



industriales
etsii

**Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

**Sostenibilidad, retos tecnológicos y
circularidad en la reutilización de
residuos agroalimentarios típicos de
la cuenca mediterránea.**

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA INDUSTRIAL

Autora: María Isabel García Martínez

Director: José Antonio Fernández López

Codirector: José Manuel Moreno Angosto



**Universidad
Politécnica
de Cartagena**

Cartagena, a 28 de mayo de 2021

ABSTRACT (RESUMEN) Y KEYWORDS

En esta revisión bibliográfica se presenta un estudio exhaustivo de las diferentes alternativas para el aprovechamiento de biomásas lignocelulósicas que se generan en la industria agroalimentaria y que muestran cierto potencial para generar productos químicos, sustancias de alto valor añadido, biocombustibles y como adsorbentes para la eliminación de contaminantes emergentes. Así mismo, se ha estudiado como estas prácticas promueven la sostenibilidad en el marco de la economía circular y crea oportunidades de crecimiento empresarial.

This bibliographic review presents an exhaustive study of the different alternatives for the use of different lignocellulosic biomass samples that are generated in the food industry and that show some potential to generate chemical products, high added value substances, biofuels and as adsorbents for the elimination of emerging pollutants. It has also been studied how these practices promote sustainability in the framework of the circular economy and create opportunities for business growth.

Keywords

Industria agroalimentaria, economía circular, sostenibilidad, biomasa lignocelulósica, residuos vegetales

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	9
2. OBJETIVOS	11
3. DESARROLLO SOSTENIBLE	13
3.1. Claves e importancia	13
3.2. Objetivos de desarrollo sostenible (O.D.S)	16
3.3. ODS y residuos agroalimentarios	18
4. BIOMASAS LIGNOCELULÓSICAS.	21
4.1. Descripción	21
4.2. Composición	22
4.2.1. Celulosa	22
4.2.2. Hemicelulosa	23
4.2.3. Lignina	24
4.3. Propiedades de la biomasa	25
4.3.1. Propiedades físicas	26
4.3.1.1. Tamaño de partícula	26
4.3.1.2. Densidad	27
4.3.1.3. Fluidez	27
4.3.1.4. Molturabilidad	27
4.3.1.5. Sorción de humedad	28
4.3.2. Propiedades térmicas	28
4.3.2.1. Conductividad térmica	28
4.3.2.2. Calor específico	28
4.3.3. Propiedades químicas	28
4.3.3.1. Contenido de agua	28
4.3.3.2. Contenido de cenizas	29
4.3.3.3. Contenido de materia volátil	29
4.3.3.4. Carbono fijo	29
4.3.3.5. Análisis final	30
4.3.3.6. Contenido energético	30
4.4. RESIDUOS AGROALIMENTARIOS TÍPICOS DE LA CUENCA MEDITERRÁNEA	31
4.4.1. Residuos sólidos de la industria del aceite oliva	31
4.4.2. Residuos sólidos de la industria de la alcachofa	33
4.4.3. Residuos sólidos de la industria cítrica	35
5. APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGROALIMENTARIOS	39
5.1. Aprovechamiento como adsorbentes	39
5.1.1. Residuos sólidos de oliva como adsorbentes	42
5.1.2. Residuos sólidos de la alcachofa como adsorbentes	43
5.1.3. Residuos sólidos de cítricos como adsorbentes	44
5.2. Obtención de productos con alto valor añadido	45
5.2.1. A partir de residuos sólidos de oliva	46
5.2.2. A partir de residuos sólidos de cítricos	46
5.2.3. A partir de residuos sólidos de alcachofa	47
5.3. Obtención de bio-materiales.	49

5.4. Generación de biocombustibles _____	51
6. APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS αGROALIMENTARIOS Y ECONOMÍA CIRCULAR. BENEFICIOS_____	53
7. Conclusiones. _____	57
8. Referencias. _____	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Herramienta de evaluación de la bioeconomía circular.....	16
Figura 2. Concepto de biorrefinería y las técnicas individuales aplicadas a los residuos agroalimentarios	20
Figura 3. Estructura de biomasa lignocelulósica.....	22
Figura 4. Estructura de la celulosa	23
Figura 5. Estructura del xilano	24
Figura 6. Modelo estructural bidimensional de la lignina que muestra varios enlaces típicos de la molécula	24
Figura 7. Distribución de hemicelulosa, celulosa y lignina en la biomasa lignocelulósica	25
Figura 8. Propiedades fisicoquímicas de la biomasa lignocelulósica relevantes para los diferentes procesos	26
Figura 9. Componentes de la biomasa según diferentes bases.....	30
Figura 10. Anatomía de la alcachofa.....	34
Figura 11. Anatomía de los cítricos	36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Objetivos de desarrollo sostenible	17
Tabla 2. Contenido medio de biomasa forestal y herbácea.....	21
Tabla 3. Propiedades físicas y químicas de residuos sólidos de la oliva.....	32
Tabla 4. Composición del residuo sólido de oliva	33
Tabla 5. Propiedades físicas y químicas de residuos sólidos de alcachofa	35
Tabla 6. Análisis fisicoquímico de residuos sólidos de cítricos.....	37
Tabla 7. Análisis de minerales en residuos sólidos de cítricos	37
Tabla 8. Capacidades de adsorción de contaminantes de los diferentes residuos sólidos.....	41

1. INTRODUCCIÓN

El mundo está atravesando una nueva ola de urbanización, especialmente en los países en desarrollo emergente, dando lugar a un aumento sustancial del consumo de energía y materiales, así como a la generación de residuos antropogénicos, ocasionando fenómenos como el deterioro del paisaje, cambio climático, desertificación y contaminación, entre otros. Impulsado por este problema, se plantea un nuevo concepto, la economía circular. Su objetivo es proporcionar una alternativa sostenible al conocido marco de “tomar, fabricar y eliminar”. La economía circular apoya el concepto de simbiosis industrial donde se fomenta la sinergia a través de la reutilización de subproductos dentro de la industria, reduciendo así los residuos y la entrada de materia prima al sistema. La sostenibilidad revoluciona radicalmente el modelo económico y productivo, especialmente de la sociedad occidental, convirtiéndose en una prioridad institucional y corporativa a nivel global desde varios puntos de vista. La bioeconomía circular adopta el marco de la economía circular, utilizando la biomasa como un componente integral para generar productos químicos, sustancias de alto valor añadido y biocombustibles en una biorrefinería.

Con la creciente demanda de energía, las incontroladas emisiones de gases de efecto invernadero y el agotamiento de los combustibles fósiles, la biomasa emerge como una fuente de energía renovable fundamental para superar las necesidades actuales y futuras de la humanidad.

En vista de la importancia del aprovechamiento de los residuos lignocelulósicos y los beneficios que aportan, se ha centrado el interés en el desarrollo de técnicas y búsqueda de alternativas para reutilizar la biomasa proveniente de la industria del cítrico, oliva y alcachofa, por su alto potencial de reutilización y por la imponente cantidad de estos residuos generados especialmente en la cuenca mediterránea.

2. OBJETIVOS

Objetivo general

Describir las diferentes posibilidades para la reutilización de residuos agroalimentarios, fundamental en el marco de la economía circular y para llegar a alcanzar un desarrollo sostenible en el sector industrial.

Objetivos específicos

- Describir la importancia de la reutilización de residuos agroalimentarios para alcanzar un desarrollo sostenible.
- Identificar las propiedades físico-químicas y la caracterización analítica de los residuos agroalimentarios, y más específicamente de residuos de los cítricos, la alcachofa y la oliva.
- Enumerar las diferentes aplicaciones tecnológicas de los residuos agroalimentarios, y más concretamente, de biomasa proveniente de residuos del cítrico, la alcachofa y la oliva.
- Explicar los beneficios de la recuperación de los subproductos en el marco de la economía circular

3. DESARROLLO SOSTENIBLE

3.1. Claves e importancia

Desde el comienzo de la época industrial, el desarrollo económico y productivo se ha basado sobre los pilares de un modelo económico lineal de extracción- fabricación-uso-eliminación, sin considerar la optimización de los recursos disponibles ni medidas para valorizar los residuos generados, por lo que se ha venido infringiendo una gran presión en los ecosistemas y recursos naturales, ocasionando un ascendente deterioro ambiental, degradando el paisaje, aumentando las zonas desérticas, acelerando el cambio climático , entre otros . En las últimas décadas, se ha intentado encontrar una solución efectiva a estos problemas sin que la sociedad tenga que renunciar al progreso económico, pero si debe lograrse de un modo sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

Se intenta encontrar un nuevo camino para desvincular el crecimiento económico del agotamiento de los recursos naturales para tener un futuro más sostenible. Por todo ello, se introduce el concepto de economía circular. Ésta propone una vía más sostenible desde el punto de vista de producción y de consumo, trata de implementar un modelo económico muy distinto al lineal, basado en alargar y cerrar el ciclo de vida de los productos generados, energía y residuos.

La economía circular apoya el concepto de simbiosis industrial donde se fomenta la sinergia a través de la reutilización de subproductos dentro de la industria, reduciendo así los residuos y la entrada de materia prima al sistema. El exitoso acogimiento que tuvo el termino de economía circular radica en la perspectiva alentadora de abordar simultáneamente las preocupaciones sociales, económicas y ambientales que trae este novedoso modelo (Ubando et al., 2020). Se trata de una nueva visión, radicalmente opuesta al modelo actual de consumo y producción de industrias, gobiernos y consumidores. Una transición difícil, con carácter transversal que implica a todos los sectores y disciplinas y, muy especialmente a la tecnología como herramienta indispensable en esta transición (Schütte, 2018).

No fue hasta la década de 1990 cuando se esboza el concepto de bioeconomía. Impulsado por la mayor concienciación con la sostenibilidad y habiendo captado la atención de académicos y profesionales de la industria. La sostenibilidad se convierte en una prioridad institucional y corporativa a nivel global desde varios puntos de vista, revolucionando integralmente el modelo productivo, de consumo y económico de las sociedades occidentales. La bioeconomía circular adopta el marco de la economía circular, utilizando la biomasa como un componente integral para generar productos químicos, sustancias de alto valor añadido y biocombustibles en una biorrefinería (Ubando et al., 2020).

El concepto de bioeconomía ha evolucionado drásticamente a lo largo de los años. En Estados Unidos inicialmente la preocupación principal era garantizar el suministro de combustibles tanto fósiles (gasolina, gas y carbón) como (bioetanol, biodiesel, etc.), posteriormente evolucionó hacia un enfoque más amplio con la generación de otros bioproductos (lubricantes, componentes biológicos, etc.). En cambio, en la UE, los objetivos iniciales se basaron en los pilares de invertir en I+D+I, reforzar la interacción política y hacer participar a las partes interesadas, así como mejorar los mercados y competitividad, orientándose, más tarde, a abordar de forma más visible la sostenibilidad y economía circular (Aguilar et al., 2019).

Desde 2012 diferentes estrategias políticas sobre bioeconomía se han ido desarrollando rápidamente en varios países, desde los más industrializados a otros en desarrollo. Aunque existe diversidad en estas políticas, todas comparten un conjunto de medidas, como la promoción de I+D+I, el desarrollo de infraestructuras y de nuevas capacidades, la mejora de la comercialización, el apoyo a la demanda y la revisión y armonización del marco regulatorio (Aguilar et al., 2019).

En 2050, se prevé que la población mundial pase de los 7000 millones a alcanzar los 9700 millones, lo que ejercerá una presión aun mayor sobre el medio ambiente y los recursos naturales. Junto con las amenazas del cambio climático, el agotamiento de la biodiversidad, la escasez de agua y suelo y el aumento de los niveles de contaminación, se necesitan con urgencias nuevas soluciones. Una bioeconomía impulsada por la innovación, con una mayor sostenibilidad como su objetivo final, puede proporcionar renovación, circularidad y multifuncionalidad al mismo tiempo que crea empleo, crecimiento y prosperidad en áreas rurales, costeras y urbanas. Sin embargo, para ser verdaderamente sostenible, la bioeconomía debe usar la biomasa solo de una manera

inteligente y eficiente, e idealmente, para propósitos donde no hay otras alternativas renovables disponibles para abordar las amenazas y la escasez de recursos que enfrentamos (Dupont-Inglis & Borg, 2018).

Con la creciente demanda de energía, las incontroladas emisiones de gases de efecto invernadero y el agotamiento de los combustibles fósiles, la biomasa emerge como una fuente de energía renovable fundamental para superar las necesidades actuales y futuras de la humanidad (Ubando et al., 2020). Así es como nace el concepto de biorrefinería, para producir productos de alto valor añadido a partir de diversas materias primas como biomasa lignocelulósicas, algas y otros tipos de residuos. Una biorrefinería es una instalación de en la que se integra procesos de conversión de la biomasa y equipamientos para producir biocombustibles, energía, y productos químicos de alto valor comercial.

El establecimiento de la economía circular promete múltiples beneficios, se espera un crecimiento económico positivo junto con el aumento exponencial de las oportunidades laborales tras la expansión y el desarrollo de los productos finales comercializables de origen biológico (Ng et al., 2020). Sin embargo, la biotecnología industrial requiere una alta especialización técnica y las habilidades actuales no se alinean con las necesidades que demanda el cambio hacia una bioeconomía circular (Dupont-Inglis & Borg, 2018). Los programas interdisciplinarios deben implementar esta visión en la ingeniería ambiental y la educación científica con el objetivo de capacitar a la próxima generación de expertos profesionales. Se necesita adaptar el modelo educativo superior con nuevos enfoques que integren los conceptos de recuperación de recursos y circularidad para ayudar a que la transición al modelo circular sea rápida y efectiva, y no se quede atrás la integración de estos conceptos en los planes de estudio (Weissbrodt et al., 2020).

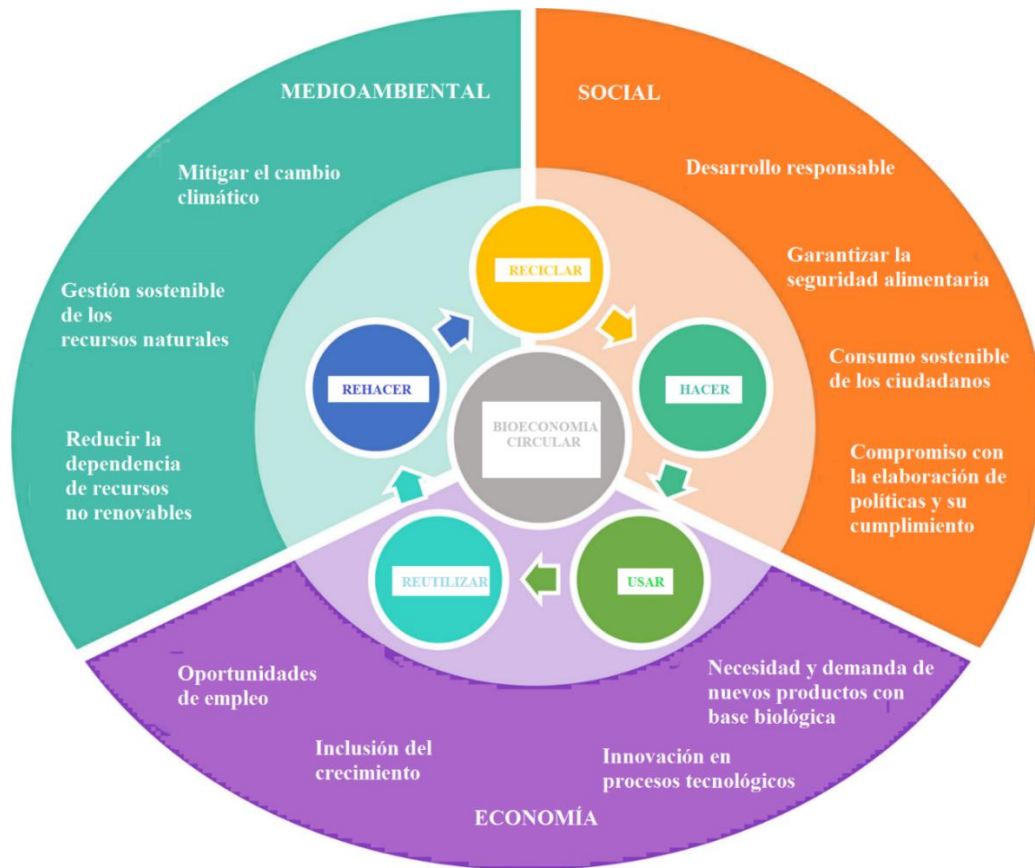


Figura 1. Herramienta de evaluación de la bioeconomía circular (Ubando et al., 2020).

3.2. Objetivos de desarrollo sostenible (O.D.S)

Los objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), son una serie de medidas a adoptar dentro de un acuerdo universal para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que las personas disfruten de la paz y la prosperidad, ahora y en el futuro. Fundamentalmente, estos defienden que abordar el problema del cambio climático es esencial para el desarrollo sostenible y la erradicación de la pobreza.

Estos objetivos fueron adoptados formalmente por todos los estados miembros de las Naciones Unidas en 2015, para el periodo 2016-30 para abordar la abrumadora situación mundial de la necesidad de un enfoque radicalmente más sostenible (Morton et al., 2017).

Al mismo tiempo, sin embargo, existe un desafío tanto a nivel nacional como internacional, con respecto a la debido a la complejidad y las interdependencias de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Los enfoques unidimensionales no son apropiados porque los objetivos individuales posiblemente podrían competir entre sí. Lo que se necesita son perspectivas y soluciones holísticas y sistemáticas, no se puede alcanzar ninguno de los objetivos sin aunar las tres dimensiones del desarrollo sostenible: crecimiento económico, inclusión social y protección del medio ambiente (Schütte, 2018).

En la tabla 1 se muestran los ODS agrupados en las cinco áreas de mayor importancia según la ONU.

Tabla 1. Objetivos de desarrollo sostenible (Morton et al., 2017)

• Personas
ODS1: Fin de la pobreza
ODS2: Hambre cero
ODS3: Buena salud y bienestar
ODS4: Educación de calidad
ODS5: Igualdad de género
ODS6: Agua limpia y saneamiento
• Prosperidad
ODS 7: Energía asequible y no contaminante
ODS 8: Trabajo decente y desarrollo económico
ODS 9: Industria, innovación e infraestructura
ODS10: Reducir las desigualdades
ODS11: Ciudades y comunidades sostenibles
ODS12: Producción y consumo responsables

• Planeta
ODS13: Acción por el clima
ODS14: Vida submarina
ODS15: Vida en la tierra

• Paz
ODS16: Paz, justicia e instituciones sólidas

• Asociaciones
ODS17: Asociaciones para los objetivos

3.3. ODS y residuos agroalimentarios

De los ODS citados anteriormente, existe una conexión entre la valorización de residuos agroalimentarios y su contribución al cumplimiento de los objetivos, destacando principalmente su aportación a:

- ODS 7: Energía asequible y no contaminante
- ODS 9: Industria, innovación e infraestructura
- ODS 10: Producción y consumo responsable
- ODS 13: Acción pro el clima

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), se producen 1300 millones de toneladas de alimentos al año, de los cuales un tercio de la producción total se desperdicia, lo que le cuesta a la economía mundial más de 900.000 millones de dólares (Dahiya et al., 2018). La cantidad de residuos generada puede provenir de su producción, manejo, almacenamiento, procesamiento, distribución o consumo. Además, estos residuos se pueden clasificar en evitables (consumo) e inevitable (no comestible). La fracción de residuos evitable se puede controlar hasta cierto punto mediante la reducción y reutilización, pero la fracción inevitable no se puede controlar, y se hace necesaria la creación de estrategias innovadoras adecuadas para la valorización de estos residuos (Mak et al., 2020).

Las industrias agroalimentarias generan enormes cantidades de residuos sólidos o líquidos biodegradables y consisten en residuos orgánicos de las materias primas procesadas. Según la literatura, se estima que estos residuos agroalimentarios provienen aproximadamente el 26% de las industrias de bebidas, 21% de la industria láctea, 14,8% de la producción y procesamiento de frutas y verduras, 12,9% del procesamiento y fabricación de cereales, 8% de la industria cárnica, 3,9% de la industria pesquera y un 12,7% de otros (Nayak & Bhushan, 2019).

Los residuos de alimentos y residuos agroalimentarios generados están asociados con una alta variabilidad en su composición y un gran volumen. Independientemente de la variabilidad en su composición y de su origen, los residuos presentan una alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y una alta demanda química de oxígeno (DQO) debido a la presencia de grandes cantidades de material orgánico como proteínas, carbohidratos y lípidos junto con una cantidad variable de sólidos suspendidos (Nayak & Bhushan, 2019). Estas condiciones ofrecen un excelente caldo de cultivo para varios microorganismos, contribuyendo a graves contaminaciones bacterianas y enfermedades infecciosas. La disposición de los residuos alimentarios en los vertederos genera gases de efecto invernadero como el metano y el dióxido de carbono, contribuyendo al ya conocido cambio climático y calentamiento global tan perjudicial para los organismos vivos (Ng et al., 2020).

En este contexto, la industria agroalimentaria juega un papel importante en la aplicación de los principios de la economía circular y desarrollo sostenible, se busca preservar el valor de los recursos (materias primas, agua y energía) utilizados en la producción de alimentos y bebidas, pero al mismo tiempo, el desarrollo de nuevas tecnologías para el aprovechamiento y valorización a partir de residuos agroalimentarios.

En los artículos publicados en la literatura científica se han encontrado cuatro enfoques para valorización de los residuos alimentarios.

- En primer lugar, encontramos la conversión de residuos de alimentos para generar biocombustibles como biogás, bioalcoholes, biohidrógeno, biocarbón y biodiesel (Nayak & Bhushan, 2019).

- El segundo enfoque es extraer y recuperar de manera eficiente varios componentes de valor añadido que se encuentran presentes en cantidades considerables en los residuos. Dichos componentes son, polifenoles, pectina, proteínas, etc., que después de la recuperación se pueden utilizar en los campos de la industria cosmética, nutracéutica, conservación de alimentos, envasado, farmacéutica y medicinal (Nayak & Bhushan, 2019).
- El tercer enfoque de valorización es la conversión de residuos alimentarios a través de la actividad microbiana para desarrollar diversos biomateriales en forma de bioquímicos, biopolímeros, enzimas, proteína unicelulares y biofertilizantes (Nayak & Bhushan, 2019).
- Y la última y más novedosa es el desarrollo de adsorbentes efectivos a partir de diversos residuos de alimentos de origen biológico para el tratamiento de aguas residuales (Nayak & Bhushan, 2019).

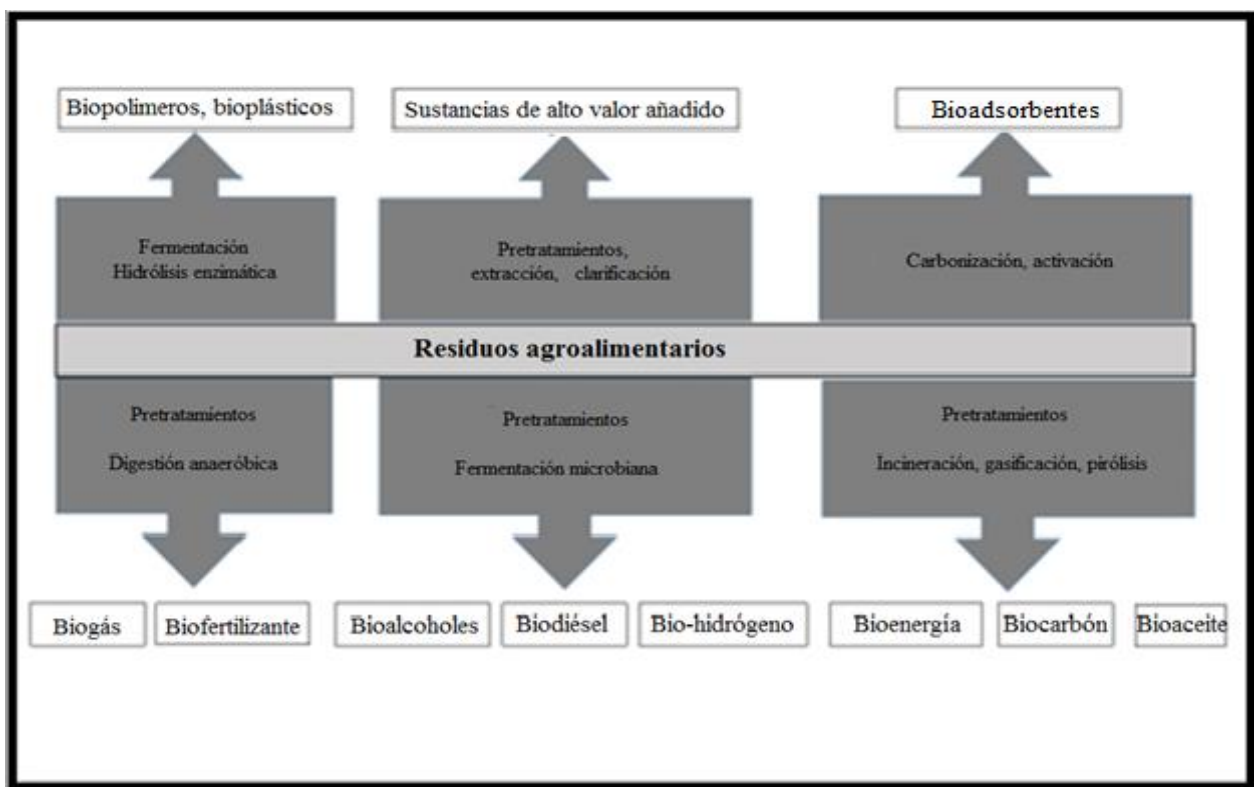


Figura 2. Concepto de biorrefinería y las técnicas individuales aplicadas a los residuos agroalimentarios (Nayak & Bhushan, 2019b)

4. BIOMASAS LIGNOCELULÓSICAS.

4.1. Descripción

“El término biomasa se define como materia orgánica de origen vegetal, espontánea o cultivada por humanos, terrestre y marina, producida directa o indirectamente a través del proceso de fotosíntesis que involucra clorofila “(Bonechi et al., 2017).

La biomasa lignocelulósica es el material más abundante y renovable del mundo para la producción de biocombustibles. La producción global anual de biomasa lignocelulósica es de más de 181.5 billones de toneladas (Paul & Dutta, 2018). Como recurso renovable, biodegradable y respetuoso con el medio ambiente, la biomasa lignocelulósica es ampliamente considerada como materia prima para la obtención de energía limpia y productos químicos de alto valor añadido (Cao et al., 2018). La materia lignocelulósica incluye diferentes tipos de residuos y residuos de origen vegetal, como madera blanda y dura (residuos forestales), residuos de la industria agrícola, alimentaria y papelera y residuos agroalimentarios, y está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina en diferentes proporciones. Factores como su nivel de humedad y composición influyen en la posibilidad de poder ser almacenadas durante un largo periodo de tiempo sin deteriorarse, contribuyendo a la sostenibilidad financiera de las biorrefinerías lignocelulósicas (Ntaikou et al., 2020; Bonechi et al., 2017).

Tabla 2. Contenido medio de biomasa forestal y herbácea (Bonechi et al., 2017)

Análisis aproximado (%peso)	Biomasa forestal	Biomasa herbácea
Humedad	42.00	8.00-9.84
Cenizas	2.31	6.90-8.09
Materia volátil	47.79	69.14-69.74
Carbono fijo	7.90	12.93-15.36

4.2. Composición

La estructura básica de la biomasa lignocelulósica se compone principalmente de celulosa (35% a 50%), hemicelulosa (20 a 35%) y lignina (10 a 25%), junto con cantidades más pequeñas de otros compuestos orgánicos y no orgánicos como proteínas, lípidos y otros extractos (Sawatdeenarunat et al., 2015).

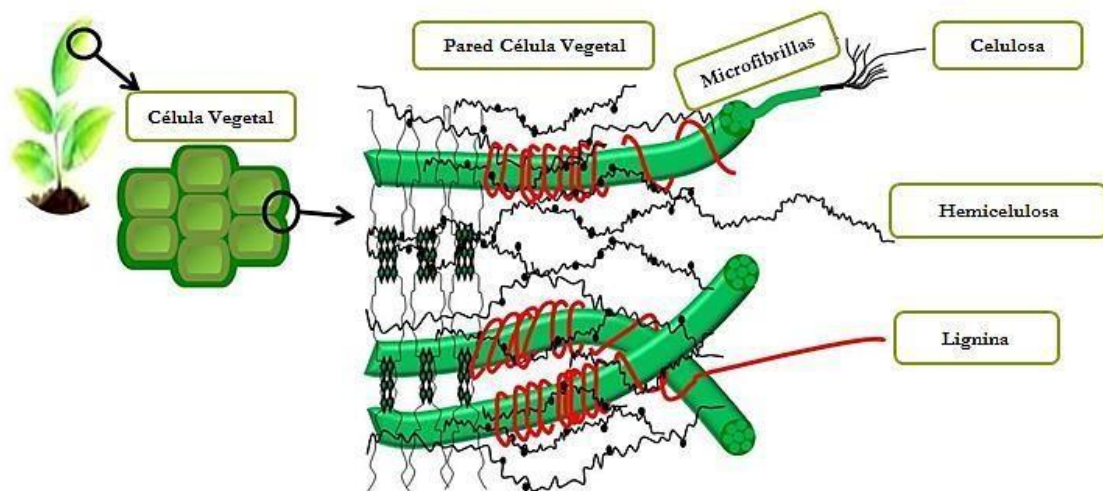


Figura 3. Estructura de biomasa lignocelulósica (Nhuchhen et al., 2014)

4.2.1. Celulosa

La celulosa es el componente principal de prácticamente todas las paredes celulares de las plantas, lo que convierte a este compuesto en uno de los polímeros más abundantes (renovables) del planeta. A nivel molecular, la celulosa ($C_6H_{10}O_5$)_n es un homopolisacárido lineal (no ramificado) que consta de 10.000 a 15.000 unidades de D-glucosa unidas por enlaces covalentes β (1 \rightarrow 4) (Sawatdeenarunat et al., 2015). Estos enlaces hacen que la celulosa sea muy estable, aumenta su rigidez y la hace altamente insoluble y muy resistente a la mayoría de los disolventes orgánicos (Bonechi et al., 2017), que el polisacárido sea casi indigerible para la mayoría de los animales (excepto rumiantes) ya que se requieren enzimas especiales, conocidas como celulasas, para hidrolizar los enlaces covalentes (Sawatdeenarunat et al., 2015).

La celulosa presente en las células vegetales tiene una estructura en la que se alternan regiones cristalinas y amorfas, siendo ésta última la más vulnerable al ataque de la celulasa, que provoca la hidrólisis de la glucosa en la molécula de celulosa. Actualmente, se emplea la hidrólisis ácida de celulosa o hidrólisis enzimática para producción industrial de bioetanol (Bonechi et al., 2017).

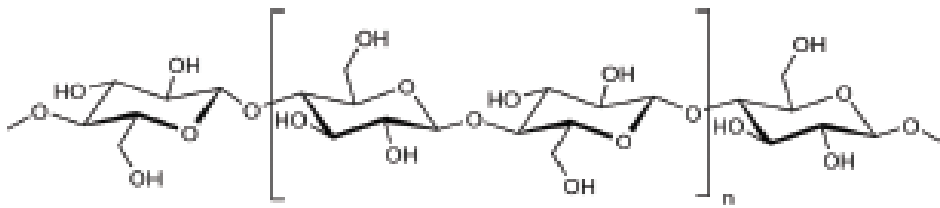


Figura 4. Estructura de la celulosa (Escudero-Oñate et al., 2017)

4.2.2. Hemicelulosa

La hemicelulosa constituye aproximadamente el 20%-30% del material lignocelulósico. Estos polímeros constan de las mismas unidades monoméricas que la celulosa, pero su estructura es diferente. La hemicelulosa, el segundo más abundante, consiste en un heteropolisacárido altamente ramificado que consta de una amplia variedad de azúcares con cinco átomos de carbono (xilosa y arabinosa) y seis átomos de carbono (glucosa, galactosa, manosa y ramnosa). Los grupos laterales que extienden fuera del esqueleto hemicelulósico principal impiden que el polímero forme estructuras cristalinas reforzadas por enlaces de hidrógeno, a diferencia de la celulosa, dando como resultado polímeros muy desordenados y esencialmente amorfos. Esta propiedad los hace más solubles en agua y más reactivos y hace que sus constituyentes básicos de azúcar se hidrolicen muy fácilmente. Según la prevalencia de unidades de glucosa, las hemicelulosas se pueden distinguir como xilano, glucuronoxilano, arabinoxilano, manano y glucomanano (Sawatdeenarunat et al., 2015; Bonechi et al., 2017).

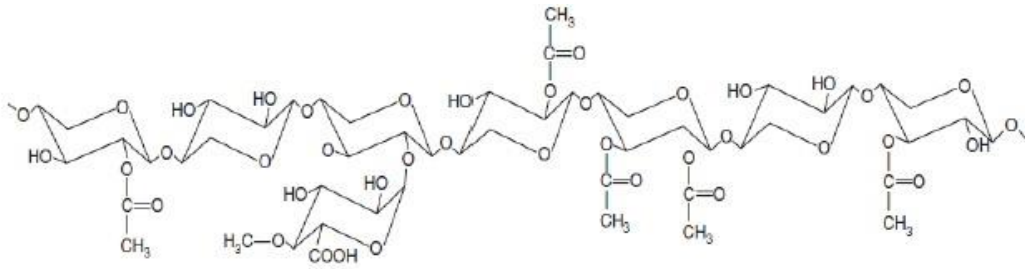


Figura 5. Estructura del xilano (Spiridon & Popa, 2008)

4.2.3. Lignina

El último constituyente principal de la lignocelulosa, la lignina, se trata de un polímero heterogéneo de cadena larga, es una red tridimensional compleja y no cristalina de polímeros fenólicos, comúnmente unidas por enlaces de éter (Bonechi et al., 2017), está reticulada con celulosa y hemicelulosa a través de enlaces covalentes y enlaces de hidrógeno (Cao et al., 2018). La lignina es una parte esencial de la estructura de la biomasa, ya que actúa como un pegamento relleno el espacio entre y alrededor de la complejidad de la celulosa y la hemicelulosa con los polímeros (Bonechi et al., 2017), proporciona soporte mecánico e impermeabilidad al agua a las paredes celulares secundarias de las plantas, pero la lignina también sirve como barrera física y bioquímica que impide la mayoría de los procesos de conversión de biomasa a bioenergía (Sawatdeenarunat et al., 2015).

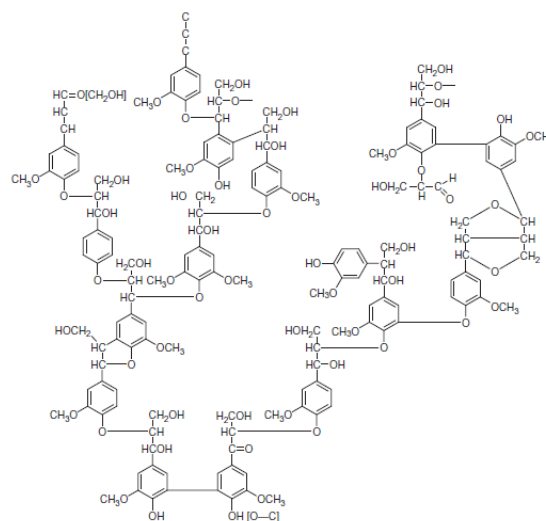


Figura 6. Modelo estructural bidimensional de la lignina que muestra varios enlaces típicos de la molécula (Bonechi et al., 2017)

Aproximadamente 50 millones de toneladas/años de residuos a base de lignina no se utilizan debido a la dificultad para recolectarlos y la limitada capacidad de procesamiento (Bonechi et al., 2017). En la biomasa, los componentes citados están interrelacionados entre sí como se muestra en la figura en la que se observa como la celulosa se encuentra en forma de fibras, alargadas, rodeada por la hemicelulosa que forma una especie de red en torno a ella. La lignina se sitúa entre las “cuerdas” formadas por la asociación de celulosa y hemicelulosa.

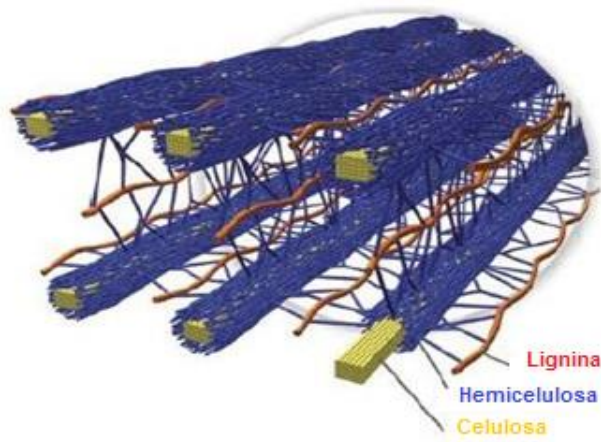


Figura 7. Distribución de hemicelulosa, celulosa y lignina en la biomasa lignocelulósica (Brandt et al., 2013)

4.3. Propiedades de la biomasa

Mediante rutas de conversión termoquímica o bioquímica, la biomasa lignocelulósica se puede convertir en energía o portadores de energía. Las propiedades fisicoquímicas de la biomasa lignocelulósica son datos esenciales de referencia para el diseño e implementación de estos procesos (Cai et al., 2017).

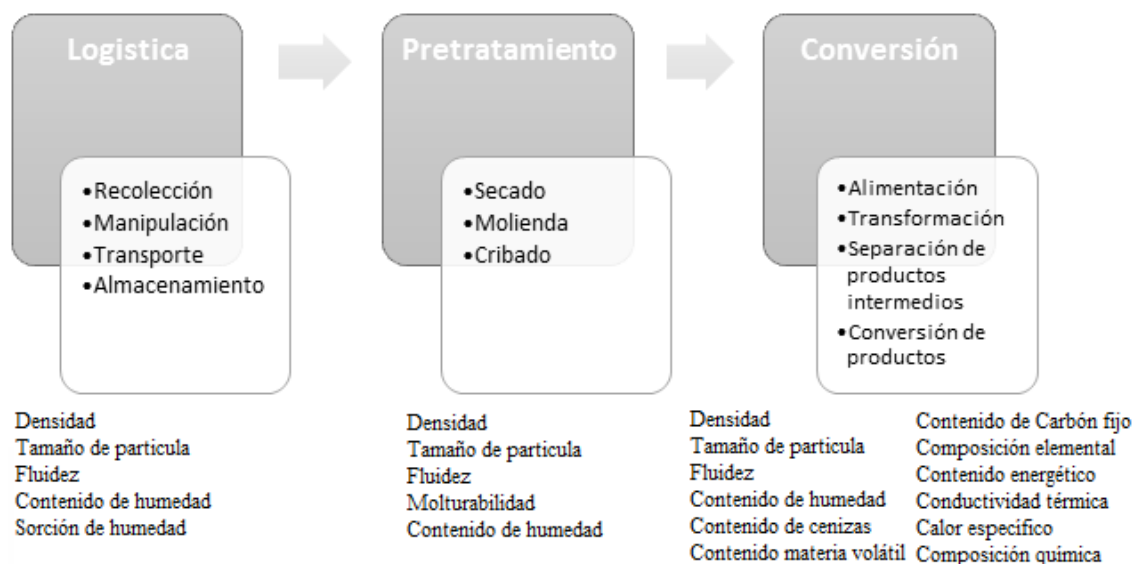


Figura 8. Propiedades fisicoquímicas de la biomasa lignocelulósica relevantes para los diferentes procesos (Cai et al., 2017)

4.3.1. Propiedades físicas

Las propiedades físicas de la biomasa lignocelulósica incluyen tamaño de la partícula, densidad, fluidez, molturabilidad, sorción de humedad y propiedades térmicas.

4.3.1.1. Tamaño de partícula

La forma y el tamaño de las partículas de la materia prima procedente de biomasa afectan notablemente a factores de proceso como la mezcla y fluidización, el área de superficie para la transferencia de calor y masa y el comportamiento de flujo de las partículas de biomasa.

En general, la forma y tamaño de las partículas de la biomasa lignocelulósica suelen ser irregular, por lo que pueden tener diferente eficiencia de conversión. Por ello, la materia prima suele recibir un pretratamiento para cumplir con los requisitos de los diferentes métodos tecnológicos de conversión termoquímica. La caracterización precisa del tamaño y la forma de las partículas de biomasa es esencial para diseñar las instalaciones de manipulación, almacenamiento y procesamiento.

4.3.1.2. Densidad

La biomasa se puede caracterizar utilizando dos densidades: la densidad de partículas y la densidad aparente. La densidad de partículas es la masa de todas las partículas dividida por el volumen que ocupan las partículas excluyendo el volumen del espacio poroso. En cambio, la densidad aparente se refiere a la relación entre la masa de partículas de biomasa y el volumen total de partículas de biomasa, incluido el volumen del espacio de poros entre y dentro de las partículas de biomasa.

Al igual que el tamaño de partícula, la densidad es una propiedad física clave en el diseño del sistema logístico para el manejo y transporte de biomasa.

4.3.1.3. Fluidez

Las propiedades de flujo de las materias primas de biomasa juegan un papel importante en el transporte, almacenamiento y manipulación. El puenteo de partículas de biomasa generalmente ocurre en el subsistema de alimentación de los sistemas de conversión de biomasa. La fluidez, como propiedad de flujo principal, es una medida de qué tan bien fluye la biomasa de un punto a otro.

4.3.1.4. Molturabilidad

El pretratamiento de biomasa incluye la reducción del tamaño de partícula, que está relacionada con otra propiedad física: la molturabilidad. La capacidad de molido de un material es una medida de su resistencia al molido. Los componentes lignocelulósicos de la biomasa, especialmente la celulosa y la lignina, son muy fibrosos y difíciles de moler.

La molturabilidad de la biomasa se puede mejorar en gran medida debido al aumento de la fragilidad y la reducción de la longitud de la fibra de celulosa por torrefacción. La trituración de biomasa es un proceso que consume mucha energía. El consumo de energía para la molienda depende del tamaño de partícula de biomasa inicial y final, el contenido de humedad, las propiedades del material, la velocidad de alimentación de la masa y las variables de la máquina, como el tamaño de la pantalla y el tipo de equipo de molienda.

4.3.1.5. Sorción de humedad

La sorción de humedad de una biomasa se determina mediante el parámetro, contenido de humedad de equilibrio (EMC), y se define como el contenido de humedad de un material en equilibrio en un ambiente particular con respecto a la temperatura y humedad relativa. La EMC de la biomasa depende de su composición, porosidad, microestructura y superficie específica.

4.3.2. Propiedades térmicas

4.3.2.1. Conductividad térmica

Cuando la biomasa se calienta en procesos de conversión termoquímica, las partículas de biomasa están sujetas a conducción de calor a lo largo y a través de su fibra, lo que a su vez influye en su comportamiento de conversión termoquímica. La biomasa es un material anisotrópico. Su conductividad térmica depende de la dirección de calentamiento, la humedad, la porosidad, la densidad y la temperatura.

4.3.2.2. Calor específico

El calor específico, que es una indicación de la capacidad calorífica de un material, es otra propiedad térmica importante de la biomasa que a menudo se requiere los cálculos termodinámicos. Depende del contenido de humedad de la biomasa y la temperatura.

4.3.3. Propiedades químicas

4.3.3.1. Contenido de agua

El contenido de humedad representa la cantidad de agua en la biomasa, expresada como porcentaje del peso del material. Es un factor importante a considerar no solo en la cosecha y preparación, sino también en el transporte, almacenamiento, procesamiento y los productos resultantes. La humedad en la biomasa puede permanecer en formas

externas e inherentes. La humedad externa reside generalmente fuera de las paredes celulares y la humedad inherente se absorbe con las paredes celulares.

4.3.3.2. Contenido de cenizas

El contenido de cenizas representa la cantidad de residuo sólido que queda después de que la muestra de biomasa se quema por completo. Los ingredientes principales de la ceniza de biomasa aparecen en forma de óxido de sílice, aluminio, hierro, calcio, magnesio, titanio, sodio y potasio. El conocimiento de las propiedades químicas y físicas de las cenizas de la biomasa es útil para predecir la tendencia a la formación de depósitos en los componentes de la caldera y la composición del carbón producido en el pirolizador y el gasificador.

4.3.3.3. Contenido de materia volátil

La materia volátil de la biomasa es el vapor condensable y los gases permanentes (sin incluir el vapor de agua) liberados de la biomasa cuando se calienta. Su cantidad depende de las condiciones de calentamiento, incluida la velocidad de calentamiento, la temperatura y el tiempo de residencia

4.3.3.4. Carbono fijo

El carbono fijo es el residuo combustible sólido que permanece después de que se calienta la biomasa y se expulsa la materia volátil. El contenido de carbono fijo en la biomasa es un valor calculado, que se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$FC = 1 - M - A - VM$$

donde FC, M, A y VM son los contenidos fijos de carbono, humedad, cenizas y materia volátil en la biomasa sobre la misma base de análisis.

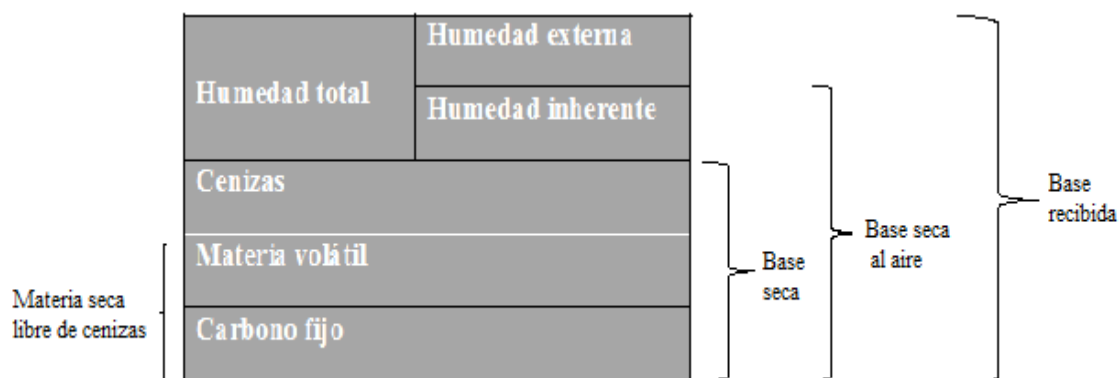


Figura 9. Componentes de la biomasa según diferentes bases (Cai et al., 2017)

4.3.3.5. Análisis final

El objetivo del análisis final es determinar el contenido de carbono, hidrogeno, nitrógeno, azufre y oxígeno. Los resultados finales del análisis se expresan generalmente en base a biomasa seca o base libre de cenizas secas. El análisis final generalmente se realiza mediante el uso de analizadores elementales mediante la combustión de una muestra de biomasa pesada en una atmósfera controlada y el posterior análisis de sus productos gaseosos.

4.3.3.6. Contenido energético

El contenido energético de la biomasa es la cantidad de energía almacenada es una unidad determinada de una muestra de biomasa y generalmente se mide como el calor de combustión, que es la energía total liberada como calor cuando se somete a una combustión completa con oxígeno en condiciones estándar.

El valor calorífico (o poder calorífico) se utiliza comúnmente como medida del contenido energético. Hay dos tipos de valor calorífico que se utilizan con frecuencia, es decir, poder calorífico superior (HHV) y poder calorífico inferior (LHV). El HHV se define como la cantidad total de calor que está disponible en la biomasa, incluido el calor latente de vaporización del agua en el combustible y los productos de reacción. El LHV no incluye el calor latente de vaporización del agua. El poder calorífico de un tipo de biomasa

lignocelulósica puede variar significativamente con el clima y las condiciones del suelo. En consecuencia, el HHV de un tipo de biomasa debe presentarse como un rango en lugar de un valor fijo.

4.4. RESIDUOS AGROALIMENTARIOS TÍPICOS DE LA CUENCA MEDITERRÁNEA

4.4.1. Residuos sólidos de la industria del aceite oliva

El olivo (*Olea europaea* L., subsp. *Europaea*) pertenece a la familia *Oleaceae*, se cultiva por sus frutos útiles que se consumen como aceitunas de mesa o se utilizan para producir aceite de oliva. La industria del aceite de oliva es una de las industrias más importantes del mundo, con una extensión de cultivo de aproximadamente 11 millones de hectáreas y con una producción de 20 millones de toneladas de aceitunas al año (García Martín et al., 2020). El 95% de la producción mundial pertenece a la región mediterránea, países como España, Grecia, Italia, Túnez y Turquía (Boufi, 2017).

La oliva se compone de tres partes, incluida la piel (1% a 3% del peso de la drupa) que contiene clorofila, carotenoides y antocianinas, la pulpa (70% a 80% de la fruta entera) como la principal parte del fruto de la aceituna que aporta todos los componentes; y el hueso (18%-22% del peso de la aceituna) que contiene la semilla (Khadem et al., 2019).

Tras el procesado de oliva, se obtienen subproductos, siendo los principales los residuos sólidos y diferentes orujos. España, es considerada la mayor productora mundial, produciendo 30.000 toneladas anuales de aceite de oliva y 400.000-600.000 toneladas anuales de residuo sólido (Fúnez-Núñez et al., 2020; García Martín et al., 2020). El residuo sólido de la oliva representa aproximadamente el 20-30% del peso de la oliva, de 100kg de oliva fresca se obtiene 22 kg de residuo sólido (4kg de semillas más 18kg de endocarpios) (García Martín et al., 2020). Dada su composición química de este residuo, principalmente lignina, hemicelulosa, y celulosa, y su alto contenido fenólico, esta fracción se hace difícilmente degradable por procesos naturales y su eliminación genera un importante problema ambiental. Por lo que se han desarrollado diferentes estrategias para su aprovechamiento en aplicaciones distintas a la incineración para generación de energía. Se puede emplear como bioadsorbente en la eliminación de metales pesados de

las aguas residuales, suplemento dietético para animales, relleno para polímeros termoplásticos, fuente de fenoles para obtener resinas, compost (Boufi, 2017; García Martín et al., 2020; Fúnez-Núñez et al., 2020).

Tabla 3. Propiedades físicas y químicas de residuos sólidos de la oliva (Martín-Lara et al., 2014)

Propiedades		
Superficie	Superficie total, m ² / g	0,163
	Superficie interna, m ² / g	0,140
	Superficie externa, m ² / g	0,022
Volumen poroso total, cm ³ / g		1,84 x10 ⁻³
Diámetro de poro, Å		453,02
Análisis elemental, %	Carbono	52,34
	Hidrógeno	7,11
	Nitrógeno	0,03
	Azufre	<0,10
	Oxígeno	40,47
Análisis aproximado, %	Humedad	5,43
	Materia volátil	74,66
	Carbono fijo	19,54
	Ceniza	0,37
Liberación de carbono a la disolución, mg C / L	Carbono total	36,84
	Carbono inorgánico total	0,02
	Carbono orgánico total	36,82

Tabla 4. Composición del residuo sólido de oliva (Ntaikou et al., 2020)

Parámetros	Valor
Sólidos totales (TS), %	98,19 ± 0,17%
Carbohidratos totales, %	49,66 ± 2,12
Azúcares libres, %	0,02 ± 0,00
Celulosa, %	29,18 ± 1,32
Hemicelulosa, %	26,32 ± 1,17
Lignina, %	26,63 ± 1,13
Xílanos, %	20,41 ± 1,03
Compuestos fenólicos, ‰	13,00 ± 0,80
Aceite residual, %	8,88 ± 1,12
Proteínas, %	3,72 ± 0,24
Extractos, %	13,92 ± 1,04
Ceniza, %	2,62 ± 0,14

4.4.2. Residuos sólidos de la industria de la alcachofa

La alcachofa (*Cynara scolymus* L.) es una planta vegetal perenne perteneciente a la familia Asteraceae, cultivada tradicionalmente en la región mediterránea. Italia es el mayor productor del mundo, con una extensión de más de 45.000 ha y producción de 440.000 t al año, seguido por Egipto, España y Perú (Guemghar et al., 2020).

Numerosos estudios han mostrado las tan valoradas propiedades medicinales de la alcachofa – anticancerígeno, antioxidante, reductor del colesterol, diurético, antiinflamatorio, antifúngico, antibacteriano y otros. La alcachofa es muy apreciada por los consumidores por su característico sabor, es considerado un alimento funcional por su contenido en minerales, vitaminas, fibra, y compuestos fenólicos bioactivos. Además es recomendado su consumo para reducir el riesgo de muchas enfermedades como infecciones intestinales, estreñimiento, diabetes no insulino dependiente, obesidad, osteoporosis y cáncer colorrectal (Angelov et al., 2015; Maietta et al., 2017).

Las partes comestibles de la alcachofa son grandes inflorescencias, recolectadas en las primeras etapas de su desarrollo, que representan alrededor del 30-40% de su peso. Dado que solo se consume la parte central de la inflorescencia, la relación “fracción comestible/biomasa total” es bastante baja (menos del 15-20% de la biomasa total de la planta) (Angelov et al., 2015 et Francavilla et al., 2021). Durante el procesado industrial de la alcachofa, sobre el 80-85% de la biomasa total de la planta se desecha y se convierte en residuo sólido. Este material está formado principalmente por hojas, tallos y las partes externas de las flores, comúnmente conocidas como brácteas, que no son comestibles y sin valor comercial (Guemghar et al., 2020; Zuorro et al., 2016; Şekara et al., 2015).

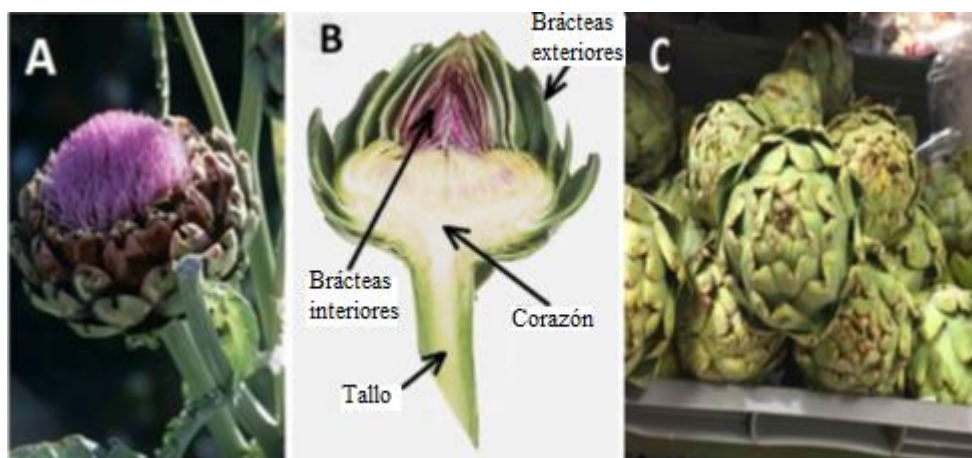


Figura 10. Anatomía de la alcachofa (Angelov et al., 2015)

Durante el desarrollo de la planta, los compuestos fenólicos tienden a acumularse tanto en las partes periféricas donde realizan sus funciones biológicas como en las partes comestibles de la planta. Por esta razón, estos residuos suelen ser muy ricos en polifenoles activos como ácidos mono y di-cafeoilquínicos (CQA) y flavonas (Maietta et al., 2017).

Siguiendo la tendencia general hacia el reciclaje de biomasa, se han creado nuevas aplicaciones biotecnológicas para la valorización de los residuos de alcachofa, algunos ejemplos incluyen la extracción de compuestos fenólicos, la producción de biocombustibles, la recuperación de la enzima peroxidasa para el tratamiento de aguas residuales, y la extracción y purificación de inulina de alto peso molecular (Francavilla et al., 2021).

Tabla 5. Propiedades físicas y químicas de residuos sólidos de alcachofa (Fernández-López et al., 2019, Eldin Awad et al., 2020, Machado et al., 2015)

Propiedades		
Análisis elemental, %	Carbono	41,2 ± 0,2
	Oxígeno	48,1 ± 0,7
	Hidrógeno	6,0 ± 0,1
	Nitrógeno	1,8 ± 0,1
	Azufre	<0,1
Minerales (mg/kg)	Fe	3,64 ± 0,3
	Zn	0,27 ± 0,05
	Cu	0,12 ± 0,01
	Mn	0,53 ± 0,04
	Na	115,00 ± 2
	K	133,00 ± 5
Análisis aproximado, (g/100g)	Humedad (peso en fresco)	76,93 ± 0,51
	Ceniza (peso en seco)	8,7 ± 0,5
	Proteína (peso en seco)	10,25 ± 0,55
	Lípidos (peso en seco)	1,73 ± 0,1
	Fibra dietética (peso en seco)	34,40 ± 2,2
	Carbohidratos totales (peso en seco)	80,31 ± 0,92

4.4.3. Residuos sólidos de la industria cítrica

Los cítricos (Citrus L. de Rutaceae) es uno de los cultivos de frutas más populares del mundo, que incluyen frutas como la naranja, limón, mandarina, lima, naranja agria y pomelo y su producción se estima en alrededor de 89 millones toneladas anuales, representado el 23% de la producción total de frutas del mundo (Pathak et al., 2017). Los cítricos contienen compuestos que pueden proteger la salud: aportan vitamina C, pectina, ácido fólico, potasio, y además por su carácter fenólico y propiedades antioxidantes contribuyen a la disuasión de enfermedades potencialmente mortales (Rafiq et al., 2018).

Tras el procesado de los cítricos en zumo, se generan 15x10⁶ toneladas de residuos, constituidos esencialmente de semillas, pieles y residuos de pulpa (M'hiri et al., 2017). La piel en concreto contiene una amplia variedad de componentes secundarios con una

sustancial capacidad antioxidante en comparación con otras partes de la fruta (Rafiq et al., 2018). La piel de los cítricos es una fuente potencial de ciertos aceites esenciales y rinde entre 0,5 y 3 kg de aceite por tonelada de fruta. Los aceites esenciales extraídos se utilizan para diversos fines, como productos farmacéuticos, confiterías, cosméticos, bebidas alcohólicas y también para mejorar la vida útil y la seguridad de diversos productos alimenticios (Pathak et al., 2017).

La piel de los cítricos se subdivide en epicarpio o flavedo (superficie periférica coloreada), la cual es rica en aceites esenciales y el mesocarpio o albedo (capa intermedia blanda y blanca), rica en pectina, fibra dietética y fenoles (Rafiq et al., 2018; M'hiri et al., 2017).

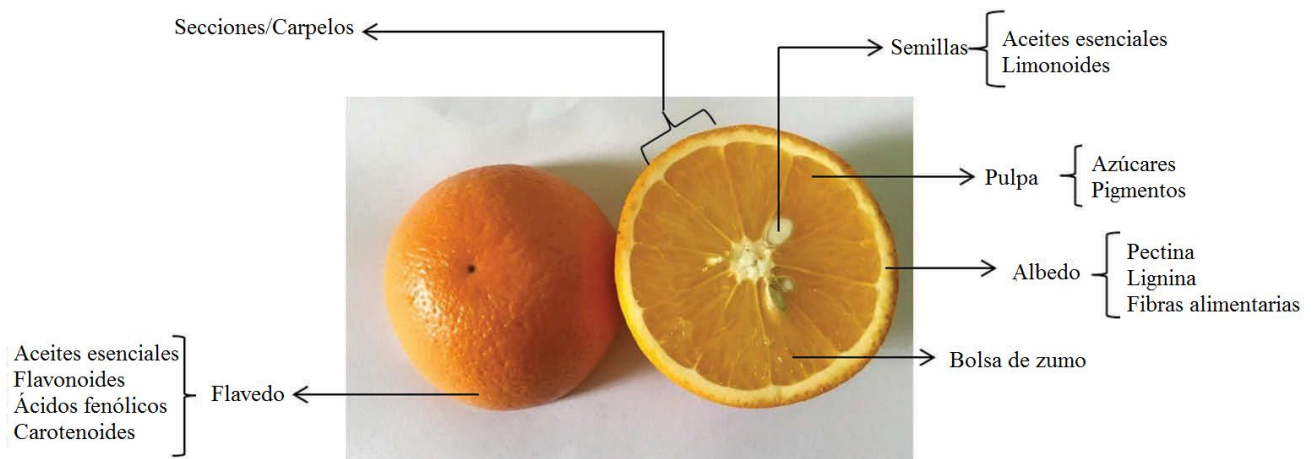


Figura 11. Anatomía de los cítricos (Panwar et al., 2021)

La valorización de las pieles de cítricos está relacionada con su composición y caracterización y en función de ello (a) extracción de compuestos valiosos (productos químicos bioactivos, antioxidantes fenólicos, enzimas, ácido carboxílico, etc.) (b) materia prima para la generación (bioetanol, biometano, biohidrógeno, biocombustible, gasificación, etc.) (c) otros usos (biofertilizantes, bioadsorbentes, etc.) (Pathak et al., 2017).

Tabla 6. Análisis fisicoquímico de residuos sólidos de cítricos (Ali et al., 2016)

Parámetros	Naranja agria	Naranja dulce	Pomelo	Limón
Humedad %	8,0 ± 0,3	7,00 ± 01	6,80 ± 01	6,20 ± 01
Cenizas %	8,30 ± 0,44	7,20 ± 01	6,90 ± 01	6,30 ± 01
Grasa %	3,5 ± 0,45	3,00 ± 01	2,50 ± 0,5	2,10 ± 0,50
Fibra %	16,0 ± 01	18,00 ± 02	17,20 ± 02	6,25 ± 01
Pectina	0,66 ± 0,22	0,75 ± 0,50	0,90 ± 0,01	0,62 ± 0,10
Acidez	1,06 ± 0,10	1,10 ± 0,50	1,20 ± 0,02	1,11 ± 0,01
Azúcares totales %	3,1 ± 0,10	3,00 ± 0,50	2,5 ± 0,50	2,60 ± 0,01
pH	3,10 ± 0,50	3,25 ± 0,10	3,08 ± 0,10	2,98 ± 0,10
TSS (° Brix)	0,80 ± 0,05	0,86 ± 0,10	0,85 ± 0,01	0,78 ± 0,10

Tabla 7. Análisis de minerales en residuos sólidos de cítricos (Ali et al., 2016)

Minerales	Residuo sólido de cítricos (ppm)			
	Naranja agria	Naranja dulce	Pomelo	Limón
Na	21750 ± 20	6000 ± 30	1000 ± 20	8000 ± 20
K	165750 ± 15	71000 ± 25	200 ± 15	218000 ± 60
Ca	3700 ± 20	5970 ± 20	11623 ± 10	6919 ± 15
Mg	530 ± 10	462,0 ± 20	1508 ± 5	787 ± 20
Fe	38,0 ± 2	33 ± 3	5 ± 01	12 ± 03
Al	6,5 ± 1	39,5 ± 4	ND	7 ± 01
Mn	4,5 ± 1	5,5 ± 1	3,5 ± 0,1	3,0 ± 01
Zn	3,5 ± 1	3,5 ± 1	5,0 ± 01	10,0 ± 01

5. APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGROALIMENTARIOS

5.1. Aprovechamiento como adsorbentes

La creciente población, acompañada de una rápida industrialización y actividades agrícolas, ha dado como resultado la generación de agua residuales (Nayak & Bhushan, 2019). La contaminación del agua superficial y subterránea se ha convertido en uno de los grandes problemas ambientales de las últimas décadas a nivel mundial.

Existe una mayor conciencia pública sobre el efecto adverso de las aguas residuales en el ecosistema, pero debido a la disponibilidad limitada de recursos de agua limpia, se ha visto aumentada la demanda de tecnologías rentables y respetuosas con el medio ambiente para la solución de este problema (Nayak & Bhushan, 2019). Como resultado, las industrias están siendo obligadas por ley a tratar estos efluentes antes de ser liberados a depuradoras, ríos y mares o ser reutilizada en otros procesos tecnológicos.

Estas aguas presentan altas concentraciones de contaminantes como metales pesados, tintes, cianidas, pesticidas, compuestos volátiles que provienen de diferentes orígenes, aguas residuales domésticas e industriales (química, farmacéutica, textil, petroquímica), flujos de desecho de las minas, plantas de tratamiento y de la actividad agrícola y ganadera.

En la literatura se pueden encontrar varios métodos y tecnologías de tratamiento para eliminar dichos contaminantes de estos efluentes. Entre ellos destacan la coagulación/floculación química, la precipitación química, los procesos de oxidación, la ultrafiltración, la osmosis inversa y el intercambio iónico, etc. Sin embargo, la mayoría de estos métodos presentan algunas limitaciones como, altos costes de operación, requieren gran demanda energética, rendimientos bajos y producen subproductos nocivos que requieren a su vez un tratamiento adicional, por lo que han sido desplazados por el método convencional de adsorción con carbones activos (Latif et al., 2018; Siddique et al., 2020; Villen-Guzman et al., 2019).

El carbón activado (CA) se caracteriza por tener una gran superficie específica y buena capacidad de adsorción. Otros parámetros como la porosidad y la química de la superficie

también son determinantes durante el proceso de adsorción (Bohli et al., 2015) . El coste del carbón activado es alto, no solo por su proceso de preparación y regeneración sino también por la materia prima de la que extrae. Los productos empleados en la síntesis del carbón activado deben presentar bajo contenido en compuestos inorgánicos y elevado contenido en carbono y condiciones que cumplen la madera, cortezas, carbón, turba y lignito, que también son caras. Por lo que para reducir los costes de la materia prima y de producción y asegurar su abundancia, actualmente ha crecido el interés en la búsqueda de diversas alternativas, existiendo una tendencia creciente a producir carbón activado a partir de residuos de la industria agroalimentaria (Halet et al., 2015).

El adsorbente ideal debe ser económico, ecológico, altamente eficiente, abundante, renovable y con posibilidad de reutilización. La preparación de bioadsorbentes a partir de residuos agroalimentarios, cumplen con estos requisitos y representan una opción viable para el tratamiento de contaminantes en aguas residuales (Villen-Guzman et al., 2019; Frezzini et al., 2019)

En ese apartado, se ha revisado los últimos estudios sobre capacidad de adsorción empleando los ya citados residuos sólidos agroalimentarios de cítricos, oliva y alcachofa. En la tabla 8 siguiente se muestra una recopilación de las capacidades adsorptivas de algunos contaminantes empleando estos residuos.

Tabla 8. Capacidades de adsorción de contaminantes de los diferentes residuos sólidos

Adsorbente	Adsorbato	Capacidad de Adsorción	Referencia
Residuo sólido de oliva	Cr (VI)	53,31mg/g	(Mangwandi et al., 2020)
Residuo sólido de oliva	Cianuro libre	57,35 mg/g	(Halet et al., 2015)
Residuo sólido de oliva tratada con NaOH Residuo sólido de oliva tratado con vapor Residuo sólido de oliva tratado con H ₂ SO ₄	Tinte Carmín Índigo	599 mg/g 505 mg/g 495 mg/g	(Enaime et al., 2016)
Residuo sólido de oliva tratado térmicamente con H ₂ SO ₄	Pb (II) Cd (II) Cu (II)	147.526 mg/g 57,098 mg/g 17,665 mg/g	(Khadem et al., 2019)
Residuo sólido de oliva	Cu (II)	2,51 mg/g	(Calero et al., 2018)
Residuo sólido de alcachofa	Pb (II) Cu (II) Cd (II)	86,2 mg/g 35,8 mg/g 24,2 mg/g	(Fernández-López et al., 2019)
Residuos sólidos de cítricos modificados químicamente con NaOH	Ni (II)	36.74 mg/g	(Villen-Guzman et al., 2019)
Residuos sólidos de cítricos con tratamiento alcalino	U(VI)	24,39 mg/g	(Šabanović et al., 2019)
Residuos sólidos de cítricos con tratamiento alcalino	Co (II)	34,71 mg/g	(Singh & Shukla, 2016)
Residuos sólidos de cítricos	COVs alifáticos y aromáticos	20 mg/g	(Frezza et al., 2019)
Residuos sólidos de cítricos activados magnéticamente	As (III) As (V) Iones fluoruro	714,3µg/g 2000µg/g 9,709 mg/g	(Verma et al., 2019; Siddique et al., 2020)
Residuos sólidos de cítricos	Iones de cobre	13,2 mg/g	(Meseldzija et al., 2019)
Residuos sólidos de cítricos	Tinte rojo reactivo Ácido rojo-87	0,624 mg/g 6,757 mg/g	(Latif et al., 2018; Razak et al., 2020)

5.1.1. Residuos sólidos de oliva como adsorbentes

Mangwandi et al., 2020 , analizaron la eliminación de Cr (VI) del agua contaminada mediante residuos sólidos de oliva químicamente activados con DETA. El mecanismo empleado fue mediante la reducción del Cr (VI) en la superficie del material bioadsorbente seguido de la bioadsorción de los iones Cr (III). Se investigaron el efecto de varias condiciones de proceso como, la concentración inicial de Cr (VI), pH, dosis de adsorbente, fuerza iónica, presencia de otros iones y la temperatura. La máxima capacidad de bioadsorción fue de 53,31mg/g, a pH=2, dosis de bioadsorbente >4g/L y baja fuerza iónica. La cinética y los equilibrios de bioadsorción siguieron los modelos de pseudo-segundo orden y de Freundlich.

El carbón activado preparado a partir de residuos sólidos de oliva también fue empleado como adsorbente de cianuro libre. Entre un pH 10.8 – 11.0 para evitar la volatilización de HCN muy tóxico, con una concentración inicial de cianuro de 260 mg/L y una dosis de carbón activado de 10g/L, a 20°C, se consiguió una adsorción de 57,35 mg/g, mejor eficiencia que la mostrada por carbones activados comerciales. Su cinética e isoterma de adsorción respondieron mejor al pseudo-primer orden y los modelos de Freundlich y Temkin (Halet et al., 2015).

Se preparó carbón activado a partir de residuo sólido de oliva impregnados con residuos acuosos de almazara como material adsorbente para la adsorción del tinte carmín índigo. El adsorbente se activó químicamente utilizando hidróxido de potasio (KOH) y ácido fosfórico (H₃PO₄) y físicamente mediante vapor. El estudio se llevó a cabo en un rango de temperaturas de (293- 323K) y de concentración inicial (10-250 mg/L), los resultados mostraron que a todas las temperaturas y para todas las concentraciones iniciales, el carbón activado por el agente KOH presentó una mejor capacidad de adsorción, seguido por el carbón activado por vapor y finalmente el carbón activado por H₃PO₄, 599 mg/g, 505 mg/g y 495mg/g (Enaime et al., 2016).

En este caso se evaluó la eliminación de Cu (II), Cd (II) y Pb (II) de una disolución acuosa por adsorción en carbón activado creado a partir de residuos sólidos de la oliva sometido a un proceso termoquímico con ácido fosfórico. Los resultados obtenidos mostraron que la adsorción de metales depende del pH, alcanzando la adsorción máxima a un pH inicial de 5. La cinética fue rápida, alcanzando el equilibrio a los 200 min para los tres iones

metálicos. La cinética y los equilibrios de adsorción siguieron los modelos de pseudo-segundo orden y de Redlich-Peterson. Pb (II) (147,526 mg / g) > Cd (II) (57,098 mg / g) > Cu (II) (17,665 mg / g) También se estudió los sistemas de adsorción binaria Cu-Cd y Cu-Pb, mostrando que la concentración inicial de Cd y Pb influía en la afinidad del cobre hacia la superficie del carbón activado. La adsorción de Cu aumentó en presencia de cadmio y disminuyó en presencia de plomo (Khadem et al., 2019). Otro estudio evaluó la bioadsorción Cu (II) en continuo en columnas de lecho fijo, de forma experimental y con el modelo ANFIS, analizando el efecto de tres parámetros operativos: caudal de alimentación (2-6ml/min), concentración de cobre de entrada (40-100mg/L) y altura del lecho (4,4-13,4cm). Los resultados mostraron que el rendimiento de adsorción aumentaba con la altura del lecho y que dependía más del caudal de alimentación que de la concentración inicial del adsorbente. La capacidad máxima de adsorción fue de 2,51 mg/g en condiciones de 6ml/min, 100 mg/L y 13,4 cm. , similares a los obtenidos por el modelo ANFIS (Calero et al., 2018). El experimento en columnas de lecho fijo también fue estudiado para eliminación de Cr (VI), Cu (II) y Ni(II) mediante adsorción por residuo sólido de oliva, en este caso, después de la evaluación de diferentes procesos, se obtuvieron los mejores resultados en la adsorción simultánea de los tres iones metálicos en dos columnas de lecho fijo (Martín-Lara et al., 2014).

5.1.2. Residuos sólidos de la alcachofa como adsorbentes

Mediante el método Taguchi se estudió el comportamiento de adsorción del desecho de la alcachofa como adsorbente de metales pesados en aguas residuales. Con esta herramienta se pudo comprender la interacción de cuatro factores (pH, temperatura, dosis de adsorbente y concentración inicial de metal pesado) que tiene lugar durante el proceso de adsorción y determinar las condiciones óptimas para la adsorción de Pb (II), Cu (II) y Cd (II). Se consiguieron adsorciones de 86,2 mg/g, 35,8 mg/g y 24,2 mg/g, respectivamente, para los tres iones metálicos estudiados. Se puede decir que el residuo de alcachofa presenta gran potencial como adsorbente de estos metales en aguas residuales industriales (Fernández-López et al., 2019).

5.1.3. Residuos sólidos de cítricos como adsorbentes

La piel de cítrico fue modificada químicamente con HNO_3 , HCl , H_3PO_4 , CaCl_2 , NH_3 y NaOH para estudiar su influencia en la capacidad de adsorción de Ni (II) en aguas residuales. La capacidad máxima de adsorción se consiguió con la activación con NaOH , 36,74 mg/g en condiciones de (pH 5, S/L= 5g/L, 25°C) y su cinética de pseudo - primer orden y modelo de Langmuir. Después de varios ciclos de adsorción se observó que el bioadsorbente estudiado podría usarse repetidamente para la adsorción de Ni (II) sin pérdidas significativas en su capacidad de desorción, el porcentaje alcanzado fue de 90 (Villen-Guzman et al., 2019).

Se analizó la eficacia de la piel de cítrico sin tratar y tratada químicamente, para eliminar los iones U(VI) de una disolución acuosa, bajo diferentes parámetros de sorción (pH, tiempo de contacto, temperatura, concentración de sorbato y de adsorbente) Los resultados mostraron que el tratamiento químico había incrementado la capacidad de adsorción de la piel de cítrico hasta 4 veces más, alcanzando una capacidad de 24,39mg/g (Šabanović et al., 2019). En otro estudio, también la piel de cítrico se sometió a un tratamiento alcalino, y se reflejó que, aunque se perdía biomasa se compensaba con el aumento de la capacidad adsorptiva se veía mejorada, 34,71 mg/g a un pH 6 a los 210 min. Esto es consecuencia a que el tratamiento álcali aumenta el área de superficie por la mejora de la porosidad, esto exponen más grupos funcionales para la adsorción. La adsorción siguió una isoterma de Langmuir y el modelo cinético de pseudo-segundo orden. (Singh & Shukla, 2016)

La piel de cítrico parecía ser un bioadsorbente prometedor para COVs tanto alifáticos como aromáticos en disoluciones acuosas. Se investigó su capacidad de adsorción con Tricloroetileno y p-Xileno, como representantes elegidos de las clases alifática y aromática, variando la concentración de COV en un rango de 25 a 2000 $\mu\text{g/L}$, con una concentración constante de 100 mg de adsorbente. Los resultados mostraron una capacidad de 20 $\mu\text{g/g}$ y 20 $\mu\text{g/g}$ tricloroetileno y p-xileno, respectivamente. El proceso de adsorción siguió mucho más cerca el modelo de isoterma de Freundlich. Esto indica un mecanismo de adsorción físico gracias a las fuerzas de London-Van der Waals entre soluto y adsorbente, en el que las moléculas ya adsorbidas en la superficie del adsorbente facilitan la adsorción de otras moléculas, es un mecanismo de adsorción cooperativo (Frezza et al., 2019).

En los siguientes estudios, como aplicación innovadora, se prepararon los adsorbentes a partir de pieles de cítricos, activando magnéticamente la biomasa con FeCl_3 y la carbonización posterior a 500°C (Verma et al., 2019; Siddique et al., 2020). Estos bioadsorbentes con propiedades magnéticas, se aplicaron para la eliminación de arsénico (III y V) de una disolución acuosa, así como de las muestras reales de agua subterránea contaminada (Verma et al., 2019) y de iones fluoruro (Siddique et al., 2020). Para el primer estudio, se alcanzó una capacidad de adsorción de As (III) de $714,3\mu\text{g/g}$ y para As(V) fue de $2000\mu\text{g/g}$. En el segundo estudio, se consiguió una adsorción de fluoruro $9,709\text{ mg/g}$ en condiciones de (pH6.6, dosis de adsorbente de 1g/L , tiempo de contacto 240 min y temperatura 25°C). En ambos estudios, siguieron la isoterma de Langmuir y una cinética de segundo orden.

Se examinó la piel de cítrico sin tratar para la eliminación de iones de cobre de las aguas residuales de minería. El proceso alcanzó el equilibrio a los 15 min con una adsorción máxima de 89% y una capacidad de adsorción de $13,2\text{ mg/g}$ para una concentración inicial de 3g a un pH de 3. Se confirmó que la piel de cítrico sin ningún proceso de purificación ni modificación química de la superficie mostraba una buena capacidad de sorción de iones de cobre en condiciones de pH ácido (Meseldzija et al., 2019).

Se estudió la efectividad de la piel de cítrico en la adsorción de los tintes rojo reactivo y ácido rojo-87 (Latif et al., 2018; Razak et al., 2020) En ambos experimentos, se analizaron el efecto de varios parámetros pH, dosis de adsorbente, concentración de sorbato, tiempo de contacto, temperatura. La isoterma de adsorción y la cinética que mejor se adaptaron fueron la ecuación de Langmuir y el modelo de pseudo-segundo orden. La capacidad de adsorción en ambas es de $0,6240\text{ mg/g}$ y $6,757\text{ mg/g}$ a pH 2, respectivamente.

5.2. Obtención de productos con alto valor añadido

Los residuos generados por el procesamiento de diversos alimentos de origen vegetal son ricos en azúcares, pectina, compuestos fenólicos, proteínas, lípidos, polisacáridos, fibras, compuestos aromatizantes y fitoquímicos. Estos productos de valor añadido, si se extraen, tienen un valor inmenso como aditivos alimentarios, nutraceúticos, terapéuticos, cosméticos, etc (Nayak & Bhushan, 2019).

Estos nuevos productos provenientes de residuos agroalimentarios ayudan a aumentar la disponibilidad de alimentos y ayudan a extender su vida útil para su consumo en un periodo de tiempo prolongado. Conduce a un uso eficiente de los recursos naturales y la minimización de los residuos de alimentos que van a los vertederos (Nayak & Bhushan, 2019).

5.2.1. A partir de residuos sólidos de oliva

El furfural es un producto químico con gran potencial, empleado para la producción de fungicidas, adhesivos, aromatizantes y como precursor de otros químicos. Debido al crecimiento de iniciativas verdes en el campo de la química, este estudio llevó a cabo la producción de furfural a partir de residuos sólidos de oliva en dos etapas. Se obtiene por hidrólisis ácida de la hemicelulosa y posterior deshidratación de los monómeros C5 resultantes, principalmente xilosa. Se optimizó la etapa de autohidrólisis analizando diferentes condiciones de temperatura (160-200°C) y tiempo (30-75 min), y se ayudó de un producto comercial $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ y CaCl_2 para conseguir una hidrólisis completa, dando lugar a licores con diferentes concentraciones de xilosa. Los valores máximos de rendimiento y eficiencia del 96%, tras solo 60 minutos a 150°C utilizando como fuente de pentosas el licor obtenido por autohidrólisis a 180°C y 30 minutos. El $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ fue el catalizador más eficaz en comparación con otros catalizadores ácidos sólidos (Fúnez-Núñez et al., 2020).

5.2.2. A partir de residuos sólidos de cítricos

El ácido levulínico (LA) es considerado un compuesto intermedio muy valioso para la síntesis de nuevos aditivos para combustibles, fragancias, solventes. La particularidad del estudio es que emplea piel de cítrico exhausta tras el proceso de maduración al que ha sido sometida, quedando como resultado un residuo sólido más enriquecido en celulosa y azúcares simples que la piel de cítrico sin tratar. Antes del proceso, los mayores rendimientos de LA se obtienen a partir de una biomasa con alto contenido de celulosa. La conversión hidrotermal de la piel de cítrico en LA se llevó a cabo en una autoclave de acero inoxidable en presencia de HCl diluido como catalizador homogéneo y NaCl

0.25M., a presión con 30 bar de N₂ y sumergido en un baño de aceite a 200°C durante 30 min. Los resultados mostraron que se podía alcanzar hasta un rendimiento de 22% de LA (Licursi et al., 2018).

Los compuestos fenólicos de la piel de cítricos se utilizan en diversas aplicaciones, como la formulación de alimentos saludables, cosméticos y productos farmacéuticos (M'hiri et al., 2017) En el presente estudio para extraer los polifenoles de la piel de cítrico, se sintetizó una membrana híbrida de impresión molecular (HMIM) basada en las nanopartículas de polímero de impresión molecular Quercetin preparadas (Qu-MIO NPs) (Mansour et al., 2018).

Por el creciente interés en la búsqueda de nuevos prebióticos con propiedades funcionales mejoradas, se han encontrado en la piel de los cítricos una fuente potencial para obtener los oligosacáridos derivados de la pectina (POS). En el estudio de Gómez et al., 2016, el proceso de extracción se llevó a cabo en tres etapas (extracción con agua, hidrólisis enzimática y filtración por membrana. Se obtuvieron se obtuvieron dos concentrados refinados POS después de 7.5 o 24 h de hidrólisis enzimática (los contenidos de las impurezas no volátiles fueron 5.8 y 11.8% en peso, respectivamente), compuesto principalmente por oligogalacturonidos con diferente distribución de masa molar y grado de metilación (43,4 y 37,4%, respectivamente) y grado de acetilación (5,5 y 8,6%, respectivamente) con rendimientos de 13,1 y 10,8 g 100g - 1 residuos secos de piel de limón, respectivamente.

5.2.3. A partir de residuos sólidos de alcachofa

La alcachofa tiene un valor nutricional importante debido a su contenido particularmente alto de compuestos bioactivos como polifenoles, fructooligosacáridos, fibras y minerales. En los siguientes estudios se ven diferentes posibilidades para su extracción.

La obtención de pectina de residuos sólidos de la alcachofa se puede realizar mediante diferentes métodos de extracción como ultrasonido de potencia (US), enzimas, combinación de US y enzimas (US+E), y ácidos (nitrógeno y citrato de sodio). En el estudio de Sabater et al. tras 6 horas, el rendimiento de pectina fue mayor cuando se aplicó US en combinación con Celluclast*1.5L, hasta un 13,9% (Sabater et al., 2020). En este otro estudio se empleó la misma enzima comercial, se consideraron la influencia de las

variables independientes de concentración de polvo del subproducto de alcachofa (2-7%p/p), dosis de enzima (2.2-13.3 U/g) y tiempo de extracción (6-24h) y ver como afectaban en la eficiencia de dicha extracción enzimática. Dando lugar a un rendimiento de 221.4 mg/g de materia seca, con un alto contenido de GaIA (720 mg/g) y con un bajo grado de metilación, lo que la hace adecuada para uso alimentario (Sabater et al., 2018).

Como se ha comentado anteriormente los residuos agroalimentarios son fuentes ricas en compuestos fenólicos, diferentes estudios se han llevado a cabo para la explotación de estos constituyentes. Estos concluyen que el método ideal debe ser cuantitativo, no-destructivo, y rápido. La extracción de los compuestos fenólicos requiere especial cuidado, porque se oxidan fácilmente y se degradan rápidamente con la luz. Recientemente han emergido diferentes tecnologías novedosas para una extracción ecológica, como las altas presiones hidrostáticas (HHP), el ultrasonido (US), campos eléctricos pulsados (PEF) y microondas (MW). Como se demostró en el estudio de Guemghar et al., 2020, el empleo de la técnica asistida por microondas (MAE), permitió obtener un rendimiento de 36 ± 0.72 mg GAE/g MS, evaluando variables independientes como la concentración de etanol (%), potencia de microondas(W), tiempo de irradiación (min), relación disolvente-material (mL/g) aplicando la metodología de superficie (RSM) para evaluar su efecto.

En otro estudio se realizó la extracción de los compuestos fenólicos mediante un procedimiento ecológico basado en el uso de etanol acuoso como disolvente de extracción al 50%(v/v). Los experimentos se realizaron de acuerdo con un diseño compuesto central para evaluar el efecto de la temperatura, tiempo de extracción y ratio liquido-sólido en el rendimiento de recuperación de los compuestos. En condiciones óptimas ($T= 53.3^{\circ}\text{C}$, $E=110,4\text{mn}$ y $R=3,3\text{MI/g}$) se recuperaron más del 90% de los compuestos fenólicos presentes en el residuo seco, expresado como equivalentes de ácido gálico (GAE) por unidad de peso seco, fue de 32,2 mg GAE/g (Zuorro et al., 2016). Rabelo et al emplearon también etanol al 0 - 75% en la extracción por ultrasonido y posterior nanofiltración para recuperar el extracto fenólico. Se comprobó que los mayores rendimientos fenólicos se obtuvieron con etanol al 50%, con una potencia de ultrasonido de 240W y nanofiltración empleado membrana DK (Rabelo et al., 2016).

Los residuos sólidos de la alcachofa también contienen azúcar prebiótico, como los fructooligosacáridos (FOS). Para su extracción se estudió el efecto del ultrasonido por

dos modos diferentes (sonicación directa e indirecta) para potenciar la extracción convencional, y se demostró que el ultrasonido con sonicación directa demostró ser más eficiente para producir extractos ricos en azúcares prebióticos que los procesos de sonicación convencional e indirecta. Se estudiaron el efecto de variables como como la temperatura de extracción (50-70°C), el tiempo (5–120min) y la potencia (240–480W). y los mejores resultados fueron a 10min, 60°C y 360W, obteniéndose 9,6 mg de sacáridos prebióticos/g de materia prima seca (Machado et al., 2015).

5.3. Obtención de bio-materiales.

Otro enfoque en la valorización es la conversión de residuos alimentarios a través de la actividad microbiana para desarrollar diversos biomateriales en forma de bioquímicos, biopolímeros, enzimas, proteínas unicelulares y biofertilizantes. Aunque diferentes estudios han dado resultados satisfactorios en la producción de estos biomateriales, aun se requieren grandes esfuerzos para escalar del laboratorio a la industria (Nayak & Bhushan, 2019).

En este estudio innovador, se emplea la ceniza de residuos sólidos de la oliva (OBA) como activador alcalino y la escoria de alto horno (BFS) se utiliza como precursor mineral en la creación de bloques de suelo dolomítico compactado. El reemplazo de este activador supone una reducción de emisiones de CO₂, 3,3kg/tonelada de suelo estabilizado, hasta un 96% menos que para la estabilización con cemento Portland ordinario, es una alternativa más ecológica. La estabilización del suelo dolomítico se realizó agregando 10% BFS, 4% OBA y 8% H₂O, cuya resistencia a la compresión final de los bloques curados durante 120 días fue de 27,8MPa (Payá et al., 2020). Estos resultados coinciden con los obtenidos previamente en otro estudio en la producción de materiales activados por álcalis (AAM), empleando OBA por su alta cantidad de calcio y potasio en su composición. Se hizo una comparativa de tres mezclas; BFS y agua, BFS y una disolución acuosa de KOH, BFS y OBA. Ésta última mezcla alcanzó una resistencia a la compresión de 30 MPa después de 7 días de curado a 65°C, que fue más alta que la activada con disolución de KOH (Font et al., 2017).

El polvo resultante de la molienda de residuo sólido de la oliva (OSF) fue incorporado a una matriz termoplástica como PVC y polipropileno (PP) para estudiar su efecto en las

propiedades de tracción, flexión, resistencia al impacto, propiedades térmicas, y resistencia a la abrasión. Tras los resultados obtenidos, en el caso de la matriz de PP se consideró necesario el empleo de un agente de acoplamiento, polipropileno maleado al 5% (MAPP) influyendo positivamente en la adhesión interfacial entre el relleno de refuerzo y la matriz circundante. Esto mejoró el módulo de tracción y flexión, y disminuyó la adsorción de agua del compuesto basado en OSF y MAPP. En el caso del compuesto OSF-PVC, la adición de OSF redujo la resistencia mecánica y las propiedades de impacto del compuesto. Dentro del campo de la tecnología de materiales, supone una aplicación muy interesante el uso del residuo sólido de la oliva como relleno sostenible en compuestos a base de polímeros (Boufi, 2017).

Otra de las posibilidades de aprovechamiento de los residuos agroalimentarios reside en la creación de compost, a través de procesos biológicos éstos se pueden transformar en biofertilizantes para el desarrollo una agricultura sostenible. Los estudios comparan las propiedades del suelo tratado con fertilizantes químicos y orgánicos y se demuestra que el uso de fertilizantes químicos acaba afectando negativamente a la degradación del suelo, mientras que los segundos presentan múltiples beneficios, mejorando la capacidad de retención de agua, el contenido de nitrógeno y materia orgánica, la fertilidad y la resistencia a la erosión hídrica y eólica. Se consigue un producto ecológico, seguro, estable que se puede emplear como mejorador del suelo, biofertilizante orgánico o sustituto de la turba en suelos cultivados. (Mekki et al., 2017 ; Debernardi-Vázquez et., 2020).

Se han encontrado algunos estudios que apoyan esta posibilidad como una buena estrategia de aprovechamiento de residuos. En esta investigación se centró en evaluar y modelar el método de compostaje en pila con disposición piramidal-rectangular, con 9 puntos diferentes para el muestreo de la temperatura y humedad en 3 secciones diferentes. Empleando como subproductos piel de cítricos y otras biomasa y se demostró que se obtenía un compost con parámetros fisicoquímicos competitivos para ser empleado como biofertilizante, con un pH (9,1), la relación C/N (27,5), la materia orgánica (65,5%), el carbono (38%) (Debernardi-Vázquez et., 2020). En otro estudio el experimento se llevó a cabo añadiendo directamente residuos sólidos de oliva en parcelas de labranza convencional, controlando la evolución de las propiedades del suelo tres años después de la aplicación del subproducto, y resultó que aumentó la existencia de C y N, alcanzando 18,5g/Kg de C, 1,4 g/Kg de N y una relación de C:N de (13,2:1) muy por

encima de las cantidades presentes en la parcelas sin tratar (Lozano-García & Parras-Alcántara, 2013)

5.4. Generación de biocombustibles

La utilización de residuos agroalimentarios para generar biocombustibles ha surgido como una importante estrategia de valorización debido al rápido aumento de los costes de energía de los recursos fósiles que se agotan. Con esta estrategia se intenta atajar la degradación del medio ambiente por la mala gestión y eliminación inadecuada de los residuos alimentarios, y al mismo tiempo sin crear competencia entre los alimentos y combustibles (Nayak & Bhushan, 2019).

La finalidad es convertir los residuos ricos en carbohidratos y azúcares en biocombustibles como el biometano y el biohidrógeno (combustibles gaseosos), y el bioetanol y el biodiesel (combustibles líquidos). Las tecnologías de base biológica (digestión anaeróbica, digestión aeróbica y proceso de fermentación microbiana), han ganado protagonismo en comparación con los procesos de térmicos de combustión y gasificación, debido a su potencial para manejar el alto contenido de humedad en los residuos alimentarios dando lugar a emisiones mínimas y rendimientos máximos. Algunas de las técnicas utilizadas para la generación de biocombustibles a partir de residuos alimentarios inherentes a la humedad alta son la licuefacción hidrotermal y la carbonización (Nayak & Bhushan, 2019).

La adopción de una opción tecnológica específica depende de los aspectos cuantitativos del desperdicio de alimentos, la caracterización de dichos desperdicios con respecto a su contenido de humedad y las características finales del biocombustible. Los criterios de selección también dependen de la eficiencia, la rentabilidad y la intensidad energética de la tecnología deseada (Nayak & Bhushan, 2019).

En la literatura se pueden encontrar estudios de investigación que tratan sobre la conversión bioquímica de residuos sólidos de oliva. Los principales productos obtenidos tras esta conversión son el xilitol y el bioetanol, que se obtienen en la fermentación simultánea utilizando levaduras como *Pachysolen tannophilus* capaces de fermentar d-xilosa y d-glucosa (García Martín et al., 2020; Padilla-Rascón et al., 2020; Ntaikou et al.,

2020). Para mejorar la digestibilidad enzimática de los residuos sólidos de oliva, se investigó el efecto del pretratamiento termoquímico evaluando la influencia de parámetros como, el tiempo de reacción, temperatura, tipo y concentración de ácidos y/o bases diluidas. La digestibilidad y sacarificación aumentó en todos los casos, con un rendimiento del 91% del total de carbohidratos OMS para el hidróxido de sodio diluido. El rendimiento más alto de etanol fue 79g/Kg OMS (pretratamiento con álcali) y de xilitol fue 49g/kg OMS (pretratamiento con ácido sulfúrico), en ambas siendo la fermentación separada de hidrolizados y sólidos (Ntaikou et al., 2020). Padilla-Rascón et al., 2020 obtuvieron un rendimiento similar, un 83% del total de contenido de azúcar en los residuos sólidos de oliva. La estrategia de proceso fue la misma, a diferencia del pretratamiento ácido y explosión de vapor, que enriqueció notablemente en xilosa la fracción sólida.

A pesar del alto contenido de humedad de la piel de limón, se ideó la licuefacción hidrotermal para aprovechar este residuo y convertirlo en aceite biocrudo, ya que el proceso de pirolisis siempre requería una etapa previa de secado, incrementando los costes energéticos del proceso. Zhang et al., 2019, basándose en la metodología de superficie de respuesta, evaluaron la repuesta con diferentes parámetros como la temperatura, el tiempo de reacción y la concentración de la materia prima. El rendimiento de aceite más alto, alrededor del 18% en peso, se logró con las condiciones de 336°C, 50 min y 9,6% peso de carga de materia prima.

6. APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGROALIMENTARIOS Y ECONOMÍA CIRCULAR. BENEFICIOS

Como se ha comentado anteriormente se espera que el consumo de materias primas como biomasa, combustibles fósiles, metales y minerales se duplique durante los próximos 40 años a escala mundial. Se estima que los residuos generados cada año aumenten en un 70% para 2050. Teniendo esto en cuenta, la Comisión Europea ha iniciado el Plan de acción de economía circular, enmarcado en el Pacto Verde Europeo, para fomentar el crecimiento sostenible. El Pacto Verde está implementando una estrategia coordinada de la UE para convertirse en una economía climáticamente neutra, eficiente en el uso de recursos y competitiva. Lograr la neutralidad climática para 2050 requerirá un esfuerzo decisivo para apoyar la ampliación de la economía circular desde los pioneros hasta los principales actores económicos. De esta forma, se fomentará la disociación del crecimiento económico del uso de recursos y también se fomentará la competitividad a largo plazo de la UE (Francavilla et al., 2021).

Las pequeñas y medianas empresas son los principales actores de este cambio ecológico mediante la adopción de tecnologías “verdes” avanzadas e innovadores y la puesta en práctica de los conocimientos técnicos adecuados. Este enfoque es particularmente de gran interés en el sector agroindustrial por la gran cantidad de residuos y subproductos que se generan. Pueden convertirse en compuestos y productos de alto valor mediante biorrefinerías basadas en procesos respetuosos con el medio ambiente. Por otro lado, el despliegue efectivo de plantas integradas de biorrefinería requiere el establecimiento de unidades de procesamiento fiables combinadas con cadenas de valor avanzadas, ecológicas y económicamente rentables. Se deben configurar bioprocesos que se incluirán en la reestructuración de las instalaciones actuales para desarrollar procesos consolidados, en el marco de la transición a un modelo circular que conferirá sostenibilidad ambiental (Kopsahelis & Kachrimanidou, 2019).

El uso creciente de biomasa residual, subutilizada y desechable podría suplir cada vez más las necesidades de materia prima requeridas por los próximos desarrollos de nuevos sistemas integrados de biorrefinería. El enfoque de biorrefinería con extracciones

secuenciales se configura como una opción muy viable en el marco de la Economía circular.

El reemplazo de combustible es de gran importancia mundial para ayudar a satisfacer la demanda de energía debido al aumento de la población. Está ampliamente aceptado que el uso de materias primas de biomasa de primera generación, como el maíz y las semillas oleaginosas comestibles, no es una opción sostenible a largo plazo porque compite, directa e indirectamente con la producción de alimentos. La Unión Europea hace hincapié firmemente en el uso de biomasa de segunda generación para la producción de biocombustibles mediante la aplicación de procesos biocatalíticos y químicos catalíticos. Además, esto es de especial para muchos países mediterráneos donde no hay suficiente tierra y agua para cultivar cultivos energéticos especializados. Por ello, residuos sólidos de la oliva y cítricos supone una biomasa de alto valor para la producción de biocombustibles (Sheldon, 2016).

En el caso de la alcachofa, el modelo de biorrefinería secuencial representa una oportunidad relevante para valorizar los residuos agrícolas emergentes de cara al enfoque de “cerrar el ciclo” postulado en la Economía Circular. La creciente demanda de ingredientes funcionales para reemplazar la grasa y el azúcar y mejorar la salud de los consumidores, convierte a ciertos componentes de los residuos de alcachofa, como son el mercado de fenoles e inulina en compuestos atractivos desde el punto de vista económico. Así, en este modelo los residuos de la extracción final se valoran eficazmente mediante la producción de bioenergía (combustión) y abono verde (regreso al campo), mejorando la fertilidad. De esta forma se cierra el ciclo y se consigue poner en práctica la sostenibilidad.

La adopción de prácticas de economía circular promueve la sostenibilidad y crea oportunidades de crecimiento empresarial. El aprovechamiento de residuos agroalimentarios ofrece múltiples beneficios:

- Reducción de la cantidad de residuos generados. La formulación de nuevos productos de alto valor añadido, producción de energía, o la creación de biomateriales y bioadsorbentes, hace que se reduzca la cantidad de residuos inutilizados que acaban en los vertedores. Idealmente se estos productos de valor agregado se introducirán en la cadena de suministro para cerrar el ciclo.

- Mejora de la rentabilidad económica de procesos. La valorización de residuos agroalimentarios y subproductos tiene un alto impacto económico, supone una reducción de costes en la compra de materias primas, en su lugar, empleando las materias transformadas.
- Creación de nuevos negocios y puestos de trabajo. Debido a la necesidad de implementar la valorización de residuos en la industria y en la sociedad, cada vez son más las empresas que necesitan nuevos puestos de trabajo relacionados con esta actividad. Además, existen nuevos modelos de negocio que centran su actividad en la valorización de residuos.
- Reducción del impacto medioambiental. Los residuos generan gases y lixiviados con efectos nocivos para el suelo, el aire y el agua. Esto tiene consecuencias muy graves en la fauna, flora e incluso puede llegar a suponer un riesgo para la sociedad. Por ello, reducir la cantidad de residuos generados ayuda a mitigar este impacto medioambiental, cada vez más acusado.

De esta forma, materiales que tradicionalmente se consideraban como “residuo” convertirse en un recurso y contribuir a la creación de un nuevo mercado mediante la aplicación de prácticas de economía circular, con beneficios ambientales y económicos a través de todos los actores involucrados.

De todo esto, se deduce que políticas de investigación e innovación son fundamentales para marcar el rumbo y establecer unas condiciones marcadas para permitir que la ciencia, la industria y la sociedad desarrollen soluciones inteligentes y que las partes interesadas trabajen juntas para iniciar un cambio estructural dirigido hacia una economía de base biológica y sostenible (Schütte, 2018).

7. CONCLUSIONES.

Esta revisión se ha centrado en aunar información sobre la bioeconomía circular, que se postula como la opción más realista para el cambio hacia políticas más sostenibles. Una de las vías para lograr esto es la reutilización de residuos agroalimentarios, por ello se ha enfocado hacia la búsqueda bibliográfica de algunas de las tantas aplicaciones tecnológicas para el aprovechamiento de los residuos sólidos generados en la industria de la oliva, cítricos y alcachofa, por la gran cantidad de éstos que se generan en la cuenca mediterránea, por sus características físico-químicas y por su alto potencial. Se han llegado a las siguientes conclusiones:

- Las empresas tienen un papel fundamental en esta transición ecológica, no solamente centrándose en intentar mitigar los efectos ambientales, sino en innovar e implementar nuevos procesos biotecnológicos en sus sistemas productivos y aprovechar la oportunidad de mercado que ofrecen el aprovechamiento de los residuos agroalimentarios.
- A pesar de la homogeneidad en las políticas de bioeconomía de los distintos gobiernos, será un factor crucial encontrar un equilibrio y puntos comunes acordes con los principios de la economía circular, para cumplir con los objetivos marcados y que la transición tenga éxito.
- Existe una clara conexión entre la valorización de los residuos agroalimentarios y el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible 7, 9, 10 y 13. Además contribuyen a la creación de un nuevo mercado empresarial con múltiples beneficios, tanto ambientales, económicos como sociales.
- La biotecnología industrial requiere una alta especialización técnica y se necesita adaptar el modelo educativo superior con nuevos programas interdisciplinarios que integren los conceptos de recuperación de recursos y circularidad, con el objetivo de capacitar a las próximas generaciones de expertos profesionales con esta nueva visión y no se quede atrás la integración de estos conceptos en los planes de estudio.
- Según la literatura revisada, se ha observado el alto potencial que presentan los residuos sólidos de la industria de la oliva, cítricos y alcachofa como adsorbentes de bajo costo en el tratamiento de aguas residuales, productos de alto valor añadido, biocombustibles y biomateriales.

- Está admitido socialmente que el modelo económico actual, basado en una producción y un consumo con recursos naturales limitados, se ha demostrado fallido al no contemplar la sostenibilidad en su valoración de riqueza y desarrollo. La economía circular, en contraposición al modelo de economía lineal, permite el aprovechamiento, la reducción y recuperación de residuos, ofreciendo una oportunidad para reinventar nuestra economía, haciéndola más sostenible y competitiva. La economía circular es una necesidad, no es una opción.

8. REFERENCIAS.

- Aguilar, A., Twardowski, T., & Wohlgemuth, R. (2019). Bioeconomy for sustainable development. *Biotechnology Journal*, 14. <https://doi.org/10.1002/biot.201800638>
- Angelov, G., Georgieva, S., Boyadzhieva, S., & Boyadzhiev, L. (2015). Optimizing the extraction of globe artichoke wastes. *Comptes Rendus de L'Academie Bulgare Des Sciences*, 68, 1235–1240.
- Bohli, T., Ouederni, A., Fiol, N., & Villaescusa, I. (2015). Evaluation of an activated carbon from olive stones used as an adsorbent for heavy metal removal from aqueous phases. *Comptes Rendus Chimie*, 18, 88–99. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2014.05.009>
- Bonechi, C., Consumi, M., Donati, A., Leone, G., Magnani, A., Tamasi, G., & Rossi, C. (2017). Biomass: An overview. *Bioenergy Systems for the Future*, 3-42. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101031-0.00001-6>
- Boufi, S. (2017). Biocomposites from olive-stone flour: A step forward in the valorization of the solid waste from the olive-oil industry. *Lignocellulosic fibre and biomass-based composite materials: processing, properties and applications*, 387–408. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100959-8.00018-4>
- Cai, J., He, Y., Yu, X., Banks, S. W., Yang, Y., Zhang, X., Yu, Y., Liu, R., & Bridgwater, A. V. (2017). Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 309–322. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.072>
- Calero, M., Iáñez-Rodríguez, I., Pérez, A., Martín-Lara, M. A., & Blázquez, G. (2018). Neural fuzzy modelization of copper removal from water by biosorption in fixed-bed columns using olive stone and pinion shell. *Bioresource Technology*, 252, 100–109. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.074>
- Cao, L., Yu, I. K. M., Liu, Y., Ruan, X., Tsang, D. C. W., & Hunt, A. J. (2018). Bioresource technology lignin valorization for the production of renewable chemicals : state-of-the- art review and future prospects. *Bioresource Technology*, 269, 465–475. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.08.065>
- Dahiya, S., Kumar, A. N., Shanthi Sravan, J., Chatterjee, S., Sarkar, O., & Mohan, S. V. (2018). Food waste biorefinery: sustainable strategy for circular bioeconomy. *Bioresource Technology*, 248, 2–12. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.176>

- Debernardi-Vázquez, Teresita de Jesús, Aguilar-Rivera, Noé, & Núñez-Pastrana, Rosalía. (2020). Composting of byproducts from the orange (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) and sugarcane (*Saccharum* spp. hybrids) Agroindustries. *Ingeniería e Investigación*, 40, 81-88. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v40n3.82877>.
- Dupont-Inglis, J., & Borg, A. (2018). Destination bioeconomy – The path towards a smarter, more sustainable future. *New Biotechnology*, 40, 140–143. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2017.05.010>
- Fernández-López, J. A., Angosto, J. M., Roca, M. J., & Doval Miñarro, M. (2019). Taguchi design-based enhancement of heavy metals bioremoval by agroindustrial waste biomass from artichoke. *Science of the Total Environment*, 653, 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.343>
- Font, A., Soriano, L., Moraes, J. C. B., Tashima, M. M., Monzó, J., Borrachero, M. V., & Payá, J. (2017). A 100% waste-based alkali-activated material by using olive-stone biomass ash (OBA) and blast furnace slag (BFS). *Materials Letters*, 203, 46–49. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.05.129>
- Francavilla, M., Marone, M., Marasco, P., Contillo, F., & Monteleone, M. (2021). Artichoke biorefinery: from food to advanced technological applications. *Foods*, 10, 112. <https://doi.org/10.3390/foods10010112>
- Frezzini, M. A., Massimi, L., Astolfi, M. L., Canepari, S., & Giuliano, A. (2019). Food waste materials as low-cost adsorbents for the removal of volatile organic compounds from wastewater. *Materials*, 12. <https://doi.org/10.3390/MA12244242>
- Fúnez-Núñez, I., García-Sancho, C., Cecilia, J. A., Moreno-Tost, R., Serrano-Cantador, L., & Maireles-Torres, P. (2020). Recovery of pentoses-containing olive stones for their conversion into furfural in the presence of solid acid catalysts. *Process Safety and Environmental Protection*, 143, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.06.033>
- García Martín, J. F., Cuevas, M., Feng, C. H., Mateos, P. Á., García, M. T., & Sánchez, S. (2020). Energetic valorisation of olive biomass: olive-tree pruning, olive stones and pomaces. *Processes*, 8. <https://doi.org/10.3390/PR8050511>
- Gómez, B., Yáñez, R., Parajó, J. C., & Alonso, J. L. (2016). Production of pectin-derived oligosaccharides from lemon peels by extraction, enzymatic hydrolysis and membrane filtration. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 91, 234–247. <https://doi.org/10.1002/jctb.4569>

- Guemghar, M., Remini, H., Bouaoudia-Madi, N., Mouhoubi, K., Madani, K., & Boulekbache-Makhlouf, L. (2020). Phenolic compounds from artichoke (*cynara scolymus* L.) byproducts: optimization of microwave assisted extraction and enrichment of table oil. *Food Technology*, 44, 193–211. <https://doi.org/10.35219/foodtechnology.2020.1.12>
- Halet, F., Yeddou, A. R., Chergui, A., Chergui, S., Nadjemi, B., & Ould-Dris, A. (2015). Removal of cyanide from aqueous solutions by adsorption on activated carbon prepared from lignocellulosic by-products. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 36, 1736–1741. <https://doi.org/10.1080/01932691.2015.1005311>
- Khadem, S., Rashidi, L., & Homapour, M. (2019). Antioxidant capacity, phenolic composition and physicochemical characteristics of whole olive stone oil extracted from different olive varieties grown in Iran. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 121. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201800365>
- Kopsahelis, N., & Kachrimanidou, V. (2019). Advances in food and byproducts processing towards a sustainable bioeconomy. *Foods*, 8. <https://doi.org/10.3390/foods8090425>
- Latif, S., Rehman, R., Imran, M., & Iqbal, S. (2018). Biosorptive decontamination of acid red-87 dye from wastewater by citrus limonum peels: ecofriendly approach. *Pakistan Journal of Analytical and Environmental Chemistry*, 19, 44–52. <https://doi.org/10.21743/pjaec/2018.06.04>
- Licursi, D., Antonetti, C., Fulignati, S., Corsini, A., Boschi, N., & Galletti, A. M. R. (2018). Smart valorization of waste biomass: exhausted lemon peels, coffee silverskins and paper wastes for the production of levulinic acid. *Chemical Engineering Transactions*, 65, 637–642. <https://doi.org/10.3303/CET1865107>
- Lozano-García, B., & Parras-Alcántara, L. (2013). Short-term effects of olive mill by-products on soil organic carbon, total N, C: N ratio and stratification ratios in a mediterranean olive grove. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 165, 68–73. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.12.007>
- M'hiri, N., Ioannou, I., Ghoul, M., & Mihoubi Boudhrioua, N. (2017). Phytochemical characteristics of citrus peel and effect of conventional and nonconventional processing on phenolic compounds: a review. *Food Reviews International*, 33, 587–619. <https://doi.org/10.1080/87559129.2016.1196489>
- Machado, M. T. C., Eça, K. S., Vieira, G. S., Menegalli, F. C., Martínez, J., & Hubinger, M. D. (2015). Prebiotic oligosaccharides from artichoke industrial waste: evaluation of different extraction methods. *Industrial Crops and Products*, 76, 141–148.

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.06.047>

- Maietta, M., Colombo, R., Lavecchia, R., Sorrenti, M., Zuorro, A., & Papetti, A. (2017). Artichoke (*cynara cardunculus* L. var. *scolymus*) waste as a natural source of carbonyl trapping and antiglycative agents. *Food Research International*, 100, 780–790. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.08.007>
- Mak, T. M. W., Xiong, X., Tsang, D. C. W., Yu, I. K. M., & Poon, C. S. (2020). Sustainable food waste management towards circular bioeconomy: policy review, limitations and opportunities. *Bioresource Technology*, 297. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122497>
- Mangwandi, C., Kurniawan, T. A., & Albadarin, A. B. (2020). Comparative biosorption of chromium (VI) using chemically modified date pits (CM-DP) and olive stone (CM-OS): kinetics, isotherms and influence of co-existing ions. *Chemical Engineering Research and Design*, 156, 251–262. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.01.034>
- Mansour, M. S. M., Abdel-Shafy, H. I., & Mehaya, F. M. S. (2018). Valorization of food solid waste by recovery of polyphenols using hybrid molecular imprinted membrane. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6, 4160–4170. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.019>
- Martín-Lara, M. A., Blázquez, G., Trujillo, M. C., Pérez, A., & Calero, M. (2014). New treatment of real electroplating wastewater containing heavy metal ions by adsorption onto olive stone. *Journal of Cleaner Production*, 81, 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.036>
- Mekki, A., Arous, F., Aloui, F., & Sayadi, S. (2017). Treatment and valorization of agro-wastes as biofertilizers. *Waste and Biomass Valorization*, 8, 611–619. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9620-3>
- Meseldzija, S., Petrovic, J., Onjia, A., Volkov-Husovic, T., Nesic, A., & Vukelic, N. (2019). Utilization of agro-industrial waste for removal of copper ions from aqueous solutions and mining-wastewater. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 75, 246–252. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.03.031>
- Morton, S., Pencheon, D., & Squires, N. (2017). Sustainable development goals (SDGs), and their implementation. *British Medical Bulletin*, 124, 81–90. <https://doi.org/10.1093/bmb/ldx031>
- Nayak, A., & Bhushan, B. (2019). An overview of the recent trends on the waste valorization techniques for food wastes. *Journal of Environmental Management*, 233, 352–370. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.041>

- Ng, H. S., Kee, P. E., Yim, H. S., Chen, P. T., Wei, Y. H., & Chi-Wei Lan, J. (2020). Recent advances on the sustainable approaches for conversion and reutilization of food wastes to valuable bioproducts. *Bioresource Technology*, 302. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122889>
- Ntaikou, I., Siankevich, S., & Lyberatos, G. (2020). Effect of thermo-chemical pretreatment on the saccharification and enzymatic digestibility of olive mill stones and their bioconversion towards alcohols. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09625-z>
- Padilla-Rascón, C., Ruiz, E., Romero, I., Castro, E., Oliva, J. M., Ballesteros, I., & Manzanares, P. (2020). Valorisation of olive stone by-product for sugar production using a sequential acid/steam explosion pretreatment. *Industrial Crops and Products*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112279>
- Pathak, P. D., Mandavgane, S. A., & Kulkarni, B. D. (2017). Fruit peel waste: characterization and its potential uses. *Current Science*, 11, 444–454. <https://doi.org/10.18520/cs/v113/i03/444-454>.
- Paul, S., & Dutta, A. (2018). Challenges and opportunities of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion. *Resources, Conservation and Recycling*, 130, 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.005>
- Payá, J., Monzó, J., Roselló, J., Borrachero, M. V., Font, A., & Soriano, L. (2020). Sustainable soil-compacted blocks containing blast furnace slag (BFS) activated with olive stone biomass ash (OBA). *Sustainability*, 12, 1–15. <https://doi.org/10.3390/su12239824>
- Rabelo, R. S., MacHado, M. T. C., Martínez, J., & Hubinger, M. D. (2016). Ultrasound assisted extraction and nanofiltration of phenolic compounds from artichoke solid wastes. *Journal of Food Engineering*, 178, 170–180. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.01.018>
- Rafiq, S., Kaul, R., Sofi, S. A., Bashir, N., Nazir, F., & Ahmad Nayik, G. (2018). Citrus peel as a source of functional ingredient: a review. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17, 351–358. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.07.006>
- Razak, Z. A., Rushdi, S., Gadhban, M. Y., Al-Najjar, S. Z., & Al-Sharif, Z. T. (2020). Possibility of utilizing the lemon peels in removing of red reactive (RR) dye from simulated aqueous solution. *Journal of Green Engineering*, 10, 7343-7359.
- Šabanović, E., Muhić-Šarac, T., Nuhanović, M., & Memić, M. (2019). Biosorption of uranium(VI) from aqueous solution by citrus limon peels: kinetics, equilibrium and batch

- studies. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 319, 425–435.
<https://doi.org/10.1007/s10967-018-6358-3>
- Sabater, C., Corzo, N., Olano, A., & Montilla, A. (2018). Enzymatic extraction of pectin from artichoke (*cynara scolymus* L.) by-products using Celluclast®1.5L. *Carbohydrate Polymers*, 190, 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.02.055>
- Sabater, C., Sabater, V., Olano, A., Montilla, A., & Corzo, N. (2020). Ultrasound-assisted extraction of pectin from artichoke by-products. An artificial neural network approach to pectin characterisation. *Food Hydrocolloids*, 98. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105238>
- Sawatdeenarunat, C., Surendra, K. C., Takara, D., Oechsner, H., & Khanal, S. K. (2015). Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: challenges and opportunities. *Bioresource Technology*, 178, 178–186. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.103>
- Schütte, G. (2018). What kind of innovation policy does the bioeconomy need? *New Biotechnology*, 40, 82–86. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2017.04.003>
- Sękara, A., Kalisz, A., Gruszecki, R., Grabowska, A., & Kunicki, E. (2015). Globe artichoke – a vegetable herb and ornamental of value in central europe: a review. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 90, 365–374. <https://doi.org/10.1080/14620316.2015.11513196>
- Sheldon, R. A. (2016). Engineering a more sustainable world through catalysis and green chemistry. *Journal of the Royal Society Interface*, 13, 1–7. <https://doi.org/10.1098/rsif.2016.0087>
- Siddique, A., Nayak, A. K., & Singh, J. (2020). Synthesis of FeCl₃-activated carbon derived from waste citrus limetta peels for removal of fluoride: an eco-friendly approach for the treatment of groundwater and bio-waste collectively. *Groundwater for Sustainable Development*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100339>
- Singh, S. A., & Shukla, S. R. (2016). Adsorptive removal of cobalt ions on raw and alkali-treated lemon peels. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13, 165–178. <https://doi.org/10.1007/s13762-015-0801-6>
- Ubando, A. T., Felix, C. B., & Chen, W. H. (2020). Biorefineries in circular bioeconomy: a comprehensive review. *Bioresource Technology*, 299. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122585>

- Verma, L., Siddique, M. A., Singh, J., & Bharagava, R. N. (2019). As(III) and As(V) removal by using iron impregnated biosorbents derived from waste biomass of citrus limmeta (peel and pulp) from the aqueous solution and ground water. *Journal of Environmental Management*, 250. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109452>
- Villen-Guzman, M., Gutierrez-Pinilla, D., Gomez-Lahoz, C., Vereda-Alonso, C., Rodriguez-Maroto, J. M., & Arhoun, B. (2019). Optimization of Ni (II) biosorption from aqueous solution on modified lemon peel. *Environmental Research*, 179. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108849>
- Weissbrodt, D. G., Winkler, M. K. H., & Wells, G. F. (2020). Responsible science, engineering and education for water resource recovery and circularity. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 6, 1952–1966. <https://doi.org/10.1039/d0ew00402b>
- Zhang, B., Chen, J., He, Z., Chen, H., & Kandasamy, S. (2019). Hydrothermal liquefaction of fresh lemon-peel: parameter optimisation and product chemistry. *Renewable Energy*, 143, 512–519. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.003>
- Zuorro, A., Maffei, G., & Lavecchia, R. (2016). Reuse potential of artichoke (*cynara scolimus* L.) waste for the recovery of phenolic compounds and bioenergy. *Journal of Cleaner Production*, 111, 279–284. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.011>