



BIORREFINERÍAS EN TIEMPOS DEL COVID-19, CONCEPTOS Y OPORTUNIDADES PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE EN LATINOAMÉRICA: INFORME DE CONCLUSIONES

CENTRO DE FORMACIÓN DE LA COOPERACIÓN ESPAÑOLA EN LA ANTIGUA

CRÉDITOS

AGENCIA ESPAÑOLA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL PARA EL DESARROLLO (AECID)

Centro de Formación de la Cooperación Española en La Antigua Guatemala (CFCE Antigua)

Dirección: **Jesús Molina Vázquez**

Coordinación del Área de Formación: **María Luisa Aumesquet**

Redacción y coordinación: **Diego Ballesteros-Vivas**

Edición de estilo: **Isabel Aguilar**

Diagramación: **Alhan Baiza**

© **Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo**

Guatemala, 23 de marzo de 2021

BIORREFINERÍAS EN TIEMPOS DEL COVID-19, CONCEPTOS Y OPORTUNIDADES PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE EN LATINOAMÉRICA: INFORME DE CONCLUSIONES

Diego Ballesteros-Vivas^{a,b}, Fabián Parada-Alfonso^a, Andrés Mauricio Hurtado-Benavides^c, Sandra Regina Salvador Ferreira^d, Alejandro Cifuentes^e, Elena Ibáñez^e

^aLaboratorio de Alta Presión, Grupo de Investigación en Química de Alimentos-GiQA, Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia.

^bDepartamento de Nutrición y Bioquímica, Facultad de Ciencias, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Colombia.

^cLaboratorio de Fluidos Supercríticos e Ingredientes Naturales, Universidad de Nariño, Pasto, Colombia.

^dLaboratório de Termodinâmica e Tecnologia Supercrítica (LATESC), Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

^eLaboratorio de Alimentómica, Instituto de Investigación en Ciencias de la Alimentación-CIAL, Consejo Superior de Investigaciones Científicas-CSIC, Madrid, España.

ÍNDICE

05 PRESENTACIÓN

07 INTRODUCCIÓN

08 DESAFÍOS DE LOS SISTEMAS ALIMENTARIOS EN TIEMPOS DE PANDEMIA

13 RESIDUOS ALIMENTARIOS (RA) COMO MATERIAS PRIMAS DE ALTO VALOR

18 BIORREFINERÍAS DE RESIDUOS AGROALIMENTARIOS: UNA APUESTA POR LA ECONOMÍA CIRCULAR

27 OTROS DESAFÍOS Y PERSPECTIVAS A MODO DE CONCLUSIÓN

28 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PRESENTACIÓN

En el presente documento se exponen las conclusiones del webinar «Biorrefinerías en tiempos del COVID-19, conceptos y oportunidades para el desarrollo sostenible en Latinoamérica. Sesión II», organizado por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España, el Instituto de Investigación en Ciencias de la Alimentación (CIAL) y la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID). El webinar se desarrolló el 23 de marzo de 2021 de manera virtual en el Centro de Formación de la Cooperación Española La Antigua Guatemala y tuvo como propósitos: (i) presentar el concepto de biorrefinería aplicado a los residuos agroalimentarios y analizar la importancia de su selección para revalorizarlos y reutilizarlos; así como, (ii) determinar cuáles pueden ser los procesos más apropiados, las posibles aplicaciones en la industria farmacéutica, cosmética y alimentaria y la necesidad de adaptar las biorrefinerías a las oportunidades de América Latina y el Caribe (ALC), no sólo desde la gestión de los residuos agroindustriales sino también como fuente de desarrollo de la región. El contenido temático del webinar consistió en la conceptualización de la biorrefinería como motor de la economía circular, su viabilidad técnica y económica al implicar aspectos de sostenibilidad como el impacto ambiental de los procesos, los compuestos objetivo (de alto valor añadido) a obtener, la composición de la biomasa (aspectos económicos y medioambientales),

entre otros. Estos temas se abordaron mediante planteamientos novedosos como el empleo de tecnologías limpias para la obtención de productos de alto valor añadido (empleando tecnologías basadas en el empleo de fluidos comprimidos), la potencial bioactividad de los productos obtenidos y un caso de estudio sobre la utilización integral del cáñamo. Las temáticas fueron socializadas y debatidas mediante cuatro ponencias desarrolladas por los profesores investigadores Dra. Elena Ibáñez (España), Dr. Fabián Parada Alfonso (Colombia), Dr. Andrés Hurtado Benavides (Colombia), Dra. Sandra Ferreira y moderado por Dr. Alejandro Cifuentes (España). El webinar hace parte del Plan de Transferencia, Intercambio y Gestión de Conocimiento para el Desarrollo de la Cooperación Española en América Latina y el Caribe (INTERCOONECTA) que tiene como objetivo proporcionar conocimientos para conseguir una alimentación saludable y accesible para la población de los países de América Latina y el Caribe, con el fin de contribuir a terminar todas las formas de hambre y desnutrición en la región,

El webinar forma parte de la programación Interconecta **“La Alimentación: oportunidades y desafíos en un contexto global y respetuoso con el medioambiente en América Latina y el Caribe”**, y se vincula con los Objetivos de desarrollo sostenible (ODS), particularmente con el número 2: *“Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible”* y se articula



a la línea de actuación “Apoyar al sector público de los países para la promoción de un sistema agroalimentario sostenible” del V Plan Director y al programa “La Alimentación: oportunidades y desafíos en un contexto global y respetuoso con el medioambiente en América Latina y el Caribe” del CSIC.

El webinar contó con la participación de investigadores/as provenientes de diversos orígenes (Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Cuba, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Panamá, Paraguay, Perú, República Dominicana, Uruguay y Venezuela), quienes trabajan en los campos agroalimentario, farmacéutico, medioambiental

y de salud en ámbitos académicos, investigativos, industriales y gubernamentales. La confluencia de una población tan diversa alrededor de temáticas de gran urgencia, como la seguridad alimentaria y el medio ambiente, propició un espacio de intercambio de propuestas basadas en la colaboración y alianza entre sus instituciones de origen y las entidades organizadoras, así como de inquietudes relacionadas con la generación de nuevos espacios académicos para profundizar en las temáticas de interés y de estrategias para diseñar y aplicar procesos de biorrefinería como motores de transformación ambiental, social y económica en América Latina y el Caribe.





INTRODUCCIÓN

En 2015 los Estados Miembros de Naciones Unidas pactaron una hoja de ruta para alcanzar el bienestar mundial abordando la sostenibilidad social, ambiental y económica. Este acuerdo se conoce como la Agenda 2030 y comprende 17 objetivos (ODS) y 169 metas de desarrollo sostenible cuyos fines son poner término a la pobreza, proteger al planeta para que continúe siendo habitable y garantizar que las personas disfruten de paz y prosperidad ahora y en el futuro (Naciones Unidas, 2015; PNUD, 2020). Pero a menos de una década de la vigencia de este ambicioso plan ¿cuál ha sido el nivel de cumplimiento de los propósitos de la Agenda 2030? El Marco de Indicadores Globales para los ODS adoptado por la Comisión de Estadística de las Naciones Unidas, así como, los exámenes voluntarios llevados a cabo por cada nación que suscribió la agenda han permitido verificar el avance anual en la implementación de los ODS (Lafortune, Fuller, Schmidt-Traub, & Kroll, 2020). Los reportes de 2019 y 2020 sobre el progreso de los ODS muestran, en la mayoría de los casos, un avance limitado. En la Figura 1 se representa esta situación comparando el nivel de cumplimiento de algunas metas de los ODS entre el mundo y América Latina y el Caribe (LAC). Los recuadros de color rojo en la figura muestran el mayor distanciamiento para alcanzar la meta, lo que plantea para LAC una situación crítica en el alcance de los ODS 1, 3, 8,

9, 12, 15 y 16. Adicionalmente, la mayoría de los datos utilizados en el esquema de progreso se compilaron antes de la pandemia de COVID-19 y, por lo tanto, no reflejan su impacto. La pandemia de COVID-19 sumó 71 millones de personas a la pobreza extrema en 2020 e incrementó la inseguridad alimentaria de manera moderada y severa afectando el ya comprometido alcance de los ODS 1 y 2, sin mencionar los efectos sobre los demás objetivos (United Nations, 2020). En consecuencia, resulta imperativo establecer estrategias que mitiguen las amenazas que plantea la pandemia sobre la desaceleración económica y fortalezcan la producción agrícola sostenible, así como, los sistemas alimentarios. En este contexto, las biorrefinerías, basadas en los principios del desarrollo sostenible y de la química verde, se plantean como un motor generador de sistemas de bioeconomía para la producción sostenida y permanente de alimentos inocuos y nutritivos que promuevan la vida y mantengan la salud, al tiempo que respaldan el desarrollo económico de las naciones. En el presente informe de conclusiones se exponen algunos de los desafíos que enfrentan los sistemas alimentarios en tiempos de pandemia y cómo el aprovechamiento biológico y económico de residuos alimentarios, empleando estrategias basadas en biorrefinería, puede contribuir a atenuar los impactos de la pandemia y a viabilizar los ODS, particularmente el número 2.





1. DESAFÍOS DE LOS SISTEMAS ALIMENTARIOS EN TIEMPOS DE PANDEMIA

La erradicación del hambre y la consolidación de la seguridad alimentaria son desafíos aún mayores dada la pandemia de COVID-19. La prevalencia de la subalimentación, indicador que mide el progreso de la meta 2.1 de los ODS, se ha mantenido relativamente estable durante el periodo 2014-2019 y por debajo del 9%, sin embargo, este valor representa la alarmante cifra de 690 millones de personas subalimentadas al término de ese año. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) estima, de manera global, que para el año 2030 el valor porcentual de este indicador incrementará en casi un punto, lo que equivale a 841 millones de personas subalimentadas, si no se implementan medidas oportunas y eficientes (FAO, FIDA, OMS, PMA y UNICEF, 2020). En LAC se prevé que la prevalencia de la subalimentación alcanzará el 9,5%, lo que implica que no solo no existen perspectivas para el cumplimiento de la meta, sino que, por el contrario, se dará una agudización de la situación. La erradicación del hambre debe acompañarse del acceso suficiente y constante a alimentos nutritivos, es decir, de la garantía efectiva de la seguridad alimentaria. En 2019 cerca de 2000 millones

de personas (25,9% de la población mundial) sufrieron inseguridad alimentaria moderada o grave (lo que representa un incremento del 22,4% en este indicador respecto a 2014), mientras que 750 millones de personas (9,7% de la población mundial) padecieron inseguridad alimentaria severa (United Nations, 2020). Esto implica que más de un tercio de la población no puede acceder a una dieta sana y equilibrada de forma regular o pasa uno o varios días sin comer. El incremento global de la inseguridad alimentaria en el periodo 2016-2019 se debió principalmente al deterioro de la situación en África subsahariana y en LAC, donde el indicador se ha incrementado con mayor celeridad: de 22,9% en 2014 a 31,7% en 2019. Estas tendencias tienen un impacto severo sobre la nutrición y, en consecuencia, sobre la salud humana, dado que las prevalencias de la emaciación, del sobrepeso en niños y de la obesidad en adultos, junto con la morbilidad asociada a las enfermedades no transmisibles, continúan aumentando, lo que afectará a los sistemas de salud pública y de atención sanitaria (FAO, FIDA, OMS, PMA y UNICEF, 2020). El efecto de la pandemia sobre los canales socioeconómicos y los sistemas alimentarios

Figura I. Progreso de metas seleccionadas de los ODS en 2019-2020. El texto de cada recuadro indica el nivel de desarrollo en el área específica abordada por el indicador con base a los datos disponibles (Statistics Division, Department of Economic and Social Affairs, 2019, 2020).



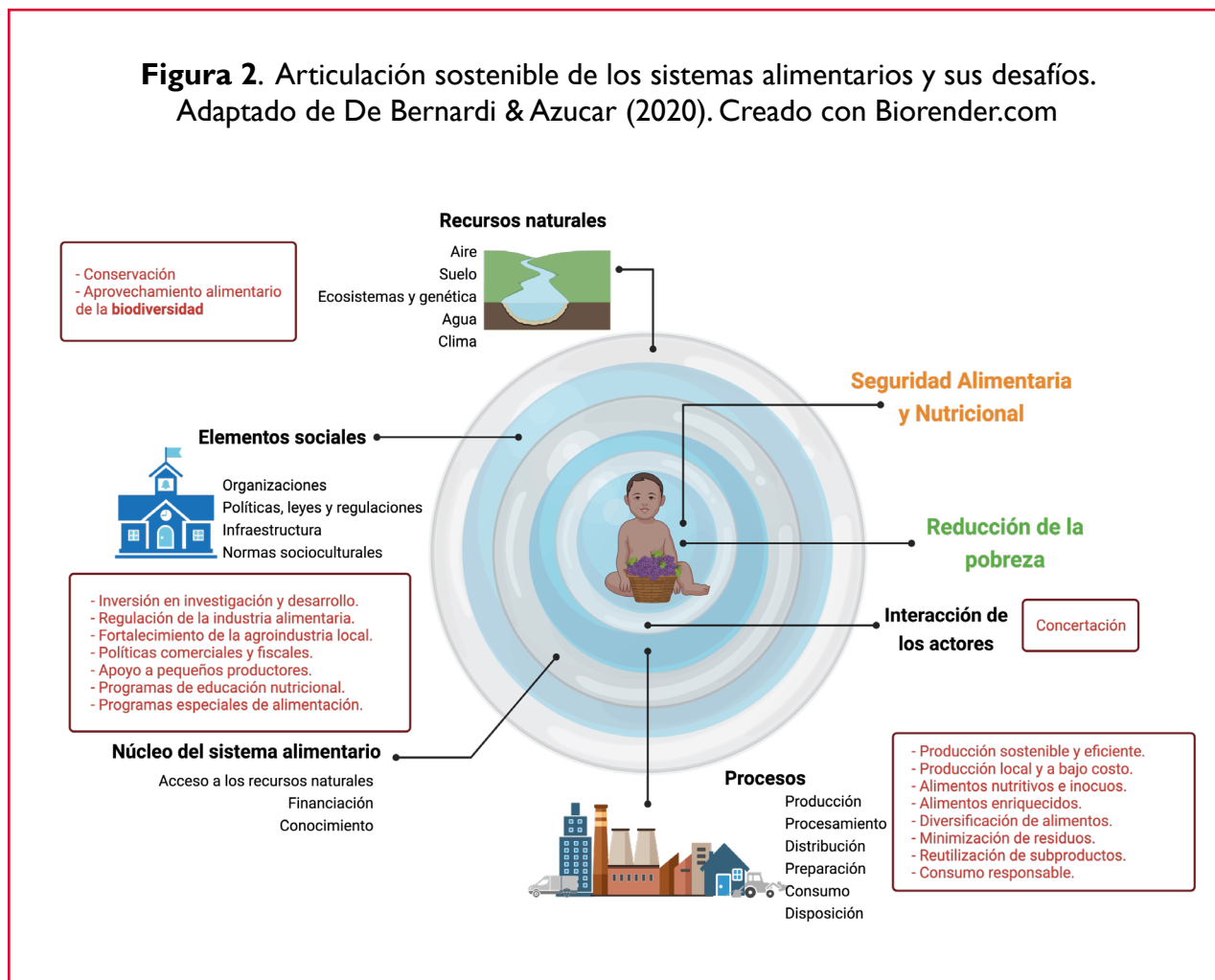
limitará aún más el acceso a alimentos nutritivos repercutiendo sobre la calidad de las dietas. Por ejemplo, la disminución del poder adquisitivo ha favorecido el consumo de cereales y derivados, dado que sus precios se han mantenido estables y pueden almacenarse por más tiempo. En la misma vía, se ha incrementado el consumo de alimentos altamente procesados y envasados, a pesar de su alto contenido de grasas saturadas, azúcar y sodio, ya que son menos costosos que los alimentos frescos y nutritivos. La orientación hacia estos tipos de alimentos compromete a los cuatro aspectos fundamentales de la calidad de las dietas saludables: diversidad, idoneidad, moderación y equilibrio. Por otra parte, los cierres y las restricciones de movilidad no solo han limitado el acceso a los alimentos, sino también su producción y distribución. Esta situación ha impactado de manera sensible a los agricultores familiares y a los pequeños productores de alimentos que tradicionalmente han enfrentado conflictos de acceso a la tierra y a otros recursos productivos. Estos actores fundamentales de los sistemas alimentarios pueden representar hasta el 85% de los productores de alimentos en regiones como América Latina, por lo que su sostenibilidad es crucial para las cadenas productiva y de suministro de alimentos. Las tensiones que la pandemia ha impuesto sobre los sistemas alimentarios se añaden al incremento en la demanda de alimentos por parte de la creciente población mundial. La FAO ha predicho que la producción de alimentos debe incrementar en 60% para 2050, lo que plantea desafíos sobre el sector agrícola, como el uso y gestión de la tierra y el suelo, la demanda energética y de combustibles, la disponibilidad y seguridad en el suministro de agua, la presión de las plagas sobre el rendimiento de los cultivos, los

impactos del cambio climático, la disposición de los residuos alimentarios, entre otros, todo esto sin imponer cargas adicionales a los recursos limitados y ya diezmados que proporciona el planeta (O’Riordan, 2018). Sin embargo, con el propósito de estimular y fortalecer aquellos procesos que promueven dietas saludables y desarrollo social sostenible, que se han generado o desarrollado durante la COVID-19 en LAC, se resaltan los siguientes: (i) el aumento en el autocuidado alimentario, lo cual ha generado mayor dedicación de tiempo y empleo de mejores productos en la elaboración casera de las dietas, (ii) un consumo informado, obligando a que los estados adopten medidas para proteger a los ciudadanos de productos alimentarios que pueden ser nocivos para la salud del consumidor, (iii) nuevas logísticas en la comercialización y distribución de alimentos, muchas de ellas estimuladas por la restricción en la movilidad y el desarrollo de tecnologías de la información y (iv) un comercio justo, al cual tienen acceso productores agropecuarios que se organizan y abordan las nuevas logísticas.

La superación de los desafíos que la pandemia ha generado involucra la articulación y transformación sostenible de los actores que integran los sistemas alimentarios. Tal integración se ha propuesto en el marco de los ODS con el ejercicio de algunas estrategias adicionales como se ilustra en la Figura 2 donde se muestran los elementos y actores de los sistemas alimentarios en una relación concéntrica cuyo máximo fin es la seguridad alimentaria y nutricional, así como, la reducción de la pobreza. En la primera capa del sistema se encuentran los recursos naturales y el mayor desafío consiste en el aprovechamiento sostenible, es decir, en su



Figura 2. Articulación sostenible de los sistemas alimentarios y sus desafíos.
Adaptado de De Bernardi & Azucar (2020). Creado con Biorender.com



uso racional y responsable para satisfacer la creciente demanda alimentaria al tiempo que se garantiza su conservación. En este sentido, las prácticas productivas basadas en la explotación de reservas fósiles y de minerales, así como en el uso intensivo de los recursos naturales deben transitar hacia modelos de bioeconomía circular (BC) (Venkata Mohan, Dahiya, Amulya, Katakojwala, & Vanitha, 2019). La BC tiene como fin lograr una economía sostenible cuyos procesos, productos y servicios estén basados

en la producción, utilización y conservación de recursos biológicos, incluidos el conocimiento, la ciencia, la tecnología y la innovación (Calicioglu & Bogdanski, 2020). Para ello, la BC incorpora el carácter cerrado y cíclico de la Economía circular optimizando los recursos al limitar los ingresos (masa y energía) y salidas (productos, subproductos y residuos) en los procesos productivos (Salvador et al., 2021). Asimismo, la BC se fundamenta en disciplinas como la biología, la ecología y la biotecnología

y en enfoques metodológicos como la química analítica verde y la biorrefinería, a fin de emplear los recursos de la biodiversidad y transformarlos de manera sostenible en productos bio-basados, tales como: alimentos nutritivos e inocuos, biocombustibles, biofertilizantes, bio-plásticos, compuestos bioactivos, entre otros (Carus & Dammer, 2018). Para que la transición entre estos modelos económicos sea factible, los elementos sociales, localizados en la segunda capa de la Figura 2, deben propiciar políticas públicas, normas y regulaciones que preserven los recursos naturales, promuevan el aprovechamiento alimentario de la biodiversidad, estimulen la producción agrícola regional, protejan a los sectores más vulnerables que viven con inseguridad alimentaria, generen programas especiales de alimentación y regulen la producción de alimentos nutritivos y asequibles. Estas políticas constituyen el eje articulador de los sistemas alimentarios y, por tanto, son un vehículo para el acceso a los recursos naturales, financieros

y al conocimiento necesario para los procesos de producción, procesamiento, distribución, preparación y consumo de alimentos, así como para la eliminación de los residuos alimentarios. En dichos procesos, los sistemas alimentarios enfrentan desafíos de gran importancia, entre los que se destacan: (i) la producción sostenible, eficiente y a bajo costo de alimentos nutritivos, diversos, enriquecidos e inocuos que sean asequibles para la población y (ii) la minimización de residuos alimentarios y su reutilización. De esta manera, el ejercicio concertado de los elementos y de los actores de los sistemas alimentarios podrá contribuir a la reducción de la pobreza, garantizar la seguridad alimentaria y nutricional, disminuir la incidencia de las enfermedades relacionadas con la alimentación y conservar los recursos del planeta. En los siguientes apartados se expone cómo la explotación biológica y nutricional de los residuos alimentarios puede contribuir al diseño y desarrollo de nuevos alimentos mediante los enfoques de la química verde y la biorrefinería.





2. RESIDUOS ALIMENTARIOS (RA) COMO MATERIAS PRIMAS DE ALTO VALOR

Los residuos alimentarios (RA) son uno de los problemas contemporáneos de mayor relevancia a nivel global, dado que se estima que anualmente más de 1,3 billones de toneladas métricas de los alimentos producidos se desperdician, lo que da cuenta de la ineficiencia de los sistemas alimentarios actuales (Gustavsson, Cederberg, Sonesson, van Otterdijk, & Meybeck, 2011). Esta problemática es multidimensional y tiene graves implicaciones ambientales, sociales, éticas y morales. Por una parte, la producción de alimentos compromete cantidades considerables de los recursos naturales, ya que, anualmente y de manera global, ésta consume alrededor del 25% de toda el agua empleada en las prácticas agrícolas y el 23% de las tierras de cultivo (lo que equivale a toda la tierra cultivable en África); mientras que genera aproximadamente el 8% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Teigiserova, Hamelin, & Thomsen, 2020). Además, y como ya se ha señalado, entre un tercio y la mitad de los alimentos producidos se desaprovechan, al tiempo que una cuantiosa porción de la población mundial vive con inseguridad alimentaria. Por otro lado, la eliminación de los RA acentúa la amenaza sobre el ambiente, ya que su gestión se lleva a cabo mayoritariamente mediante el vertido o relleno sanitario, sistema que aporta el 3% de las emisiones de GEI (Wang, Yuan, & Tang, 2021). El origen de los RA es multifactorial y ocurre durante toda la cadena alimentaria. De esta manera y en un sentido amplio, los RA incluyen las pérdidas de alimentos que se dan durante la producción

agrícola, en el manejo poscosecha, en el procesamiento y almacenamiento, así como a los desperdicios que se dan durante la distribución, transporte y consumo de alimentos. Asimismo, los RA pueden categorizarse de acuerdo con diferentes indicadores: comestibilidad (comestible, no comestible), origen (según grupo de alimentos), complejidad (productos sencillos o mezclas), entre otros (García-García et al., 2017). En términos de grupos de alimentos, la mayor cantidad de RA, que se originan desde los procesos de poscosecha hasta la distribución, son raíces, tubérculos y cultivos oleaginosos (25%), seguidos por frutas y hortalizas (22%), carnes y productos animales (12%) y cereales y legumbres (9%) (Socas-Rodríguez, Álvarez-Rivera, Valdés, Ibáñez, & Cifuentes, 2021). Sin embargo, una de las mayores fuentes de los RA son los consumidores finales (Gustavsson et al., 2011). Por estas razones, la Agenda 2030 se ha propuesto las metas 12.3 y 12.5, las cuales indican que “De aquí a 2030, reducir a la mitad el desperdicio de alimentos per cápita mundial en la venta al por menor y a nivel de los consumidores y reducir las pérdidas de alimentos en las cadenas de producción y suministro, incluidas las pérdidas posteriores a la cosecha” y “De aquí a 2030, reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización”, respectivamente (United Nations, 2017). En este contexto, la gestión sostenible de los sistemas alimentarios para la reducción de los RA es un área de investigación trascendental que ha crecido significativamente en los últimos años. Uno de

los resultados de mayor interés que ha proporcionado dicha área es la jerarquía de residuos aplicada a los productos alimentarios, la cual es una herramienta útil para clasificar las alternativas de gestión de RA según

su sostenibilidad (García-García et al., 2017). En esta jerarquía (ver Figura 3) la estrategia más sostenible y deseable es la prevención de la generación de RA o al menos la reducción en la fuente.



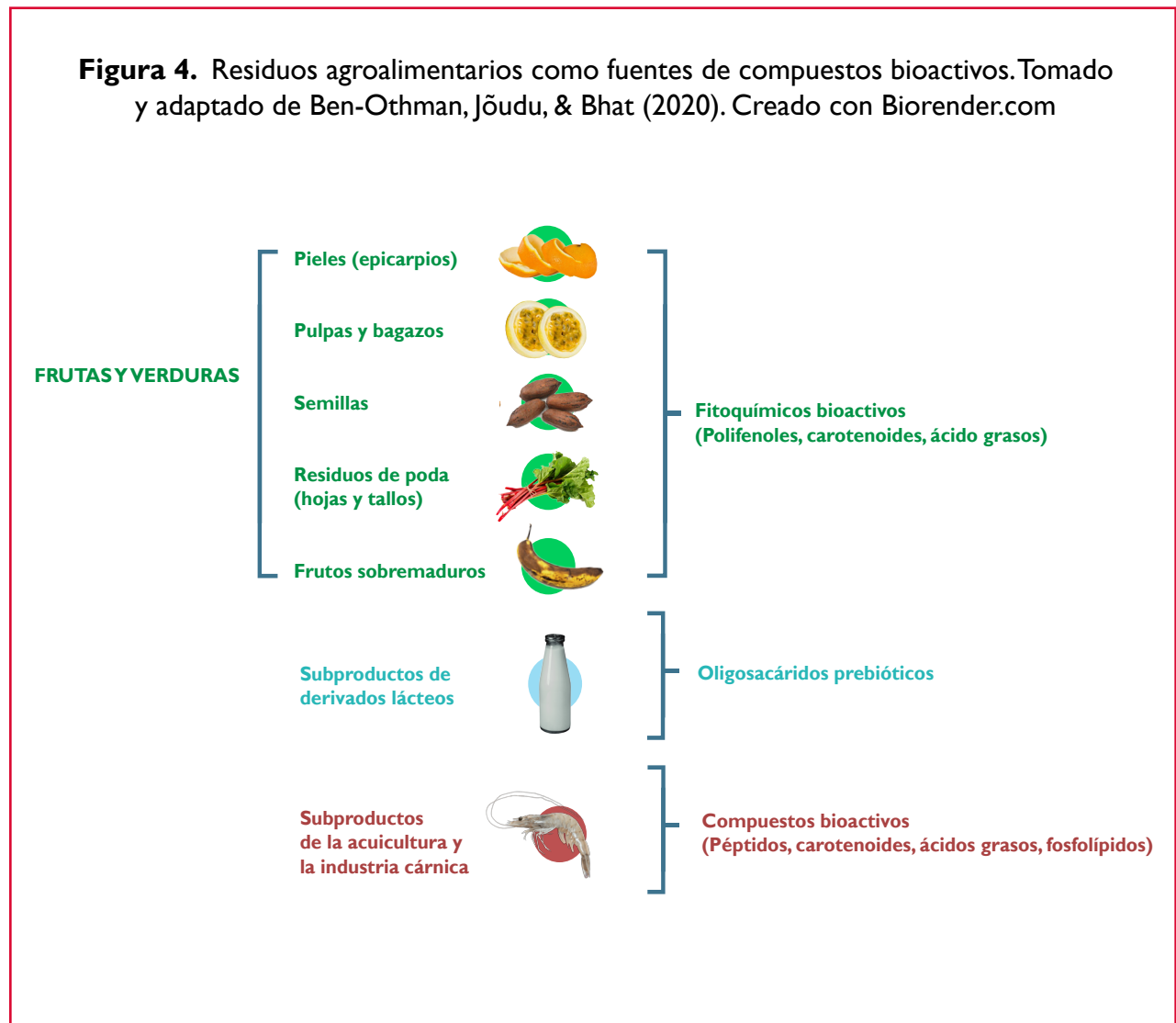
Sin embargo, la generación de RA es inevitable y cuando se trata de alimentos aptos para el consumo humano deben ser redistribuidos entre la población que vive con inseguridad alimentaria, aunque si los alimentos no son adecuados porque han caducado, son defectuosos o se trata de residuos integrados por componentes no comestibles de los alimentos, entonces deben reusarse para la alimentación animal. Por otra parte, cuando se trata de residuos agroalimentarios el tratamiento más

adecuado consiste en su reciclaje mediante la obtención de extractos y compuestos de interés. Por ejemplo, el procesamiento de frutas y verduras da lugar a pieles (epicarpios), pulpas, bagazos, semillas, residuos de poda (hojas y tallos), frutos sobremaduros que no cumplen con parámetros para su comercialización o con normas de calidad, entre otros, los cuales son fuente de compuestos bioactivos que pueden promover la salud humana y, en consecuencia, poseen un alto valor

(ver Figura 4) (Ben-Othman, Jõudu, & Bhat, 2020). Los residuos de derivados lácteos, así como los de la acuicultura y la industria cárnica también son fuente de este tipo de sustancias. Cuando los RA corresponden a alimentos en alto grado de descomposición, residuos domésticos mezclados, animales muertos o aceite de cocina, las estrategias más sostenibles son la recuperación

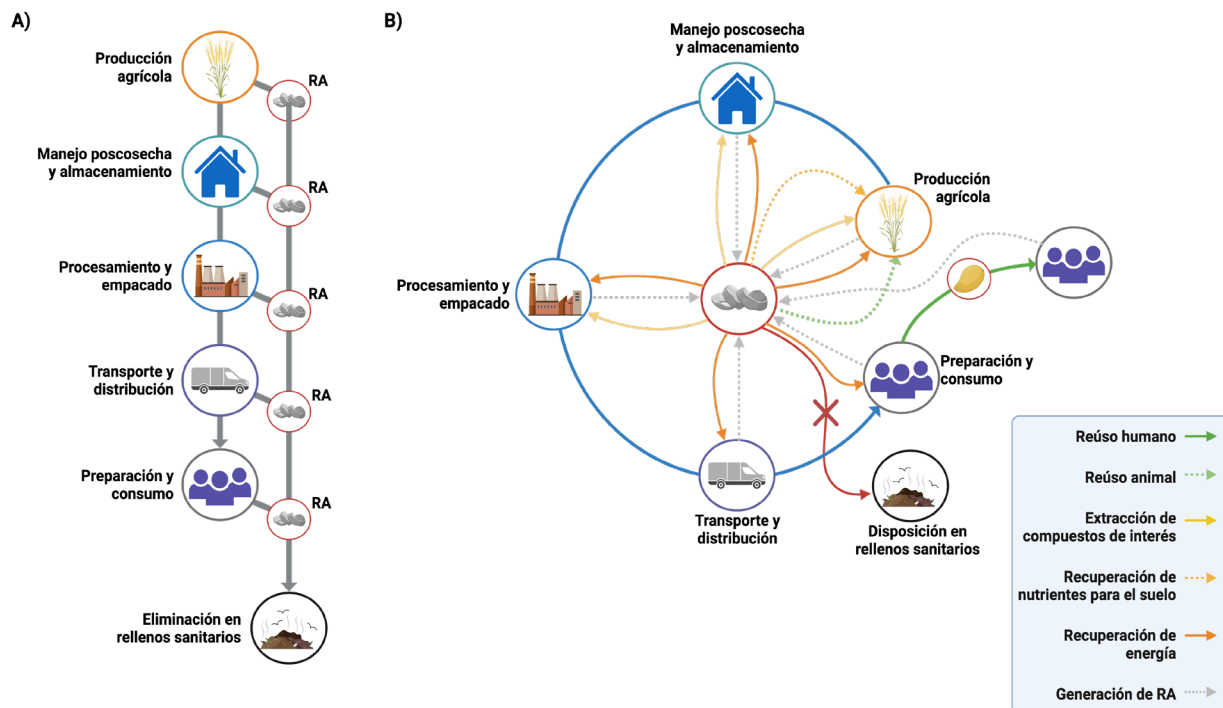
de nutrientes para el suelo, a través de procesos de digestión anaerobia y compostaje, y la recuperación de energía mediante la generación de biocombustibles o el tratamiento térmico. Finalmente, las estrategias menos deseables son la incineración y la eliminación en rellenos sanitarios dados los impactos sobre el ambiente y la salud pública.

Figura 4. Residuos agroalimentarios como fuentes de compuestos bioactivos. Tomado y adaptado de Ben-Othman, Jõudu, & Bhat (2020). Creado con Biorender.com



Estas estrategias también pueden contribuir al tránsito de los modelos económicos de los sistemas alimentarios desde un enfoque lineal hacia una estructura circular, como se representa en la Figura 5.

Figura 5. Representación de los procesos de los sistemas alimentarios en modelos de economía A) lineal y B) circular (Wang et al., 2021).



En el modelo de economía lineal (Figura 5A) los RA generados en cada proceso se acumulan y finalmente son eliminados en rellenos sanitarios. En contraste, cuando los procesos se integran en un modelo circular, los RA son aprovechados de acuerdo con la jerarquía

de residuos y estrategias sostenibles (Figura 5B). De esta manera, si los RA no son redistribuidos como alimentos entre la población, estos pueden ser transformados y sus productos contribuyen a cerrar la linealidad del sistema haciéndolo cíclico. Por ejemplo, el reuso de los RA, que no

presentan riesgo de contaminación con carne, pescado y derivados para la alimentación animal, puede aliviar parcialmente la carga que tienen los sistemas agrícolas para producir alimentos destinados al mismo fin. En la misma vía, los compuestos bioactivos obtenidos a partir de los RA pueden ser usados para múltiples finalidades, tales como: la preservación de alimentos, el diseño y desarrollo de alimentos fortificados y funcionales destinados a programas especiales de alimentación, al manejo de plagas en cultivos, entre otros. Asimismo, los nutrientes para el suelo obtenidos de los RA pueden

contribuir al fortalecimiento de prácticas agrícolas ecológicas y sostenibles. También, la energía obtenida de los RA puede dirigirse hacia los diferentes procesos de los sistemas alimentarios.

Para que el tránsito hacia la economía circular se consolide son necesarias metodologías sostenibles y eficientes de prospección de los RA dada su gran heterogeneidad. En el siguiente apartado se describe la biorrefinería como una estrategia de esta naturaleza, particularmente en el aprovechamiento de residuos agroalimentarios.





3. BIORREFINERÍAS DE RESIDUOS AGROALIMENTARIOS: UNA APUESTA POR LA ECONOMÍA CIRCULAR

La biorrefinería se define como el procesamiento integrado y sostenible de biomasa para la obtención de diversos productos de alto valor y por tanto comercializables, tales como: compuestos bioactivos, biopolímeros, biocombustibles y energía (Ferreira, 2017). El concepto de biorrefinería se deriva de la refinería del petróleo, estrategia en la que éste es refinado en combustibles, productos petroquímicos y energía. La diferencia fundamental entre estos conceptos yace en que la biorrefinería usa recursos renovables como materia prima, mientras que la refinería se basa en materiales no renovables como los combustibles fósiles. En el campo de los sistemas alimentarios la biorrefinería se constituye como una plataforma de gran potencial para reutilizar los RA y dotarlos de un mayor valor mediante la integración de diversas tecnologías de conversión. Así, las estrategias de reúso y reciclaje de los RA descritas en la Figura 3 (reúso animal, extracción de compuestos de interés, recuperación de nutrientes para el suelo y recuperación de energía) se pueden optimizar

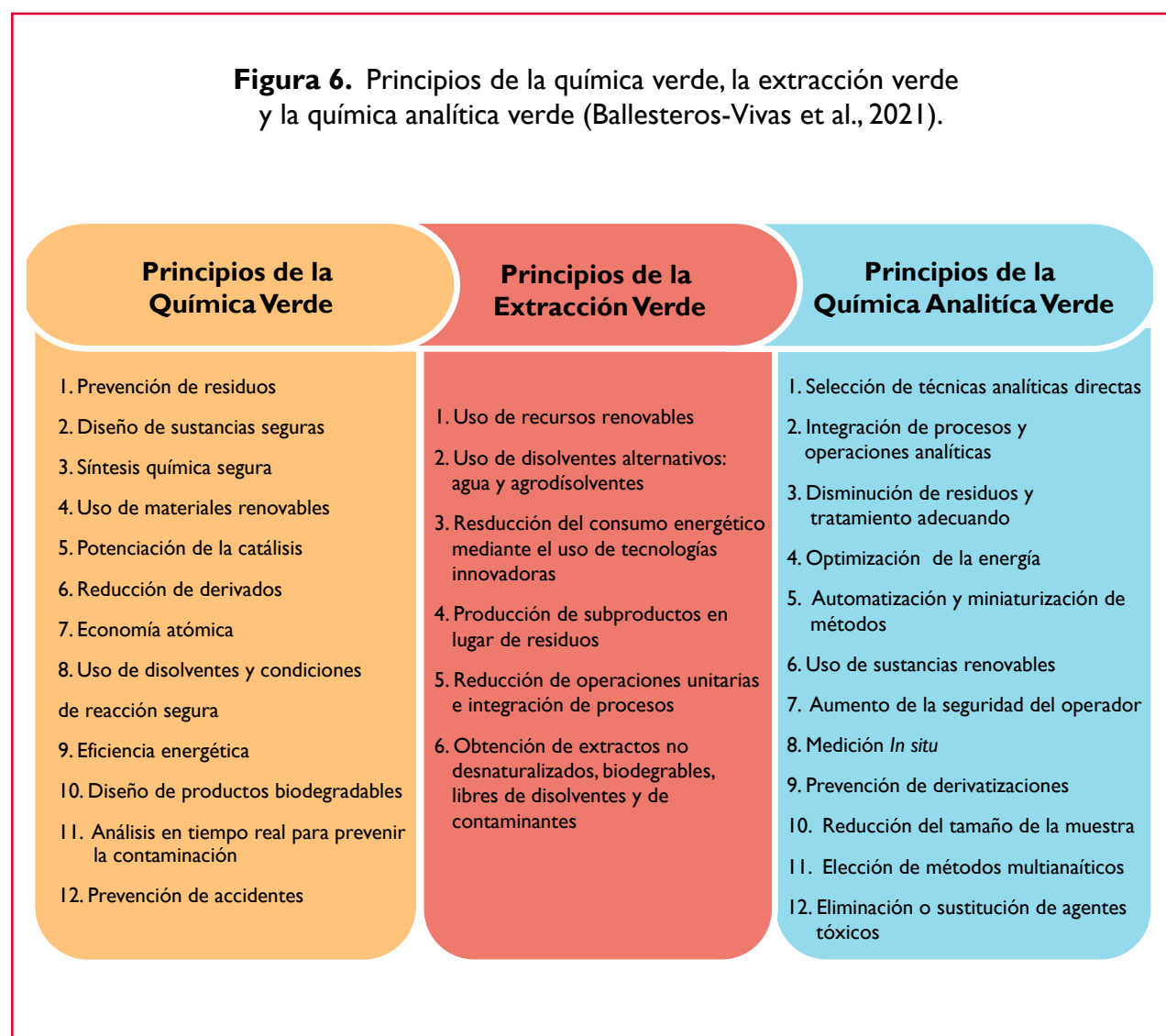
mediante estrategias de biorrefinería facilitando el tránsito de los sistemas alimentarios hacia modelos de economía circular como se ilustra en la Figura 5B. De acuerdo con Jin, Yang, Poe, & Huang (2018) la biorrefinería de los RA aplicada a la obtención de bioproductos con valor agregado tiene ventajas significativas, entre las que se incluyen:

- i. Utilización completa de materias primas, minimizando así la generación de nuevos residuos o subproductos durante el procesamiento.*
- ii. Diversificación de oportunidades de negocio al generar productos múltiples para diferentes poblaciones, nichos y mercados objetivo.*
- iii. Optimización de recursos mediante la integración e intensificación de tecnologías y de procesos.*
- iv. Potencial autosuficiencia energética mediante la producción de biogás o bioetanol.*

El diseño de un proceso de biorrefinería debe contemplar tres aspectos clave para que el aprovechamiento sea exitoso: la naturaleza de la biomasa, los productos finales y las rutas (tecnologías) para convertir a la biomasa en éstos. En el caso de los RA la naturaleza química es sumamente compleja. Por ejemplo, los residuos agroalimentarios provenientes de frutas y verduras, como los señalados en

la Figura 4, están compuestos de manera genérica por macronutrientes (carbohidratos, proteínas y lípidos), micronutrientes (vitaminas y minerales) y compuestos funcionales (p. ej., carotenoides, polifenoles, entre otros) (Carmona-Cabello, Garcia, Leiva-Candia, & Dorado, 2018). Sin embargo, el perfil de compuestos y su concentración varía ampliamente entre especies vegetales y de

Figura 6. Principios de la química verde, la extracción verde y la química analítica verde (Ballesteros-Vivas et al., 2021).



Por una parte, la química verde establece el marco general para el diseño de procesos novedosos, responsables y amigables con los colaboradores, el medio ambiente y los consumidores, en los que se obtienen productos seguros y biodegradables con un uso óptimo del material y de la energía, sin emplear ni generar sustancias tóxicas (Anastas & Eghbali, 2010). Por otro lado y de una manera más puntual, la extracción verde fija los principios de sostenibilidad para la obtención compuestos de interés a partir de fuentes naturales, tales como los RA. En estos principios se destaca el énfasis en los procesos extractivos libres de disolventes o en aquellos en los que se usen disolventes seguros, tales como agua, dióxido de carbono, etanol, acetato de etilo, entre otros. Asimismo, estos principios demandan tecnologías en las que se puedan emplear dichos disolventes, pero que además sean eficientes en términos energéticos y de la recuperación de los compuestos de interés. Algunas de estas tecnologías son: extracción asistida por ultrasonido (EAU), extracción asistida por microondas (EAM), inducción termomagnética, extracción con campos eléctricos pulsantes, descompresión instantánea controlada, extracción con líquidos presurizados (ELP), extracción con fluidos supercríticos (EFS), entre otras (Chemat et al., 2019). La extracción es además una de las primeras etapas de los procesos analíticos, los cuales son fundamentales en las estrategias de conversión mediante los enfoques de biorrefinería. En este contexto, los procesos analíticos tienen como fines proveer información confiable y de calidad sobre la identidad y cantidad de los compuestos que integran las biomasa y sus extractos, así como contribuir al conocimiento de su seguridad y bioactividad. Desde la perspectiva de la química

analítica verde estos fines son alcanzables de manera sostenible empleando técnicas analíticas directas, métodos multianalíticos e integrando operaciones y procesos analíticos (ver Figura 6). Entre las estrategias multianalíticas avanzadas y de alto rendimiento se encuentran las técnicas cromatográficas acopladas a espectrometría de masas de alta resolución (HRMS, por sus siglas en inglés) o a espectroscopia de resonancia magnética nuclear (NMR, por sus siglas en inglés), y las técnicas de análisis directo HRMS y NMR. Estas estrategias tienen la versatilidad suficiente para proporcionar información sobre la compleja composición de los RA y también pueden ser usadas para estudiar la bioactividad de extractos y compuestos obtenidos de estas fuentes mediante enfoques holísticos como la alimentómica (Balkir, Kemahlioglu, & Yucel, 2021). La alimentómica no solo permite conocer el efecto de compuestos y extractos a nivel molecular y celular en modelos biológicos *in vitro* e *in vivo* usando herramientas ómicas (p. ej., genómica, proteómica, metabolómica), sino también los efectos de la dieta sobre la salud de un individuo o de una población, por lo que resulta ser un enfoque indispensable para el diseño y desarrollo de productos alimentarios basados en biorrefinerías de RA. En la Figura 7 se ilustra, a modo de ejemplo, un proceso de biorrefinería de residuos agroalimentarios basado en los principios y condiciones descritas.

En esta figura se plantea un esquema de aprovechamiento integral de una biomasa, en este caso, de residuos agroalimentarios provenientes de frutas y verduras. Inicialmente, la biomasa es sometida a un procesamiento de inactivación de enzimas y microorganismos para detener las transformaciones bioquímicas de las que pueden ser sustrato los compuestos



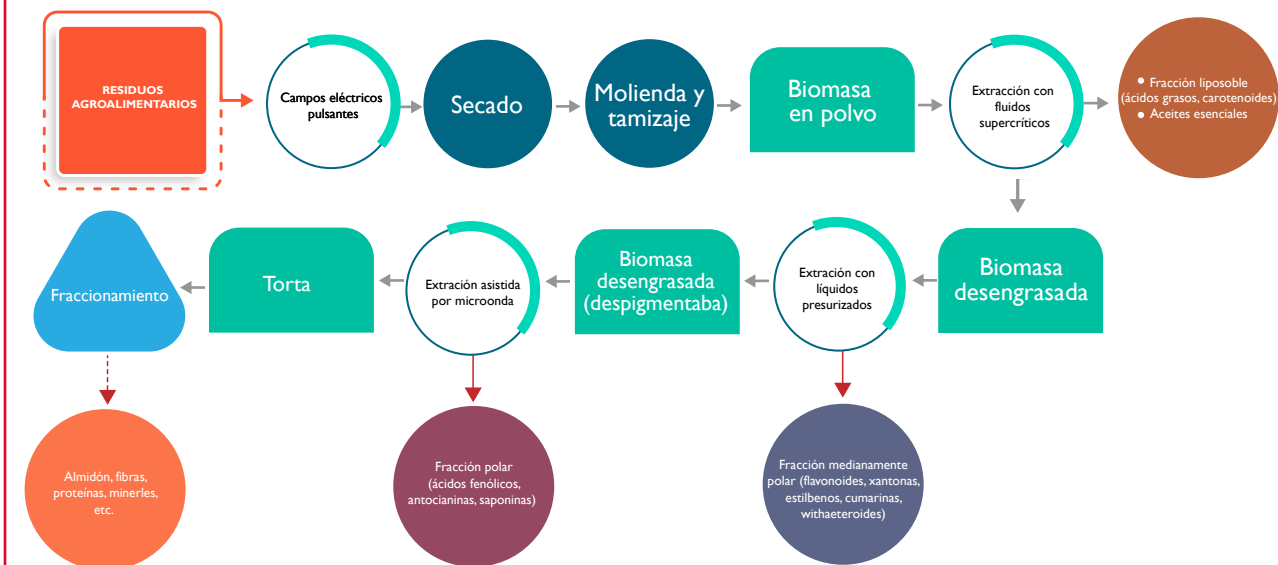
de interés. Dicho procesamiento se lleva a cabo mediante tecnologías sostenibles no térmicas como los campos eléctricos pulsantes. Posteriormente, el material es secado, molido y tamizado. Luego, la biomasa en polvo es objeto de procesos de extracción sucesivos empleando tecnologías y disolventes de diferente polaridad para así obtener fracciones ricas en compuestos de diversa naturaleza química. Si la primera etapa de extracción se lleva a cabo mediante EFS, particularmente con dióxido de carbono, es posible conseguir extractos apolares o de baja polaridad, lo que constituye la fracción liposoluble de la biomasa. De acuerdo con la naturaleza de la matriz, dicha fracción puede contener lípidos como ácidos grasos, pigmentos como carotenoides, o aceites esenciales. La biomasa resultante (desengrasada y despigmentada) contiene además otros compuestos de interés extraíbles por otras tecnologías que permitan condiciones de mayor polaridad. Por ejemplo, si se emplea ELP (con agua, etanol, acetato de etilo, etc.) se extraerían compuestos de mediana polaridad o polares (p. ej. flavonoides, xantonas, estilbenos, cumarinas, withaesteroides, entre otros). En una tercera etapa de extracción usando EAM, con un disolvente polar como agua, es factible recuperar los compuestos más polares (p. ej., ácidos fenólicos, antocianinas, acetogeninas, saponinas, entre otros). Finalmente, etapas adicionales de procesamiento físico o químico de la torta resultante permiten conseguir otros constituyentes de valor e interés, como carbohidratos (almidones y fibras), proteínas e hidrolizados, minerales, entre otros. Este proceso de biorrefinería también puede hacerse intensificando el uso de una tecnología, por ejemplo, adaptando un equipo de EFS para que funcione de manera multimodal como ELP

y llevando a cabo las extracciones sucesivas alternando disolventes y modificando las condiciones de presión, temperatura y tiempo de extracción. Las fracciones obtenidas durante la conversión de la biomasa son caracterizadas químicamente siguiendo el enfoque de la química analítica verde y adicionalmente su actividad biológica también es estudiada. Cada fracción da lugar a productos finales diferentes con el potencial para ser incorporados a las cadenas de los sistemas alimentarios como constituyentes de alimentos para humanos, alimentos para animales, envasado de alimentos, agentes de control de plagas, entre otras aplicaciones.

La biorrefinería de los RA es un área emergente de investigación y desarrollo, sin embargo, el potencial de las biorrefinerías ha sido evidenciado en el aprovechamiento integral de uno de los cultivos más antiguos en diversas culturas y civilizaciones del mundo: el cáñamo (*Cannabis sativa* L.), por lo que se trata de un referente de gran relevancia para el diseño de nuevos procesos de biorrefinería. El cáñamo es un cultivo de gran versatilidad puesto que es explotado por múltiples industrias, como la alimentaria, agrícola, textil, papelera, energética, cosmética, farmacéutica, entre otras (Zhao et al., 2020). En la actualidad todas las partes de la planta, excepto la raíz, se utilizan económicamente. En el ámbito alimentario, las hojas y las semillas son los órganos más explotados del cáñamo para la producción de alimentos reconocidos por la Comisión Europea y por la Agencia de Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) (Kladar, Čonić, Božin, & Torović, 2021). Las hojas se utilizan para la producción de té, mientras que las semillas se comercializan peladas o enteras y son procesadas mediante prensado en frío,



Figura 7. Esquema general de un proceso de biorrefinería de residuos agroalimentarios usando tecnologías sostenibles. Basado en Aranda Saldaña, Silva, Olmos Cornejo, & Orozco Lopez (2021).



lo que da lugar al aceite de semilla de cáñamo (ASC). En el ASC se han identificado 33 ácidos grasos diferentes, especialmente ácidos grasos poliinsaturados (PUFA por sus siglas en inglés) como el ácido linoleico (C18:2 ω 6) y el ácido α -linolénico (C18:3 ω 3), en concentraciones que varían entre 50-60% y 20-25% respectivamente, lo que indica que estos ácidos se encuentran en una proporción 3:1 en el ASC, la cual es óptima en términos nutricionales (Abdollahi, Sefidkon, Calagari, Mousavi, & Fawzi Mahomoodally, 2020). El procesamiento alimentario de las semillas de cáñamo genera como subproductos

semillas enteras no viables, residuos de la trilla, harina, salvado, torta del prensado, entre otros. Estos subproductos contienen, además de ácidos grasos, proteínas globulares (como edestina y albúmina), carbohidratos y fibras, minerales (p. ej., P, K, Mg, Ca, Fe y Zn), así como diversos compuestos funcionales (Abdollahi et al., 2020; Ellison et al., 2021). Recientemente se han desarrollado múltiples enfoques de biorrefinería para el posible aprovechamiento alimentario de estas biomásas. Setti et al., (2020) evaluaron tres estrategias de conversión de la harina de semillas de cáñamo

(subproducto del prensado) para la obtención de proteínas funcionales y péptidos bioactivos bajo un enfoque de biorrefinería: (i) extracción alcalina seguida de digestión enzimática, (ii) fermentación líquida con cepas de *Lactobacillus* spp. y (iii) fermentación en estado sólido por *Pleurotus ostreatus*. Los productos resultantes de las tres estrategias presentaron diferentes niveles de actividad antioxidante (incluida la captación de radicales ABTS, capacidad quelante de Fe²⁺ y poder reductor férrico) y actividad antihipertensiva (inhibición de la enzima convertidora de angiotensina I). Kitryté et al., (2018) desarrollaron un proceso de biorrefinería de los residuos de la trilla de las semillas de cáñamo para la recuperación de compuestos bioactivos apolares y polares que consistió en tres etapas de extracción sucesivas: (i) EFS con dióxido de carbono (EFS-CO₂); (ii) ELP empleando mezclas etanol-agua; y (iii) extracción asistida por enzimas (EAE) usando Viscozyme® L. La fracción liposoluble obtenida con EFS-CO₂ permitió recuperar cannabidiol (0,2 g/100g de residuos de trilla) y ácido cannabidiólico (2,2 g/100g de residuos de trilla); mientras que en el extracto hidroalcohólico-ELP se obtuvieron compuestos fenólicos (23,52 mg-equivalentes de ácido gálico/ g de residuos de trilla), entre los que se encontraron ácidos fenólicos y flavonoides. Por otra parte, el tratamiento EAE facilitó la liberación de mono y disacáridos. Las fracciones apolares y polares exhibieron una capacidad antioxidante (capacidad antioxidante equivalente al Trolox) interesante (0,6 a 205,2 mg de equivalentes de Trolox/g).

Por otra parte, Ellison et al., (2021) estudiaron la capacidad de algunos disolventes (dióxido de carbono, propano y dimetiléter) en condiciones sub-críticas (condiciones de

presión y temperatura cercanas al punto crítico) para obtener compuestos de alto valor a partir de la harina, las cáscaras y los corazones de las semillas de cáñamo prensadas en frío. Los disolventes extrajeron lípidos de las diferentes biomásas, como PUFAs (ácido linoleico, ácido α -linolénico, ácido γ -linolénico, ácido estearidónico, entre otros), fosfolípidos (fosfatidilcolina, lisofosfatidilcolina, fosfatidiletanolamina, entre otros) y tocoferoles (α -, β -, γ - y δ -tocoferol), así como proteínas ricas en ácido glutámico, arginina y ácido aspártico. Los resultados de los estudios sobre el aprovechamiento de subproductos de las semillas del cáñamo, basado en estrategias de biorrefinería, sugieren que los productos de la transformación pueden usarse como ingredientes de valor en los sectores alimentario, cosmético y farmacéutico.

En esta misma línea, diversos grupos de investigación han aportado evidencias fundamentales para el aprovechamiento de residuos agroalimentarios provenientes del procesamiento de alimentos que hacen parte de la biodiversidad de LAC. En la Tabla I se presentan algunos de los resultados más destacados en esta área. Como se puede observar, los residuos agroalimentarios estudiados comprenden una amplia gama de subproductos (epicarpios, semillas, hojas, tallos, orujos) de especies heterogéneas, puesto que se incluyen leguminosas (frijoles), frutas (mango, naranja, mandarina, papaya, tomate de árbol, uva), tubérculos (remolacha), entre otros. Estos residuos fueron sometidos a extracción empleando técnicas de extracción verde, como EFS, ELP y EAM, lo que permitió obtener compuestos bioactivos de diferente naturaleza química como ácidos grasos, carotenoides



y compuestos fenólicos (ácidos fenólicos, xantonas, flavonoides, aldehídos fenólicos, xantonas, estilbenos, cumarinas, galotaninos, antocianinas). Los extractos enriquecidos en los compuestos bioactivos presentaron actividades biológicas como antioxidante, antimicrobiano y

antiproliferativo, lo que plantea sus potenciales usos y aplicaciones como ingredientes en productos alimentarios, tales como alimentos funcionales y terapéuticos, nutracéuticos, suplementos, colorantes, preservantes y conservantes.

Tabla 1. Aplicaciones potenciales para el aprovechamiento de residuos agroalimentarios basado en procesos de biorrefinería.

Residuo agroalimentarios	Técnica verde de extracción	Compuestos bioactivos	Bioactividad del extracto	Uso potencial	Referencia
Cáscara de frijoles negros	ELP	Abtocianinas (delfinidin-3- glucósido)	Antioxidante	Suplemento y colorante alimentario	(Teixeira et al., 2021)
Epicarpio de mango	EAM	Compuesto fenólicos (ácidos gálico, mangiferina, quercetina)	Antioxidante y antiproliferativa	Quimioterapéutico contra cáncer de colon	(Sánchez- Camargo et al.,2020)
Semilla de guayaba	EFS	Ácidos grasos (ácido linoleico, ácido oleico) Compuestos fenólicos (vainilla, cinamaldebido)	NI	Aceite comestible	(Narváez-Cuenca, Inampues-Charfuelan, Hurtado-Benavides, Parada-Alfonso, & Vincken, 2020)
Epicarpio de mandarina	EFS	Compuestos fenólicos (naringenina, sinesteína, nobiletina)	Antioxidante	Aditivo para la protección de mayonesa contra la oxidación lipídica	(Franco-Amedo, Buelvas-Puello Miranda-Lasprilla, Martínez-Correa, & Parada-Alfonso 2020)
Semillas de curuba	ELP	Proantocianidinas	Antioxidante y antiproliferativa	Quimioterapéutico contra cáncer de colon	(Ballesteros-vivas et al., 2020)
Epicario de mango	EFS	Carotenoides (trans - β - caroteno)	Antioxidante	Aditivo para la protección de aceite de girasol contra la oxidación	(Sánchez-Camargo et al., 2019)
Remolacha (hojas y tallos)	EFS ELP	Compuestos fenólicos (ácidos fenólicos, flavonoides, estilbenos, aldehidos, fenólicos)	Antioxidante	Aditivo antioxidante en alimentos	(Battistella lasta et al., 2019Lasta, Lentz, Mezzomo, & Ferreira, 2019)

Residuo agroalimentarios	Técnica verde de extracción	Compuestos bioactivos	Bioactividad del extracto	Uso potencial	Referencia
Cáscara de buriti (moriche, aguaje)	ELP	cumarinas diterpenos fenólicos Compuesto fenólicos (ácidos, fenólicos, flavonoides, aldehídos, fenólicos, cumarinas, estilbenos)	Antioxidante	Aditivo antioxidante en alimentos y cosméticos	(Rudke Mzzuti, Andrade, Vitali, &) Ferreira, 2019)
Almendra de semilla de mango	ELP	Xantonas (mangifertina) Galotaninos (etilgalato)	Antioxidante y antiproliferativa	Quimioterapéutico contra cáncer de colon Aditivo para la protección de aceite vegetal contra la oxidación	(Ballesteros-Vivas, et al., 2019a)
Semilla de papaya	EFS	Compuestos fenólicos (ácido clorogénico, ácido ferúlico, ácido p- cumárico)	Antioxidante	Aditivo para la protección de carne de res cocida contra la oxidación lipídica Aditivo antioxidante	(Castro-Vargas Baumann, Ferreira, & Parada-Alfonso, 2019) (Castro-Vargas, Benelli, Ferreira, & Parada-Alfonso, 2013) (Andrade et al., 2012)
Epicarpio de tomate de árbol	EFS	NI	Antioxidante	Aditivo antioxidante y antimicrobiano	(Benelli, Riehi, Smánia, Smánia, & Ferreira, 2010) (de Campos, Leimann, Pedrosa, & Ferreira, 2008; Oliveira et al., 2013)
Posos y cáscaras de café	EFS	Compuestos fenólicos (ácido clorogénico)	Antioxidante	Aditivo antioxidante y antimicrobiano	(de Campos, Leimann, Pedrosa, & Ferreira, 2008; Oliveira et al., 2013)
Orujo de naranja (epicarpio y albedo)	EFS	L-limoneno, ácido palmítico y oleico, nbutilbencenosulfonamida y β-sitosterol	Antioxidante y antimicrobiano	Aditivo antioxidante y antimicrobiano	(de Campos, Leimann, Pedrosa, & Ferreira, 2008; Oliveira et al., 2013)
Orujo de uva (residuos vinícolas)	EFS	Compuestos fenólicos (ácido gálico, ácido p-hidroxibenzoico)	Antioxidante y antimicrobiano	Aditivo antioxidante y antimicrobiano	(de Campos, Leimann, Pedrosa, & Ferreira, 2008; Oliveira et al., 2013)

EAM: Extracción asistida por microondas; EFS: Extracción con fluidos supercríticos; ELP: Extracción con líquidos presurizados; NI: No informado.

Estas aplicaciones se han explorado en diferentes alimentos, como en los derivados lácteos, cárnicos y aceites que han sido funcionalizados con extractos antioxidantes provenientes de residuos agroalimentarios. Por ejemplo, extractos de orujo de uva, residuos del procesamiento de tomate, semillas de granada, residuos de champiñón, residuos vinícolas y

epicarpio de mango se han empleado en queso (Lucera et al., 2018), mantequilla (Abid et al., 2017), yogur (Ersöz, Kinik, Yerlikaya, & Açu, 2011), bebidas lácteas (Vital, Croge, Gomes-da-Costa, & Matumoto-Pintro, 2017), salchichas (Riazi, Zeynali, Hoseini, Behmadi, & Savadkoohi, 2016) y aceite de girasol (Sánchez-Camargo et al., 2019), respectivamente.

Las potenciales aplicaciones de los residuos agroalimentarios han trascendido al campo de los antivirales, más aún en el contexto de la atención a la actual emergencia sanitaria por COVID-19. El estudio de esta aplicación ha crecido de manera significativa en los últimos años. Por ejemplo, se ha observado que flavonas polimetoxiladas aisladas de extractos EFS del epicarpio de mandarina exhiben actividad contra el Virus sincitial respiratorio (VSR) (Xu et al., 2014). Asimismo, se ha reportado que compuestos aislados de extractos EFS,

como cinamaldehído de *Cinnamomi ramulus* y pseudoguaianólido de *Centipeda minima* poseen actividad antiviral contra VSR y H1N1 (Influenza A), respectivamente (Poletto et al., 2020). Esto indica que el aprovechamiento de residuos agroalimentarios con enfoques de biorrefinería debe abarcar el desarrollo de productos terapéuticos contra enfermedades virales, incluida la COVID-19, así como de otros productos de valor que potencien los sistemas alimentarios como una estrategia dual para combatir la pandemia y sus efectos.



OTROS DESAFÍOS Y PERSPECTIVAS A MODO DE CONCLUSIÓN

Las biorrefinerías de los RA, basadas en enfoques sostenibles como la química verde, la extracción verde y la química analítica verde, se perfilan como estrategias para el fortalecimiento de los frágiles sistemas alimentarios al promover la reutilización y conversión de los RA en productos de alto valor facilitando así el tránsito de los modelos de economía lineal hacia modelos de economía circular. De esta manera, la biorrefinería es además un vehículo para alcanzar las metas y objetivos de desarrollo sostenible, lo cual ha sido seriamente afectado por la COVID-19 en LAC. Sin embargo, persisten algunos desafíos importantes para el diseño y aplicación de procesos de biorrefinería de RA. Uno de estos consiste en la necesidad de contar con datos precisos sobre las cantidades de residuos generados a lo largo de las cadenas

de los sistemas alimentarios a fin de establecer las causas de la generación y las estrategias para su prevención. Esta información también reviste importancia para la planificación de los procesos de transformación basados en biorrefinería en términos de los balances de materia y energía. Por otra parte, es necesario desarrollar estudios económicos y de escalado de los procesos de biorrefinería de los RA que se realizan a nivel de laboratorio, para así garantizar su sustentabilidad. También resulta conveniente implicar a los diversos actores de los sistemas alimentarios (agricultores, productores, distribuidores, consumidores) en los estudios de biorrefinería para que los procesos de transferencia tecnológica generen impactos positivos a nivel social, económico y ambiental.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdollahi, M., Sefidkon, F., Calagari, M., Mousavi, A., & Fawzi Mahomoodally, M. (2020). A comparative study of seed yield and oil composition of four cultivars of Hemp (*Cannabis sativa* L.) grown from three regions in northern Iran. *Industrial Crops and Products*, 152(March). <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112397>

Abid, Y., Azabou, S., Jridi, M., Khemakhem, I., Bouaziz, M., & Attia, H. (2017). Storage stability of traditional Tunisian butter enriched with antioxidant extract from tomato processing by-products. *Food Chemistry*, 233, 476–482. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.125>

Anastas, P., & Eghbali, N. (2010). Green chemistry: principles and practice. *Chem Soc Rev*, 39(1), 301–312. <https://doi.org/10.1039/b918763b>

Andrade, K. S., Gonálvez, R. T., Maraschin, M., Ribeiro-Do-Valle, R. M., Martínez, J., & Ferreira, S. R. S. (2012). Supercritical fluid extraction from spent coffee grounds and coffee husks: Antioxidant activity and effect of operational variables on extract composition. *Talanta*, 88, 544–552. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2011.11.031>

Aranda Saldaña, M. D., Silva, E. K., Olmos Cornejo, J. E., & Orozco Lopez, C. L. (2021). Green Processes in Foodomics: Biorefineries in the Food Industry. *Comprehensive Foodomics*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100596-5.22821-7>

Balkir, P., Kemahlioglu, K., & Yucel, U. (2021). Foodomics: A new approach in food quality and safety. *Trends in Food Science and Technology*, 108(December 2020), 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.11.028>

Ballesteros-Vivas, D., Alvarez-Rivera, G., León, C., Morantes, S. J., Ibáñez, E., Parada-Alfonso, F., ... Valdés, A. (2020). Foodomics evaluation of the anti-proliferative potential of *Passiflora mollissima* seeds. *Food Research International*, 130(December 2019), 108938. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108938>



Ballesteros-Vivas, D., Álvarez-Rivera, G., Morantes, S. J., Sánchez-Camargo, A. del P., Ibáñez, E., Parada-Alfonso, F., & Cifuentes, A. (2019). An integrated approach for the valorization of mango seed kernel: Efficient extraction solvent selection, phytochemical profiling and antiproliferative activity assessment. *Food Research International*, 126, 108616. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108616>

Ballesteros-Vivas, D., Socas-Rodríguez, B., Mendiola, J. A., Ibáñez, E., & Cifuentes, A. (2021). Green Food Analysis: Current Trends and Perspectives. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 100522. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2021.100522>

Battistella Lasta, H. F., Lentz, L., Gonçalves Rodrigues, L. G., Mezzomo, N., Vitali, L., & Salvador Ferreira, S. R. (2019). Pressurized liquid extraction applied for the recovery of phenolic compounds from beetroot waste. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 21 (July). <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101353>

Ben-Othman, S., Jõudu, I., & Bhat, R. (2020). Bioactives from agri-food wastes: Present insights and future challenges. *Molecules* (Vol. 25). <https://doi.org/10.3390/molecules25030510>

Benelli, P., Riehl, C. A. S., Smânia, A., Smânia, E. F. A., & Ferreira, S. R. S. (2010). Bioactive extracts of orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck) pomace obtained by SFE and low pressure techniques: Mathematical modeling and extract composition. *Journal of Supercritical Fluids*, 55(1), 132–141. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2010.08.015>

Calicioglu, O., & Bogdanski, A. (2020). Linking the Bioeconomy to the 2030 Sustainable Development Agenda: Can SDG indicators be used to monitor progress towards a sustainable bioeconomy? *New Biotechnology*, 124658. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.10.010>

Carmona-Cabello, M., Garcia, I. L., Leiva-Candia, D., & Dorado, M. P. (2018). Valorization of food waste based on its composition through the concept of biorefinery. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 14, 67–79. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.06.011>

Carus, M., & Dammer, L. (2018). The Circular Bioeconomy - Concepts, Opportunities, and Limitations. *Industrial Biotechnology*, 14(2), 83–91. <https://doi.org/10.1089/ind.2018.29121.mca>

Castro-Vargas, H. I., Baumann, W., Ferreira, S. R. S., & Parada-Alfonso, F. (2019). Valorization of papaya (*Carica papaya* L.) agroindustrial waste through the recovery of phenolic antioxidants by supercritical fluid extraction. *Journal of Food Science and Technology*, 56(6), 3055–3066. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03795-6>

Castro-Vargas, H. I., Benelli, P., Ferreira, S. R. S., & Parada-Alfonso, F. (2013). Supercritical fluid extracts from tamarillo (*Solanum betaceum* Sendtn) epicarp and its application as protectors against lipid oxidation of cooked beef meat. *Journal of Supercritical Fluids*, 76, 17–23. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2012.10.006>

Chemat, F., Abert-Vian, M., Fabiano-Tixier, A. S., Strube, J., Uhlenbrock, L., Gunjevic, V., & Cravotto, G. (2019). Green extraction of natural products. Origins, current status, and future challenges. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 118, 248–263. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.05.037>

De Bernardi, P., & Azucar, D. (2020). The food system grand challenge: A climate smart and sustainable food system for a healthy Europe. In *Contributions to Management Science* (pp. 1–25). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33502-1_1

de Campos, L. M. A. S., Leimann, F. V., Pedrosa, R. C., & Ferreira, S. R. S. (2008). Free radical scavenging of grape pomace extracts from Cabernet sauvignon (*Vitis vinifera*). *Bioresource Technology*, 99(17), 8413–8420. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.058>

Ellison, C., Moreno, T., Catchpole, O., Fenton, T., Lagutin, K., MacKenzie, A., ... Scott, D. (2021). Extraction of hemp seed using near-critical CO₂, propane and dimethyl ether. *Journal of Supercritical Fluids*, 173(December 2020), 105218. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2021.105218>

Ersöz, E., Kinik, Ö., Yerlikaya, O., & Açu, M. (2011). Effect of phenolic compounds on characteristics of strained yoghurts produced from sheep milk. *African Journal of Agricultural Research*, 6(23), 5351–5359. <https://doi.org/10.5897/AJAR11.1012>

FAO FIDA OMS PMA y UNICEF. (2020). El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2020. Transformación de los sistemas alimentarios para que promuevan dietas asequibles y saludables. Roma: FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. <https://doi.org/10.4060/ca9699es>

Ferreira, A. F. (2017). Biorefinery Concept. In M. Rabaçal, A. F. Ferreira, C. A. M. Silva, & M. Costa (Eds.), *Biorefineries: Targeting Energy, High Value Products and Waste Valorisation* (pp. 1–20). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48288-0_1

Franco-Arnedo, G., Buelvas-Puello, L. M., Miranda-Lasprilla, D., Martínez-Correa, H. A., & Parada-Alfonso, F. (2020). Obtaining antioxidant extracts from tangerine (*C. reticulata* var. *Arrayana*) peels by modified supercritical CO₂ and their use as protective agent against the lipid oxidation of a mayonnaise. *Journal of Supercritical Fluids*, 165. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2020.104957>

García-García, G., Woolley, E., Rahimifard, S., Colwill, J., White, R., & Needham, L. (2017). A Methodology for Sustainable Management of Food Waste. *Waste and Biomass Valorization*, 8(6), 2209–2227. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9720-0>



Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., van Otterdijk, R., & Meybeck, A. (2011). Global food losses and food waste (Save Food!). Düsseldorf.

Jin, Q., Yang, L., Poe, N., & Huang, H. (2018). Integrated processing of plant-derived waste to produce value-added products based on the biorefinery concept. *Trends in Food Science and Technology*, 74(August 2017), 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.02.014>

Kitrytė, V., Bagdonaitė, D., & Rimantas Venskutonis, P. (2018). Biorefining of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) threshing residues into cannabinoid and antioxidant fractions by supercritical carbon dioxide, pressurized liquid and enzyme-assisted extractions. *Food Chemistry*, 267(March 2017), 420–429. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.09.080>

Kladar, N., Čonić, B. S., Božin, B., & Torović, L. (2021). European hemp-based food products – Health concerning cannabinoids exposure assessment. *Food Control*, 129(March). <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108233>

Lafortune, G., Fuller, G., Schmidt-Traub, G., & Kroll, C. (2020). How is progress towards the sustainable development goals measured? Comparing four approaches for the EU. *Sustainability (Switzerland)*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/su12187675>

Lasta, H. F. B., Lentz, L., Mezzomo, N., & Ferreira, S. R. S. (2019). Supercritical CO₂ to recover extracts enriched in antioxidant compounds from beetroot aerial parts. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 19(May), 101169. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101169>

Lucera, A., Costa, C., Marinelli, V., Saccotelli, M. A., Del Nobile, M. A., & Conte, A. (2018). Fruit and vegetable by-products to fortify spreadable cheese. *Antioxidants*, 7(5). <https://doi.org/10.3390/antiox7050061>

Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. New York.

Narváez-Cuenca, C. E., Inampues-Charfuelan, M. L., Hurtado-Benavides, A. M., Parada-Alfonso, F., & Vincken, J. P. (2020). The phenolic compounds, tocopherols, and phytosterols in the edible oil of guava (*Psidium guava*) seeds obtained by supercritical CO₂ extraction. *Journal of Food Composition and Analysis*, 89(February), 103467. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103467>

O’Riordan, T. J. C. (2018). UN Sustainable Development Goals: How can sustainable/green chemistry contribute? The view from the agrochemical industry. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 13(Figure 2), 158–163. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.06.014>

Oliveira, D. A., Salvador, A. A., Smânia, A., Smânia, E. F. A., Maraschin, M., & Ferreira, S. R. S. (2013). Antimicrobial activity and composition profile of grape (*Vitis vinifera*) pomace extracts obtained by supercritical fluids. *Journal of Biotechnology*, 164(3), 423–432. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2012.09.014>

PNUD. (2020). *Objetivos de Desarrollo Sostenible | PNUD*. Retrieved November 10, 2020, from <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>
Poletto, P., Alvarez-Rivera, G., Torres, T. M. S., Mendiola, J. A., Ibañez, E., & Cifuentes, A. (2020).

Compressed fluids and phytochemical profiling tools to obtain and characterize antiviral and anti-inflammatory compounds from natural sources. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 129. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.115942>

Rammuni, M. N., Ariyadasa, T. U., Nimarshana, P. H. V., & Attalage, R. A. (2019). Comparative assessment on the extraction of carotenoids from microalgal sources: Astaxanthin from *H. pluvialis* and β -carotene from *D. salina*. *Food Chemistry*, 277(May 2018), 128–134. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.10.066>

Riazi, F., Zeynali, F., Hoseini, E., Behmadi, H., & Savadkoohi, S. (2016). Oxidation phenomena and color properties of grape pomace on nitrite-reduced meat emulsion systems. *Meat Science*, 121, 350–358. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.07.008>

Rudke, A. R., Mazzutti, S., Andrade, K. S., Vitali, L., & Ferreira, S. R. S. (2019). Optimization of green PLE method applied for the recovery of antioxidant compounds from buriti (*Mauritia flexuosa* L.) shell. *Food Chemistry*, 298(May), 125061. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125061>

Salvador, R., Puglieri, F. N., Halog, A., Andrade, F. G. d., Piekarski, C. M., & De Francisco, A. C. (2021). Key aspects for designing business models for a circular bioeconomy. *Journal of Cleaner Production*, 278, 124341. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124341>

Sánchez-Camargo, A. del P., Ballesteros-Vivas, D., Buevas-Puello, L. M., Martínez-Correa, H. A., Parada-Alfonso, F., Cifuentes, A., ... Gutiérrez, L.-F. (2020). Microwave-assisted extraction of phenolic compounds with antioxidant and anti-proliferative activities from supercritical CO₂ pre-extracted mango peel as valorization strategy. *LWT*, 110414. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110414>

Sánchez-Camargo, A. del P., Gutiérrez, L. F., Vargas, S. M., Martínez-Correa, H. A., Parada-Alfonso, F., & Narváez-Cuenca, C. E. (2019). Valorisation of mango peel: Proximate composition, supercritical fluid extraction of carotenoids, and application as an antioxidant additive for an edible oil. *Journal of Supercritical Fluids*, 152, 104574. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2019.104574>



Setti, L., Samaei, S. P., Maggiore, I., Nissen, L., Gianotti, A., & Babini, E. (2020). Comparing the Effectiveness of Three Different Biorefinery Processes at Recovering Bioactive Products from Hemp (*Cannabis sativa* L.) Byproduct. *Food and Bioprocess Technology*, 13(12), 2156–2171. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02550-6>

Socas-Rodríguez, B., Álvarez-Rivera, G., Valdés, A., Ibáñez, E., & Cifuentes, A. (2021). Food by-products and food wastes: are they safe enough for their valorization? *Trends in Food Science & Technology*, 114, 133–147. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.002>

Statistics Division, Department of Economic and Social Affairs, U. N. (2019). Sustainable Development Goals Progress Chart 2019. Retrieved from <https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/progress-chart.pdf>

Statistics Division, Department of Economic and Social Affairs, U. N. (2020). Sustainable Development Goals Progress Chart 2020. Retrieved from <https://unstats.un.org/sdgs/report/2020/progress-chart-2020.pdf>

Teigiserova, D.A., Hamelin, L., & Thomsen, M. (2020). Towards transparent valorization of food surplus, waste and loss: Clarifying definitions, food waste hierarchy, and role in the circular economy. *Science of the Total Environment*, 706, 136033. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136033>

Teixeira, R. F., Benvenuti, L., Burin, V. M., Gomes, T. M., Ferreira, S. R. S., & Zielinski, A. A. F. (2021). An eco-friendly pressure liquid extraction method to recover anthocyanins from broken black bean hulls. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 67(August 2020). <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102587>

United Nations. Global indicator framework for the Sustainable Development Goals and targets of the 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/71/313 E/CN.3/2018/2, Work of the Statistical Commission pertaining to the 2030 Agenda for Sustainable Development § (2017). Retrieved from https://unstats.un.org/sdgs/indicators/GlobalIndicatorFrameworkafterrefinement_Eng.pdf

United Nations. (2020). *The Sustainable Development Goals Report 2020*. New York, USA: Department of Economic and Social Affairs.

Veleva, V. R., & Cue, B. W. (2019). The role of drivers, barriers, and opportunities of green chemistry adoption in the major world markets. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 19, 30–36. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2019.05.001>

Venkata Mohan, S., Dahiya, S., Amulya, K., Katakojwala, R., & Vanitha, T. K. (2019). Can circular bioeconomy be fueled by waste biorefineries — A closer look. *Bioresource Technology Reports*, 7(June), 100277. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100277>

Vital, A. C. P., Croge, C., Gomes-da-Costa, S. M., & Matumoto-Pintro, P. T. (2017). Effect of addition of *Agaricus blazei* mushroom residue to milk enriched with Omega-3 on the prevention of lipid oxidation and bioavailability of bioactive compounds after in vitro gastrointestinal digestion. *International Journal of Food Science and Technology*, 52(6), 1483–1490. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13413>

Wang, Y., Yuan, Z., & Tang, Y. (2021). Enhancing food security and environmental sustainability: A critical review of food loss and waste management. *Resources, Environment and Sustainability*, 4(November 2020), 100023. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100023>

Xu, J. J., Wu, X., Li, M. M., Li, G. Q., Yang, Y. T., Luo, H. J., ... Li, Y. L. (2014). Antiviral activity of polymethoxylated flavones from “guangchenpi”, the edible and medicinal pericarps of citrus *reticulata* ‘chachi.’ *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(10), 2182–2189. <https://doi.org/10.1021/jf404310y>

Zhao, J., Xu, Y., Wang, W., Griffin, J., Roozeboom, K., & Wang, D. (2020). Bioconversion of industrial hemp biomass for bioethanol production: A review. *Fuel*, 281(July). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118725>





EMBAJADA
DE ESPAÑA
EN GUATEMALA



Cooperación
Española
CONOCIMIENTO/ LA ANTIGUA