 25% para raíces, tubérculos y semillas oleaginosas (FAO, 2019). Estos desperdicios agroindustriales son usualmente desechados en vertederos o incinerados, generando serios problemas ambientales y de salud (Arun *et al.*, 2020).

Otros cuestionamientos y contrastes sociales se suman al hablar de la pérdida y el desperdicio de alimentos, como el hecho de que la obesidad (por un excesivo consumo de calorías) es un problema de salud global de rápido crecimiento que afecta a 1.9 mil millones de personas, y que contrasta con el hecho de que cada año aproximadamente nueve millones de personas mueren de hambre y enfermedades relacionadas con la misma (Gibson, 2020).

Aunado a esto, la pérdida y el desperdicio de alimentos amplifica el impacto medioambiental de su producción a lo largo de la cadena de suministro mediante el requerimiento de producir más de lo que es necesario, ya que se basa solo en las demandas del mercado. Por lo tanto, si se lograra disminuir este residuo, manteniendo el nivel recurrente de producción podría ser de ayuda para satisfacer las necesidades mundiales de alimentos (Thyberg *et al.*, 2016). El reducir esta cantidad de desperdicios o bien, aprovecharlos, es una de las principales soluciones que se han identificado para hacer frente al cambio climático que, a su vez, afecta la producción de alimentos.

De acuerdo con Sheppard *et al.* (2020) también se desperdicia un tercio de energía y materiales involucrados en la producción de alimentos, lo que indica un manejo ineficiente de recursos. A partir de este hecho, se han propuesto iniciativas para abordarlo, lo cual ha llevado al desarrollo de sistemas de toma de decisiones para promover un correcto manejo de recursos. Es necesario un modelo lógico en el que

se puedan identificar y cuantificar los flujos de residuos de alimentos a diferentes escalas, su forma de caracterización, la identificación de tecnologías de conversión apropiadas, así como otros factores que proveen un ajuste final para cada propietario o generador de residuos.

La migración hacia sistemas alimentarios más sostenibles es esencial y urgente; para esto se necesitan acciones a lo largo de toda la cadena de suministro de alimentos moderando la demanda, mejorando la gobernanza (interacciones entre el estado, las instituciones y la sociedad, que permitan el desempeño equilibrado de los sistemas alimentarios) y reduciendo el desperdicio. La reducción en la generación y el manejo de residuos de alimentos puede ahorrar recursos económicos, contribuir a la seguridad alimentaria, y minimizar los efectos negativos que tienen estos residuos sobre los sistemas de manejo actuales (Thyberg *et al.*, 2016).

Dado que la pérdida y el desperdicio de alimentos representa un problema social, financiero y medio ambiental a nivel global (Amicarelli *et al.*, 2021), un mejor monitoreo y estructuras de evaluación son necesarias para determinar el progreso de las estrategias, ya que la sustentabilidad en términos de producción y consumo es fundamental en la bioeconomía (Sheppard *et al.*, 2020). Sheppard *et al.* (2020) seleccionaron programas y proyectos para la valorización de residuos de alimentos, llevados a cabo en diferentes países, que a continuación se describen.

Programas y/o proyectos de diferentes países para la valorización de residuos de alimentos

Resource efficient food and dRink for the entire supply cHain (REFRESH)

- **Descripción:** Proyecto de investigación de la Unión Europea (UE) que involucra 26 socios de 12 países europeos y China. Su punto es considerar todos los problemas asociados con el residuo de alimentos, principalmente al nivel de hogares y venta minorista, además de la valorización industrial, para la toma de decisiones informada y el desarrollo, evaluación de ideas y prácticas relacionadas con el residuo de alimentos.
- **Puntos relevantes:** Identificación de fuentes de generación de residuos de alimentos con un alto potencial para ser valorizados.
Simplificación de las metodologías de Life-Cycle Assessment (LCA) y Life-Cycle Costing (LCC).
Creación de una herramienta en forma de hoja de cálculo llamada

FORKLISFT (FOod side flow Recovery LIFe cycle Tool), la cual involucra los acercamientos de LCA y LCC, además de que contiene una base de datos con composiciones de residuos de alimentos

AgroCycle

- **Descripción:** Es un proyecto de innovación y desarrollo de Horizon 2020 cuyo objetivo es reciclar y valorizar el desperdicio del sector agroalimentario. Se compone de 26 socios (8 países socios de la UE, 2 de China y 1 de Hong Kong y otros países).
- **Puntos relevantes:** Recopilación de diferentes datos de residuos como carnes, pescado, frutas, cereales y vegetales a lo largo de toda la cadena de suministro, incluyendo un análisis de las leyes involucradas, cadenas de suministro y logística de los residuos de alimentos. Desarrollo de una estructura de evaluación para la sustentabilidad y valorización del rendimiento de residuo de alimentos y subproductos, cubriendo aspectos medioambientales, sociales y económicos

WRAP

- **Descripción:** Waste and Resources Action Programme (WRAP) es una organización impulsada por el gobierno del Reino Unido para implementar una economía más eficiente en cuestión de recursos. Este proyecto ha conducido un gran número de iniciativas para reducir el desperdicio de alimentos además de proveer estimaciones de datos cuantitativos acerca del residuo de alimentos en el Reino Unido.
- **Puntos relevantes:** Firma de un acuerdo voluntario (Courtauld Commitment) por parte del sector de abarrotes en el Reino Unido, cuyo objetivo es mejorar el uso eficiente de los recursos y reducir desperdicios. Una herramienta de hoja de cálculo para un Caso de Negocio el cual une todos los factores que influyen en la valorización del residuo de alimentos en una secuencia lógica, a partir de fórmulas que permiten la cuantificación y comparación de diferentes opciones de procesamiento y resultados.

SwaVI

- **Descripción:** Sustainable Waste Valorisation Identifier desarrollado por Stone *et al.* (2019) en Reino Unido, el cual ayuda a las compañías a identificar la mejor opción de valorización de residuos de alimentos dependiendo su situación particular. Esto lo logra a través de cinco etapas las cuáles incluye un análisis de las características y composición del residuo a la mano, evaluación, seguido de una selección de las mejores opciones de valorización, selección de los indicadores más apropiados (medioambiental, económico, social, tecnológico y el respectivo a la marca). Finalmente clasifica las opciones de valorización dependiendo de las mediciones hechas en cada indicador.
- **Puntos relevantes:** Publicación que contiene todas las pautas y principios de la estructura SwaVI, y una guía paso a paso para su implementación junto

con un caso de estudio.

AgroCycle

- **Descripción:** Es un proyecto de innovación y desarrollo de Horizon 2020 cuyo objetivo es reciclar y valorizar el desperdicio del sector agroalimentario. Se compone de 26 socios (8 países socios de la UE, 2 de China y 1 de Hong Kong y otros países).
- **Puntos relevantes:** Recopilación de diferentes datos de residuos como carnes, pescado, frutas, cereales y vegetales a lo largo de toda la cadena de suministro, incluyendo un análisis de las leyes involucradas, cadenas de suministro y logística de los residuos de alimentos. Desarrollo de una estructura de evaluación para la sustentabilidad y valorización del rendimiento de residuo de alimentos y subproductos, cubriendo aspectos medioambientales, sociales y económicos.

WRAP

- **Descripción:** Waste and Resources Action Programme (WRAP) es una organización impulsada por el gobierno del Reino Unido para implementar una economía más eficiente en cuestión de recursos. Este proyecto ha conducido un gran número de iniciativas para reducir el desperdicio de alimentos además de proveer estimaciones de datos cuantitativos acerca del residuo de alimentos en el Reino Unido.
- **Puntos relevantes:** Firma de un acuerdo voluntario (Courtauld Commitment) por parte del sector de abarrotes en el Reino Unido, cuyo objetivo es mejorar el uso eficiente de los recursos y reducir desperdicios. Una herramienta de hoja de cálculo para un Caso de Negocio el cual une todos los factores que influyen en la valorización del residuo de alimentos en una secuencia lógica, a partir de fórmulas que permiten la cuantificación y comparación de diferentes opciones de procesamiento y resultados.

SwaVI

- **Descripción:** Sustainable Waste Valorisation Identifier desarrollado por Stone *et al.* (2019) en Reino Unido, el cual ayuda a las compañías a identificar la mejor opción de valorización de residuos de alimentos dependiendo su situación particular. Esto lo logra a través de cinco etapas las cuáles incluye un análisis de las características y composición del residuo a la mano, evaluación, seguido de una selección de las mejores opciones de valorización, selección de los indicadores más apropiados (medioambiental, económico, social, tecnológico y el respectivo a la marca). Finalmente clasifica las opciones de valorización dependiendo de las mediciones hechas en cada indicador.
- **Puntos relevantes:** Publicación que contiene todas las pautas y principios de la estructura SwaVI, y una guía paso a paso para su implementación junto con un caso de estudio.

PGIR (Programa de Gestión Integral de Residuos para la Ciudad de México, 2021 – 2025)

- **Descripción:** La CDMX es la quinta ciudad más poblada en el mundo con 9,209,944 habitantes, y se encuentra entre las mayores generadoras de residuos sólidos, con un volumen diario estimado de 13,149 toneladas y una generación per cápita de 1.40 kg/hab/día, razones por las cuales se busca la implementación de este programa cuyo objetivo es: Trazar las estrategias, metas y acciones dirigidas a reducir la generación de residuos, fortalecer la innovación, la infraestructura y el manejo, e incrementar el aprovechamiento para avanzar hacia una economía circular con la generación mínima de residuos en la CDMX en el período 2021-2025, con la participación incluyente, equitativa, corresponsable y efectiva de todos los sectores de la sociedad para la adopción de compromisos conjuntos para minimizar la problemática ambiental de los residuos.
- **Puntos relevantes:** En el Programa se describen los antecedentes, procedimientos y sus componentes y acciones.
Dentro de los componentes y acciones se encuentran 4 aristas en las cuales se definen las diferentes metas a cumplir, así como los años de ejecución y responsables:
 - I. Producción y Consumo Responsable
 - II. Manejo y Aprovechamiento
 - III. Cambio climático, Adaptación e Innovación
 - IV. Impulso al empleo

En el contexto del desperdicio de alimentos, se busca su reducción para contribuir a garantizar la seguridad alimentaria, eficientar las cadenas de suministro y producción y mitigar las emisiones de GEI asociadas a su manejo.

Dentro de las metas se menciona busca promover para 2025 un modelo cero residuos de alimentos, a través de un programa de certificación que promueva la prevención, reúso y reciclaje de residuos alimenticios en el sector privado.

Colaboración México-Holandesa para reducir la cantidad de residuos generada en la Central de Abastos (Ministerio de Agricultura, Naturaleza y Calidad Alimentaria Holandés, 2022)

- **Descripción:** Oficialmente iniciada el 31 de Enero de 2022 a través de una reunión virtual entre la Central de Abastos y la Universidad de Wageningen. La Central de Abastos de la Ciudad de México es el mercado mayorista de productos frescos más grande de América Latina, actualmente produce alrededor de 294 toneladas de residuo de alimentos al día, por esta razón se busca reducir esta cantidad y eventualmente implementar un modelo de cero residuos mediante la aplicación de principios de economía circular.
- **Puntos relevantes:** Dentro de las iniciativas para la utilización del residuo se incluyen la digestión anaeróbica, la producción de biodiesel a partir del aceite utilizado para cocinar, y donaciones a cocinas comunitarias dentro de la Ciudad de México.
La duración del proyecto fue de 14 meses, en donde ambas partes se

abocarán a generar datos primarios acerca de la pérdida y el residuo de alimentos (ya que no se cuenta con ellos), y a desarrollar herramientas y métodos para reducir y/o dar un nuevo uso al residuo que se genera. El proyecto está financiado por el Ministerio de Agricultura, Naturaleza y Calidad Alimentaria Holandés, y apoyado por la Embajada de Países Bajos en México.

Socialab #SinDesperdicioMéxico

- **Descripción:** Concurso llevado a cabo en 2020 donde se invitaba a emprendedores de México y LATAM con soluciones innovadoras para reducir la pérdida y el desperdicio de alimentos en México en la cadena de alimentos como la producción primaria, el procesamiento de alimentos y desperdicio generado en mercados de abasto, comercialización, industria hotelera y restaurantes, y hogares. Fueron recibidas 154 propuestas de distintos emprendedores.
- **Puntos relevantes:** Tres proyectos fueron los ganadores. El primer lugar fue otorgado a la iniciativa Save Fruit, la cual a través de una aplicación móvil puede extender la vida de anaquel de las frutas después de la cosecha y que puede ser utilizada por los productores para localizar unidades de almacenamientos, transporte, distribución, comercialización y consumo doméstico. El segundo lugar lo obtuvo Mi Fruta, Mi Pueblo cuya propuesta consistía en generar relaciones comerciales para frutos como la mandarina, naranja, mango, papaya, cacahuete y guayabas producidas en comunidades vulnerables de Oaxaca, para la minimización del residuo generado en la región, así como la promoción del desarrollo económico de esta.

La startup Preemar tuvo un especial reconocimiento por el desarrollo de un sistema llamado Pro-viden, el cual puede monitorear la calidad del agua en tiempo real, lo cual puede ser de utilidad para piscicultores y así mantener un ambiente libre de enfermedades y por lo tanto prevenir pérdidas. Estos emprendimientos también fueron ingresados a una incubadora para continuar apoyando el desarrollo de dichas innovaciones.

2. Estatus global de la pérdida y el desperdicio de alimentos

La cadena de suministro de alimentos comienza a partir de la fase agrícola, continúa con la manufactura y la venta minorista (retail), y finaliza con el consumo. Durante este ciclo de vida, los alimentos se pierden o se desperdician por razones tecnológicas, económicas y/o sociales (Galanakis, 2021), provocando un aumento en la cantidad de alimentos que no son consumidos.

Mundialmente, alrededor de 1.3 billones de toneladas de alimentos son desperdiciados anualmente desde la primera etapa de producción hasta su consumo (Arun *et al.*, 2020). De acuerdo con el informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2021), se calcula que el desperdicio de alimentos en los hogares, los establecimientos de venta al por menor y la industria de los servicios de alimentación asciende a 931 millones de toneladas cada año. Tan solo en México, la estimación del desperdicio de alimentos realizado en un estudio por Kemper *et al.* (2019), es de 94 kg/cápita por año, mientras que la cifra reportada por #SinDesperdicioMéxico asciende a las 20.4 millones de toneladas al año (Socialab, 2020). Las diferencias reportadas se deben a las discrepancias en las metodologías de medición de los residuos, así como la selección de los grupos de alimentos que se consideran.

Las Naciones Unidas estiman que la población mundial alcanzará los 9.3 billones de habitantes para el año 2050 y este crecimiento requerirá un incremento en la producción de alimentos del 70%. Por lo tanto, es necesario desarrollar formas para proveer más alimentos con menor gasto de recursos para que el sistema alimentario mundial pueda entregar mejores soluciones nutrimentales con menores costos medioambientales (Thyberg *et al.*, 2016).

Partiendo de estas cifras alarmantes la FAO declaró el 29 de septiembre de 2020 como el Día Internacional de la Sensibilización sobre la Pérdida y el Desperdicio de Alimentos. Este día se enfoca en concientizar la necesidad de reducir la pérdida y el desperdicio de alimentos, y cómo el hacerlo puede contribuir a un desarrollo sostenible (FAO, 2019).

Una creciente atención con respecto a la pérdida y desperdicio de alimentos se ve reflejada en las Metas del Desarrollo Sostenible (MDS) establecidas por la FAO, específicamente en el objetivo 12.3 que establece reducir a la mitad la pérdida y el desperdicio de los alimentos antes del 2030 (PNUMA, 2021). También tiene como propósito contribuir a otras MDS, como el objetivo de Cero Hambre (MDS 2) que propone terminar con el hambre, lograr una seguridad alimentaria y una mejor nutrición, así como sumarse a la promoción de una agricultura sostenible (FAO, 2019). En resumen, las razones de la pérdida y desperdicio de alimentos se pueden atribuir a distintos aspectos como el cambio climático, el uso de técnicas poco eficientes durante la cosecha, la falta de instalaciones para el almacenamiento y el mal uso del consumidor final (Ferri *et al.*, 2020).

La generación de materiales no comestibles, como semillas y cáscaras, presentes en las etapas de procesamiento y manufactura de alimentos durante la cadena de suministro, han sido clasificados como un tipo de residuo inevitable (Sheppard *et al.*, 2020) por lo que su integración a procesos de transformación para obtención de nuevos productos es inaplazable.

Específicamente dentro de la industria de procesamiento de alimentos el residuo y la pérdida de alimentos se genera por distintas razones y en diferentes etapas, por ejemplo, durante el procesamiento del alimento y debido a los programas de aseguramiento de calidad: apagones, equipos defectuosos, errores humanos, pérdidas generadas en los trabajos experimentales, lotes que se hayan detectado como contaminantes, muestras para análisis; también se genera a partir de las especificaciones de calidad que se establecen para su venta.

En la tabla 1 se menciona el costo económico de la pérdida y el residuo de alimentos en diversos países, cabe mencionar que dichas cifras corresponden a distintos sectores de la cadena de suministro, por lo que las metodologías de cuantificación, así como los desperdicios y pérdidas tomadas en cuenta pueden variar. El valor monetario de las 1.3 mil millones de toneladas que se pierden y se desperdician durante la cadena de suministro cada año, se estima en \$936 mil millones de dólares, sin contar los costos sociales y ambientales (Ishangulyyev *et al.*, 2019). Bajo una perspectiva financiera, social y medioambiental, en promedio se pierden 680 mil millones de dólares en países en vías de desarrollo, mientras que en países

desarrollados 310 mil millones (Amicarelli *et al.*, 2021). En contraste a estas cifras financieras, Ishangulyyev *et al.* (2019) reportan que la pérdida y el desperdicio de alimentos en países en vías de desarrollo suma aproximadamente el 44% del total global, mientras que los países desarrollados generan el 56% restante.

En resumen, la pérdida total de capital es una suma acumulada de la inversión hecha en (1) la producción agrícola (la cual incluye agua, fertilizantes, plaguicidas, alimento para ganado o semillas), (2) el transporte, (3) el procesamiento, (4) la preparación o el procesamiento de alimentos, y (5) los recursos empleados para una eliminación adecuada del residuo generado (Sharma *et al.*, 2021).

Tabla 1. Costos económicos (en USD) de la pérdida y el residuo de alimentos en diferentes países.

País	Estimado 10⁶ USD/año	Sectores incluidos
Nueva Zelanda*	589	Residuos domésticos evitables
Australia*	5,800	Todos
Global*	750,000	Todos (excluyendo mariscos)
Reino Unido*	18,300	Nivel doméstico
Estados Unidos*	197,700	Distribución evitable, residuos de venta minorista y consumidores
México**	25,000	Costo ambiental, pérdidas en ventas a nivel nacional y en mercados de exportación. No se incluyen consumidores y costos asociados para la disposición del residuo en sistemas de gestión de desechos sólidos, por lo que el verdadero costo financiero debe ser sustancialmente mayor.

Adaptado de Thyberg *et al.* (2016)* y Banco Mundial México (2020)**.

Es bien sabido que el mayor potencial en términos de reducción se encuentra en la venta minorista y en el sector de los consumidores en vez del sector de producción y procesamiento (Thyberg *et al.*, 2016), aún con esto en mente la industria de alimentos debe tomar cartas en el asunto y hacerse partícipe en todas las etapas de la cadena de suministro de alimentos y promover la reducción de residuos; en seguida se describe de forma general cómo impacta la industria de alimentos en el medio ambiente.

2.1. Impacto medioambiental de la producción de alimentos, su consumo y su desperdicio

Se reconoce cada vez más el hecho de que existen grandes problemáticas ambientales asociadas al sistema de suministro de alimentos, lo cual incluye su producción, uso de empaques, distribución y comercialización. La producción de alimentos afecta el ambiente y suma al detrimento de los ecosistemas (Thyberg *et al.*, 2016). Algunos factores atribuidos a la producción y consumo de alimentos que producen un impacto medioambiental, suman al cambio climático e implican un riesgo para la salud humana son: la erosión y cambios en la vocación del suelo, interferencia con los ciclos globales de nitrógeno y fósforo, la desertificación, deforestación, pérdida de la biodiversidad, el uso de agua y su contaminación, el uso de energía, el cambio climático y el uso de productos químicos, entre otros (Thyberg *et al.*, 2016, The Lancet Commissions, 2019).

Tan solo la producción de alimentos, que incluye la cadena de suministro, los sectores de pesca y ganadería, la producción de cultivos y el uso de suelo para cultivo, es responsable de un 26% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Además de estas emisiones que están causando un impacto medioambiental, se debe tener en cuenta la cantidad de uso de tierra destinada a estas actividades, el consumo de agua, la pérdida de biodiversidad, el enriquecimiento excesivo en nutrientes del agua salada y dulce por actividades humanas, lo que promueve el crecimiento de algas fitopláncticas, etc. (Ritchie *et al.*, 2022). Debe recordarse que, al desperdiciar alimentos comestibles, todos los recursos que se utilizaron para la fertilización, la cosecha, el procesamiento y el transporte, también son desperdiciados, resultando en un impacto medioambiental innecesario (Thyberg *et al.*, 2016).

Cuando se trata de hacer frente al cambio climático, el enfoque tiende a basarse en soluciones de 'energías limpias' como el despliegue de energía renovable o nuclear, mejoras en la eficiencia de energía, o la transición a transportes de bajas emisiones de carbono. Es cierto que la energía, ya sea en forma de electricidad, calor, transporte o procesos industriales, suma la mayoría de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (76%); sin embargo, el sistema global de alimentos, incluyendo producción y etapa postcosecha (como el procesamiento y distribución),

también es un contribuyente clave de emisiones y es un problema del cual aún no se tienen soluciones tecnológicas viables (Ritchie *et al.*, 2022).

Dentro del 26% de las emisiones globales de efecto invernadero que genera la producción de alimentos, hay cuatro elementos claves que son partícipes de este porcentaje como se observa en la figura 1.

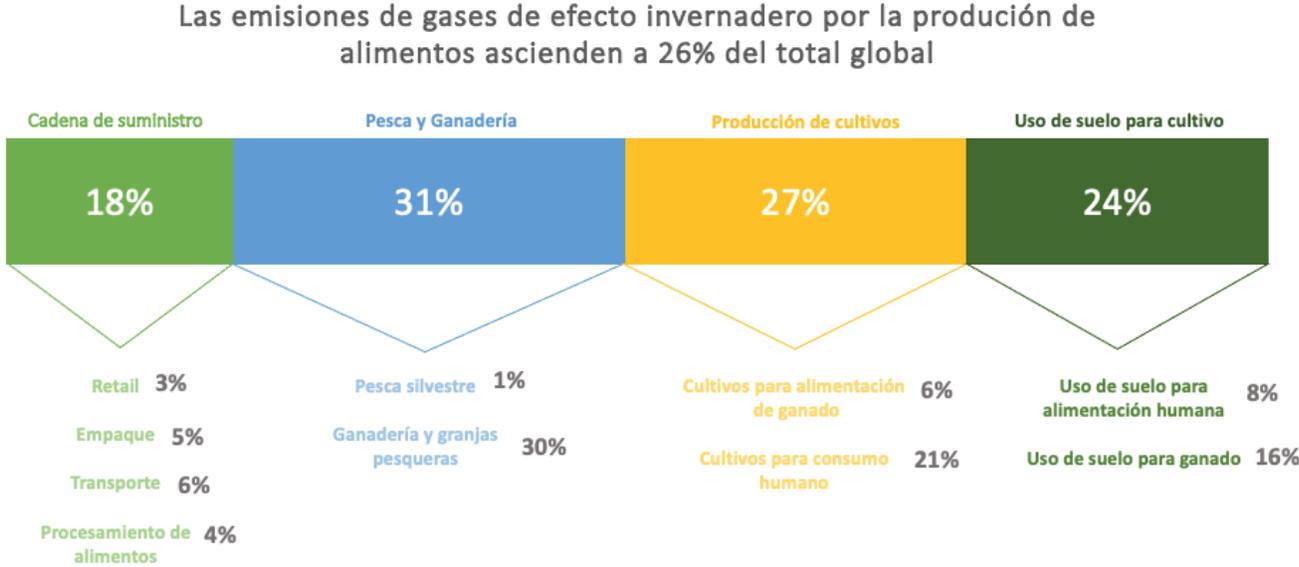


Figura 1. Representación de las emisiones de GEI provocadas por la producción de alimentos y la participación de cada sector.

Imagen adaptada de <https://ourworldindata.org/environmental-impacts-of-food> con datos de Poore, J. y Nemecek, T. (2018). *Reducing food's environmental impacts through producers and consumers.*

Con un enfoque en la cadena de suministro, el procesamiento de alimentos, el transporte, los empaques y la venta minorista, requieren de energía y disposición de recursos. Muchos asumen que consumir local es la clave para una dieta con una huella de carbono baja, sin embargo, las emisiones por transporte son regularmente un porcentaje pequeño de las emisiones totales por alimentos (sólo el 6% global). Si bien las emisiones de la cadena de suministro no parecen altas, un 18%, es esencial que se plantee una reducción mediante la prevención y tratamiento del residuo de alimentos (Ritchie *et al.*, 2022).

La reducción de las emisiones de la producción de alimentos será uno de los mayores retos en las décadas por venir; a diferencia de muchos aspectos de la producción de energía, donde existen oportunidades viables para el escalamiento de energías con baja huella de carbono; las formas en las cuales se puede reducir la huella de carbono en la agricultura son menos claras. Se necesitarán emplear varias soluciones entre las cuales se encuentran los cambios en las dietas, la reducción del desperdicio de alimentos, las mejoras en la eficiencia de la producción agrícola, y la innovación en tecnologías que permitan producir alimentos alternativos con baja huella de carbono, escalables y accesibles (Ritchie *et al.*, 2022).

Volviendo a las industrias de procesamiento de alimentos, éstas generan una dramática cantidad de desperdicios, los cuales consisten principalmente en residuos orgánicos del procesamiento de materias primas (Galanakis, 2021) que son depositados en vertederos. En estos, el residuo de alimentos se convierte en metano, un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global 25 veces más alto que el CO₂, por ello, reducir la cantidad de residuos que llegan a vertederos debe ser una prioridad (Thyberg *et al.*, 2016), o bien, deben implementarse sistemas para utilizar el metano en la generación de energía que pueda alimentar a la red eléctrica de la zona.

A nivel global, el alto contenido de carbono en el desperdicio de alimentos se estima que genera 4.4 gigatonnes de CO₂ anualmente lo cual contribuye significativamente al calentamiento global (Arun *et al.*, 2020). Por otra parte, la huella hídrica, por ejemplo, el consumo de agua superficial y subterránea se ha estimado en más de 250 km³ al año, mientras que 1.4 mil millones de hectáreas de tierras destinadas para cultivo fueron utilizadas en vano ya que los cultivos fueron perdidos o desperdiciados (Amicarelli *et al.*, 2021). Todo lo anterior constituye un impacto importante en la seguridad nutricional, calidad y seguridad alimentaria, recursos naturales y protección del medio ambiente, además de impactar el desarrollo sustentable y económico de los sistemas alimentarios.

De acuerdo con la FAO, la reducción de desperdicios desde un inicio permitirá la optimización de recursos, producirá beneficios a las industrias de procesamiento de alimentos y a la sociedad. Además, cambios recientes en los marcos legislativos, y la creciente atención hacia la sostenibilidad han estimulado a la industria para

reconsiderar el concepto de “recuperación” como una oportunidad (Galanakis, 2021). En resumen, se trata de la implementación de una larga serie de cambios y adaptaciones que podrían contribuir a disminuir, al final, los GEI y los diversos impactos al medio ambiente.

2.2. Economía circular, bioeconomía y sostenibilidad

El sistema alimentario global está compuesto por una extensa red de actores, incluyendo productores, distribuidores, empresas químicas, aseguradoras y consumidores, entre otros (Banu *et al.*, 2020). Dentro de este sistema, tiene lugar una cadena de valor que se divide en proveedores, que conforman el sistema agrícola, y consumidores, que conforman el sistema de alimentos urbano; este modelo de producción y consumo de alimentos actual se basa en un enfoque lineal, similar al modelo económico predominante, en donde al existir un inicio y un final se produce una cantidad importante de residuos.

Según el informe del Banco Mundial, alrededor del 87% de los residuos globales, que son desechados en vertederos al aire libre o en rellenos sanitarios, produce de 300 a 1000 kg de CO₂ por tonelada de residuo, basado en la materia orgánica presente (Banu *et al.*, 2020). En América Latina, se registraron alrededor de 4.6 gigatoneladas de CO₂ en 2014, de las cuales el 50% se asoció con actividades agrícolas y de uso de suelo (Bottausci *et al.*, 2022).

Con las cifras mencionadas anteriormente y entendiendo que existe una creciente demanda de alimentos global debido al crecimiento de la población y sumado a la presión existente por los recursos naturales limitados con los que se cuenta actualmente, investigadores y legisladores han reconocido la importancia de hacer un cambio en el paradigma del actual modelo lineal a una producción circular de alimentos (Banu *et al.*, 2020); en esta circularidad se reconoce el potencial que existe en la valorización del residuo de alimentos.

El concepto de economía circular (EC) debe su origen a la ecología industrial y al “metabolismo” industrial formulado en la década de los setenta y ochenta al buscar nuevas formas de llevar a cabo los distintos procesos industriales; dicha terminología fue introducida por Boulding y Jarrett, y más tarde por Pearce y Turner en 1990. La fundación Ellen MacArthur, una de las pioneras en trabajar en esta

área, define la EC como “una economía industrial que es restaurativa o regenerativa por intención y diseño” (Banu *et al.*, 2020).

Aunque este concepto no es reciente, ha ganado importancia entre diferentes gobiernos y legisladores como es el caso de la Unión Europea con su programa “Economía Circular Europea” de 2015 y la Directiva Europea 2008/98/EC8, y en China con la Ley de Promoción China de Economía Circular la cual se actualiza cada 5 años desde el año 2002.

En países desarrollados, el desperdicio de alimentos se genera principalmente por decisiones de los consumidores, debido a la percepción que se tiene respecto a la calidad del producto (aspectos visuales, golpes, color) pero los desperdicios también son generados desde el campo, el procesamiento y en la venta minorista en donde se separan los elementos que tienden a ser no deseados por el consumidor (Rakk *et al.*, 2016).

Una de las decisiones que logran paliar, aunque parcialmente este impacto es la instalación de digestores anaeróbicos, que ha sido satisfactoria en distintos países de la UE y Asia para estabilizar el desperdicio de alimentos. En Alemania, la separación de residuos se hace desde el inicio por medio de distintas clasificaciones, mientras que en Noruega se han instalado plantas transformadoras de biogas en donde se trata el 46% del residuo de alimentos (Banu *et al.*, 2020).

En cuanto a los países en desarrollo, el desperdicio se da principalmente por la falta de infraestructura y tecnología necesarias para la preservación de los alimentos, y al rápido deterioro debido a las difíciles condiciones climáticas (Rakk *et al.*, 2016). Los presupuestos limitados, legislaciones, políticas incompletas y gestiones inadecuadas en países en desarrollo son las causas de la disposición de la mayoría del residuo de alimentos en vertederos (Banu *et al.*, 2020) lo que conlleva a no poder aplicar un correcto manejo de los residuos de alimentos. El segundo método más utilizado para su disposición es el compostaje en un rango del 1-6%, y le sigue la digestión anaerobia la cual es raramente utilizada. Además de la producción de composta, los biocombustibles de primera generación son otra industria en crecimiento en los climas tropicales y subtropicales de Latinoamérica. A pesar de que se han implementado tecnologías que usan el residuo orgánico para transformarlo en energía, estas son insuficientes, no solo para la cantidad de

residuo sino también para abastecer significativamente la demanda energética regional y alcanzar las metas nacionales de sustentabilidad. Este fenómeno se debe a una serie de factores: las dificultades tecnológicas que este tipo de infraestructura requiere, junto a una falta de investigación y educación, inversión económica inasequible y legislaciones políticas débiles (Bottausci *et al.*, 2022).

Un aspecto importante de la generación de desperdicio de alimentos es la sobreproducción. Considerando que un excedente de aproximadamente 30% es necesario para compensar pérdidas inesperadas y para mantener la seguridad alimentaria, actualmente este excede hasta un 50% el cual se debe principalmente a las demandas del mercado (Banu *et al.*, 2020).

Se ha estimado que para el año 2025 el residuo sólido urbano de alimentos se elevará a 138 millones de toneladas (Sharma *et al.*, 2021), siendo su componente mayoritario aquel que proviene de las industrias procesadoras o de cocinas, es decir, restaurantes y/o hogares (Banu *et al.*, 2020).

La presencia de residuos de alimentos se debe directamente a un sistema de producción y consumo de alimentos insostenible; en contraste, la economía circular (EC) enfatiza la optimización en el uso de los recursos, mientras se utiliza el residuo de un proceso como materia prima de otro. La recuperación de nutrimentos post-cosecha, post-proceso, post-consumo acoplado a prácticas agrícolas regenerativas, reduciría así la necesidad de integrar nuevos nutrimentos de fuentes no renovables, como los fertilizantes sintéticos, contribuyendo a la renovación del ciclo de nutrimentos y a un crecimiento sustentable.

Este principio puede ser bien adoptado en el manejo de los residuos de alimentos, en donde no solo se crearían nuevos procesos para la reducción de la contaminación, sino también nuevas industrias y empleos.

Una EC que mantiene productos, componentes, y materiales en su mayor punto de utilidad y valor en todo momento, asegura el reúso y la renovación del recurso (Banu *et al.*, 2020).

En la literatura también se encuentra el uso de términos como bioeconomía, que surgió tras reconocer la presencia de recursos limitados para la producción de diferentes productos; esta se define como el proceso que transforma el conocimiento de la ciencia y la vida en productos nuevos, sustentables,

eficientes y competitivos (Bottausci *et al.*, 2022). Con el uso de este término se busca obtener el máximo rendimiento de los recursos sin poner en riesgo la capacidad de regenerarlos. La bioeconomía comprende aquellas partes de la economía que utilizan fuentes de recursos biológicos renovables de la tierra y el mar de forma responsable con el objetivo de beneficiar a los negocios, la sociedad y a la naturaleza por igual (Banu *et al.*, 2020).

De acuerdo con Banu *et al.* (2020), el uso del término “bioeconomía” ha pasado por tres fases. La primera tuvo un acercamiento considerando los principios de sustentabilidad, la segunda se dio con la aplicación del concepto de biotecnología para soportar la creciente demanda de recursos y, por último, la tercera fase en la cual nos encontramos, que se centra en la utilización de la biomasa.

Esta biomasa proviene de fuentes que van desde los recursos forestales a los agrícolas, y los residuos que pueden ser transformados en biorefinerías, las cuales son el lugar donde se integran los procesos de conversión de la biomasa.

Implementando un sistema de EC se puede mejorar el flujo de nutrientes, es decir reutilizarlos; en el contexto urbano dichos nutrientes pueden ser captados de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (a lo que también se le puede denominar biomasa) y procesarlos para que puedan ser regresados al suelo, en forma de fertilizantes, por mencionar un ejemplo (Banu *et al.*, 2020), pero como se ha comentado a lo largo de este trabajo, también se puede reutilizar de otras formas: como fuente para producción de bioenergía, usado como alimento para animales, elaboración de composta o buscar otros tipos de valorización.

Si desde el diseño de un proceso se introducen formas en la que los productos puedan ser reutilizados o que dicho proceso cuente con cierta flexibilidad para que sus subproductos puedan ser integrados a otras cadenas de valor, se podría reducir la cantidad de residuos generados.

Una legislación que tomar en cuenta es la Directiva 2008/98/CE de la UE, en la cual se menciona una jerarquía de residuos la cual establece el orden de prioridad en la legislación y la política, sobre la prevención y la gestión de los residuos que los países miembros deben considerar para proporcionar el mejor resultado medioambiental. La jerarquía se describe de la siguiente forma: a) prevención, b)

preparación para la reutilización, c) reciclado, d) otro tipo de valorización y e) eliminación

Aplicado a la gestión del residuo de alimentos también se recomienda dicha jerarquización. El paso que se recomienda desde un principio es la prevención en la generación de residuos a lo largo de toda la cadena de suministro, con esto se puede reducir el volumen de alimentos excedentes. Entre las acciones que pueden ser aplicadas en este paso están la promoción de nuevos comportamientos de consumo como el cambio en las dietas, tal como la reducción en la compra de productos ganaderos e incrementando el consumo de frutas y vegetales de temporada.

La siguiente opción es la reutilización a través de bancos de alimentos y centros de redistribución de alimentos para personas sin acceso a satisfacer sus necesidades alimenticias. Cuando estos métodos preventivos no se pueden llevar a cabo, ya que los alimentos (o sus partes) no puedan ser consumidos por las personas, se aplica un concepto en cascada en donde se busca la reutilización, el reciclaje y la recuperación para evitar el depósito de residuos en vertederos como se muestra en la figura 2; al aplicarlo se maximiza la efectividad en cuanto al uso de recursos mediante la utilización del residuo para alimentación de ganado, seguido del uso de la biomasa para la obtención de nuevos productos con valor agregado.

La recuperación a través del aprovechamiento de energía por digestión anaeróbica y/o elaboración de composta es recomendado cuando cualquiera de las otras opciones como la valorización, extracción de nutrientes o su uso como alimento para ganado no haya sido posible (Banu *et al.*, 2020). En este enfoque la aplicación del residuo como fuente de energía debe ser una de las últimas opciones, después de que otras estrategias de valorización hayan sido agotadas.

La figura 2 toma en cuenta toda la cadena de suministro de alimentos, como es de esperarse, no todas las etapas generan la misma cantidad de residuos; en la UE la cantidad más grande de residuos de alimentos es generada durante la etapa de consumo (46%), seguida de la producción primaria (25%), y el procesamiento y manufactura (24%) (JRC for the European Commission's Knowledge Centre for Bioeconomy, 2020).

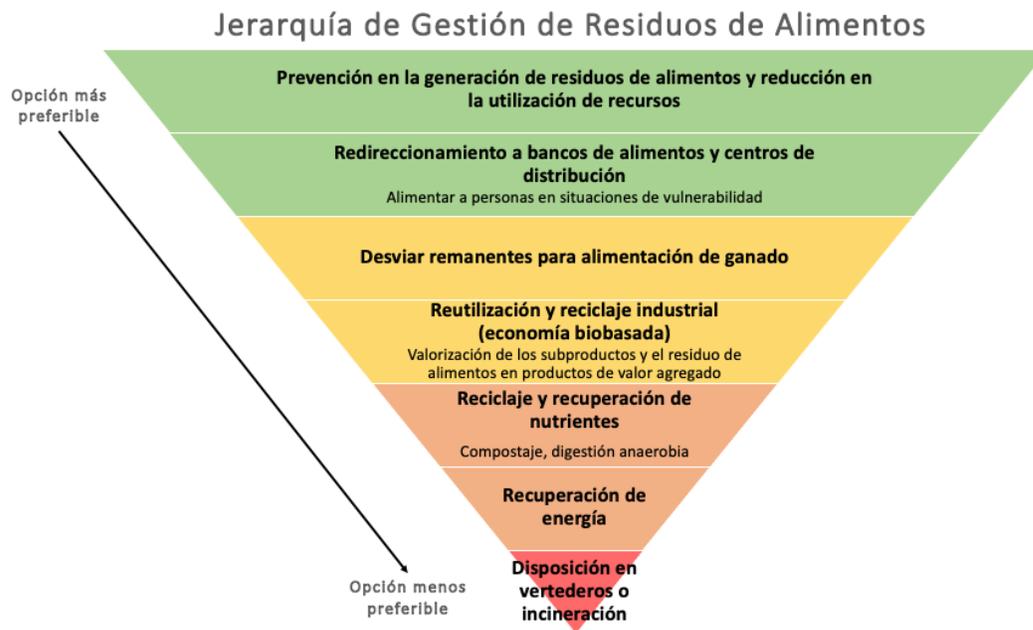


Figura 2. Jerarquía de Gestión de Residuos de Alimentos. Basada en: Banu *et al.* (2020), Directiva 2008/98/CE y JRC (2020).

Dado que cada etapa de la cadena de suministro es diferente, también lo pueden ser las estrategias para la gestión de residuos, por lo que este trabajo se centra en la etapa post-procesamiento, con una estrategia de valorización para la obtención de compuestos bioactivos los cuales se definirán en el Capítulo 6. El término “valorización”, se refiere a cualquier actividad de procesamiento o conversión cuyo objetivo es la reutilización, reciclaje y recuperación para obtener productos útiles con valor agregado (incluye químicos, materiales y combustibles).

Se hace la selección de la etapa de procesamiento ya que el residuo de alimentos generado en las plantas procesadoras de alimentos tiene un alto potencial de valorización, las diferentes fuentes que generan este residuo se presentan en grandes cantidades además de que presentan cierto grado de homogeneidad (JRC for the European Commission’s Knowledge Centre for Bioeconomy, 2020) a diferencia del residuo de alimentos urbano que es generado después del consumo, éste es heterogéneo e implica ser separado desde su origen antes de poder ser considerado para un proceso de valorización (Banu *et al.*, 2020).

La homogeneidad del residuo en la etapa de procesamiento facilita el uso de tecnologías de conversión y que se cuente con una gran cantidad del residuo

concentrado, lo que reduce los costos logísticos y de capital, al existir la posibilidad de que se valore dentro de la misma instancia generadora. Por lo tanto, esta etapa proporciona un suministro estable para los procesos de valorización y evita que el residuo de alimentos se disponga en vertederos.

Dentro de la etapa de procesamiento se pueden encontrar diferentes residuos dependiendo de la materia prima y el proceso de elaboración, muchos de los procesos de valorización que han sido y se están desarrollando se enfocan en el procesamiento de los residuos de fruta (44% del total de diferentes procesos de valorización), seguido de cereales (11%) y alimentos a base de pescado (11%); existen desarrollos de procesos enfocados en la obtención de polifenoles (25%), polisacáridos (14%), enzimas (10%) y ácidos grasos (10%) (JRC for the European Commission's Knowledge Centre for Bioeconomy, 2020).

En vista de estas cifras, se darán ejemplos concretos sobre la aplicación en residuos de origen vegetal dado que el contenido de moléculas bioactivas es relevante y se discutirán en el capítulo 6.

Ya delimitada la etapa de la cadena de suministro, así como el tipo de residuo en el que se centra este trabajo, es importante marcar la diferencia entre los términos sostenibilidad y sustentabilidad para su correcta aplicación dentro de los sistemas alimentarios.

2.2.1. Revisión de terminología: sostenibilidad y sustentabilidad

En este trabajo se han utilizado los términos *sostenibilidad* y *sustentabilidad* de distintas formas, por ejemplo, en “sistema alimentario sostenible” y “estrategias de sustentabilidad”, para avanzar en la investigación es necesario conocer las diferentes definiciones, ya que, en distintos contextos, las acepciones no son claras, dado que tergiversan o mezclan ideas o conceptos (Damián *et al.*, 2022).

Para comenzar es necesario remontarse a los orígenes de estos conceptos: en 1984 se reunió por primera vez la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo de la ONU para discutir la factibilidad de construir un futuro más próspero para la humanidad, entre cuyos objetivos estaban examinar los temas críticos de desarrollo económico y medio ambiente, y formular propuestas realistas al respecto. Esta reunión tuvo como resultado la publicación en 1987 de “Nuestro futuro común” o

también conocido como “Informe Brundtland”, donde se menciona el concepto en cuestión <<[...] está en manos de la humanidad hacer que el desarrollo sea sostenible, es decir, asegurar que satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias>> (Zarta, 2018).

Para algunos autores es a partir del Informe Brundtland que se acotó el término inglés “sustainable development” como desarrollo sostenible, y de ahí mismo nace la confusión entre si existe o no diferencia alguna entre los términos “desarrollo sostenible” y “desarrollo sustentable”. Parece ser que la única diferencia es el tipo de traducción que se hizo del inglés al español que, en el caso mexicano, se tradujo como desarrollo sostenible y en otros países de habla hispana, como desarrollo sustentable.

Damián *et al.* (2022) mencionan diferentes definiciones escritas por diferentes autores para los términos “sostenible”, “sustentable”, “desarrollo sostenible” y “desarrollo sustentable”; su investigación concluye que los términos se pueden llegar a usar como sinónimos o el significado puede cambiar dependiendo el contexto en el que se usen (uso en investigaciones, ONGs, fines gubernamentales y/o privados, etc.), dependiendo de las tendencias ideológicas y/o período histórico y generacional. A partir de la investigación de Damián *et al.* (2022) se tomaron los puntos más relevantes de cada concepto para llegar a los siguientes puntos que ayudarán a seguir con el desarrollo de este texto:

- El desarrollo sostenible es el proceso de mejora sistémico que se basa en el triple enfoque (economía, medio ambiente, sociedad) con énfasis en el sector económico, diferenciándose del concepto “sostenible” que ilustra la capacidad de sostenerse o mantenerse por sí solo en el tiempo. El uso del término “desarrollo sostenible” se usa como herramienta de apoyo para el crecimiento y la mejora en los procesos productivos, donde se reconoce que el problema ambiental es un factor crítico para las siguientes generaciones; el término es normativo y, a su vez, junto a la sostenibilidad busca preservar el futuro próximo en iguales o mejores condiciones de las que se mantienen actualmente.

- El término sustentabilidad se refiere a un sistema que entrelaza la sociedad, economía y ambiente, con una prevalencia en este último y con un enfoque crítico en los procesos contaminantes de las industrias; al usar el término “sustentable” se hace referencia a las cualidades de producir bienes y servicios que satisfagan las necesidades a través de proyectos limpios, no destructivos con la naturaleza, a fin de aprovechar correctamente los recursos medioambientales y garantizar la regeneración y el crecimiento natural, de manera que se alcance una equidad intergeneracional. El desarrollo sustentable es un proceso integral que garantiza la interacción entre la naturaleza y la sociedad, a través de la transformación de paradigmas locales y globales, tales como la inequidad, la pobreza, la sobrepoblación, la carencia de recursos y la biodiversidad, de tal forma que dentro de una nación brinda un equilibrio ambiental, social y económico.

Se encuentran algunas similitudes entre los términos, pero una de las principales diferencias es el enfoque que se le da, es decir, que algo sea “sostenible” lleva un énfasis en el sector económico, mientras que “sustentable” en temas relacionados al ambiente, además de que busca la integración activa de la sociedad para garantizar las necesidades de las generaciones futuras.

Por lo tanto, el uso de ambos términos dentro de este trabajo tomará dichas consideraciones además de que son válidos para el desarrollo y discusión del tema; por un lado se está explorando una estrategia sustentable para la valorización del residuo de alimentos obtenido de los procesos de transformación dentro de la industria, entendiendo que existe la posibilidad de integrarse a otras cadenas productivas y así mitigar daños medioambientales, para sumar a la construcción de un sistema alimentario sostenible, es decir, un sistema que contribuye a la seguridad alimentaria y nutrición de todos, de tal manera que las bases económicas, sociales, culturales y ecológicas para que la generación de alimentos para las futuras generaciones estén salvaguardadas (von Braun *et al.*, 2023).

De esta manera, se están integrando los enfoques económico, social y medioambiental: la estrategia de valorización de residuos de alimentos es sustentable ya que busca mitigar el daño medioambiental que se genera actualmente por su disposición y/o incineración, a través del cambio en el modelo

económico y de la creación de incentivos y políticas públicas y privadas descritas por el gobierno de cada localidad, para hacer un uso eficiente de los recursos; a la par se está contribuyendo a la transformación de un sistema alimentario sostenible ya que se busca una forma de hacer uso de recursos que aún cuentan con valor agregado en lugar de seguir explotando los recursos finitos del planeta.

El desarrollo sustentable, concepto de EC, se puede lograr mediante la adopción de tecnologías avanzadas para la valorización del residuo de alimentos (Sharma *et al.*, 2021). Al implementar un correcto sistema de EC, se pueden obtener múltiples beneficios. Por ejemplo, la creación de sistemas agroforestales inteligentes los cuales contribuyen a un desarrollo rural sustentable, se puede obtener energía limpia a partir de procesos bioenergéticos (como el biodiesel, bioetanol y biogas), y la instauración de un nivel confiable de seguridad alimentaria gracias a la implementación de sistema de producción simultáneo (uso de subproductos). Además de tener importantes ventajas sociales gracias a la creación de nuevos empleos y por lo tanto de ingresos adicionales (Bottausci *et al.*, 2022).

Dado que el concepto de EC considera el reúso y el reciclaje de todo tipo de residuo (Pleissner *et al.*, 2016), la valorización de los residuos de alimentos contribuye al desarrollo de una economía “biobasada”. Asimismo, esto ayuda a lograr beneficios sociales y sistemas de alimentación justos y saludables (Amicarelli *et al.*, 2021). La búsqueda de modelos económicos alternativos con enfoque es un desarrollo sostenible, es imperativo para poder mantener la vida de la humanidad o la vida como la conocemos, en el planeta.

La aplicación de una bioeconomía basada en la biomasa es de ayuda para las estrategias del manejo de residuo de alimentos (Banu *et al.*, 2020). La valorización del residuo de alimentos que se puede considerar como biomasa, abre nuevos horizontes de crecimiento económico, colocando los residuos como una oportunidad de contar con el insumo para bioprocesos que sintetizen productos bio-basados en un bucle circular (Sharma *et al.*, 2021), además de que brinda una solución viable para disminuir las pérdidas causadas por su eventual disposición en vertederos.

Al iniciar la búsqueda y selección de bibliografía adecuada para la realización de este proyecto, se encontró el uso de diferentes conceptos y definiciones (como

pérdida de alimentos, residuo de alimentos, desperdicio, por mencionar algunos) a manera de dirigir y delimitar las investigaciones, por lo que en el siguiente capítulo se realiza un análisis de dicha terminología.

2.3. Análisis de terminología: pérdida, desperdicio, residuo de alimentos y propuesta del uso del término ‘subproducto’

Las definiciones de “desperdicio de alimentos” y “pérdida de alimentos” en la cadena de suministro, han sido tema de desacuerdo entre distintos científicos (Beretta *et al.*, 2013; Ascherman-Witzel *et al.*, 2015; Thyberg *et al.*, 2016 y Chaboud *et al.*, 2017), es decir, no hay un acuerdo universal (Thyberg *et al.*, 2016) por lo que entender las diferencias entre pérdidas y desperdicio es un ejercicio importante, sumando la complejidad que el idioma español trae consigo al poder emplear términos como residuo y/o desperdicio. Muchas de estas definiciones reflejan las distintas problemáticas de los involucrados, la materia incluida, los medios de producción y los enfoques de gestión (Thyberg *et al.*, 2016); a continuación, se realiza una comparación de las definiciones de varios autores, con la finalidad de generar un punto de partida que dé mayor relevancia a la problemática principal y seleccionar los términos que se utilizarán en los siguientes capítulos.

Definiciones de “pérdida de alimentos” de acuerdo con diferentes autores.

FAO (2019) (<https://www.fao.org/3/ca6030en/ca6030en.pdf>)

Definición: Disminución en la cantidad o calidad de los alimentos como resultado de las decisiones y acciones de los proveedores en la cadena de suministro de alimentos, excluyendo a los minoristas, proveedores de servicios de alimentos y consumidores. Empíricamente, se refiere a cualquier alimento que se descarta, incinera o desecha de otra manera, a lo largo de la cadena de suministro de alimentos desde la cosecha/sacrificio/captura hasta, pero excluyendo, el nivel minorista, y no vuelve a ingresar en ninguna otra etapa de utilización productiva, como alimento o semilla.

Galanakis (2021)

Definición: Reducciones cualitativas y cuantitativas en la cantidad y el valor de los alimentos. La pérdida cualitativa significa una pérdida del valor calórico y nutricional, pérdida de calidad, y pérdida de comestibilidad. La pérdida cuantitativa se refiere al decremento de masa comestible de los alimentos a lo largo de la cadena de suministro en la cual específicamente se dirigen los alimentos al consumo humano. La pérdida de alimentos es generada durante las etapas de procesamiento, distribución, venta minorista, consumo final y post-consumo.

Sin embargo, la pérdida de alimentos durante el procesamiento industrial se debe a derrames (spillages) o degradación. En esta etapa, los residuos también se generan durante las actividades de lavado, pelado, cortado, hervido o por interrupciones en el proceso.

De Laurentiis (2021) (Joint Research Center: Servicio de Ciencia y Conocimiento de la Comisión Europea)

Definición: Cultivos alimentarios dejados en el campo y cultivos sin cosechar, la muerte de los animales previa al matadero, tanto en el transporte como los rechazados al llegar al matadero.

Chaboud et al. (2017)

Definición: Define la pérdida y el desperdicio de alimentos como todo alimento que no es consumido.

PNUMA (2021)

Definición: Se entiende por pérdidas de alimentos todas las cantidades de productos agrícolas o ganaderos básicos, aptos para consumo humano que, de forma directa o indirecta, abandonan por completo la cadena de producción y/o suministro posterior a la cosecha o el sacrificio al ser descartados o incinerados (entre otros procesos), y que no vuelven a utilizarse de otro modo (como en los piensos, los usos industriales, etc.) hasta llegar a la venta al por menor, sin incluirla. Se incluyen las pérdidas que se producen durante el almacenamiento, el transporte y el procesamiento, también en el caso de importaciones. Las pérdidas abarcan el producto básico en su conjunto, incluidas las partes no comestibles.

Sheppard et al. (2020)

Definición: El concepto de residuo de alimentos engloba las partes comestibles y no comestibles, y puede ser definido como las partes de alimentos originalmente destinados para alimentación humana pero que no llegan a ser comercializados, así como las partes no comestibles de los alimentos.

Thyberg et al. (2016)

Definición: Disminución en la masa comestible del alimento a través de la parte de la cadena de suministro de alimentos que específicamente se dirige para consumo humano. Lo que conduce a esto son limitaciones en la infraestructura, factores climáticos y medioambientales, y estándares de calidad, estética o seguridad. Incluye a los sectores de producción, post-cosecha y procesamiento.

Raak et al. (2017)

Definición: Cualquier material derivado de alimentos perdido durante el procesamiento en forma de residuos, lotes defectuosos, muestras de retención o análisis, o subproductos, que no son recuperados para consumo humano. Dichos materiales son conocidos como pérdidas post-cosecha o de alimentos porque están asociadas a la manufactura de alimentos y usualmente no son desperdiciados a propósito.

Definiciones de “desperdicio de alimentos” de acuerdo con diferentes autores.**FAO (2019)** (<https://www.fao.org/3/ca6030en/ca6030en.pdf>)

Definición: El desperdicio de alimentos se refiere a la disminución en la cantidad o calidad de los alimentos como resultado de las decisiones y acciones de los minoristas, proveedores de servicios alimentarios y consumidores.

Desperdicio de alimentos se define como aquel residuo vegetal el cual se refiere principalmente a las cáscaras, tallos, semillas, salvados y pulpas; el desperdicio animal incluye el desperdicio de la crianza de animales, del procesamiento de lácteos, mariscos y desperdicios del rastro, es decir, todo componente obtenido después del procesamiento de alimentos.

Por otra parte, la FAO diferencia el “desperdicio de alimentos” como una parte importante de la “pérdida de alimentos”, la cual se refiere a la remoción de alimentos apropiados para el consumo desde la cadena de suministro por decisión, o alimentos que han sido dejados a deteriorarse o caducar (expirar) como resultado de la negligencia (predominantemente pero no exclusivamente) del consumidor final, a nivel del hogar (Galanakis, 2015).

De Laurentiis (2021) (Joint Research Center: Servicio de Ciencia y Conocimiento de la Comisión Europea)

Definición: Desperdicio de alimentos: Todos los alimentos, incluyendo las partes comestibles y no comestibles, que se han convertido en desperdicio.

Desperdicio (definido en la Directiva 2008/98/EC): Cualquier sustancia u objeto, el cual el titular deshecha, trata o requiere descartar.

Reporte de Foresight Project (Proyecto de Previsión) por la Oficina de Gobierno para la Ciencia (Galanakis, 2015)

Definición: Material comestible destinado para el consumo humano que es descartado, perdido, se degrada o es consumido por plagas a medida que los alimentos viajan desde la cosecha hasta el consumidor.

En la etapa de procesamiento industrial, el desperdicio de alimentos puede ser generado durante el lavado, pelado, cortado, hervido o se da por interrupciones durante el proceso.

PNUMA (2021)

Definición: El desperdicio de alimentos se define como los alimentos (incluidas las bebidas) para consumo humano, y las partes no comestibles de estos, que se retiran de la cadena de suministro de alimentos en los siguientes sectores: elaboración de productos alimentarios (en determinadas circunstancias); tiendas de alimentación o venta minorista; servicios de alimentación y hogares.

Thyberg et al. (2016)

Definición: Alimentos que originalmente fueron producidos para consumo humano, pero después fueron descartados o no fueron consumidos. Incluye a los alimentos

que se descomponen antes de su uso y alimentos que aún eran comestibles, pero se descartan. Los principales conductores de este desperdicio son las decisiones hechas por el consumidor y/o negocios, así como los estándares de calidad, estética y seguridad. Los sectores que se ven involucrados son la venta minorista y los consumidores.

Como se puede observar, las distintas definiciones dependen del enfoque y del problema a exponer y/o solucionar.

Para generar una definición a partir de un objetivo en específico, según Chaboud y Daviron (2017), se deben tomar en cuenta los puntos que se muestran en la figura 3. Después de integrar los conceptos revisados en el diagrama de la figura 3, una posible definición y contextualización para que la industria de alimentos integre la materia orgánica remanente de su proceso principal de transformación, se formaría de la siguiente manera:

“El residuo de los procesos de transformación de la industria de alimentos es toda aquella materia orgánica, cuyo fin no se dispone para consumo humano”.

Este residuo se puede valorizar para recuperar biomateriales que pueden ser usados en otras industrias; con esto se busca reducir el desecho de las industrias de alimentos en vertederos y en algún punto, cerrar el ciclo para eliminar cualquier residuo con el fin de explorar una estrategia de EC.

Para el análisis de factibilidad de la estrategia, la información o los datos recopilados deben ser de naturaleza cuantitativa para determinar si efectivamente existe una reducción en el residuo de dicho procesamiento y/o impacta de manera positiva en el medio ambiente.

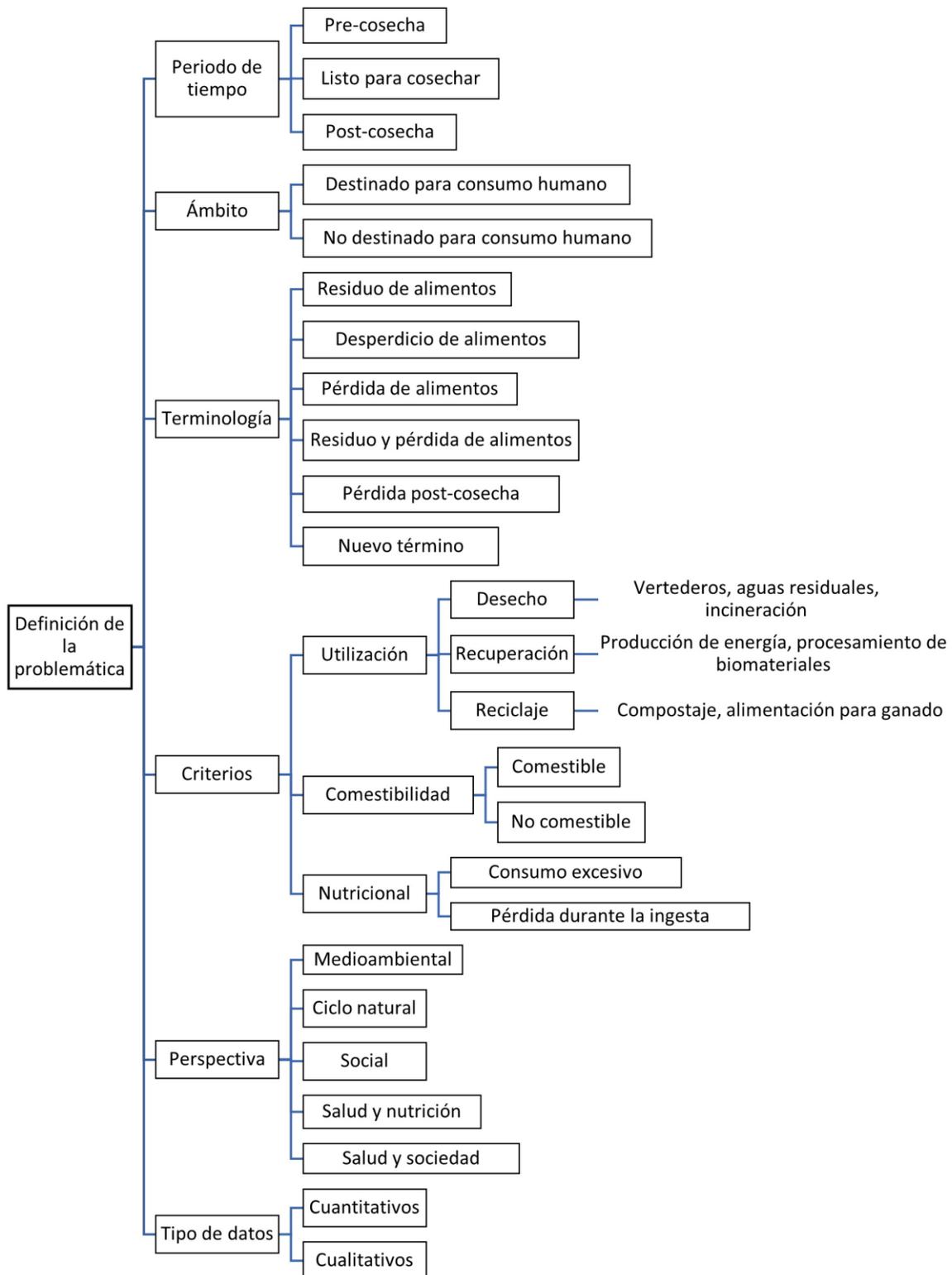


Figura 3. Puntos clave para definir la problemática relacionada con la pérdida y/o residuo de alimentos.

Adaptación de Chaboud, G. y Daviron, B. (2017).

Aunque se haya podido desarrollar este punto de partida, el problema a enfrentar surge después de consultar otras fuentes bibliográficas. La Comisión Europea aplica el término residuo de alimentos a todas las etapas de la cadena de suministro de los alimentos, pero no hace la diferencia entre las partes comestibles y no comestibles de los alimentos, tampoco considera como pérdida y residuo de alimentos a los productos redireccionados para la alimentación de ganado o para procesos de producción bio-económicos (Chaboud *et al.*, 2017).

El “residuo de alimentos” no indica una macro-categoría de residuo homogénea, sino una percepción de diferentes partes de los alimentos que son descartadas, estas pueden y deben seguir trayectorias específicas para su disposición (Amicarelli *et al.*, 2021). Ya que la materia orgánica remanente obtenida después de cualquier proceso dentro de la industria de alimentos será redireccionada para obtener nuevos productos de valor agregado, no se puede continuar definiéndolo como residuo.

Subproducto es un término comúnmente utilizado en la industria de alimentos y representa un producto formado durante el procesamiento que puede no contar directamente como un recurso útil por su productor. Sin embargo, los subproductos aún pueden contener sustancias con un valor en el mercado que se pueden convertir en productos útiles. La industria de alimentos utilizó el término “desperdicio” para caracterizar cualquier tipo de pérdida (por ejemplo, materias primas, sustancias procesadas, energía o incluso tiempo) y últimamente el término “subproductos desperdiciados” se usa cada vez más (Galanakis, 2021).

Por lo tanto, de ahora en adelante se utilizará el término *subproducto de alimentos* para hacer referencia a toda materia orgánica resultante de algún proceso de producción de alimentos que, debido al análisis de su composición, puede ser dirigida a un nuevo proceso para la obtención de moléculas bioactivas, energía, biomasa, etc.

Además de la falta de una definición en común dentro de las investigaciones, no se cuenta con una metodología homogénea y estandarizada para la medición de los residuos de alimentos, lo cual dificulta los procesos al momento de comparar y replicar estudios (Amicarelli *et al.*, 2021).

Los métodos apropiados y sugeridos por Amicarelli *et al.* (2021) para cuantificar el residuo de alimentos a lo largo de la cadena de suministro es a partir de mediciones directas, análisis de la composición del residuo, evaluación volumétrica, balance de masa, conteos y escaneos diarios. Es cierto que la medición precisa de estos residuos es esencial para proveer un mejor entendimiento, recolectar información y dar seguimiento a los puntos más relevantes en tiempo y forma.

Ya que se definió un punto de partida, en el cual se revisaron antecedentes y estatus global de la pérdida y el desperdicio de alimentos, así como las discrepancias en las definiciones y en las maneras de medir dicho desperdicio, es posible continuar con la revisión de las legislaciones pertinentes con relación a este tema; como es de esperarse cada país cuenta con una legislación específica por lo que solo se revisarán aquellas legislaciones que sean aplicables dentro del territorio mexicano.

3. Legislación y Antecedentes del Aprovechamiento de Subproductos Agroindustriales en México

Para integrar conceptos de EC y nuevas tecnologías, es de vital importancia el desarrollo de políticas públicas y legislaciones que prioricen la reducción del residuo resultante de procesos, la recuperación y la valorización de residuos orgánicos. Las legislaciones tienen como objetivo la promoción de la reducción de residuos y la prevención a través de penalizaciones contra aquellos que no obedezcan las provisiones regulatorias (Banu *et al.*, 2020). Es necesaria su aplicación en forma rigurosa además de la implementación de programas que eviten que el residuo termine en vertederos a través de técnicas de reducción, reciclaje y/o valorización. A continuación, se comentará el escenario en tema legislativo en el que se encuentra México.

México cuenta con una Ley General de Economía Circular (LGEC, https://www.senado.gob.mx/65/gaceta_del_senado/documento/101326) que fue aprobada por el Senado de la República el 4 de noviembre de 2021, sin embargo, se encuentra actualmente en discusión en la cámara de diputados.

Esta ley, en concordancia con la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) y la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), busca adoptar un nuevo modelo de producción y de aprovechamiento de los recursos mediante la preservación del capital natural, la optimización de procesos tomando en cuenta subproductos y materias primas secundarias, aplicando el reciclaje, la reutilización o el rediseño que integre criterios de EC, así como la difusión de información con la población para crear una cultura de consumo responsable y dirigir la transformación hacia comunidades sostenibles. También busca que, en las actividades económicas, se observen criterios de EC como la implementación de cadenas de valor que integren las materias primas secundarias (todos aquellos materiales al final de su vida útil, productos no conformes con especificaciones regulatorias, de seguridad alimentaria y calidad) para su aprovechamiento o valorización, ya sea en el mismo proceso que los generó u otros nuevos.

En el Capítulo IV de la ley se menciona que dichas materias primas secundarias podrán ser utilizadas cuando se atiendan los requerimientos que apliquen para el producto final, por lo que la caracterización física, química y biológica juega un rol importante en este tema. Cuando un subproducto no sea apto para su reincorporación en cadenas de valor, se podrá utilizar para fines energéticos, siguiendo la normatividad internacional (exportaciones) o nacional que aplique. De acuerdo con el Capítulo VI, se podrán otorgar incentivos económicos, de mercado y fiscales a personas físicas y morales a través de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público por la implementación de criterios de EC en sus procesos productivos, y para impulsar la cadena de valor y el uso de materias primas secundarias.

Como se mencionó anteriormente la LGPGIR también debe ser considerada para la aplicación de la LGEC, esta última aprobada el 8 de octubre de 2003 tiene por objetivo garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente sano y propiciar un desarrollo sustentable a través de la prevención, generación, valorización y gestión integral de los residuos peligrosos, sólidos urbanos y de manejo especial como residuos eléctricos y electrónicos, aceite de cocina usado, llantas, etc. Otro objetivo es fomentar la valorización, así como el desarrollo de mercados de subproductos y en tema de residuos sólidos urbanos, categoría en la que entran los residuos generados por el sector alimentario, se busca que los grandes generadores estén registrados para dar información acerca del tipo, volumen y forma de manejo de los residuos, así como su manejo integral.

Teniendo en cuenta la fecha de la aprobación de la ley parece ser que no hubo un gran avance en estos temas ya que es bien sabido que actualmente los residuos generados terminan en vertederos y poco se habla de su valorización, aun cuando se menciona que la disposición final solo debe realizarse cuando no fuera factible la valorización o tratamiento.

Como tal, no se menciona algo específico para los productores de alimentos industrializados y la generación de residuos que aún cuentan con valor agregado; la LGPGIR hace mayor énfasis en el manejo integral de los residuos peligrosos. Siendo que en 2021 se hicieron modificaciones sobre la ley aún se podrían adicionar

acciones para disminuir la pérdida y el residuo de alimentos, así como la vía de procesos de valorización.

Recientemente se aprobó la Ley de Economía Circular de la Ciudad de México (LECCDMX,

https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal_old/uploads/gacetas/eff885ae4de05e2cae8ff80377f5205b.pdf) el pasado 14 de febrero de 2023, en donde se definen los

principios políticos para la aplicación de un sistema de EC, con un enfoque regenerativo tomando en cuenta el análisis del ciclo de vida del producto para fomentar la valorización de subproductos evitando que se conviertan en residuos.

Esta ley mandata el encadenamiento productivo de los procesos, es decir en donde las industrias intercambian sus materiales (los residuos de una industria pueden ser materia prima de otra) bajo una perspectiva de eficiencia, colaboración y aprovechamiento. La participación de las empresas sigue siendo voluntaria, pero aquellas que quieran registrarse y cuenten con un programa en donde se cumplan criterios de circularidad pueden ser acreedoras de incentivos fiscales, así como de un distintivo de circularidad.

Se espera que las implementaciones de estas legislaciones cambien el esquema productivo del país y se realicen reformas para establecer criterios de obligatoriedad en todos los sectores, incluyendo el privado (para fines de este tema, las industrias de alimentos) para cumplir los objetivos que la ley sustenta.

4. Estrategias de manejo de residuos de alimentos y valorización de subproductos en la industria alimentaria

Existen tres áreas principales donde se generan residuos de alimentos: el deterioro de materias primas y productos durante las operaciones logísticas, subproductos obtenidos a partir del procesamiento de alimentos y dependiendo de la percepción de calidad según el consumidor (Raak *et al.*, 2017). Esto último se refiere a lo que el consumidor percibe visualmente, por ejemplo, es común que este deseche frutas que cuentan con golpes, estén mallugadas o que sean estéticamente diferentes a lo que comúnmente se comparte en las campañas publicitarias, pero también puede involucrar la generación de desechos por malinterpretaciones de las fechas de caducidad o consumo preferente, así como el desperdicio de comidas preparadas en casa que ya no le apetecen al consumidor.

La pérdida y el desperdicio de alimentos pueden ser reducidos, pero no pueden ser evitados completamente (Ferri *et al.*, 2020), en particular, la industria de alimentos genera una gran cantidad de desechos biodegradables y descarta grandes cantidades de residuos con una alta demanda de oxígeno para su completa descomposición. Por esta razón, a lo largo de la última década los requerimientos legales alrededor del mundo para la disposición de desechos se han vuelto más restrictivos, en donde se solicita la adopción de programas de manejo integral de residuos, así como la integración de procesos para su tratamiento (Galanakis, 2021), como se revisó en el capítulo 3 para el caso de México.

No obstante, tratar con desechos de alimentos no es fácil debido a su estabilidad biológica y la existencia de microorganismos patógenos y de descomposición que pueden causar un incremento de la actividad microbiana, por lo que su descomposición empieza rápidamente. El alto contenido de agua (particularmente en desperdicios vegetales y cárnicos) tienen un efecto importante en los costos de transporte (Galanakis, 2021).

Métodos generales como la incineración, fermentación anaeróbica, compostaje, desecho en vertederos, o su uso para aplicaciones agrícolas como alimento para ganado o fertilizantes, son las estrategias principales para la minimización y reutilización de los residuos. A lo largo de los últimos años, el manejo de nuevos

métodos y tratamientos que se enfocan en la recuperación y reutilización de los constituyentes valiosos del residuo y el desperdicio de alimentos han generado mucho interés (Galanakis, 2021).

Como se revisó esquemáticamente sobre la figura 2, prevenir la generación de residuos de alimentos tiene los más altos beneficios económicos, sociales y medioambientales en comparación a otros acercamientos de manejo de residuos (Thyberg *et al.*, 2016). Dependiendo de la etapa dentro de la cadena de valor, así como el tipo de alimento y/o procesamiento, será la composición y estabilidad del residuo, esto implica que se deba tomar una decisión y aplicar la jerarquía para la Gestión de Residuos de Alimentos que se revisó en el capítulo 3, por lo que aún puede existir el caso en el que no haya más alternativa que hacer uso de la disposición en vertederos o incineración.

Considerando lo anterior, el término *residuo de alimentos* puede seguir siendo utilizado ya que todo dependerá de la toma de decisiones del generador de la materia en cuestión, donde la estabilidad fisicoquímica, química y biológica juegan un rol importante. En este trabajo, se habla de subproducto cuando se busca integrarlo a un proceso de reciclaje, reutilización, recuperación y obtención de nuevos productos de valor agregado.

En la UE, una gran cantidad de las partes no comestibles producidas durante el procesamiento de diferentes grupos de alimentos es utilizado en otras industrias, y por lo tanto no es considerado como residuo de alimento. Por ejemplo, los residuos de molienda obtenidos del procesamiento de cereales, grano cervecero, la torta de aceite obtenida de la producción de aceite vegetal y los residuos del procesamiento de la papa son usualmente utilizados como alimentos para ganado (JRC for the European Commission's Knowledge Centre for Bioeconomy, 2020).

Las industrias de procesamiento de alimentos pueden dejar de implementar procesos que parten de una economía lineal y dejar de perpetuar el hecho de que la disposición en vertederos o incineración de los subproductos que generan es la única opción con la que se cuenta para su manejo. Cuando se sigue teniendo esta forma de actuar, en definitiva, se habla de residuos y desechos de alimentos, sin tomar en cuenta que existen otras formas de manejar integralmente dicha materia.

Entonces, hoy en día el manejo de los residuos en la industria de alimentos puede incluir numerosos tratamientos (métodos físicos, químicos, térmicos y biológicos) (Galanakis, 2021). A continuación, se mencionan las ventajas y desventajas de las diferentes estrategias de manejo de residuos de alimentos después del procesamiento de materias primas, por lo que no se están tomando en cuenta otras etapas de la cadena de suministro.

Descripción, ventajas y desventajas de las diferentes estrategias de manejo de residuos de alimentos utilizados en la etapa post-procesamiento de materias primas

Uso para alimentación de ganado

Descripción: Una de las prácticas más tradicionales, que involucra el direccionamiento de dichos residuos para alimentación de ganado vacuno, porcino, aves, etc.

Ventajas

- Los residuos ricos en grasa y proteína son adecuados para la alimentación de omnívoros, mientras que los sustratos con altos contenidos de celulosa y hemicelulosa pueden ser adecuados para la alimentación de rumiantes (Galanakis, 2021).
- Utilización de diversas materias orgánicas obtenidas post-procesamiento, por ejemplo, el grano utilizado en la producción de cerveza (Obersteiner *et al.*, 2021)
- La utilización de subproductos puede disminuir la necesidad de adquirir alimento para ganado (Obersteiner *et al.*, 2021)

Desventajas

- Debe considerarse que en el residuo pueden existir materiales tóxicos, con efectos antinutricionales y composiciones nutrimentales desbalanceadas que pueden ser un peligro para los animales (Galanakis, 2021).
- Los costos de transporte regularmente hacen que esta fuente de alimento sea tan costosa como el alimento convencional para ganado. Deben tenerse en cuenta los altos contenidos de humedad de los residuos, dado que esto aumenta su peso y causa mayores gastos en el transporte.
- Aun cuando se opte por secar y peletizar el residuo para facilitar el transporte, se gastarían combustibles fósiles.
- Al comparar el uso del residuo contra una dieta especializada para ganado, se encuentran diferencias a nivel de digestibilidad, palatabilidad, y la ausencia o presencia de aminoácidos esenciales y factores antinutricionales (Obersteiner *et al.*, 2021)

Compostaje

Descripción: El compostaje es la degradación aeróbica de materiales orgánicos en productos relativamente estables, por la acción de una variedad de microorganismos como hongos, bacterias y protozoarios (Galanakis, 2021). El objetivo del compostaje es la producción de fertilizantes.

Ventajas

- Producción de biomasa capaz de mejorar las propiedades estructurales del suelo, incrementar su capacidad de retención de agua, incrementar sus nutrientes y electrolitos, lograr la supervivencia de la microbiota y otros organismos, mejora la capacidad de almacenamiento de carbono en el suelo, y finalmente ayudar a que compuestos orgánicos regresen al suelo (Galanakis, 2021 y Obersteiner *et al.*, 2021) lo que impacta de forma positiva en el rendimiento del campo.
- Existen otras vertientes para su obtención como el vermicompostaje (uso de gusanos de tierra), sistemas de compostaje abiertos o cerrados.
- Se puede partir de mezclas inapropiadas en su proporción de C:N, humedad, carga microbiana, etc. (Obersteiner *et al.*, 2021).

Desventajas

- Principal alternativa a vertederos, en países y regiones en donde la cantidad de bioresiduos es fuertemente generada tanto a nivel doméstico como industrial (Bottausci *et al.*, 2022).
- No toda la composta obtenida es de buena calidad, es decir, no alcanza las propiedades de un fertilizante (Obersteiner *et al.*, 2021).
- La actividad biológica durante la conversión genera emisiones de metano y dióxido nitroso, lo que resulta en emisiones netas positivas (Obersteiner *et al.*, 2021).
- El impacto medioambiental dependerá del uso final de la composta (Obersteiner *et al.*, 2021).

Métodos de conversión en biocombustible

Descripción: Conversión de energía a partir de componentes orgánicos, recuperados en forma de calor o electricidad.

Incluye tratamientos termoquímicos: combustión, gasificación y pirólisis (Galanakis, 2021).

Ventajas

- Se pueden obtener biocombustibles como el biometano, biohidrógeno, bioetanol, y biodiesel mediante la aplicación de diferentes técnicas de biotecnología (Zeng *et al.*, 2022).
- Existen diferentes procesos para su obtención, como la digestión anaeróbica, tecnologías de fermentación con *Saccharomyces cerevisiae*, fotofermentación y fermentación oscura (sin luz) de biomasa acoplada, licuefacción, gasificación y carbonización hidrotermales (Zeng *et al.*, 2022).

Desventajas

- La materia de la cual se parte debe someterse a pre-tratamientos físicos, químicos o biológicos con ciertas desventajas como el alto consumo de energía, generación de contaminación por uso de reactivos, y degradación microbiológica que implica una inversión considerable de tiempo, cuando se usan dichos pretratamientos por separado, por lo que ocasionalmente se deben usarse combinaciones (Zeng *et al.*, 2022).
- Algunas tecnologías carecen de una mayor aplicabilidad debido a las diferencias en composición de la biomasa (Zeng *et al.*, 2022).
- Debido a la composición específica de cada lote de biomasa, debe realizarse una evaluación sistemática del método de transformación, así como un análisis del ciclo

de vida para medir los costos de industrialización, eficiencia e impactos medioambientales (Zeng *et al.*, 2022).

Fermentación o digestión anaeróbica (DA)

Descripción: La digestión ocurre bajo la exclusión de aire en un proceso fermentativo multi-etapa (hidrólisis, acidificación, formación de ácido acético y formación de metano). El resultado es biogas y materia remanente de la digestión; el biogas consiste típicamente de metano y CO₂ biogénico, con pequeñas proporciones de nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno y amoníaco. El metano es la parte del biogas que puede ser usada con fines energéticos (Obersteiner *et al.*, 2021).

También es considerado un método de conversión en biocombustible, pero debido a su relevancia dentro de la gestión de residuos se revisa por separado.

Ventajas

- Adecuado para materias con alto contenido de humedad o para aquellas que ya se encuentran en descomposición (Obersteiner *et al.*, 2021).
- El biogas puede ser utilizado para la producción de calor y electricidad, como combustible o para la generación de biometano que puede ser usado para enriquecer el contenido de metano en el suministro de gas natural (Obersteiner *et al.*, 2021).
- La fase sólida de la materia digerida puede utilizarse como humus, mientras que la fase líquida como fertilizante (Obersteiner *et al.*, 2021).

Desventajas

- El rendimiento de biogas y la cantidad obtenida de metano dependerá del sustrato del cual se parte, además de las tecnologías de digestión y las condiciones aplicadas. (Obersteiner *et al.*, 2021).
- Para evaluar el impacto medioambiental debe considerarse el tipo de sustrato ya que influye en la cantidad y calidad del biogas, el uso final del producto, el balance de energía, el proceso de fermentación y la temperatura de operación (fermentación líquida o sólida bajo condiciones mesofílicas o termofílicas), así como las operaciones que se realizan sobre la materia ya digerida (Obersteiner *et al.*, 2021).
- En comparación directa con otras fuentes de energía renovable (eólica, solar) la DA genera mayores emisiones de GEI (Obersteiner *et al.*, 2021).

Incineración

Descripción: Técnica de tratamiento de residuos que permite reducir su volumen, su peso y modificar su composición. Consiste en someter los residuos a un proceso de oxidación a elevada temperatura donde los componentes orgánicos de los desechos reaccionan con el oxígeno del aire y se transforman en dióxido de carbono y agua, además de producir otras emisiones. (Greenpeace, 2020). Se puede recuperar energía térmica y/o eléctrica a partir de esta estrategia.

Ventajas

- Las plantas de incineración cuentan con equipos combinados para la generación de calor y electricidad (Obersteiner *et al.*, 2021).
- En una evaluación de impacto ambiental con otros materiales que no sea el desperdicio de alimentos, la producción de energía puede verse como algo positivo (Obersteiner *et al.*, 2021).

- Se puede hacer uso de subproductos resultantes de otros tipos de tratamiento, por ejemplo, la fase sólida resultante de una DA.

Desventajas

- Tratamiento más común utilizado en Latinoamérica, debido a su bajo costo (Bottausci *et al.*, 2022).
- Resulta en la formación de dioxinas, que son contaminantes ambientales persistentes con capacidad de acumularse en el tejido de adiposo de animales, por lo que pueden llegar a ser consumidas por el ser humano lo cual se traduce en un problema de seguridad alimentaria (Banu *et al.*, 2020).
- Se pierden nutrimentos y compuestos químicos valiosos que pueden ser aprovechados (Banu *et al.*, 2020).
- Cuando los subproductos se envían directo a este procesamiento, si el contenido de humedad es de alrededor del 80%, se dificulta la operación resultando en un requerimiento mayor de combustible (Obersteiner *et al.*, 2021).
- No se puede obtener energía a partir del desperdicio de alimentos debido a su contenido de humedad, por lo que se obtienen emisiones de GEI debido a la combustión (Obersteiner *et al.*, 2021).

Vertido de Residuos

Descripción: Se define como la disposición, compresión, y el terraplén de relleno de residuos en los rellenos sanitarios e incluye cuatro etapas (Galanakis, 2021):

- 1) Hidrólisis/ degradación anaeróbica
- 2) Hidrólisis y fermentación
- 3) Acetogénesis
- 4) Metanogénesis

Ventajas

-Método común de disposición de residuos sólidos ya que es una de las opciones de gestión más barata.

Desventajas

- La oxidación tiene lugar durante el proceso y descomposición de los residuos y eventualmente conlleva a la producción de metano (GEI) y a la contaminación de aguas subterráneas, debido a la presencia de compuestos orgánicos y metales pesados, en los lixiviados (Galanakis, 2021).
- Es la opción menos preferible para manejar el residuo de alimentos debido a la pérdida de recursos y nutrimentos, por su impacto ambiental debido a la formación de metano y óxido nitroso por la descomposición.

Una vez revisadas las ventajas y desventajas de los diferentes manejos de residuos de alimentos, se discute la valorización de los subproductos de la industria alimentaria, específicamente los obtenidos después del procesamiento o transformación de materias primas para la obtención de productos que pueden ser comercializados. Se revisa que la recuperación y valorización de subproductos pueda sumar positivamente a una estrategia de contribución a un sistema alimentario, pero que, como los otros tipos de manejo, también cuenta con

ventajas y desventajas, así como puntos importantes a considerar para su factibilidad, escalabilidad e implementación en temas relacionados con tecnología, finanzas y sustentabilidad.

4.1. Recuperación y valorización

Como se mencionó anteriormente, la recuperación del residuo de alimentos y su conversión a productos económicamente viables podría ser una opción atractiva para la industria de alimentos, mediante la implementación de estrategias factibles, apoyadas a nivel nacional e internacional (Galanakis, 2021).

La valorización del residuo de alimentos no es solo benigna medioambientalmente, sino que también cuenta con beneficios por la recuperación de nutrientes, energía, e ingresos obtenidos (Banu *et al.*, 2020).

Utilizando esta materia orgánica se podrían reducir significativamente las cantidades de residuos de alimentos, así como crear nuevas oportunidades y beneficios para todos aquellos relacionados con el sistema de producción de alimentos (Galanakis, 2021). Por lo tanto, adaptando el uso de la materia orgánica remanente y tomándola en cuenta como un subproducto a través de la recuperación de componentes valiosos es una forma importante de incrementar la sostenibilidad de los sistemas de producción de alimentos.

Existen diferentes opciones para la valorización de los subproductos de alimentos para convertirlos en productos de valor agregado. Dentro de estas opciones se encuentran el reúso, el reciclaje y la recuperación.

Algunas de las vías para el reúso involucran el direccionamiento de excedentes de alimentos aptos para el consumo humano o para alimentación de ganado; un ejemplo de excedentes aptos para consumo humano dentro de la industria, pueden ser todas las muestras excedentes de producto terminado que se producen con el fin de realizar análisis de calidad, fisicoquímicos y sensoriales. El reciclaje incluye opciones que generan productos de bajo valor agregado como portadores de bioenergía (bioenergy carriers), como el biogas y biometano, bioetanol, biohidrógeno, biopetróleo y biocarbón, y opciones que pueden generar productos de alto valor agregado. Con un enfoque en este último punto, investigaciones y desarrollos recientes han llevado a la extracción y recuperación de componentes de

valor agregado para aplicaciones industriales, por ejemplo, cosméticos y nutracéuticos, conservación de alimentos y productos de empaque, farmacéuticos, etc. También existe la conversión de los subproductos en bloques de construcción biobasados que pueden ser utilizados en una amplia gama de aplicaciones como biomateriales (por ejemplo, biocerámica, biopolímeros, etc.) (JRC for the European Commission's Knowledge Centre for Bioeconomy, 2020).

Los subproductos del procesamiento de alimentos son la materia principal que los científicos utilizan en sus investigaciones para propósitos de recuperación de recursos (Galanakis, 2021). Por mencionar algunos ejemplos se incluyen los subproductos obtenidos en las industrias productoras de jugo de frutas. En el caso de la producción de jugo de manzana, 25% de la fruta se convierte en residuo después del procesamiento el cual contiene cáscaras, pulpa y semillas mientras que en el caso del jugo de mango 30-50% del peso de la fruta se convierte el residuo de procesamiento; en las cervecerías se genera entre 120 y 140 kg del grano gastado húmedo por metro cúbico de cerveza producida (Obersteiner *et al.*, 2021). Dado que estos ya son materiales procesados, susceptibles a crecimiento bacteriano, requieren de un tratamiento rápido o de un pre-tratamiento que permita su traslado hasta el sitio en donde se llevará a cabo el proceso de valorización; independientemente de que se necesite movilizar el subproducto es crucial hacer un manejo bajo buenas prácticas de manufactura (BPM), una recolección rápida en la fuente de producción, así como evitar trayectos largos para su tratamiento.

Las opciones actuales de valorización de la tabla 2, muestran formas para la utilización de subproductos de origen animal, pero principalmente de origen vegetal. Por mencionar algunas, se han obtenido y producido compuestos como antioxidantes, flavonoides, enzimas y proteínas, ésteres metílicos de ácidos grasos, glicerol y ácido erúxico a partir del residuo de frutas y vegetales, carnes y derivados, residuos de aceites y productos lácteos. La biomasa lignocelulósica, obtenida por ejemplo en el sector agrícola, como el bagazo de caña o la cascarilla de arroz, también ha sido utilizada para la producción de diversos compuestos, como fitoesteres, polipropileno, ácido acrílico y ésteres (Pleissner *et al.*, 2016).

El procesamiento de los subproductos de frutas es tratado principalmente para obtener sustancias utilizadas como aditivos alimentarios, productos farmacéuticos

y cosméticos, también compuestos fenólicos, aceites esenciales y otros ácidos grasos, así como licopeno y otros compuestos bioactivos. Estos también pueden ser utilizados para producir productos intermediarios, como enzimas, las cuales pueden ser utilizadas en un amplio rango de aplicaciones. Los residuos obtenidos del procesamiento de semillas para obtención de aceite, azúcar, cultivos almidonosos y vegetales pueden ser convertidos en polifenoles. Otras rutas de valorización altamente investigadas son la recuperación de hidrolizados de proteína y otros péptidos bioactivos a partir del residuo generado por el procesamiento de carne y pescado, y la producción de ácidos orgánicos del procesamiento de cereales, ambos para su uso como nutraceuticos y aditivos alimentarios (JRC for the European Commission's Knowledge Centre for Bioeconomy, 2020).

Tabla 2. Posibles compuestos obtenidos de la valorización de subproductos orgánicos y sus fuentes de origen.

Origen del subproducto	Subproducto	Compuestos objetivo
Frutas y vegetales	Cáscaras de cítricos	Pectina, flavonoides y aceites esenciales
	Pulpa y cáscara de manzana	Compuestos fenólicos y pectina
	Pulpa de durazno	Pectina
	Hueso de chabacano	Proteínas
	Cáscara de tomates y zanahorias	Carotenoides
	Orujo de aceituna Granza de café (Obersteiner <i>et al.</i> , 2021)	Compuestos fenólicos
	Biomasa celulósica	Fitoesteroles, polipropileno, ácido acrílico, isobutanol, tioésteres, ésteres
	Residuos lignocelulósicos	Polihidroxialcanoatos, ácido adípico
Raíces y tubérculos	Cáscara de papa	Compuestos fenólicos

Cereales	Salvado de arroz	Proteínas y fibras dietarias insolubles en agua
	Salvado de trigo	Hemicelulosa
	Cascarilla de avena	β -glucano
Oleaginosas y leguminosas	Residuos de aceites	Ésteres metílicos de ácidos grasos, glicerol, ácido erúcico
	Aguas residuales del procesamiento de soya	Fitoesteroles
Productos lácteos	Suero de queso	Lactosa, proteínas, fuente de carbono y nitrógeno
Pescados y mariscos	Cabezas, huesos y pieles	Proteínas y lípidos
Carne	Remanentes del rastro: plasma, hemoglobina (Obersteiner <i>et al.</i> , 2021)	Proteínas, enzimas, colágenos, gelatina, fuente de nitrógeno, minerales traza.

Modificado de Pleissner *et al.* (2016) y Galanakis (2021).

Si los subproductos son explotados para la recuperación de compuestos bioactivos, esto puede reducir el costo de producción y la cantidad de residuos que se generan. Por lo tanto, deben adoptarse estrategias efectivas para la extracción de estas moléculas bioactivas económicamente importantes (Ferri *et al.*, 2020).

Siguiendo las etapas apropiadas para la recuperación y el direccionamiento correcto de subproductos, el rendimiento de los compuestos objetivo puede ser maximizado al igual que el valor económico obtenido (Galanakis, 2021).

Los procesos y tecnologías utilizados en estas rutas de valorización son bastante diversos y combinan diferentes técnicas, desde métodos bioquímicos (vía enzimática, vía química e hidrólisis ácida, fermentación, extracción, etc.) hasta métodos termofísicos (extracción supercrítica con CO₂, ultrafiltración, extracción con ultrasonido, etc.). Sin embargo, la mayoría de estos procesos se encuentran en escala de laboratorio y su factibilidad a escala industrial aún debe probarse. Su potencial tecnológico y económico depende de diversos factores, como lo es la

disponibilidad y logística de las corrientes generadas de subproductos, los pretratamientos realizados y la capacidad para escalar industrialmente los procesos, (JRC for the European Commission's Knowledge Centre for Bioeconomy, 2020), dichos procesos se comentarán en el capítulo 6.

Como es de imaginarse la valorización puede aplicarse a distintas etapas de la cadena de suministro de alimentos, por lo que la revisión que se presentará a continuación toma un enfoque general para finalmente aplicarlo a la valorización de subproductos de origen vegetal post-procesamiento.

5. Valorización: Definición de la estrategia, clasificación y compuestos objetivo

En el estudio realizado por Sheppard *et al.*, 2020, titulado “Una infraestructura completa de apoyo en la toma de decisiones para la valorización de residuos de alimentos” reconoce que todo material, insumo y energía dispuesto para la producción de alimentos, en donde un tercio de dicha producción es desperdiciada, impacta de forma negativa en los estándares de vida a diferentes niveles alrededor del mundo, información que se comentó en el Capítulo 2 de este trabajo. En este se revisan y evalúan cuatro tipos de sistemas mencionados anteriormente en el Capítulo 1, como REFRESH, AgroCycle, WRAP y SwaVI para la toma de decisiones cuyo objetivo es la disminución del residuo de alimentos mediante su valorización. En un caso práctico, dependiendo del enfoque del cual se haya partido, las herramientas antes mencionadas, además de otras que se encuentran en la literatura, cuentan con fortalezas, debilidades y brechas de conocimiento (Sheppard *et al.*, 2020) que deben ser consideradas para poder ser aplicadas a un contexto y subproducto en particular dentro de la industria de alimentos.

La combinación de factores como la composición de subproductos, cantidades, tecnologías habilitadoras y principios de sustentabilidad asociados pueden ayudar a seleccionar una estrategia de valorización para cada efluente de residuos (Sheppard *et al.*, 2020).

Los acercamientos mencionados anteriormente para la valorización de residuos de alimentos tienen una lógica en general:

1. Identificar los tipos de materiales en flujo, cantidad, ubicación y tiempo (en el sitio de producción o a nivel de campo)
2. Caracterizar la composición de los subproductos (propiedades fisicoquímicas)
3. Identificar los productos y tecnologías de valorización más adecuados
4. Realizar un análisis a los datos obtenidos en los pasos 1 y 3 en materia económica, medioambiental y social

En cuanto a algunos inconvenientes que tienen en común, Sheppard *et al.* (2020) enlistó los siguientes:

- No se realiza la caracterización de los subproductos en términos de propiedades fisicoquímicas. Los datos reunidos pertenecen a un gran número de estudios de laboratorio y a nivel planta piloto. Como resultado, los potenciales productos de valorización no necesariamente pueden ser identificados desde las propiedades fisicoquímicas del material del cual se parte.
- Los datos de referencia se encuentran en documentos independientes, en lugar de estar incorporados a una herramienta electrónica con la que se pueda llevar un mejor control de los datos, así como realizar análisis estadísticos.
- No se hace uso de un enfoque transdisciplinario al momento de seleccionar la información que se utilizará como base de conocimiento.

En resumen, una gran cantidad de conocimiento se ha acumulado en cuanto a la valorización de los subproductos de alimentos técnicamente, junto con el entendimiento de diferentes criterios que necesitarían ser evaluados para evaluar el caso de negocio y su sustentabilidad. Sin embargo, ningún acercamiento ha sido capaz de integrar las decisiones, puntos de vista e interés de aplicación de todas las partes interesadas. Parte del desafío proviene del hecho de que el conocimiento acumulado se deriva principalmente y se dirige a un procesamiento lineal en donde se selecciona solo un tipo de subproducto de una fuente generadora de residuos para obtener un solo tipo de producto, aun cuando se ha partido de principios de bioeconomía (Sheppard *et al.*, 2020). En línea con lo anterior, las iniciativas no contienen fundamentos de ingeniería química y biológica que son necesarios para una valorización industrial óptima.

A pesar de la existencia de diferentes herramientas para la valorización del residuo de alimentos, muchas de estas fueron desarrolladas desde un punto de vista aislado. Para desarrollar un proceso en donde se pueda partir de lo general a lo específico Sheppard *et al.* (2020) proponen: **integrar** el conocimiento existente acerca del residuo de alimentos como materia prima, las tecnologías de conversión,

los posibles productos a obtener, y los costos e ingresos asociados; **segmentar** el conocimiento y asociar otros recursos en unidades que sean manejables fácilmente y capaces de establecerse, así como de crecer. Por último, **coordinar** la integración y segmentación del proceso de valorización junto con el sistema de recursos disponibles dentro de la industria de alimentos.

5.1. Integración

La mayoría de la investigación realizada para valorizar el residuo de alimentos se ha enfocado en extraer moléculas presentes en el material del cual se parte, las cuales también son el producto objetivo (Sheppard *et al.*, 2020). Lo sugerido es primero conocer la composición del subproducto por categoría (si es que en el sitio de producción hay varios de ellos, como fases sólidas o líquidas) y también individualmente. De esta manera se podrán determinar las características fisicoquímicas del subproducto, así como conocer los componentes mayoritarios y compuestos bioactivos; se necesita caracterizar en términos de grupos químicos, estructuras moleculares y las relaciones que contengan. Lo segundo, es determinar cuál será la ruta óptima y el uso de tecnologías para el procesamiento y definir los productos intermediarios o finales.

Una vez que se cuente con las categorías y subcategorías del subproducto, se pueden aplicar ciertas modificaciones químicas, junto con tecnologías de procesamiento, de manera que se pueda definir un proceso más factible para la obtención de productos intermediarios y/o finales.

En la literatura, se encontrarán varias formas en las que se puede caracterizar el subproducto, los diferentes compuestos que pueden extraerse, las combinaciones de dichos compuestos, y los pasos en los que se puede llevar a cabo la valorización, basándose en modelos termodinámicos y fundamentos teóricos para crear una herramienta que comprenda el valor funcional del subproducto (Sheppard *et al.*, 2020). La ventaja de este acercamiento es hacer uso de los datos obtenidos sobre la composición real del subproducto, como se muestra en la figura 4 para obtener productos específicos de valorización según sea el caso.

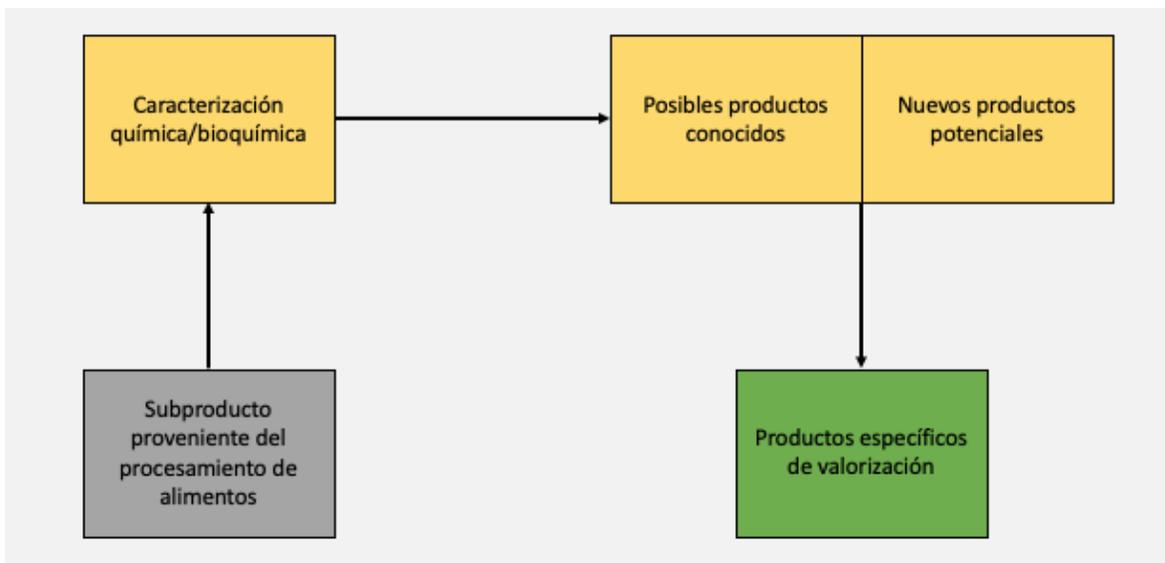


Figura 4. Esquema para la obtención de productos específicos de valorización dependiendo del subproducto de partida.

Modificado de Sheppard *et al.* (2020).

Sobre la etapa de integración se debe planear la ubicación de las operaciones de valorización de los subproductos dado que esto influye en la viabilidad comercial y en la huella medioambiental. Una opción obvia es localizar la planta en el mismo sitio donde se generan los subproductos, de esta manera se elimina la transportación, y también provee oportunidades de eficientar la integración de recursos entre ambos procesos (Sheppard *et al.*, 2020), solo es necesario elaborar un HACCP para evitar contaminaciones cruzadas en dado caso que este tratamiento se lleve a cabo en la misma instalación, o también se puede dedicar una locación aparte pero contigua al proceso principal.

Existen diversos enfoques metodológicos a partir de los cuales se puede diseñar un proceso de valorización dependiendo del subproducto, así como su composición, en donde también se integra la factibilidad económica y el impacto medioambiental. A continuación, se comentará la Estrategia de Recuperación Universal propuesta por Galanakis (2021) y el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) o mejor conocido como LCA, Life-Cycle Assessment por sus siglas en inglés, los cuales pueden ser un buen punto de partida para seleccionar los compuestos bioactivos que se pueden obtener, de la mano de una vía de procesamiento factible y eficiente.

Entre otros enfoques metodológicos se encuentran: Evaluación sustentable del ciclo de Vida, Costo del ciclo de vida, Análisis costo-beneficio, Contabilidad de costos completos y Análisis de decisión multicriterio (Stone *et al.*, 2019).

5.1.1. Estrategia de Recuperación Universal

La “Estrategia de Recuperación Universal” fue introducida por Galanakis en el 2015 como un acercamiento holístico para la gestión de todos los asuntos relativos a la recuperación de cualquier compuesto objetivo presente en cualquier fuente de subproductos de alimentos. El objetivo final es asegurar el desarrollo de metodologías de recuperación económicamente factibles y sustentables, así como la obtención de productos finales seguros. Inicialmente, los diferentes tipos y composiciones que existen en una forma particular de subproductos son identificados. El siguiente paso es recolectar toda la información necesaria concerniente a la disponibilidad del subproducto, su distribución en diferentes ubicaciones, la frecuencia de producción (estacional o no estacional), y finalmente las cantidades generadas (Galanakis, 2021).

Este acercamiento involucra la identificación de subproductos y los caracteriza en seis niveles, de manera esquemática estos niveles pueden verse en la figura 5.

1. Nivel Macroscópico

El primer nivel incluye la determinación de características macroscópicas, por ejemplo, las diferentes fases (agua, aceite y sólidos) dentro del subproducto. El ajuste del contenido de las fases podría ser una forma efectiva de estandarizar las diferentes composiciones de los sustratos iniciales.

Las macromoléculas pueden ser solubles o insolubles en agua, mientras que son generalmente insolubles en alcoholes. El peso molecular (PM), polaridad intermolecular, carga y punto isoeléctrico (pI) son los principales aspectos que afectan su recuperación con diferentes tecnologías. Las macromoléculas que se pueden encontrar en subproductos de alimentos son β -glucano, homogalacturonano, rhamno-galacturonano, arabinano, arabino-galactano, globulinas, albúminas y prolamina, por mencionar algunas (Galanakis, 2021).

2. Microestructura

El segundo nivel es la determinación de las características de la microestructura para tener la información general de la matriz antes de diseñar el proceso de recuperación. En este nivel, se puede observar la influencia de las paredes celulares, gránulos de almidón, gotas de agua y aceite, cristales de grasa y burbujas de gas, que también influyen en lo macroscópico, particularmente en la formación de estructuras de soporte intercaladas como dispersiones coloidales, emulsiones, fases amorfas y cristalinas, y geles (Sheppard *et al.*, 2020).

Los parámetros más importantes a tener en cuenta en este nivel es el PM y la presencia de sustituyentes como anillos aromáticos, grupos hidroxilo, carboxilo y metilo (Sheppard *et al.*, 2020). Los anillos aromáticos y las cadenas alifáticas proporcionan un comportamiento hidrofóbico, mientras que un número elevado de grupos hidroxilo y carboxilo conducen a una polaridad intermolecular en medios ácidos y el aumento en el volumen debido a la atracción con moléculas de agua (Galanakis, 2021).

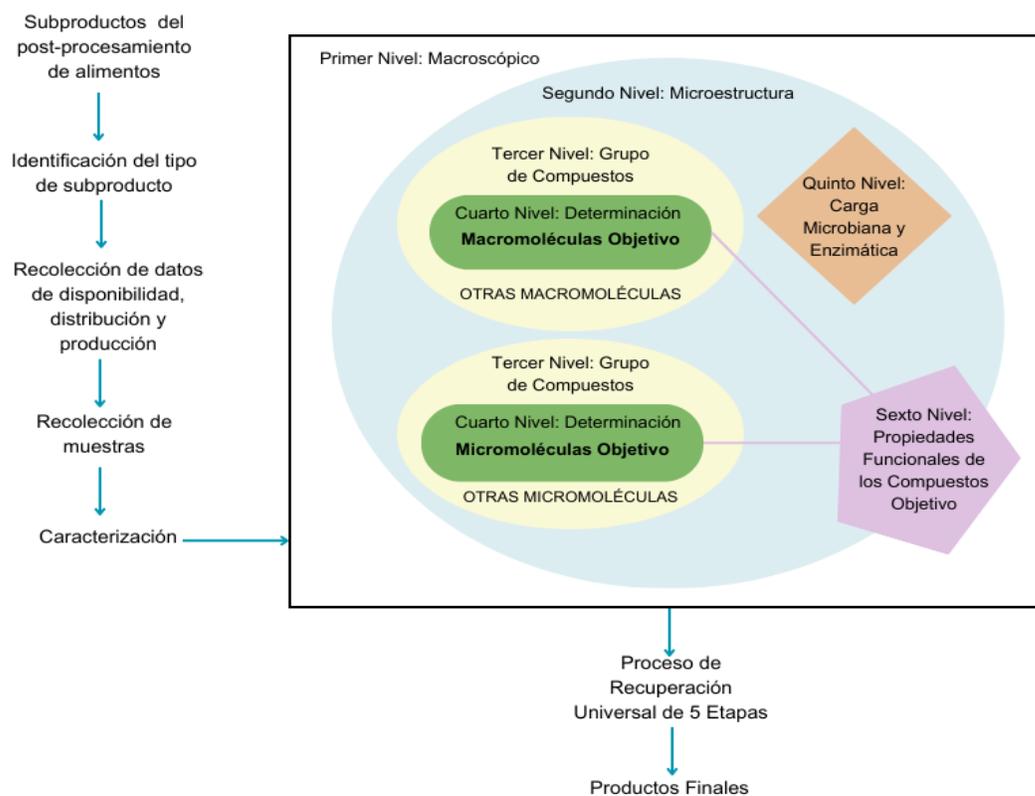


Figura 5. Desarrollo de la Estrategia de Recuperación Universal.

Modificado de Galanakis, 2021.

Las micromoléculas presentes en subproductos son, por ejemplo: monosacáridos, disacáridos, ácido hidroxicinámico y derivados, o-Difenoles, alcoholes fenólicos, aldehídos fenólicos, flavonoles, flavonas, antocianinas y carotenoides.

3. Agrupamiento de compuestos

El tercer nivel es la determinación de los grupos de compuestos como el total de fenoles, total de azúcares, carotenoides, fibras dietarias, proteínas, etc. Este paso permite tener una visión clara del contenido de macro y micromoléculas antes del diseño de su separación. Además, estas determinaciones (típicamente basadas en técnicas espectrofotométricas) permiten la detección rápida de numerosas muestras, así como la optimización de condiciones (Galanakis, 2021).

4. Determinación de macro- y micro-moléculas objetivo

Esto dependerá del tipo de subproducto y ciertamente de su composición y de la información de la literatura. Las determinaciones de laboratorio deberán hacerse sobre los subproductos a procesar en cada caso.

5. Carga microbiana y enzimática

El quinto nivel de caracterización incluye la determinación de la carga enzimática y microbiana. Estas causan deterioro del sustrato y en muchos casos pueden disminuir las propiedades funcionales de los compuestos objetivo. Por ejemplo, enzimas como la pectin metil esterasa, pectin liasa y la poligalacturonasa presente en subproductos de frutas pueden afectar la desesterificación de la pectina y su solubilización durante el proceso; en otros casos, las polifeniloxidasas pueden disminuir las propiedades antioxidantes de los polifenoles (Galanakis, 2021).

6. Propiedades funcionales de los compuestos objetivo

Las propiedades funcionales son particulares para cada compuesto objetivo, por lo que deberán ser analizadas en específico.

Cabe mencionar que una vez que se conocen las características de la macro- y microestructura, se debe integrar dicha información para predecir y controlar las propiedades del subproducto. Las estructuras de los materiales en cuestión están generalmente organizadas jerárquicamente desde moléculas a ensamblajes (forzados y autónomos) y organelos que después se compartimentalizan en células y tejidos. Los subproductos del post-procesamiento de alimentos son matrices multicomponente, modificados por los cambios físicos y químicos durante el

procesamiento, inducidos por componentes individuales como proteínas, fibras dietarias, polisacáridos, antioxidantes, azúcares y lípidos. Por ejemplo, antioxidantes pueden encontrarse atrapados en una compleja matriz macromolecular de gránulos hinchados de almidón y proteína unidos a organelos de plantas como los carotenoides presentes en zanahorias (Galanakis, 2021).

Las propiedades moleculares de los componentes individuales inducen ciertas respuestas a nivel microscópico que llevan a cambios a nivel macroscópico tales como las propiedades reológicas de la matriz. Las interacciones entre los niveles molecular, microscópico y macroscópico pueden ser explorados usando una combinación de datos reológicos, de composición y de estructura; esto debería de llevar a un mejor diseño de la estrategia de recuperación para cada compuesto objetivo por separado. La información cualitativa acerca del estado físico, superficie y estructuras internas del subproducto puede ser obtenida utilizando métodos microscópicos, como la microscopía de luz, microscopía electrónica de barrido, microscopía electrónica de transmisión, microscopía de escaneo láser con focal o microscopía de fuerza atómica (Galanakis, 2021).

Después de contar con esta información, se puede definir el proceso e identificar las tecnologías de recuperación, de acuerdo con cinco pasos de tratamiento, también denominados el Proceso de Recuperación Universal de Cinco Etapas:

1. Pre-tratamiento macroscópico
2. Separación de Macro- y Micro-Moléculas
3. Extracción
4. Aislamiento y Purificación
5. Formación de Producto

Puesto que los compuestos objetivo están presentes en menores cantidades en comparación a las fuentes iniciales, el proceso de recuperación puede hacer uso de conceptos de química analítica tales como la preparación del sustrato, extracción y purificación de los compuestos objetivo. Este proceso de recuperación puede lograrse a partir de las cinco etapas antes mencionadas, aunque todo depende del caso, donde uno o dos pasos pueden omitirse y/o cambiar el orden. La cuestión más importante es poder separar efectivamente los compuestos de la matriz del subproducto.

Para recuperar los compuestos objetivo es necesario el uso de solventes, es decir se necesita la solubilización de los solutos en uno o más solventes que permitan su transferencia en diferentes fases (sólida, líquida y vapor). Para la selección de estos solventes, se debe tomar en cuenta la solubilización del compuesto objetivo en función de la temperatura y/o las condiciones seleccionadas para el proceso (procesos presurizados, extracción con fluido supercrítico, fermentación), el solvente no deberá solubilizar otros compuestos o impurezas y, dependiendo de la aplicación final, la selección puede estar enfocada al uso de solventes grado alimenticio.

La Estrategia de Recuperación Universal permite ubicar mejoras en el proceso y mejorar la eficiencia y calidad del producto final mediante el conocimiento de las interacciones atómicas y moleculares del subproducto, que influyen en la obtención de las moléculas objetivo.

Los valores de parámetros macroscópicos y a nivel macro- y micro-molecular se pueden conseguir en bases de datos existentes o usando métodos de espectrofotometría (Sheppard *et al.*, 2020). Una herramienta utilizada en la estructura publicada por Galanakis *et al.* (2022), es el uso del diseño molecular asistido por computadora o por sus siglas en inglés computer-aided molecular design (CAMD). Este es un acercamiento para el diseño de rutas de ingeniería química para lograr las funciones objetivo a partir de un conjunto de moléculas potenciales (Sheppard *et al.*, 2020).

En cuanto a la ingeniería y diseño de procesos, existen paquetes de softwares como Aspen y ProSim, los cuales cuentan con una gran biblioteca de datos para diseñar procesos, así como algoritmos de cálculo para calcular la termodinámica de un sistema. Sin embargo, estos softwares aún no cuentan con la capacidad de desarrollar sistemas flexibles, eficientes en identificación y consiguiente aplicación. Un ejemplo de software que es capaz de ofrecer tecnologías para el procesamiento de subproductos y biorefinería, es el denominado USIM PAC de la compañía francesa Caspeo (Caspeo SARL, 2019).

La selección de tecnologías de procesamiento apropiadas para la valorización de subproductos es una consideración crítica para la viabilidad tanto económica como medioambiental (Sheppard *et al.*, 2020). Cada paso mencionado dentro del Proceso

de Recuperación Universal puede lograrse con tecnologías convencionales o emergentes dependiendo del costo del procesamiento, conveniencia, rendimientos, producto final, etc. En la tabla 3 se describen algunas de las tecnologías convencionales y emergentes aplicables en el Proceso de Recuperación Universal de Cinco Etapas. En general, las tecnologías emergentes pretenden superar problemas como el sobrecalentamiento, pérdidas en la funcionalidad e inestabilidad, pero los efectos positivos en costos y cuestiones de seguridad aún se encuentran bajo debate (Galanakis, 2021).

Tabla 3. Tecnologías convencionales y emergentes capaces de ser aplicadas en el proceso de recuperación universal de cinco pasos.

Etapas	Tecnologías Convencionales	Tecnologías Emergentes
Pre-tratamiento Macroscópico	<ul style="list-style-type: none"> - Molienda húmeda - Concentración térmica y/o de vacío - Prensado mecánico - Secado en frío - Centrifugación - Microfiltración 	<ul style="list-style-type: none"> - Secado en lecho de espuma (foam-mat drying) - Deshidratación electroosmótica - Tratamiento de plasma a baja temperatura
Separación de Macro- y Micro-moléculas	<ul style="list-style-type: none"> - Precipitación alcohólica - Ultrafiltración - Solubilización-precipitación isoelectrica - Extrusión 	<ul style="list-style-type: none"> - Microburbujas de gas coloidal (colloidal gas aphanes) - Cristalización asistida por ultrasonido - Extracción presurizada asistida por microondas
Extracción	<ul style="list-style-type: none"> - Con solventes - Ácida o alcalina - Asistida por microondas - Difusión con vapor - Hidrodestilación - Uso de fluidos supercríticos 	<ul style="list-style-type: none"> - Por ultrasonido - Ablación láser - Campo de pulsos eléctricos - Descarga eléctrica de alto voltaje - Membranas líquidas - Pervaporación
Aislamiento y Purificación	<ul style="list-style-type: none"> - Adsorción - Cromatografía - Nanofiltración - Electrodialisis 	<ul style="list-style-type: none"> - "Pesca" magnética - Separación acuosa de dos fases - Cromatografía de membrana de intercambio iónico

Formación del Producto	<ul style="list-style-type: none"> - Secado por aspersion - Liofilización - Emulsiones - Extrusión 	<ul style="list-style-type: none"> - Nanotecnología - Aglomeración de lecho fluidizado pulsado
------------------------	--	--

Modificado de Galanakis, 2021.

5.1.2. Análisis del Ciclo de Vida

La evaluación o análisis de ciclo de vida (conocido como LCA por su nombre en inglés) es un acercamiento de principio a fin para medir los impactos medioambientales de un proceso, servicio o producto (Lam *et al.*, 2018). Dicha evaluación fue estandarizada por la Organización Internacional para la Estandarización, Serie ISO 14040 en 1997, la cual fue revisada por última vez en 2006 (Amicarelli *et al.*, 2021 y Moresi *et al.*, 2021).

El primer intento de aplicar LCA se remonta al siglo XIX con la publicación del libro *The Coal Question*, escrito por William Stanley Jevons donde se exploraban las implicaciones de la dependencia del carbón en el Reino Unido, más adelante este enfoque fue utilizado en diferentes estudios elaborados en Estados Unidos y Europa lo que llevó a la publicación del primer manual para el análisis de energía industrial. Posteriormente, los estudios se extendieron para analizar los problemas medioambientales asociados con la disposición de residuos sólidos a escala global. Este acercamiento es utilizado en diferentes industrias, para desarrollos inmobiliarios, en el sector agrícola y en el sector de alimentos para apoyar al negocio y las estrategias de Investigación y Desarrollo, para el diseño de procesos y productos, etiquetado y la aplicación de declaraciones. Actualmente, LCA es una herramienta apropiada y confiable para evaluar la carga medioambiental de un producto, proceso, o actividad durante todo su ciclo de vida; permite la identificación de cualquier acción de mitigación para reducir los impactos medioambientales de los productos o procesos y limita el uso de recursos a través de todos los pasos del ciclo de vida (Moresi *et al.*, 2021).

El procedimiento de trabajo de la norma ISO 14040 involucra las siguientes cuatro fases:

1. Meta y Definición del alcance
2. Análisis del Inventario del ciclo de vida o Life Cycle inventory (LCI)

3. Evaluación del impacto del ciclo de vida o Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

4. Interpretación del Ciclo de Vida o Life Cycle Interpretation

La primera fase define los objetivos del estudio, límites del sistema, unidades funcionales o de referencia, procedimientos de asignación, suposiciones y limitaciones. Generalmente, las unidades funcionales más utilizadas en el ámbito de agricultura y alimentos son de masa (kg) o volumen (L) y el contenido de energía expresado en kilo Joule (kJ) (Moresi *et al.*, 2021).

La segunda fase es la aplicación de balances de masa y energía dentro de los límites del sistema previamente definidos. Todas las entradas y salidas de datos deben ser incluidas, en particular el consumo de energías renovables y no renovables, materias primas y de empaque, agua, obtención del producto final, coproductos, subproductos, emisiones al aire (CO₂, CH₄, SO₂, NO_x, CO) y emisiones por el uso de suelo (NH₃, NO₃⁻, NO₂), efluentes (suero, aceite) en términos de sólidos suspendidos totales, demanda química y biológica de oxígeno, compuestos orgánicos clorados y residuos sólidos (residuos sólidos municipales, subproductos de alimentos). Esta fase es una de las más laboriosas y onerosas en comparación a otras fases del LCA, debido a la cantidad de datos que debe ser recolectada. Los datos recolectados o medidos directamente por la compañía o empresa son conocidos como los datos primarios, mientras que aquellos extraídos de la literatura, softwares y bibliotecas de LCA cuentan como datos secundarios (Moresi *et al.*, 2021).

El análisis de LCI es la fase en la que se cuentan las entradas y salidas de los materiales y energía del sistema en estudio. La cuenta total provee información para realizar una estimación de los impactos medioambientales en las siguientes etapas del proceso (Lam *et al.*, 2018).

En el caso de la energía, todas las fuentes, como combustibles y electricidad necesitan considerar la eficiencia y las pérdidas. Generalmente, los resultados del análisis del inventario se expresan en las unidades funcionales ya establecidas y se reportan en una tabla con todos los datos de entrada y salida de las diferentes fases del ciclo de vida incluidos dentro de los límites del sistema (Moresi *et al.*, 2021).

Por otra parte, también se enfatiza el potencial que tiene el residuo de alimentos sobre el calentamiento global, en cuestión de emisiones, uso de agua y tierras, y el uso de recursos (por ejemplo, mide cuánta energía será absorbida por la emisión de 1 tonelada de gas en un periodo de tiempo, expresada como las emisiones de 1 tonelada de dióxido de carbono), como un indicador común para comparar diferentes estudios, esto provee información útil acerca del impacto del residuo de alimentos y puntos a tener en cuenta para la realización de políticas medioambientales (Amicarelli *et al.*, 2021).

La tercera fase se relaciona con lo obtenido en LCI respecto del impacto potencial sobre la salud humana, degradación del medio ambiente y el agotamiento de recursos. Siguiendo la norma ISO 14040, esta fase incluye los siguientes pasos (Moresi *et al.*, 2021):

1. Selección de las categorías de impacto ambiental más apropiadas, indicadores y modelos de caracterización para la meta y alcance del LCA.
2. Clasificación del impacto medioambiental mediante la asignación de los resultados de LCI sobre las categorías de impacto seleccionadas. Por ejemplo, la cantidad de emisiones de GEI se pueden ubicar en la categoría de “cambio climático”.
3. Caracterización del impacto ambiental mediante cálculos con ecuaciones pertinentes.
4. Presentación de los datos caracterizados empleando un perfil del LCIA usando los indicadores seleccionados.
5. Aplicación de características opcionales del LCIA, como normalización, agrupamiento, ponderación y calidad de los datos.

La cuarta fase tiene por objetivo discutir los resultados de LCI y LCIA, obtener conclusiones y sugerencias, involucrando (Moresi *et al.*, 2021):

1. Identificar los problemas más significativos resultantes de las fases de LCI y LCIA, por ejemplo, en el caso del inventario, la importancia de la fuente de energía utilizada, emisiones, residuos formados, mientras que, en la evaluación de impactos, son las categorías más relevantes que están involucradas en el ciclo de vida, como el cultivo y el procesamiento.

2. Controles de evaluación para los resultados del LCA mediante la evaluación de los datos, estadísticas e incertidumbres asociadas, y una revisión de la consistencia hacia la meta y alcance.
3. Conclusiones, limitaciones y recomendaciones para los lectores, revisores y personas a cargo de la toma de decisiones del presente análisis.

El acercamiento del LCA minimiza una puntuación subjetiva, pero depende del acceso a información especializada en bases de datos de terceros (Sheppard *et al.*, 2020), como Ecoinvent, una asociación sin fines de lucro basada en Zúrich, Suiza dedicada a proveer datos de alta calidad para las evaluaciones de sustentabilidad a nivel mundial (Ecoinvent, 2023). Otras bases de datos que pueden utilizarse son LCA food database, World food life cycle assessment database (WFLDB) y Agri-footprint (Del Borghi *et al.*, 2020).

Las aplicaciones futuras deben tener una evolución. En estos términos, el siguiente paso dentro de la integración de conocimiento debe simplificar los elementos del LCA para permitir a los usuarios identificar y enfocarse en los impactos ambientales principales (Sheppard *et al.*, 2020), además de expandirse para cubrir los ciclos de carbono y de nutrientes.

Una herramienta que puede ser de uso para la aplicación de este acercamiento es la Calculadora de Valor de la Pérdida y Residuos de Alimentos (<https://flwprotocol.org/why-measure/food-loss-and-waste-value-calculator/>), desarrollada por Quantis en 2019 junto con el Instituto de Recursos del Mundo (World Resources Institute). Entre las categorías de impactos ambientales se encuentran el cambio climático, huella de carbono, escasez de agua, uso de suelo y eutroficación. Esta herramienta también cuantifica el valor nutrimental de los alimentos que son desperdiciados (Sheppard *et al.*, 2020).

5.1.3. Clasificación y compuestos objetivo

Los subproductos de alimentos tienen componentes diversos a partir de los cuales se pueden obtener nuevos productos con un alto valor agregado. Estos pueden ser extraídos, purificados, y caracterizados por tecnologías existentes o emergentes, lo cual permite el desarrollo de nuevas aplicaciones comerciales en alimentos y sectores no relacionados (farmacéutico, biomédico, cosmético, etc.). Los

subproductos obtenidos de distintas fuentes de la industria de alimentos pueden ser divididos en dos grupos principales y siete subcategorías de acuerdo con la clasificación de Galanakis, 2021, que se reportan en la tabla 4.

Tabla 4. Clasificación de los subproductos obtenidos en la industria de alimentos.

Origen	
Vegetal	Animal
Cereales	Productos cárnicos
Raíces y tubérculos	Pescados y mariscos
Oleaginosas y legumbres	Productos lácteos
Frutas y vegetales	

Independientemente de la rama de la industria alimentaria que esté bajo investigación, los subproductos son generados a través de las distintas etapas de la cadena de suministro. La mayoría de las investigaciones se enfocan en la recuperación de compuestos presentes en los subproductos generados durante las etapas agrícola y de procesamiento de alimentos (Galanakis, 2021).

Cuando de valorizar se habla, es más fácil integrar los subproductos del procesamiento de alimentos que los residuos que se generan al final de cadena de suministro dada su heterogeneidad, la necesidad de transportarlo a sitios específicos y la reducción de estabilidad biológica debido al crecimiento de microorganismos.

Es importante que las industrias procesadoras de alimentos tengan bien ubicados los diferentes subproductos que se pueden generar a partir de un proceso específico, y posterior a la obtención del producto final debido a problemas durante el proceso o resultantes de no haber cumplido con los estándares de calidad; al tener bien ubicada la corriente de generación de subproducto, el diseño del proceso de valorización puede llevarse de forma más amigable al tener en consideración todas las variables que impactarán en la obtención de compuestos objetivo. A

continuación, se mencionarán algunos compuestos objetivo que han sido identificados en diferentes subproductos de origen vegetal.

- **Cereales**

Se refiere a los miembros de la familia de las gramíneas, la cual comprende nueve especies: (1) trigo (*Triticum*), (2) centeno (*Secale*), (3) cebada (*Hordeum*), (4) avena (*Avena*), (5) arroz (*Oryza*), (6) mijo (*Pennisetum*), (7) maíz (*Zea*), (8) sorgo (*Sorghum*) y (9) triticale (híbrido de trigo y cebada).

Los cereales y sus derivados, además de proveer de energía, por sus carbohidratos, son fuentes importantes de proteínas, lípidos, vitaminas, principalmente las del complejo B y vitamina E, elementos inorgánicos y traza. Son conocidos por su alto contenido de fitoquímicos con efectos benéficos bien establecidos en la salud humana pero también cuentan con factores antinutricionales como el ácido fítico (Galanakis, 2021).

El procesamiento de cereales genera alrededor del 12.9% del residuo de alimentos global (Fărcas *et al.*, 2022). El paso de procesamiento más común al que se someten los granos de cereales es la molienda en seco (trigo y centeno), el descascarillado (de arroz, avena, cebada) y el proceso de malteado. En la molienda en seco, las capas de salvado y germen se separan del endospermo almidonoso, junto con las cáscaras y los residuos del pulido. Por otro lado, la molienda húmeda del maíz tiene como objetivo extraer la máxima cantidad posible de gránulos de almidón nativos o no dañados, proporcionando así sólidos de maceración (ricos en nutrientes valiosos para la industria farmacéutica), germen (destinado a la industria de producción de aceite), salvado y gluten como subproductos (Galanakis, 2021).

El descascarillado es una técnica abrasiva que gradualmente elimina la cubierta de la semilla (testa y pericarpio), las capas de aleurona, subaleurona y el germen. Este proceso resulta en granos pulidos y subproductos con una alta concentración de compuestos bioactivos. El proceso de malteado de los granos incluye el remojo, la germinación y el secado en horno. Durante este proceso, las enzimas consumen los azúcares fermentables y el almidón del grano, dejando atrás el grano gastado (Galanakis, 2021).

Tabla 5. Composición de los subproductos del procesamiento de cereales y sus respectivos compuestos objetivo con información de Galanakis, 2021.

Subproducto del procesamiento de cereales	Composición o parte donde se encuentra	Compuestos Objetivo
Paja de trigo	Celulosa (28-39%) Hemicelulosas (23-24%) Lignina (16-25%) Contenidos menores de ceniza y proteína	Xilanos
Paja de cereales y olote	Fragmento xilano de hemicelulosa	Xilooligosacáridos
Salvado de trigo	Agua (12%) Proteína (13-18%) Lípidos (3.5%) Carbohidratos (56%)	Fibra dietaria Arabinoxilanos β -glucano Celulosa Lignina
Salvado de arroz	Lípidos (15-22%) Proteína (10-16%) Carbohidratos Fibra Cenizas Humedad	Orizanoles Tocoferoles Tocotrienoles Compuestos fenólicos
Salvado de avena	Carbohidratos (51%) Fibra (15%) Proteína (17%) Lípidos (7%)	β -glucano
Salvado de maíz (Alabiden <i>et al.</i> , 2020)	Compuesto mayoritariamente por fibras dietarias y ácidos fenólicos Almidón (9-23%) Proteínas (10-13%) Lípidos (2-3%) Cenizas (2%)	Ácido ferúlico Ácido vanílico Ácido cafeico Ácido p -cumárico Ácido p -hidroxibenzoico

De los diferentes procesos a los que se pueden someter los cereales, los subproductos obtenidos pueden ser: paja de trigo, paja de maíz, rastrojo de maíz, fracciones de la molienda como el salvado de trigo, de arroz, de avena y de cebada, cáscaras y gérmenes de los mismos cereales y cebada malteada. Algunos compuestos de valor agregado que pueden encontrarse en los subproductos de

cereales son proteínas, aminoácidos esenciales, ácidos grasos, ácido ferúlico, fenoles, tocoferoles y β -glucanos (Fărcas *et al.*, 2022). Otros ejemplos, así como los posibles compuestos objetivo se mencionan en la tabla 5.

- Raíces y tubérculos

Dentro de esta categoría se pueden distinguir siete cultivos primarios de raíces y tubérculos: (1) papas, (2) batatas, (3) mandioca (yuca, manioc, mandioca), (4) ñames, (5) aráceos comestibles como la yautía (malanga, nuevo cocoyam, ocumo, tannia) y (6) taro (dasheen, eddoe, viejo cocoyam) ambos conocidos como cocoyams, y (7) otras raíces y tubérculos (por ejemplo, arracacha, fécula de flecha, chufa, palma de sagú, oca y ulluco, frijol yam, jícama, mashua y alcachofa de Jerusalén). La mandioca, la papa y la batata representan el 93% del total de cultivos de raíces y tubérculos utilizados para consumo humano, mientras que los ñames y las aráceas representan el resto del porcentaje. Aproximadamente el 55% de la producción de raíces y tubérculos se consume como alimento, mientras que la parte restante se utiliza como alimento para animales o para producir almidón, bebidas destiladas, alcohol y otros productos menores (Galanakis, 2021).

La papa (*Solanum tuberosum*) es el cuarto cultivo de mayor producción a nivel mundial después del arroz, trigo y maíz. Las tendencias en el sector de las papas están cambiando de tal manera que el consumo de papas se está desplazando de las papas frescas a productos procesados como papas congeladas, principalmente papas fritas, copos de papa deshidratada, harina de papa y almidón de papa. Esto conduce a un aumento en la cantidad de desperdicio generado en la industria de la papa. Dependiendo del producto de papa obtenido, se pueden distinguir los siguientes subproductos de procesamiento: (1) cáscaras de papa; (2) desperdicio de cortes; (3) aguas residuales de plantas de fabricación de papas fritas, chips y almidón, y de destilerías; (4) pulpa y licor de papa después del procesamiento de almidón de papa; (5) restos de chips (papas fritas rotas), etc.

Dentro del procesamiento de mandioca o cassava (*Manihot esculenta*) existen cinco categorías de subproductos: (1) Residuos de almidón (también conocidos como bagazo, orujo, pulpa o residuo fibroso), (2) cáscaras, (3) tocones (stumps), (4) suero y (5) efluentes. En la tabla 6 se mencionan algunos compuestos bioactivos que se

encuentran en subproductos de raíces y tubérculos, así como la composición de dichos subproductos.

Tabla 6. Composición de los subproductos del procesamiento de raíces y tubérculos y sus respectivos usos o compuestos objetivo con información de Galanakis, 2021.

Subproducto del procesamiento de raíces y tubérculos	Composición o parte donde se encuentra	Compuestos Objetivos o Usos
Cáscara de papa	Carbohidratos (64.5%) Proteína (13.5%) Humedad (11.2%) Cenizas (7.6%) Azúcares (3.4%)	Antioxidantes: Ácido gálico y clorogénico, otros ácidos fenólicos. Fibra dietaria. Glicoalcaloides
Bagazo de mandioca	Humedad (75-85%) Almidón (15-30%) Fibra dietaria no soluble (>35% en base seca) Proteína (1-4%)	Sustrato para la producción de xantana y pululano
Cáscara de mandioca	Proteína (<6% en base seca) Fibra cruda (10-30% en base seca)	Sustrato para la producción de enzimas como celulasa, α -amilasa, glucoamilasa y xilanasa.

- Leguminosas

Las **leguminosas** son el segundo alimento más importante en el mundo después de los cereales, ya que son una fuente rica de proteínas y otros nutrientes importantes como carbohidratos, fibra dietética, vitaminas y minerales (Galanakis, 2021). El término leguminosa hace referencia a toda la familia de plantas cuyo fruto se encuentra dentro de una vaina. A la vez, estas se clasifican oleaginosas como el cacahuate (*Arachis hypogaea*) o la soya (*Glycine max*), y las legumbres que se refieren a las semillas secas de plantas leguminosas, como los frijoles (*Phaseolus vulgaris*), habas (*Vicia faba*), garbanzos (*Cicer arietinum*), alubias, lentejas (*Lens culinaris*), entre otros.

Las leguminosas suelen ser procesadas en instalaciones de pequeña escala o en mercados mediante las acciones de pelado, inflado, molienda y división. Los principales productos obtenidos son harinas y fracciones de la molienda (proteína, almidón y fibra), que pueden ser utilizados en la industria alimentaria directamente

o pretratados para mejorar el valor nutritivo, la funcionalidad y/o la textura. El pelado y la separación de los cotiledones durante la molienda implican la aplicación de fuerzas abrasivas intensas que dan lugar a granos rotos y productos en polvo. El proceso de molienda comercial de las leguminosas produce aproximadamente el 75% de los productos finales y el 25% de subproductos. Estos últimos consisten principalmente en la cáscara (hasta un 14%), polvo (hasta un 12%), los granos rotos (hasta un 13%) y semillas arrugadas y sin procesar. La recuperación de subproductos de leguminosas implica varias etapas, como la molienda y el fraccionamiento (tamizado) para obtener el material a granel en forma de polvo o harina. Dichos subproductos pueden ser utilizados como fuente de fibra dietaria en diferentes aplicaciones de alimentos, tras haber pasado por otros procesos como molienda, tamizado, extrusión, etc. También pueden ser utilizados como harina para la fortificación de productos de panificación, o como concentrados y aislados proteicos. Aún con este tipo de aplicaciones, se necesita un mayor número de investigaciones con respecto al uso de estos subproductos, el aislamiento de compuestos objetivo y la mejora en las características organolépticas de productos finales.

Pasando al grupo de las **oleaginosas**, son los cultivos mayoritarios para la producción de aceites, también ricos en proteína, como la canola, semilla de girasol, linaza, cacahuates y ajonjolí. La canola y la semilla de girasol son cultivadas principalmente para la obtención de aceite, mientras que los cultivos de soya se cultivan para la obtención de proteínas, y la semilla de algodón para la obtención de fibras. El contenido de aceite en los cultivos oleaginosos representa el 50% en semillas de girasol y canola, el 56% en cacahuate y entre el 15% y el 25% en la soya y la semilla de algodón. Estos cultivos se procesan mediante prensado mecánico y extracción con disolventes para obtener el aceite, ambos métodos generan residuos que consisten en cáscaras, semillas, harinas de oleaginosas desgrasadas y las tortas residuales de la extracción de aceite. Antes de los dos procesos mencionados, las oleaginosas deben limpiarse, desgranarse y cocerse con vapor o pasar por un proceso de calentamiento, lo que también genera otras fuentes de subproductos.

En la fase de limpieza, el material separado consiste en tallos, vainas, hojas, granos rotos, suciedad, pequeñas piedras y semillas extrañas que se encuentran comúnmente en el material a granel de las oleaginosas. Mediante el desgranado, se obtiene una cierta cantidad de cáscaras que se podrían utilizar para la extracción y recuperación de compuestos funcionales residuales. La siguiente etapa comprende la molienda de las semillas, seguida de un calentamiento para permitir la completa liberación de aceite. La aplicación de altas temperaturas en esta fase tiene varios efectos: coagulación de las proteínas, insolubilización de los fosfolípidos, aumento de la fluidez del aceite, destrucción de microorganismos e inactivación de enzimas. Las oleaginosas pre-acondicionadas se someten a prensado mecánico, que exprime el aceite de la semilla, o a una extracción directa con disolventes (Galanakis, 2021). Debido a que la extracción de aceites es comúnmente realizada con solventes, como el hexano o mezclas de hexano con hidrocarburos, la recuperación de subproductos resultantes de estos procesos es más complicada y menos segura.

Las tortas post-procesamiento de oleaginosas son ricas en proteínas, fibras dietéticas, antioxidantes y otras sustancias con efectos beneficiosos para la salud, lo que las hace adecuadas para su valorización tanto como alimento humano como para alimentación animal. La valorización de este tipo de subproductos se basa en la extracción, concentración y aislamiento de proteínas a partir de materiales desengrasados; estos procesos pueden ser tema para nuevas investigaciones o aplicación de nuevas tecnologías que faciliten la reducción o eliminación de componentes anti-nutricionales presentes en dichos subproductos. Algunos productos que pueden obtenerse son harinas con alto contenido de proteína (hasta 50%), concentrados (65-70% de proteína) y aislados (90-95% de proteína), estos últimos cuentan con propiedades funcionales como capacidad de emulsificación, espumado y propiedades filmogénicas (con capacidad de formar películas) debido a su alto contenido de proteínas (Galanakis, 2021).

- **Frutas y Vegetales**

Las **frutas y vegetales** son alimentos consumidos en grandes cantidades debido a que son una fuente rica en nutrientes, por lo que deberían tener un peso

considerable en la dieta de las personas. La demanda de estos alimentos ha incrementado debido al crecimiento de la población mundial, así como el cambio en las dietas; en 2017 la demanda de estas materias primas fue de 900 millones de toneladas de frutas y más de 1000 millones de toneladas de vegetales. Las frutas que han sido prominentemente producidas en los últimos años incluyen varias especies de cítricos, sandía, plátano, manzana, uva, mango, etc. Por otro lado, los vegetales más consumidos son los tomates, cebollas, pepino, col, etc. (Majumder *et al.*, 2021). Como se mencionó anteriormente, se desperdician del 45% al 60% de las frutas y verduras producidas mundialmente (Pleissner *et al.*, 2016). En particular, la industria procesadora de frutas genera casi 600 millones de toneladas de frutas desperdiciadas anualmente a nivel mundial; esto último incluye las partes no comestibles de diferentes frutas como el plátano (35%), piña (46%), granada (30%), cítricos (25-35%), manzana (12%) y sandía (48%); en el caso de vegetales como la coliflor y el brócoli (43%), zanahoria y rábano (20%) y ajo (22%) (Majumder *et al.*, 2021). Para evitar que estos desperdicios terminen en vertederos o contaminando efluentes como ríos, pueden ser utilizados para la recuperación de diversos compuestos bioactivos.

Los subproductos agrícolas de frutas y verduras son consecuencia de daños mecánicos y/o pérdidas durante las operaciones de cosecha (como el trillado o la recolección de frutas) o de la clasificación de los cultivos después de la cosecha para cumplir con los estándares de calidad. Dependiendo de la tecnología de procesamiento de frutas y verduras (como el secado y deshidratación, la tecnología de jugos, la producción de mermeladas, enlatado, jaleas, mermelada, etc.), se generan corrientes de residuos sólidos (como pulpa, cáscaras, semillas y tallos) y líquidos (como jugos, agua de lavado, agua de enfriamiento y también productos químicos de limpieza) (Galanakis, 2021).

Los subproductos resultantes de las actividades del campo están compuestos de alrededor de 40% de celulosa, 30% de hemicelulosa, 20% de lignina, 5% de proteínas y 5% de minerales (Pleissner *et al.*, 2016). En general, los residuos de frutas y verduras se componen principalmente de agua (80%–90%) y carbohidratos, con cantidades relativamente pequeñas de proteínas y grasas. Sin embargo, dado que estos subproductos también contienen una cantidad significativa de

compuestos biológicamente activos, pueden ser utilizados para la recuperación de productos de valor agregado, como azúcares simples (glucosa y fructosa), polisacáridos, pectina, polifenoles, glucosinolatos, fibras dietéticas, aceites esenciales, pigmentos, enzimas, vitaminas, compuestos aromáticos y ácidos orgánicos; además cuentan con la posibilidad de ser utilizados como aditivos alimentarios, ingredientes para enriquecimiento de alimentos funcionales (Galanakis, 2021 y Majumder *et al.*, 2021). En la tabla 7 se mencionan compuestos bioactivos que pueden encontrarse en subproductos del procesamiento de frutas y vegetales.

También se pueden producir biocombustibles, biofertilizantes y químicos cuando los subproductos son utilizados como medios de cultivo en fermentaciones. De igual manera existen investigaciones que se enfocan en obtener materiales a base de pectina con buenas propiedades surfactantes y biológicas (Pleissner *et al.*, 2016). Además de los usos ya mencionados, se puede añadir valor a estos subproductos mediante su conversión en aceites esenciales, aceites comestibles, enzimas, pigmentos, proteínas, películas biodegradables, etc. (Majumder *et al.*, 2021).

Tabla 7. Compuestos bioactivos presentes en subproductos de frutas y vegetales.

Subproductos de fruta o vegetales	Compuestos bioactivos
Semillas desengrasadas y bagazo de manzana (Majumder <i>et al.</i> , 2021)	Pectinas, celulosa, hemicelulosa, lignina
Cáscara de cítricos (Majumder <i>et al.</i> , 2021)	Hesperidina, narangina, rutina, quercetina, tangerina
Semillas y bagazo de uvas (Majumder <i>et al.</i> , 2021)	Hemicelulosa, celulosa, pectina, polifenoles, ácidos fenólicos, flavanoles, estilbenos, antocianinas
Cáscara y semilla de mango (Majumder <i>et al.</i> , 2021)	Fibra dietaria, compuestos fenólicos, alquilresorcinoles, flavonoides, proantocianidinas, carotenoides
Bagazo de zanahoria (Annegowda <i>et al.</i> , 2021)	α -caroteno, β -caroteno, licopeno, vitamina C y E, antocianinas, ácidos fenólicos
Hoja de apio (Annegowda <i>et al.</i> , 2021)	Apigenina y luteolina
Cáscara de pepino (Annegowda <i>et al.</i> , 2021)	β -caroteno, quercetina y kaempferol
Cáscara de ajo (Annegowda <i>et al.</i> , 2021)	Ácido ferúlico, ácido hidroxibenzoico, ácido p-cumárico, ácido caféico

5.2. Segmentación y Coordinación

Una vez reunida toda la información acerca del posible proceso de valorización, se debe **segmentar** en plataformas más pequeñas para que al momento de aplicarla sea efectiva. Dentro de los tópicos a tomar en consideración según Sheppard *et al.* (2020) se encuentran:

- *Búsqueda de inversión de capital*

El mayor obstáculo para la comercialización de subproductos valorizados es el capital de inversión requerido para plantas de mayor escala. Por esta razón la mayoría de los proyectos para el desarrollo de rutas de valorización, resultado de investigaciones, son financiadas por gobiernos por lo que los residuos generados provienen de tratamientos de bajo costo.

- *Lugar, diseño y opciones para el procesamiento.*

Es recomendable considerar el diseño de procesos modulares, es decir, a pequeña escala, para tener un mejor control de las condiciones y procesos.

- *Biorefinación*

Hacer uso de plantas de valorización modulares o móviles como un servicio brindado por terceros (servicio emergente que está atrayendo la atención de emprendedores e inversionistas), pueden ser la opción más factible para la biorefinación de los subproductos, para moverse de forma más rápida desde la experimentación hacia la validación y calificación, y por último el mercado (Sheppard *et al.*, 2020). Es decir, que existan industrias de procesamiento dedicadas específicamente a la biorefinación, para poder reducir el capital que el generador del subproducto tendría que invertir, y en donde probablemente sólo se deba hacer un pretratamiento para estabilizar el residuo y evitar el inicio de su descomposición, de forma que transportarlo sea más económico.

La adopción generalizada de los subproductos de alimentos conlleva el riesgo de sufrir ineficiencias debido a los conflictos que surgen al momento de la planeación del proceso dentro del sitio de generación, en otras palabras, cuando el generador del subproducto trata de realizar esta planeación de forma independiente. Es por lo anterior que en esta etapa deben **coordinarse** varios esfuerzos para crear una estrategia realizable.

Una solución a este problema propuesto por Sheppard *et al.* (2020), podría ser la creación de modelos de negocio de la biorefinación como servicio (BCS) con ciertos beneficios:

1. Concentración de expertise: contratar una compañía especializada en biorefinación de subproductos.
2. Ubicación: como un servicio la biorefinación podría operar dentro del sitio del cliente.
3. Modular: cambio y adaptación del proceso que responda a las variaciones en composición del subproducto y cambios en las demandas del mercado.
4. Movilidad: Uso de una planta modular dentro de las instalaciones que lo requieran.

Otras limitaciones y barreras identificadas para la valorización de los subproductos de alimentos en biorefinerías incluyen la disponibilidad de la materia y la logística para su suministro; costos del proceso y precio en el mercado de los productos biobasados obtenidos; y la necesidad de estandarización de ciertos procesos (JRC for the European Commission's Knowledge Centre for Bioeconomy, 2020).

La etapa de coordinación también debe innovar en la parte financiera para que las inversiones en materia de tecnologías sean las adecuadas para la adopción de valorización de subproductos. Estas opciones innovadoras para la valorización y los impactos ambientales, económicos y sociales deben ser dirigidos cuidadosamente durante todo el ciclo de vida esperado de los productos, utilizando métodos holísticos apropiados con el fin de demostrar que no son menos sustentables o seguras que las opciones convencionales (por ejemplo, la digestión anaeróbica en comparación a ciertos tipos de valorización) (JRC for the European Commission's Knowledge Centre for Bioeconomy, 2020).

Una vez definido el enfoque metodológico, así como la estrategia de integración de subproductos, se continúa con la revisión de compuestos bioactivos. En particular, los subproductos de origen vegetal contienen una cantidad significativa de biocomponentes (por ejemplo, proteínas, polisacáridos, polifenoles y ácidos grasos) que pueden ser utilizados como antioxidantes, aditivos y colorantes en la formulación de productos funcionales e innovadores (Alabiden *et al.*, 2020).

6. Compuestos bioactivos

En las últimas décadas, diversos estudios sobre los subproductos de origen vegetal han sugerido la presencia de un amplio rango de compuestos bioactivos en diferentes fracciones residuales dependiendo del subproducto. A partir de subproductos de origen vegetal se pueden recuperar diversos compuestos biológicamente activos y constituyentes químicos de valor agregado con actividades farmacológicas y biológicas además de contar con un gran valor nutrimental (Annegowda *et al.*, 2021).

A pesar de que los compuestos bioactivos sintéticos están aprobados en varios países para aplicaciones en alimentos, estos no tienen buena aceptación por parte del consumidor. Por lo tanto, ha habido un incremento en el interés por reemplazar estos compuestos sintéticos por aquellos que se obtienen a partir de una fuente natural. Estos compuestos naturales pueden ser utilizados como aditivos alimentarios para mantener la calidad, seguridad y el atractivo de los alimentos, y como suplemento o nutracéuticos para corregir deficiencias nutricionales, mantener una adecuada ingesta de nutrimentos, o para apoyar funciones fisiológicas (Vilas-Boas *et al.*, 2021). También pueden ser utilizados en el desarrollo de productos cosméticos, además de ser conocidos como importantes componentes en productos de la industria farmacéutica (Srivastava *et al.*, 2021).

El interés alrededor de los compuestos bioactivos ha incrementado a lo largo de estos últimos años; estos pueden definirse como nutrimentos y no nutrimentos presentes en matrices alimentarias (fuentes vegetales y animales) que pueden producir efectos fisiológicos más allá de sus propiedades nutricionales clásicas. Adicionalmente estos compuestos pueden encontrarse en algas, hongos, diferentes fuentes marinas, etc. (Betim *et al.*, 2022).

Otra definición bien aceptada los describe como compuestos naturales o sintéticos con la capacidad de interactuar con uno o más componentes dentro de los tejidos vivos ejerciendo una amplia gama de efectos (Vilas-Boas *et al.*, 2021).

Los compuestos bioactivos encontrados en subproductos de origen vegetal, especialmente los compuestos fenólicos y la fibra dietaria son los más prominentes, pero también existen otros. En la tabla 8 se hace una breve clasificación de dichos compuestos, además de mencionar ciertos impactos biomédicos de éstos.

Tabla 8. Clasificación de compuestos bioactivos presentes en subproductos de origen vegetal y su funcionalidad en biomedicina.

Grupo de compuestos	Compuestos	Funcionalidad en Biomedicina o bioactividad
Polifenoles	Ácido hidroxibenzóico, ácido hidroxicinámico, antocianinas, proantocianidinas, flavonoles, flavonas, flavanoles, flavanonas, isoflavonas, estilbenos, lignanos, catequinas, epicatequinas, epigallocatequina, etc.	Previenen el estrés oxidativo asociado a enfermedades cardíacas, diabetes (tipo II), enfermedades neurodegenerativas y osteoporosis
Terpenos	Carotenoides (α -caroteno, luteína, licopeno, zeaxantina)	Potentes antioxidantes de membrana, refuerzan el sistema inmune. Reducen el riesgo de cataratas y enfermedades coronarias.
	Limonoides (d-limoneno nomilina)	Agentes quimiopreventivos
	Saponinas (cicloartanos, furostanoles)	Obstruyen la exponenciación de células cancerígenas
	Derivados de 6-cromanol (tocoferoles, tocotrienoles)	Tocotrienoles han reportado la inhibición en el crecimiento de células de cáncer en pecho, tocoferoles tienen un impacto benéfico en la salud cardíaca.
Polisacáridos	Pectina, celulosa, hemicelulosa	Reducen significativamente los niveles de glucosa en sangre y de colesterol. Mejoran la tasa del paso gastrointestinal (gastrointestinal passage rate), la interacción de enzimas digestivas, viscosidad, etc.

Fitoesteroles		Moléculas de señalización que activan los receptores de esteroides y se convierten en un componente de la membrana celular que afecta su flexibilidad.
Organosulfuros	Glucosinolatos S-alq(en)il-l-cisteína sulfoxido S-metil cisteína-l-sulfoxido	Conocidos por sus efectos antioxidantes, antiinflamatorios, anticarcinogénicos y antiangiogénicos. Ayudan en la ruptura de toxígenos y metabolitos tóxicos estrogénicos en el hígado.
Ácidos orgánicos y aminos de origen vegetal	Ácido oxálico, ácido cinámico, ácido ferúlico, ácido cafeico, etc.	Agentes antioxidantes, antiinflamatorios y de desintoxicación del hígado.
Amina de origen vegetal	Contienen nitrógeno (-NH) como el átomo principal que tiene un rol importante en los sistemas biológicos: clorofila, espirulina, papaína, bromelina (enzimas)	Poseen propiedades antiinflamatorias, antimutagénicas y antioxidantes. Las enzimas vegetales son de ayuda en la digestión, y mejoran la respuesta antiinflamatoria e inmune.

Adaptado de Majumder *et al.* (2021).

Estas moléculas presentan un potencial efecto terapéutico, mientras que reducen los estados pro-inflamatorios, el estrés oxidativo y los desórdenes metabólicos. Estudios epidemiológicos indican que un alto consumo de alimentos ricos en compuestos bioactivos con capacidad antioxidante, incluyendo vitaminas, fitoquímicos, y principalmente compuestos fenólicos como los flavonoides, y carotenoides, tienen un efecto positivo en la salud humana y pueden disminuir el riesgo de diversas enfermedades, como el cáncer, enfermedades coronarias, infartos, Alzheimer, diabetes, cataratas y decadencia funcional relacionada con la edad. También son capaces de modular los procesos metabólicos y demuestran propiedades positivas como efectos antioxidantes, inhibición o inducción de enzimas, e inducción o inhibición de la expresión de genes (Santos *et al.*, 2019).

Los compuestos bioactivos están presentes como metabolitos primarios (esenciales) y secundarios (no esenciales) en subproductos de origen vegetal. Los primeros incluyen principalmente vitaminas y minerales, que en el cuerpo humano son capaces de prevenir enfermedades de deficiencias y mantener procesos bioquímicos específicos. Por otra parte, fenoles, carotenoides, fitoesteroles, saponinas, aceites esenciales y ácido fítico son los principales ejemplos de metabolitos secundarios, los cuales tienen un rol biológico importante en mantener una óptima salud celular, lo que conduce a una mejora en la longevidad (Alabiden *et al.*, 2020). A continuación, se discutirán algunos usos de y aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética.

6.1 Compuestos bioactivos presentes en subproductos de origen vegetal y sus aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética

La extracción de compuestos bioactivos a partir de subproductos, pueden generar un ingreso a la industria cosmética, farmacéutica y de alimentos debido al bajo costo de la fuente y a la abundante presencia de estas moléculas (Arun *et al.*, 2020).

Por ejemplo, a partir de los subproductos de plantas y vegetales se pueden recuperar péptidos bioactivos, polisacáridos (Banu *et al.*, 2020), fibras dietarias, polifenoles, flavonoides, carotenoides, glucosinolatos, concentrados de proteína, así como pectina, usados para producir suplementos alimentarios, aditivos y sabores (Galanakis *et al.*, 2022). Ahora, los consumidores son más conscientes acerca de su salud, y por lo tanto la incorporación de compuestos bioactivos en alimentos, cosméticos y nutraceuticos han ido ganando mayor relevancia (Arun *et al.*, 2020).

Debido a la existencia de la amplia gama de compuestos bioactivos, estos pueden ser utilizados como aditivos alimentarios, ya sea como antioxidantes, antimicrobianos, colorantes, saborizantes y agentes espesantes o aglutinantes. En la Tabla 9 se muestra la funcionalidad de algunos compuestos bioactivos que pueden ser aplicados en la formulación de productos de la industria alimentaria, por ejemplo, integrándolos en alimentos funcionales; estos se elaboran para mejorar la salud y reducir el riesgo de desarrollar enfermedades. Los compuestos bioactivos son añadidos para fortificar los alimentos con otras propiedades benéficas para la

salud (Arun *et al.*, 2020), además de que pueden obtenerse a un bajo costo industrial (Banu *et al.*, 2020).

Tabla 9. Funcionalidad de distintos compuestos bioactivos en la formulación de productos de la industria alimentaria.

Compuesto bioactivo	Funcionalidad en alimentos
Xilooligosacáridos (Galanakis, 2021)	Prebióticos Sustrato enzimático
Arabinosilano (Galanakis, 2021)	Por su capacidad de absorber grandes cantidades de agua e influenciar su balance, pueden ser de utilidad en procesos de panificación porque impactan las propiedades reológicas de masas y la retrogradación del almidón.
Concentrados de proteína de salvado de arroz (Galanakis, 2021)	Incorporación en panes y bebidas para fortificación. Agente aglutinante en carnes y salchichas.
Carotenoides (Galanakis <i>et al.</i> , 2022)	Uso como colorantes para mejorar el color de productos finales
Antoncianinas (Banu <i>et al.</i> , 2020)	Uso como colorantes
Betalainas (Banu <i>et al.</i> , 2020)	Uso como colorantes
Pectinas (Galanakis <i>et al.</i> , 2022)	Uso como estabilizantes, espesantes agentes gelificantes, emulsificantes, y como vehículos

Pasando al sector farmacéutico y cosmético, la aplicabilidad de los compuestos bioactivos obtenidos de diversas fuentes de subproductos dependerá del producto final, ya que pueden ser aplicados para obtener un posible beneficio a la salud, así como evitar el desarrollo de enfermedades. Los compuestos bioactivos obtenidos de fuentes vegetales tienen un potencial efecto antioxidante, anticáncer, antiinflamatorio e inmunomodulatorio, entre otros beneficios a la salud (Bhat, 2021). Por ejemplo, un consumo regular y generoso de fibra dietaria, proveniente de frutas y/o verduras, reduce el riesgo de desarrollar enfermedad coronaria, infartos, hipertensión, diabetes, obesidad, y ciertas enfermedades gastrointestinales. El consumo de alimentos con alto contenido de fibra o suplementos con fibra disminuye la presión arterial, ayuda a la pérdida de peso y mejora las funciones

inmunitarias (Galanakis *et al.*, 2022), por lo que hacer uso de fibra dietaria obtenida de subproductos vegetales para la formulación de productos puede ser beneficioso para el consumidor. En la tabla 10 se mencionan otros posibles beneficios a la salud que pueden tener los compuestos bioactivos así como el subproducto del cual pueden obtenerse.

Tabla 10. Posibles beneficios a la salud por el consumo de distintos compuestos bioactivos.

Compuesto bioactivo	Beneficio a la salud
Xilanos en subproductos de maíz (Galanakis, 2021)	Disminución de colesterol en la sangre, disminución de la respuesta postprandial de la glucosa e insulina, exhibición de efectos antitumorales
β -glucanos en subproductos de avena y cebada (Galanakis, 2021)	Contribuye a mantener los niveles normales de colesterol en sangre y reduce las respuestas glicémicas postprandiales
Dihidrochalconas en bagazo de manzana (Ben-Othman <i>et al.</i> , 2020)	Efecto antidiabetes, y efecto potencial en el tratamiento de obesidad; promueve la blastogénesis para la formación de huesos
Carotenoides en cáscara de mango (Ben-Othman <i>et al.</i> , 2020)	Antioxidantes, prevención de la enfermedad ocular macular relacionada con la edad, regulación de la homeostasis de hueso.
Lípidos en semillas de bayas silvestres o cultivadas (Ben-Othman <i>et al.</i> , 2020)	Equilibran la composición de ácidos grasos en la dieta, antioxidantes, regeneración de la piel.
Glicoalcaloides en cáscara de papa (Ben-Othman <i>et al.</i> , 2020)	Anti-carcinogénicos (apoptosis inducida en células cancerosas)
Glucosinolatos en tallos de brócoli (Ben-Othman <i>et al.</i> , 2020)	Prevención de cáncer, enfermedades cardiovasculares y otras enfermedades relacionadas con la edad
Péptidos bioactivos en tallos y hojas de coliflor (Ben-Othman <i>et al.</i> , 2020)	Antihipertensivo (inhibición de la enzima convertidora de angiotensina)

En la tabla 11 aparecen otros compuestos también denominados fitoquímicos que pueden ser aplicados como ingredientes en la formulación de fármacos y cosmeceúticos, reportados por Pleissner *et al.* (2016). Los cosmeceúticos son productos que mejoran la apariencia de la piel humana por el uso de antioxidantes y otros compuestos fenólicos presentes en diversos subproductos. Péptidos antioxidantes, ácidos fenólicos y carotenoides extraídos a partir de subproductos de

cítricos están siendo introducidos como productos cosmecéuticos para reducir los signos de la edad, manchas en la piel debido a la radiación UV y el eritema por inflamación (Banu *et al.*, 2020).

Tabla 11. Fitoquímicos encontrados en subproductos obtenidos del procesamiento de frutas y vegetales.

Fitoquímicos	Subproductos de frutas y vegetales
Ácidos fenólicos	Pulpa de manzana, pulpa de zanahoria, subproductos de cebollas
Flavonoides	Pulpa de manzana, pulpa de uva, cáscara de manzana, pulpa de limón, subproductos de cebollas
Carotenoides	Cáscara de durazno, pulpa de zanahoria, pulpa de tomate, pulpa de limón
Antocianinas	Pulpa de manzana, pulpa de uva, cáscara de mango, pulpa de zanahoria, subproductos de cebolla
Ácido hidroxicinámico	Pulpa de naranja, subproductos de coliflor

Modificado de Pleissner *et al.* (2016).

Los compuestos bioactivos pueden ser recuperados usando diferentes técnicas de extracción y/o aislamiento; estos procesos contribuyen a estrategias cero-residuos que pueden ser implementadas en las industrias de alimentos (Annegowda *et al.*, 2021). Enseguida se revisarán algunas técnicas para la extracción de compuestos bioactivos.

6.2. Técnicas de extracción

La mayor problemática que se presenta en un proceso de recuperación es separar efectivamente los compuestos bioactivos a partir de la matriz del subproducto y aplicar un procedimiento de separación progresiva desde lo macroscópico a lo macromolecular y finalmente a nivel micromolecular, de acuerdo con lo publicado

por Ferri *et al.* (2020) y revisado en el capítulo 5 como el Proceso de Recuperación Universal.

La principal ventaja de esta estrategia es que puede ser aplicada para la recuperación simultánea de varios ingredientes en diferentes vertientes (Ferri *et al.*, 2020). Cada etapa del proceso dependerá de la matriz de la cual se parte, así como de los resultados de su caracterización. Dentro de estos pasos, la extracción es el punto crítico para la obtención de compuestos bioactivos a partir de subproductos (Sagar *et al.*, 2018). Los factores que determinan una buena extracción de dichos compuestos son la preparación de la muestra, la temperatura, características y partes de la matriz (tallo, hojas, semillas), presión y tipos de solvente utilizados.

Los compuestos bioactivos presentes en subproductos de origen vegetal pueden ser extraídos con diferentes métodos, los cuales pueden clasificarse en dos categorías principales: convencionales y tecnologías emergentes. Los métodos clásicos son considerados como técnicas convencionales porque han sido utilizados por mucho tiempo. Estas técnicas se basan en el poder de extracción del solvente utilizado, el calor aplicado o la combinación de ambos. Dentro de las técnicas principales de extracción se encuentran (1) extracción por Soxhlet, (2) hidrodestilación y (3) maceración (Sagar *et al.*, 2018).

Por otra parte, las tecnologías emergentes surgen debido a las limitaciones de los métodos convencionales, estos últimos se caracterizan por tener dificultades para obtener altas purzas, hacen uso de solventes costosos y poco amigables con el ambiente, involucran largos tiempos de extracción, existe la degradación de compuestos lábiles al calor y cuentan con baja selectividad durante la extracción. Algunas de las tecnologías emergentes mencionadas por Sagar *et al.* (2018) y Banu *et al.* (2020) son:

- Extracción asistida por microondas
- Extracción por campo de pulso eléctrico
- Extracción asistida por enzimas
- Extracción líquido-líquido
- Extracción sólido-líquido
- Extracción en fase sólida
- Extracción con fluido supercrítico

- Extracción con líquido presurizado
- Extracción asistida por ultrasonido
- Extracción por descargas eléctricas de alto voltaje
- Extracción con altas presiones hidrostáticas

Para poder diseñar un proceso de extracción de compuestos bioactivos se deben tener en cuenta diferentes variables, que solo podrán ser evaluadas cuando se tenga el conjunto de toda la información previa, así como resultados del análisis de la caracterización de la materia de la cual se parte, apalancándose en enfoques metodológicos como LCA para determinar la factibilidad económica, medio ambiental y sustentable del proceso.

La selección de una técnica de extracción en particular, así como sus ventajas y limitaciones de los compuestos bioactivos a extraer, dependerá de la selección de solventes, estabilidad de la matriz, subproducto del cual se parte, pre-tratamiento, etc. Con esto en mente, en la tabla 12 se muestran las técnicas mencionadas anteriormente y una recomendación para la extracción de compuestos específicos. Cabe recalcar que día a día se generan nuevas innovaciones, por lo que es conveniente mantener una actualización periódica en términos de técnicas de extracción de estos compuestos.

Tabla 12. Compuestos bioactivos recomendados para su extracción mediante el uso de distintas técnicas.

Técnica	Compuestos recomendados para su extracción
Soxhlet o extracción con solventes	Lípidos (Sagar <i>et al.</i> , 2018) Antocianinas, lignanos (Banu <i>et al.</i> , 2020)
Hidrodestilación	Compuestos bioactivos oleosos (Sagar <i>et al.</i> , 2018)
Extracción Líquido-Líquido	Para compuestos fenólicos (Sagar <i>et al.</i> , 2018) Extracción de compuestos a partir de subproductos líquidos de la industria de bebidas (Sagar <i>et al.</i> , 2018)
Extracción en Fase Sólida	Algunos fitoquímicos en plantas medicinales (Sagar <i>et al.</i> , 2018)
Extracción con Fluido Supercrítico	Para compuestos volátiles (Sagar <i>et al.</i> , 2018) Con agua subcrítica: Quercetina, antocianinas, compuestos fenólicos (Banu <i>et al.</i> , 2020)
Extracción con Líquido Presurizado	Fitoquímicos (Sagar <i>et al.</i> , 2018) Resveratrol, licopeno (Banu <i>et al.</i> , 2020)
Extracción por campo de pulso eléctrico	Fitoesteroles y varios polifenoles (Sagar <i>et al.</i> , 2018) Antocianinas, hesperidina (Banu <i>et al.</i> , 2020)
Extracción asistida por enzimas	Extracción de aceite y fitoquímicos fuertemente unidos a la matriz (Sagar <i>et al.</i> , 2018) Flavonoides, licopeno, pectina (Banu <i>et al.</i> , 2020)
Extracción asistida por microondas	Extracción rápida de polifenoles. Flavonoides, taninos (Sagar <i>et al.</i> , 2018) Proantocianidinas, antocianinas (Banu <i>et al.</i> , 2020)
Extracción asistida por ultrasonido	Compuestos fenólicos, lípidos, clorofilas, carotenoides (Sagar <i>et al.</i> , 2018) Antocianinas, pectina, hesperidina (Banu <i>et al.</i> , 2020)
Extracción por descargas eléctricas de alto voltaje	Polifenoles (Sagar <i>et al.</i> , 2018)
Extracción con altas presiones hidrostáticas	Polifenoles, carotenoides (Banu <i>et al.</i> , 2020)

7. Perspectivas

Las pérdidas y el desperdicio de alimentos que ocurren a lo largo de la cadena de alimentos desde la producción hasta el hogar deberían ser minimizados mediante la explotación de los desperdicios generados en productos de valor agregado. Se espera que en años siguientes legislaciones más estrictas en cuanto al manejo del desperdicio de alimentos, empujen al sector alimentario, gobierno y otras instituciones y partes involucradas, de México y el mundo, a definir estrategias en la gestión de dichos materiales, desde planes de prevención, mejoramiento de procesos, redistribución de mermas o productos aptos para consumo humano hacia bancos de alimentos, redireccionar subproductos a la alimentación de ganado y hacer uso de las distintas vías de valorización para, en la medida de lo posible, evitar que se disponga de los subproductos en vertederos o pasar por el proceso de incineración.

Desafortunadamente, los beneficios ambientales no siempre vienen de la mano con las metas económicas, lo que dificulta su implementación en la práctica. Las futuras investigaciones deberán no solo enfocarse en la prevención y reducción del desperdicio de alimentos, sino también en el desarrollo de nuevas políticas para superar las limitaciones económicas. En cualquier caso, la evaluación de los impactos medioambientales de la gestión de residuos de alimentos es un punto crítico para luchar contra el cambio climático y puede guiar a las personas encargadas de la toma de decisiones en la transición a un sistema circular y más sustentable (Obersteiner *et al.*, 2021).

Algunos protocolos usados en el tratamiento de desperdicios de alimentos como la digestión anaeróbica, técnicas de separación química bien elaboradas, bioconversión unificada de compuestos a moléculas de valor agregado y prototipos de biocombustible, así como técnicas avanzadas de extracción para la recuperación de compuestos bioactivos, tienen un menor impacto medioambiental con mejores beneficios económicos (Arun *et al.*, 2020).

Hablando específicamente de los subproductos de alimentos obtenidos post-procesamiento, se espera que las industrias tengan en consideración que dichos materiales aún tienen potencial para ser integrados a otros procesos, como se

comentó en este trabajo, diversos subproductos presentan en su composición compuestos bioactivos que pueden tener aplicabilidad en otras industrias.

A pesar de que existen distintos métodos de extracción de compuestos bioactivos a partir de subproductos, deben buscarse nuevas tecnologías para obtener mejorar el rendimiento con una menor inversión. Las técnicas futuras de valorización deben ser moldeadas de tal forma que sean viables económicamente y con un menor impacto medioambiental.

Otro desafío tecnológico se encuentra en el escalamiento de los procesos, que requieren estudios a fondo de la factibilidad económica y tecnológica antes de llevarlos a cabo (Banu *et al.*, 2020).

Puede existir el caso en el que una empresa no sea capaz de implementar un proceso de valorización para la obtención de compuestos bioactivos, ya sea por falta de capital, tiempo o por desconocimiento del tema y su implementación. Siendo así, nuevas empresas pueden surgir para implementar estos procesos como un servicio externo. La BCS puede estar integrada por personas expertas en temas de sustentabilidad y valorización de subproductos de alimentos, capaces de brindar asesorías a las empresas para la implementación de este tipo de estrategias, o que existan servicios con el equipamiento necesario para el tratamiento de los subproductos con la intención de obtener compuestos bioactivos. De una u otra forma, el integrar estrategias de valorización puede impactar positivamente dentro de la sociedad ya que la generación de un nuevo sector resulta en la generación de nuevos empleos, evitando a su vez que los desperdicios sigan el camino que tienen marcado hoy en día.

Después de la extracción de dichos compuestos bioactivos, aún existirá materia orgánica remanente, por lo que dentro de la elaboración de la estrategia también se tiene que definir un proceso o acción para su tratamiento. A través de una caracterización se podrá definir si aún hay posibilidad de extraer algún compuesto de valor agregado o se puede optar por la vía de obtención de energía, como la obtención de biocombustibles.

La implementación industrial de un proceso de valorización es un acercamiento complejo que requiere de una consideración cuidadosa de diferentes aspectos, entre los cuales se encuentran: la integración de enfoques metodológicos que

aseguren la factibilidad económica y ambiental del proceso, la evaluación de sustentabilidad del proceso, integración de conceptos de bioeconomía para evitar generar más desperdicios y/o contaminación, diseño de un proceso lo más cercano al enfoque de EC, flexibilidad y opciones alternas para el desarrollo de un producto comercialmente factible y por último, apoyarse de las investigaciones e innovaciones que se hacen día con día.

Para la ejecución de estas técnicas innovadoras con mejores resultados de rendimiento, debería existir una fuerte alianza entre la comunidad científica, la industria y el gobierno. Deben generarse esfuerzos desde cada sector de la producción de alimentos, procesos, marketing y el consumidor final para minimizar la generación de desperdicios de alimentos.

Los compuestos bioactivos extraídos a partir del desperdicio de alimentos deben ser promocionados, lo cual podría reducir el costo de la fortificación de alimentos, mejorando su aceptación. Para que dichos compuestos puedan ser aplicados en alimentos para consumo humano se deberán de definir estatutos regulatorios y de seguridad alimentaria para garantizar que estos sean seguros y aptos para su consumo.

Los diferentes órganos de gobierno deben monitorear que las industrias estén adoptando nuevas tecnologías que permitan reducir el desperdicio de alimentos y concientizar a los consumidores acerca de la importancia del uso de productos de valor agregado desarrollados a partir de subproductos de alimentos (Arun *et al.*, 2020).

8. Discusión

La industrialización del sistema de alimentos, la urbanización, globalización y el crecimiento económico propicia la generación de desperdicios (Thyberg *et al.*, 2016). En particular, el desperdicio de alimentos depende de temas culturales, personales, políticos, geográficos y económicos. Las perspectivas en cuanto al desperdicio varían de persona en persona y de lugar en lugar. Los desperdicios evitables e inevitables forman parte del sistema alimentario y se generan a lo largo de toda la cadena de suministro.

En un sistema alimentario, la sustentabilidad se puede ilustrar a través del concepto del “acompañamiento” de productos (“product stewardship” en inglés), definido como las responsabilidades compartidas que todos los participantes tienen en el ciclo de vida de un producto para minimizar los impactos medioambientales y a la salud (Galanakis *et al.*, 2022).

Es imperativo que las industrias del sector alimentario busquen la forma de adoptar nuevos procesos en los cuales el impacto medioambiental y social, sea el mínimo (Thyberg *et al.*, 2016). Una gestión efectiva de los desperdicios y residuos de alimentos beneficiaría a todos los miembros de la cadena de suministro ya que los costos pueden minimizarse significativamente si se logra reducir el gasto de energía y se mejora el desempeño ambiental del sistema alimentario.

Dentro del reporte de The Lancet Commissions de 2019, se remarcan cinco estrategias para la integración de dietas sustentables a partir de un sistema alimentario sostenible basadas en fuertes evidencias científicas. Se menciona, en el punto número cinco, reducir al menos a la mitad las pérdidas y el desperdicio de alimentos, alineado a las MDS. La reducción substancial de la cantidad de alimentos que se pierden o se desperdician, desde la producción hasta su consumo, es esencial para que el sistema alimentario global permanezca dentro un espacio seguro de operación. Diversas soluciones tecnológicas tendrán que ser aplicadas a lo largo de la cadena de suministro, así como políticas rigurosas para lograr la reducción del 50%. Se estima que reduciendo a la mitad la pérdida y el desperdicio de alimentos se pudiera lograr una reducción del 5% en emisiones de gases de efecto invernadero.

Por lo general, el flujo de residuos de alimentos inevitables (cáscaras, huesos, bagazo, semillas, etc.) se mantiene constante y es generado por los sectores de procesamiento y manufactura. Por lo tanto, la inversión en la valorización de los subproductos de alimentos debe planificarse principalmente en función de los residuos inevitables para lograr un suministro adecuado de materia prima (Roy *et al.*, 2023), seguido de la integración de la materia generada post-procesamiento en procesos que impliquen la creación de nuevos productos de valor agregado que mantengan en valor la materia prima de la cual se parte. Es importante hacer el uso del término “*subproducto*” ya que si se continúa nombrando “*residuo*” a materias orgánicas con el potencial de ser nuevamente integradas a una cadena de valor se seguirá perpetuando lo que por definición significa la palabra residuo: material que queda como inservible después de haber realizado un trabajo u operación (RAE, 2023).

Para aplicar totalmente los conceptos de bioeconomía, deben establecerse nuevas reglas en temas de ética y sociedad, para poder alcanzar la sustentabilidad (Bottausci *et al.*, 2022).

El hacer eficiente el uso de materiales recuperados de un proceso tiene dos significados: el primero, utilizar los subproductos que de otra forma hubieran sido desechados, y el segundo, procesar dicho subproducto de forma eficiente. Subsecuentemente, la utilización de subproductos post-procesamiento para la recuperación de compuestos de valor agregado puede significar una reducción en la cantidad de residuos generada, abre paso al desarrollo de productos innovadores, y finalmente crea nuevas oportunidades y beneficios para las personas relacionadas con ese sistema de producción alimentario (Galanakis *et al.*, 2022).

Unas de las acciones más importantes que pueden acelerar la correcta gestión de los desperdicios de alimentos en toda la cadena de suministro, es la creación e implementación de legislaciones a nivel mundial, lo que involucra el desarrollo de procesos de valorización. Las políticas de prevención deben englobar tres aspectos clave: Valores, oportunidades y logística (Thyberg *et al.*, 2016).

Una iniciativa que ha sido utilizada para desarrollar políticas, programas y estrategias de financiamiento para disminuir el residuo y la pérdida de alimentos es Save Food Initiative (Iniciativa para Ahorrar Alimentos). Dentro de las soluciones en

infraestructura se incluye iniciar sitios colectivos de almacenamiento de materias primas, desarrollar tecnologías e infraestructura para el procesamiento de alimentos, y lograr una mayor inversión en cadenas de frío (The Lancet Commission, 2019).

En cuanto a la elaboración de políticas para prevenir el desperdicio de alimentos, se debe tener un acercamiento multifacético, dependiendo del país y/o región en el cual se pretende implementar. Algunas políticas potenciales para la prevención de residuos propuestas por Thyberg *et al.* (2016), son:

- **Incentivar la prevención en la generación de desperdicios de alimentos:** Al activar este tipo de políticas, se pueden dar incentivos a las compañías que sean capaces de prevenir el desperdicio de alimentos. Dichos incentivos pueden ser financieros, como créditos fiscales o también se pueden aplicar costos más altos obligatorios en caso de disposición de residuos (lo cual debería alentar la reducción)
- **Incrementar la investigación y el desarrollo:** Implementar políticas para apoyar esta área, puede contribuir a innovaciones que reduzcan el desperdicio de alimentos. Estas incluyen mejoras en empaques para alargar su vida útil, mejoras en el almacenamiento de alimentos, o mejorar los sistemas de seguimiento para la gestión de stocks. Los incentivos pueden incluir financiamiento para organizaciones de investigación o incentivos fiscales.

A nivel mundial se han visto cambios en los marcos legislativos y requerimientos para la disposición de residuos. Por ejemplo, en Estados Unidos la Agencia para la Protección del Medio Ambiente o EPA (Environmental Protection Agency) lo describe como el Desafío del Desperdicio de Alimentos junto a un aplicativo de 3R (reducir-recuperar-reciclar) en el cual se busca “reducir” las pérdidas y el desperdicio de alimentos, “recuperar” alimentos en buen estado para consumo humano, y “reciclar” para otros usos incluyendo la alimentación para ganado, compostaje y generación de energía (Galanakis *et al.*, 2022).

Por otra parte, la estrategia de la UE se enfoca en la prevención del desperdicio a través de tecnologías de producción más eficientes, reciclaje interno de la producción de subproductos, mejoras orientadas a la fuente de generación de residuos para su captación y mantenimiento de su calidad, reúso de productos, y

recientemente enfoques de bioeconomía circular y productos bio-basados (Galanakis *et al.*, 2022). En Europa, la actividad de investigación y desarrollo para lograr una mejor forma de mantener, o incluso de incrementar el valor de los subproductos de alimentos, en términos económicos y medioambientales, ha avanzado a una etapa de consolidación (Sheppard *et al.*, 2020). En contraste, México y otros países de Latinoamérica se encuentran muy alejados de esta etapa, ya que, a pesar de que este tipo de estrategias se mencionan en las legislaciones, para iniciar el proceso hace falta que el gobierno y el sector privado tengan una ruta concisa para la recopilación de información de las cantidades, lugares y formas de caracterización del residuo de alimentos, para posteriormente implementar procesos y sistemas de gestión de residuos.

En el texto escrito por Bottausci *et al.* (2022), se hace una comparación entre la UE y Latinoamérica en cuanto a la valorización de los residuos orgánicos. Existe una diferencia en el panorama legal para la aplicación de la bioeconomía: la UE cuenta con una estrategia formal que engloba diferentes sectores económicos como el agrícola, el pesquero y la silvicultura; mientras que las estructuras de Latinoamérica raramente están agrupadas. En particular se encuentran limitaciones por la ausencia de armonización en cuanto a la clasificación de nuevos productos obtenidos a partir de subproductos que, debido a la falta de caracterización de estos no pueden ser utilizados, o bien, por su baja estabilidad y alta tasa de descomposición, no se pueden integrar a tiempo a procesos de recuperación. Otra marcada diferencia es el nivel de madurez de la gobernanza, la cual puede ser entendida como un proceso por el cual las sociedades adaptan sus reglas y políticas a nuevos desafíos, así como las oportunidades de fondeos, que en Latinoamérica generalmente provienen de agencias de cooperación internacional como el Fondo Verde para el Clima, el Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas y el Banco Mundial, en contraste con la UE donde los fondos provienen de un programa público conocido como Pacto Verde Europeo.

Un caso de éxito en términos de valorización que mencionan Sharma *et al.* (2021), es del gobierno de Francia, el cual adoptó una política para la valorización de los residuos de alimentos, en donde se obtienen beneficios al transformarlos en materiales de valor agregado y en subproductos que liberan energía. Francia aplicó

leyes punitivas para su estricto cumplimiento; la implementación de esta política salvó de la descomposición aproximadamente 88 millones de toneladas de residuos de alimentos, lo que correspondió a \$167 billones de dólares, recuperados ese año. Otro ejemplo es el de una de las marcas más famosas en la industria del helado: Ben and Jerry's transforma sus residuos para producir energía. Los residuos lácteos y agrícolas de esta industria son llevados a un digestor de metano para generar energía a partir de la biomasa, la cual es utilizada para alimentar a la planta. El equipo de esta empresa está trabajando en reducir las emisiones de CO₂, uso de agua y energía además de mejorar su tratamiento de residuos (Dutta *et al.*, 2021). Para empezar el desarrollo de una estrategia de valorización, se debe partir de un enfoque metodológico sustentable, para asegurar que la estrategia sea factible en términos, económicos y tecnológicos, y evitar que el nuevo proceso genere más GEI, mayor gasto de energía y de recursos. Las emisiones de GEI de diversos procesos de valorización y la capacidad para reducirlas varían ampliamente según el tipo de residuos de alimentos, el proceso de refinación o conversión, y el uso final de los productos derivados de residuos de alimentos (Roy *et al.*, 2023). Para seleccionar dicho enfoque deben analizarse las ventajas y desventajas, e investigarse estrategias similares, es decir que utilicen el mismo subproducto de alimentos y/o se busque la extracción de compuestos objetivo en particular. Es de suma importancia que el equipo que desarrolle la estrategia esté conformado por distintas áreas de expertise; un enfoque multidisciplinario puede evitar vacíos dentro del diseño de la estrategia, además de que la integración, segmentación y coordinación de la información recopilada y obtenida de la caracterización del subproducto, converja de forma holística.

Una vez completada la caracterización del subproducto, se puede diseñar el proceso de valorización como lo sugiere Galanakis en su Proceso de Recuperación Universal de cinco etapas; dependiendo de los resultados se podrán definir los procedimientos idóneos para el pretratamiento, separación, extracción, aislamiento y purificación, y obtención del producto final dependiendo de los compuestos bioactivos que se pretendan obtener. Para definir el tipo de tecnología involucrada en el paso más retador, que es la extracción, se debe realizar una investigación

profunda para la selección de la técnica más adecuada y que facilite la extracción de los compuestos objetivo.

Se han reunido grandes cantidades de conocimiento sobre cómo valorizar técnicamente los subproductos o residuos de alimentos, junto con los diferentes criterios que se deben tener en cuenta para evaluar la sustentabilidad y factibilidad del proyecto (Sheppard *et al.*, 2020). Sin embargo, estos acercamientos solo direccionan hacia un proceso lineal, en donde se obtienen uno o dos tipos de productos y no se valoriza la parte remanente, es decir, no se cuenta con un sistema integral y se deja de lado la valorización completa del subproducto del cual se partió. Este trabajo se enfocó principalmente en el desarrollo de una estrategia de valorización para la obtención de compuestos bioactivos en subproductos de origen vegetal, pero se hace hincapié en tomar en cuenta la materia remanente del proceso de valorización, mediante una nueva caracterización para definir si aún existen compuestos bioactivos que puedan ser extraídos, o hacer uso de otras estrategias de valorización como la obtención de biometano a partir de una digestión anaeróbica.

9. Conclusiones

El sistema alimentario actual enfrenta desafíos insostenibles que requieren cambios fundamentales y colaborativos para garantizar la viabilidad futura, especialmente ante la proyección de una creciente población global para 2050 (Thyberg *et al.*, 2016). El desperdicio de alimentos, que constituye una cuarta parte de las calorías producidas a nivel mundial, subraya la necesidad de abordar este problema de manera urgente (Ritchie *et al.*, 2022). En vista de la generalización de la inseguridad alimentaria entre cientos de millones de personas en todo el mundo, abordar el desperdicio de alimentos es una cuestión crítica para desarrollar sistemas alimentarios resilientes, saludables y con poco impacto ambiental (PNUMA, 2021). La sostenibilidad de la producción de alimentos no puede ser meramente económica; debe abarcar factores políticos, ambientales, sociales y tecnológicos. Lograr un sistema alimentario global que funcione dentro de los límites planetarios exige cambios en las dietas, en la gestión del ganado y cultivos, así como la drástica reducción de los residuos alimentarios a través de tecnologías y políticas eficientes. La transformación de este sistema debe involucrar a todas las partes interesadas desde consumidores individuales, políticos y todos los actores de la cadena de suministro de alimentos, para trabajar de forma conjunta hacia el objetivo global compartido de dietas saludables y sostenibles para todos (The Lancet Commissions, 2019).

El mapeo de los acercamientos y oportunidades a lo largo de la cadena de suministro es crucial para promover la prevención de la pérdida y el desperdicio de alimentos, acción que debe tener la máxima prioridad (Obersteiner *et al.*, 2021) y promover comportamientos de consumo sostenibles, dietas y hábitos saludables. Cuando la prevención no sea posible se puede aplicar la donación de alimentos aptos para el consumo humano y aplicar estrategias de reciclaje o reutilización de alta calidad (Obersteiner *et al.*, 2021), así como la valorización de los subproductos generados (Amicarell *et al.*, 2021).

Desde una perspectiva global para mantener un sistema alimentario de los límites planetarios, el cambio en las dietas, mejoras en el manejo del ganado y producción de cultivos, y la reducción de residuos de alimentos y su conversión a subproductos, son indispensables (Westhoek *et al.*, 2021).

A través de estrategias que incluyan incentivos financieros, programas nacionales de reducción de residuos y colaboración entre múltiples actores, es posible abordar los obstáculos regulatorios, sociales y políticos que dificultan la implementación de soluciones eficaces. Dentro de los desafíos se incluye una baja participación pública, falta de indicadores eficientes para monitorear el desempeño e incertidumbre de resultados de las políticas, añadiendo que no existe una solución única que englobe todos los obstáculos; las medidas políticas por abordar deben realizarse para cada situación individual en la cual se integren las necesidades de la comunidad (Thyberg *et al.*, 2016). La implementación de políticas de gestión de residuos a lo largo de toda la cadena de valor es crucial para evitar el depósito de desechos en vertederos y aguas (Banu *et al.*, 2020).

El enfoque hacia la EC y la aplicación de técnicas emergentes de extracción de compuestos bioactivos son pasos fundamentales para lograr una gestión más eficiente y sostenible de los residuos agroalimentarios. La optimización de recursos a través de la reducción de generación de residuos, el reciclaje, la valorización y la implementación de estrategias bioeconómicas puede generar beneficios significativos para la sociedad y el medio ambiente. Sin embargo, es esencial abordar los desafíos económicos que pueden surgir en la implementación de estas estrategias y asegurar una regulación adecuada para minimizar riesgos.

En última instancia, la conversión y valorización de subproductos de alimentos puede aportar beneficios económicos y ambientales, pero debe ser llevada a cabo de manera estandarizada y regulada. La promoción de investigaciones innovadoras, la adopción de tecnologías emergentes y la colaboración entre diferentes sectores son esenciales para lograr la extracción eficaz y sostenible de compuestos bioactivos. En este contexto, la utilización sostenible de los residuos y subproductos agroalimentarios para obtener productos de valor agregado presenta una oportunidad para generar ingresos adicionales en el sector industrial y promover prácticas más respetuosas con el medio ambiente.

En definitiva, la transformación hacia un sistema alimentario sostenible y saludable requiere el compromiso de todos los actores involucrados, la implementación de políticas eficaces, la adopción de tecnologías innovadoras y la gestión responsable de los residuos y subproductos generados en la producción de alimentos. Solo a

través de esfuerzos conjuntos y enfoques multidisciplinarios pueden abordarse los desafíos actuales y crear un sistema alimentario que sea capaz de satisfacer las necesidades futuras de la población global de manera equitativa y respetuosa con el medio ambiente.

10. Bibliografía

- Alabiden, A., Fiorino, G., Polo, A., Filannino, P., Di Cagno, R. (2020). High-Value Compounds in Fruit, Vegetable and Cereal Byproducts: An Overview of Potential Sustainable Reuse and Exploitation. *Molecules*. 25. 2978. MDPI.
- Amicarelli, V., Lagioia, G., Bux, C. (2021). Global warming potential of food waste through the life cycle assessment: An analytical review. *Environmental Impact Assessment Review* 91. 106677. Elsevier.
- Annegowda, H.V., Majumder, P. (2021). Valorization of Agri-Food Wastes and By-Products. Capítulo 5. Valuable bioactives from vegetables. Elsevier. India. 83 – 87.
- Arun K. B., Madhavan A., Sindhu R., Binod P., Pandey A., Reshmy R., Sirohi R. (2020). Remodeling agro-industrial and food wastes into value-added bioactives and biopolymers. *Industrial Crops & Products* 154. 112621. Elsevier.
- Aschemann-Witzel, J., De Hooge, I., Amani, P., Bech-Larsen, T., Oostindjer, M., (2015). Consumer-related food waste: causes and potential for action. *Sustainability* 7 (6). 6457– 6477.
- Banco Mundial México. (2020). Marco conceptual para una estrategia nacional sobre la pérdida y el desperdicio de alimentos. Grupo del Banco Mundial. P. 6
- Banu, R.J., Kumar, G., Gunasekaran, M., Kavitha, S. (2020). Food Waste To Valuable Resources, Applications and Management. Elsevier. Academic Press. Capítulos 9, 14 y 18. 189 – 209, 299 – 323, 389 – 400.
- Bhat, R. (2021). Valorization of Agri-Food Wastes and By-Products. Capítulo 1. Sustainability challenges in the valorization of agri-food waste and buy-products. Elsevier. 1 – 27.
- Ben-Othman, S., Jōudu, I., Bhat, R. (2020). Bioactives from Agri-Food Wastes: Present Insights and Future Challenges. *Molecules MDPI* 25(3):510.
- Beretta, C., Stoessel, F., Baier, U., Hellweg, S., (2013). Quantifying food losses and the potential for reduction in Switzerland. *Waste Management*. Vol. 33. 764 – 773.

- Betim, C., Lemos, J., Pastore, G., Marostica, M. (2022). Bioactive Food Components Activity in Mechanistic Approach. Capítulo 1. Introduction. Academic Press. 1 – 3.
- Bonales Revuelta, Joel. (2021). Evaluación de impactos ambientales y económicos del aprovechamiento energético de cáscaras residuales de naranja: un estudio de caso en México. Tesis de Maestro en Ciencias de la Sostenibilidad. UNAM, ENES Morelia.
- Bottausci, S., Midence, R., Serrano-Bernardo, F., Bonoli, A. (2022). Organic Waste Management and Circular Bioeconomy: A Literature Review Comparison between Latin America and the European Union. Sustainability 2022, 14, 1661. Suiza.
- Caspeo SARL, 2019. USIM PAC.
<http://caspeo.net/usimpac>
- Chaboud, G., Daviron, B. (2017). Food losses and waste: navigating the inconsistencies. Global Food Security. 12. 1 – 7.
- Comisión Europea. (2015). Cerra el círculo: un plan de acción de la UE para la economía circular. Bruselas.
- Damián, C., Hernández, A., Garzón, J., Bellon, D. (2022). Desde la sostenibilidad hasta el desarrollo sustentable: Una radiografía de la evolución del concepto. Redilat. Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades. Vol. 3 Núm. 2. Paraguay. 1536 – 1550.
- De Laurentiis, V., Caldeira, C., Sala, S. (2021). Building a balancing system for food waste accounting at National Level, EUR 30685 EN, Publications Office of the European Union. Luxemburgo.
- Del Borghi, A., Moreschi, L., Gallo, M. (2020). The Interaction of Food Industry and Environmet. Capítulo 3. Life Cycle Assessment in the Food Industry. Italia. Elsevier. 63 – 118.
- Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&from=EN>
- Dutta, D., Sankar Cheela, V.R., Kumar, A., Rani, S., Adibhatla, S., Brajesh, E. (2021). Products, processes, environmental impacts, and waste

management of food industry focusing on ice cream. Capítulo 7. Environmental Impact of Agro-Food Industry and Food Consumption. Elsevier. 147 – 168.

- Ecoinvent. (2023).
<https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-association/>
- FAO. (2019). The State of Food and Agriculture 2019. Moving forward on food loss and waste reduction. Roma.
<https://www.fao.org/3/ca6030en/ca6030en.pdf>
- FAO. (2021). The State of Food and Agriculture 2021. Making agrifood systems more resilient to shocks and stresses. Rome, FAO.
<https://www.fao.org/3/cb4476en/online/cb4476en.html>
- Fărcas, A., Socaci, S., Nemes, S., Pop, O., Coldea, T., Fogarasi, M., Biris-Dorhoi, E. (2022). An Update Regarding the Bioactive Compound of Cereal By-Products: Health Benefits and Potential Applications. *Nutrients*. 14. 3470.
<https://doi.org/10.3390/nu14173470>
- FEMSA. (2020). #SinDesperdicioMéxico announces three winning initiatives to stop food waste.
<https://www.femsa.com/en/press-room/press-release/sindesperdiciomexico-announces-three-winning-initiatives-to-stop-food-waste/>
- Ferri, M., Vannini, M., Ehrnell, M., Eliasson, L., Xanthakis, E., Monari, S., Sisti, L., Marchese, P., Celli, A., Tassoni, A., (2020). From winery waste to bioactive compounds and new polymeric biocomposites: a contribution to the circular economy concept. *Journal of Advanced Research*. Elsevier.
- Gibson, M. (2020). *Food and Society*. Academic Press. Capítulo 10. Global Food Waste. Elsevier. 223 – 240.
- Galanakis C. M. (2015). *Food Waste Recovery. Processing Technologies and Industrial Techniques*. Academic Press. Elsevier. Grecia.
- Galanakis C. M. (2021). *Food Waste Recovery. Processing Technologies, Industrial Techniques, and Applications*. 2da Ed. Academic Press. Elsevier. Grecia.
- Galanakis, C. M., Cvejic, J., Verardo, V., Segura-Carretero, A. (2022). *Innovation Strategies in the Food Industry. Tools for Implementation*. 2da Ed.

Capítulo 13. Food use for social innovation by optimizing food waste recovery strategies. Academic Press. Elsevier.

- Greenpeace. (2020). ¿Sabes que es la incineración de residuos y por qué no debe aprobarse en México?
<https://www.greenpeace.org/mexico/blog/4106/sabes-que-es-la-incineracion-de-residuos-y-por-que-no-debe-aprobarse-en-mexico/>
- Hawken, P. (2017). Drawdown: The Most Comprehensive Plan Ever Proposed to Reverse Global Warming, 1ª Ed. Penguin.
- Ishangulyyev, R., Kim, S., Hyeon Lee, S. (2019). Understanding Food Loss and Waste – Whe Are We Losing and Wasting Food?. Foods. Aug 8 (8):297. MDPI.
- Jevons, W. S. (1865). The Coal Question. Macmillan & Co. Londres. Reino Unido.
- Joint Research Centre (JRC) for the European Comission’s Knowledge Centre for Bioeconomy. (2020). Brief on food waste in the European Union. Italia.
- Kemper, K., Voegele, J., Hickey, V., Ahuja, P. S., Poveda, R., Edmeades, S., Kneller, C., Swannell, R., Gillick, S., Corallo, A., Aguilar, G., Alencastro, S., Felix, E. y Sebastian, A. (2019). “Mexico Conceptual Framework for a National Strategy on Food Loss and Waste”. 68.
<https://beta.wrap.org.uk/resources/report/conceptual-framework-national-strategy-food-loss-and-waste-mexico>
- Lam, C., Yu, I. K.M., Hsu, S., Tsang, D. (2018). Life-cycle assessment of food waste valorization to value-added products. Journal of Cleaner Production. Vol. 199. Elsevier. 840 – 848.
- Ley de Economía Circular de la Ciudad de México. (2023).
https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal_old/uploads/gacetas/eff885ae4de05e2cae8ff80377f5205b.pdf
- Ley General de Economía Circular. (2019).
https://www.senado.gob.mx/65/gaceta_del_senado/documento/101326
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. (2023).
<https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGEEPA.pdf>

- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. (2003). https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_180121.pdf
- Majumder, P., Annegowda, H. (2021). Valorization of Agri-Food Wastes and By-Products. Capítulo 7. Fruit and vegetable by-products: novel ingredients for a sustainable society. Elsevier. 133 – 134.
- Ministerio de Agricultura, Naturaleza y Calidad Alimentaria Holandés. (2022). Reporte Periodístico: Mexican-Dutch collaboration on reducing food waste officially launched. <https://www.agroberichtenbuitenland.nl/actueel/nieuws/2022/02/11/mexican-dutch-collaboration-on-reducing-food-waste-officially-launched>
- Moresi, M., Cibelli, M., Cimini A. (2021). Environmental Impact of Agro-Food Industry and Food Consumption. Capítulo 1. Standard methods useable for mitigating the environmental impact of food industry. Academic Press. Elsevier. 1 – 30.
- Obersteiner, G., Scherhauser, S. (2021). Environmental Impact of Agro-Food Industry and Food Consumption. Capítulo 12. Environmental impact of food waste. Academic Press. Elsevier. 261 – 283.
- Pleissner, D., Qi, Q., Gao, C., Perez, C., Webb, C., Sze Ki Lin, C., Venus, J. (2016). Valorization of organic residues for the production of added value chemicals: A contribution to the bio-based economy. Biochemical Engineering Journal. Vol. 116. Elsevier. 3 – 16.
- Poore, J., Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. Science 1;360(6392). 987 – 992.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2021). Informe sobre el Índice de Desperdicio de alimentos 2021 del PNUMA. Nairobi, Kenia.
- Programa de Gestión Integral de Residuos para la Ciudad de México, 2021 – 2025. (2021). Gobierno de la Ciudad de México. Secretaría del Medio Ambiente.
- Proyecto de Decreto: Ley General de Economía Circular. (2021). https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/senclave/65/CS-LXV-I-1P-038/01_minuta_038_17nov21.pdf

- Qi Lau, K., Redzwan, M., Raihanah, S. (2021). Utilization of Vegetable and Fruit By-products as Functional Ingredient and Food. *Frontiers in Nutrition* Vol. 8. Sec. Nutrition and Sustainable Diets.
- Quantis. World Resources Institute. (2019) Food loss & waste value calculator.
<https://flwprotocol.org/why-measure/food-loss-and-waste-value-calculator/>
- Raak, N., Symmank, C., Zahn, S., Aschemann-Witzel, J., Rohm, H. (2017). Processing- and product-related causes for food waste and implications for the food supply chain. *Waste Management* 61. Elsevier. 461 – 472.
- RAE. Definición de Residuo. (2023).
<https://www.rae.es/drae2001/residuo>
- Ritchie, H. Rosado, P., Roser, M. (2022). Environmental Impacts of Food Production. Publicado en línea en OurWorldInData.org
<https://ourworldindata.org/environmental-impacts-of-food#citation>
- Roy, P., Mohanty, A. K., Dick, P., Manjusri, M. (2023). A Review on the Challenges and Choices for Food Waste Valorization: Environmental and Economic Impacts. *ACS Environmental* 3, 2. American Chemical Society. 58 – 75.
- Sagar, N., Pareek, S., Sharma, S., Yahia, E., Lobo, M. (2018). Fruit and Vegetable Waste: Bioactive Compounds, Their Extraction, and Possible Utilization. *IFT Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. Vol 00.
- Santos, D., Alexandre, J., Vicente, A., Moldão-Martins, M. (2019). Innovative Thermal and Non-Thermal Processing, Bioaccessibility and Bioavailability of Nutrients and Bioactive Compounds. Capítulo 2. Methods for determining bioavailability and bioaccessibility of bioactive compounds and nutrients. *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition*. 23 – 54.
- Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México. (2021). Programa de Gestión Integral de Residuos para la Ciudad de México, PGIR 2021-2025.

https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGEIRA/PGIR/PGIR%202021-2025_N_ago21.pdf

- Sharma, P., Gaur, V.K., Sirohi, R., Varjani, S., Kim, S., Wong, J. (2021). Sustainable processing of food waste for production of bio-based products for circular bioeconomy. *Bioresource Technology*. Vol. 325. 124684. Elsevier.
- Sheppard, F., Garcia-Garcia, G., Stone, J., Rahimifard, S. (2020). A complete decision-support infrastructure for food waste valorisation. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 247. 119608. Elsevier. Reino Unido.
- Socialab. (2020). #SinDesperdicioMéxico.
<https://ar.socialab.com/challenges/SinDesperdicioMexico>
- Srivastava, N., Singh, A., Kumari, P., Nishad, J., Gautam, V., Yadav, M., Bharti R., Kumar, D., Kharwar, R. (2021). Natural Bioactive Compounds. *Technological Advancements*. Capítulo 21. Advances in extraction technologies: isolation and purification of bioactive compounds from biological material. Academic Press. 409 – 433.
- Stone, J., Garcia-Garcia, G., Rahimifard, S. (2019). Development of a pragmatic framework to help food and drink manufacturers select the most sustainable food waste valorisation strategy. *Journal of Environmental Management* 247. 425 – 438.
- Thyberg, K., Tonjes, D., (2016). Drivers of food waste and their implications for sustainable policy development. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 106. Elsevier. 110 – 123.
- The Lancet Commissions. (2019). Food in the Anthropocene: the EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. Vol. 393. 447 – 92.
- Vilas-Boas, A., Pintado, M., Oliveira, A. (2021). Natural Bioactive Compounds from Food Waste: Toxicity and Safety Concerns. *Foods*. 10. 1564. MDPI.
- von Braun, J., Fresco, L., Afsana, K., Ali, M. (2023). Science and Innovations for Food Systems Transformation. Springer. Suiza. 11 – 13.
- Westhoek, H., Doelman, J., Muilwijk, H., Stehfest, E. (2021). Commentary: Food choices and environmental impacts: Achievements and challenges. *Global Environmental Change*. Vol. 71. Elsevier.

- Zarta, P. (2018). La Sustentabilidad o Sostenibilidad: Un Concepto Poderoso para la Humanidad. Universidad Colegio Mayor de Dinamarca. Tabula Rasa. Núm 28. Colombia. 409 – 423.
- Zeng, J., Zeng, H., Wang, Z. (2022). Review on technology of making biofuel from food waste. International Journal of Energy Research. 46. John Wiley & Sons Ltd. 10301 – 10310.