

Residuos con valor: estrategias de aprovechamiento agroindustrial en Puebla

Juana Deisy Santamaría Juárez¹ **iD**, Héctor Toribio Cuaya¹ **iD**, José Carlos Mendoza Hernández¹ **iD**,
Ma Dolores Castañeda Antonio^{2*} **iD**

¹Facultad de Ingeniería Química, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla 72570, México. ²Centro en Investigaciones en Ciencias Microbiológicas, Instituto de Ciencias de la BUAP, 24 sur y Av San Claudio, Jardines de San Manuel Puebla, Pue.

Email de autor para correspondencia: *dolores.castaneda@correo.buap.mx

Recibido: 13 octubre 2024. **Aceptado:** 5 febrero 2025

RESUMEN

En Puebla, la agricultura se centra en cultivos como Aloe vera, maíz, café y caña de azúcar, generando importantes residuos agrícolas. Estos residuos deben gestionarse, principalmente la biomasa lignocelulósica debido a su potencial para la producción de energía, abonos y bioplásticos. Actualmente, muchos residuos se eliminan mediante quema, contribuyendo a la contaminación y al cambio climático.

Este documento propone la valorización de residuos agrícolas como una solución sostenible. Se abordan métodos como la producción de bioenergía a partir de restos de cultivos y su compostaje para obtener abonos orgánicos. Además, algunos subproductos pueden utilizarse como alimentación animal, mientras que otros pueden ser transformados en bioplásticos y materiales industriales aportando biotecnologías a disposición y en pro de la sociedad.

La selección de cultivos como el maíz y la caña de azúcar se basa en su alta producción y el volumen de residuos generados. Estos residuos contienen celulosa, hemicelulosa y lignina, componentes que pueden procesarse en biorrefinerías para obtener productos de valor agregado. A pesar de los desafíos, como la falta de infraestructura y apoyo gubernamental, la valorización de estos residuos en Puebla ofrece beneficios económicos, sociales y ambientales, contribuyendo a una agricultura más sostenible.

Palabras clave: Agroindustrial; desperdicios; residuo; transformación; valorización.

ABSTRACT

In Puebla, agriculture focuses on crops such as aloe vera, corn, coffee, and sugar cane, generating significant agricultural waste. This waste must be managed, particularly lignocellulosic biomass due

to its potential for energy production, fertilizers, and bioplastics. Currently, many wastes are disposed of by burning, contributing to pollution and climate change.

This document proposes the value of agricultural waste as a sustainable solution. It addresses methods such as bioenergy production from crop residues and their composting to obtain organic fertilizers. Additionally, some by-products can be used as animal feed, while others can be transformed into bioplastics and industrial materials, leveraging biotechnology for societal benefit.

The selection of crops like corn and sugar cane is based on their high production and the volume of waste generated. This waste contains cellulose, hemicellulose, and lignin, components that can be processed in biorefineries to obtain value-added products. Despite challenges such as lack of infrastructure and government support, the valorization of these wastes in Puebla offers economic, social, and environmental benefits, contributing to more sustainable agriculture.

Keywords: Agroindustrial; residue; transformation; valorization; waste.

INTRODUCCIÓN

En el estado de Puebla, la mayoría de los municipios se dedican a la cosecha de una amplia variedad de productos. Entre ellos destaca la planta de aloe vera, de interés industrial, así como cereales como el trigo, maíz, cebada y avena. También son importantes granos como el café (Figura 1), el maíz (Figura 2) y el frijol.



Figura 1. Cosecha de cereza de café.



Figura 2. Cosecha de maíz.

En el ámbito de las hortalizas, Puebla produce zanahorias, cebollas, col, calabacitas, habas, papas, tomates, chiles, lechugas, jitomates, cilantro y ejotes. Los cítricos, como el limón y la naranja, también forman parte de su producción, al igual que frutos como la guayaba, durazno, aguacate, nuez y cacahuete. Además, se cultivan especies perennes como la alfalfa y la caña de azúcar (Figura 3), así como diversas plantas de ornato, entre otros.



Figura 3. Cosecha de caña de azúcar.

Los procesos de cosecha y transformación de estos productos generan biomasa lignocelulósica. La eliminación y el aprovechamiento de esta biomasa representan desafíos significativos para los productores, ya que actualmente se enfrenta a un almacenamiento inadecuado. Desafortunadamente, gran parte de esta biomasa suele eliminarse mediante la quema, lo que produce amoníaco y metano, contribuyendo así a la emisión global de gases de efecto invernadero y causando graves problemas de contaminación ambiental y cambio climático.

Este documento aborda de manera general la importancia de la valorización de los residuos agrícolas, considerando la productividad agroindustrial en el estado de Puebla. Se describen los principales sectores generadores, con el objetivo de proponer la selección de residuos lignocelulósicos como materia prima disponible para su uso en procesos de biorrefinería.

Valorización de residuos agrícolas en el estado de Puebla

El parlamento Europeo mediante el Diario Oficial de la Unión Europea (DOUE), a través de la directiva 2009/28/CE referente al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, definen a la biomasa lignocelulósica como la fracción biodegradable de desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrícolas, incluidas las de origen vegetal y animal, las de la silvicultura, incluso las fracciones de la pesca y la acuicultura, así como la fracción de los residuos industriales y municipales [1].

La valorización de residuos agrícolas en el estado de Puebla es un tema de gran importancia debido a la significativa producción agrícola de la región. Uno de los objetivos es plantear procesos y técnicas para convertir estos residuos en productos útiles, como energía, abonos orgánicos, y materiales industriales. A continuación, se mencionan algunos enfoques y ejemplos de la valorización de estos residuos en el estado de Puebla.

1. Producción de bioenergía

La biomasa agrícola, que incluye restos de cultivos como el maíz, el olote y el rastrojo (Figura 4), así como los bagazos de agave y caña provenientes de la producción de mezcal y el procesamiento de caña de azúcar, puede aprovecharse para la producción de bioenergía, biocombustibles y biomateriales. Por otro lado, los residuos orgánicos generados por las industrias alimentarias y la ganadería pueden

enfocarse en la producción de biogás. Este enfoque no solo proporciona una fuente de energía renovable, sino que también contribuye a reducir la dependencia de combustibles fósiles.



Figura 4. Residuo lignocelulósico de la cosecha de maíz (olote).

2. Compostaje y abonos orgánicos

Los residuos agrícolas, como las hojas, tallos y cáscaras, pueden ser compostados para producir abonos orgánicos, un ejemplo son los residuos del procesamiento del café, pulpa del café (Figura 5). Este proceso no solo ayuda a reducir el volumen de residuos, sino que también mejora la calidad del suelo, aumentando su fertilidad y capacidad de retención de agua. En Puebla, se ha promovido el compostaje a nivel local para pequeñas y medianas explotaciones agrícolas [2].

3. Alimentación animal

Algunos residuos agrícolas, como el rastrojo de maíz y los subproductos de la molienda de granos y bagazos (Figura 6), pueden ser utilizados como alimento para el ganado. Este uso es especialmente importante en áreas rurales donde el acceso a alimento concentrado

para animales puede ser limitado y costoso [3].



Figura 5. Pulpa de café.



Figura 6. Bagazo de caña.

4. Materiales industriales y bioplásticos

La investigación y desarrollo en las áreas de la biotecnología y la ingeniería de los materiales han permitido el uso de residuos lignocelulósicos para la producción y extracción de precursores de bioplásticos (Figura 7). En el estado de Puebla, existen iniciativas para desarrollar tecnologías que permitan transformar residuos de cultivos como el agave en bioplásticos biodegradables, lo cual es una alternativa ecológica a los plásticos convencionales. Por ejemplo, la empresa BioSolutions procesa fibras de agave, para producir empaques [4].

Otras empresas como Solep procesan residuos sólidos orgánicos para convertirlos en fertilizantes orgánicos [5]. Algunas instituciones como la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) aprovechan los restos de frutas, en especial la cáscara, para elaborar fibras y con ellas barras energéticas, bebidas lácteas y galletas [6]. Además, en la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP), propusieron el tratamiento anaerobio de residuos sólidos orgánicos [7].

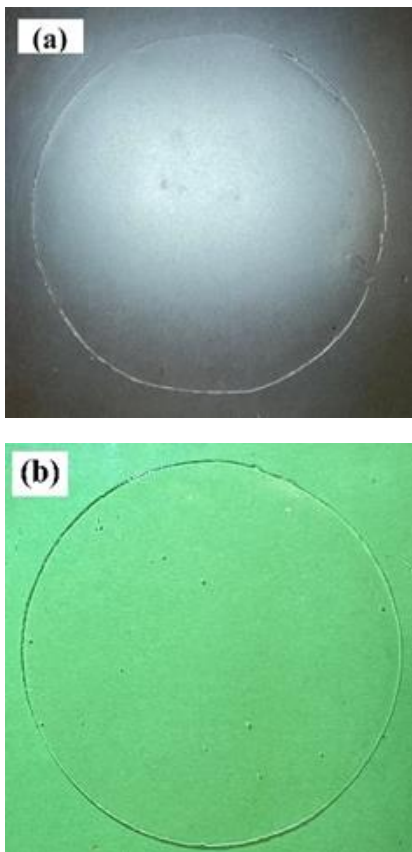


Figura 7. Películas biopoliméricas a base de celulosa de tallo de banano, a) fondo claro; b) fondo translucido.

Productividad agrícola en el estado de Puebla

En el estado de Puebla, es crucial explorar

posibles rutas que generen energía, materiales y recursos beneficiosos para la sociedad en general. En este sentido, se propone el uso de recursos renovables para obtener materias primas destinadas a la producción de bienes de interés comercial. Los residuos agroindustriales presentan un alto potencial, ya que se generan a partir de la fijación de CO₂ de la atmósfera, lo que contribuye a un balance con un menor impacto ambiental.

México tiene potencial para suministrar este tipo de material debido a que existen cultivos potenciales en el país como: maíz, frijol, sorgo, cebada, algodón, entre otros. La Tabla 1 presenta los 12 cultivos con mayor producción en el cierre de 2022, sólo se presenta la cantidad de los cultivos que se consideran candidatos para el uso de sus residuos como biomasa lignocelulósica disponible, debido a que estos son subproductos del aprovechamiento de los granos y sus rastrojos son materiales generados con rendimientos que resultan de interés.

Tabla 1. Producción de cultivos en México en 2022, datos obtenidos de SIAP [8].

	Producción en Toneladas
1. Maíz grano	26553239.30
2. Frijol	965370.65
3. Sorgo grano	4762961.75
4. Avena forrajera en verde	—
5. Maíz forrajero en verde	—
6. Cebada grano	1023969.25
7. Algodón hueso	909809.24
8. Sorgo forrajero en verde	—
9. Chile verde	3112480.69
10. Soya	175544.50
11. Garbanzo grano	188594.77
12. Ajonjolí	56467.77

Para el estado de Puebla se tiene que los cultivos con mayor producción durante el cierre del año 2022 fueron la caña de azúcar con 1,862,284.30 toneladas, el maíz en grano con 724,891.92 toneladas y el café en cereza con 208,291.87 toneladas [8]. Su ubicación en el estado se presenta en la Figura 8, donde se observa que la producción de grano de maíz está distribuida en diversos municipios en el estado. Para la caña de azúcar esta se focaliza en la parte del sur de estado en el oriente y poniente y para el café en cereza se concentra en el noreste del estado y un municipio en el sureste.

El criterio por el cual se considera que los cultivos de granos y frutos resultan de interés como materia prima lignocelulósica se debe a que genera cantidades considerables de residuos que se concentran después de la cosecha y que en su mayoría son rastrojos, bagazos y residuos de los frutos como en el caso del café en cereza que sólo utiliza el grano.

Estos materiales son biomasa lignocelulósica que está conformada por celulosa, hemicelulosa

y lignina (Figura 9). Los dos primeros son polisacáridos constituidos por azúcares monoméricos unidos por enlaces glucosídicos, en general estas azucares se dividen en dos grupos hexosas y pentosas, estos polímeros pueden ser homopolisacáridos y heteropolisacáridos. En el caso de la lignina es un polímero amorfo formado por las unidades monoméricas que son los alcoholes coniferílico, sinapílico y p-cumarílico. Estos materiales también contienen otros compuestos como la pectina que es un polisacárido formado por el ácido galacturónico que es su principal unidad monomérica [9].

Estos polímeros naturales pueden utilizarse directamente tras ser extraídos mediante pretratamientos, sirviendo como base para la creación de nuevos materiales en el ámbito de los biopolímeros. Entre sus principales ventajas se encuentran su origen renovable, su biodegradabilidad y su disponibilidad en toda actividad agrícola como residuo. Sin embargo, es necesario realizar más investigaciones en el área de tecnología aplicada para igualar sus



Figura 8. Distribución de la producción de grano de maíz, caña de azúcar y café en cereza en Puebla según información de SIAP en cierre de 2022 [8].

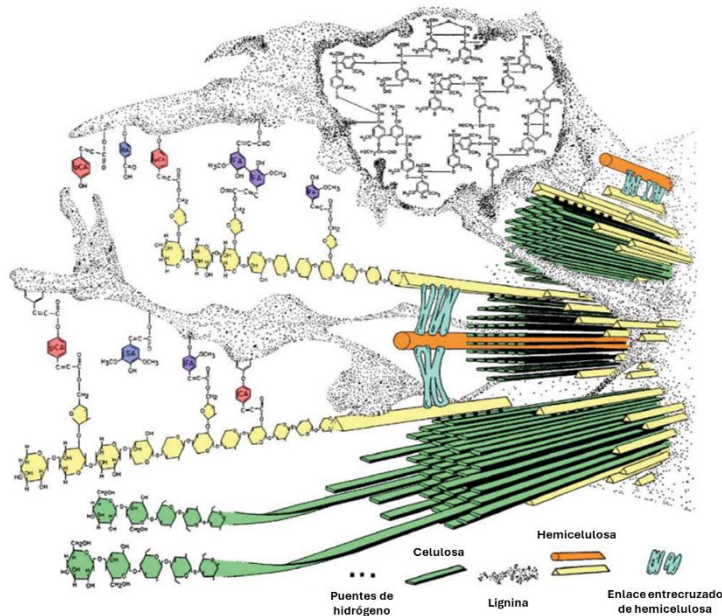


Figura 9. Modelo de la pared celular secundaria de la planta que muestra la asociación de los principales componentes estructurales. Modificado de Bidlack *et al.* (1992) [10].

propiedades mecánicas con las de los polímeros sintéticos, con el fin de mitigar los efectos negativos que estos últimos tienen en el medio ambiente.

Para alcanzar este objetivo, actualmente se cuenta con el concepto de biorrefinería, que se define como “el proceso sostenible de la biomasa en un espectro de productos comercializables y energía” [11]. Con esto en mente, se presenta una metodología para seleccionar biomasa lignocelulósica potencial como materia prima, mediante el análisis de su composición química, lo que permitirá identificar la ruta o plataforma de biorrefinería más adecuada y sus posibles aplicaciones.

Sector industrial generador

La mayoría de los residuos agroindustriales producidos en grandes cantidades, son

desechados y acumulados en el suelo, como consecuencia son una fuente de contaminación del medio ambiente debido a que estos emiten gases tóxicos, generan infertilidad del suelo, producen fauna nociva y propician enfermedades (Figura 10).



Figura 10. Infertilidad del suelo por desechos de cáscara de aloe vera.

Sin embargo, el aprovechamiento de la alta composición de celulosa, hemicelulosa y

lignina es fundamental, en la Tabla 2 se muestran algunos de ejemplos de la composición de diversos residuos.

Tabla 2. Componentes lignocelulósicos de biomasa residuales [12].

Muestra	%Celulosa	%Hemicelulosa	%Lignina
Hojas de la planta Saharan Aloe Vera Cactus	67.40	8.20	13.70
Cáscara de plátano rojo	31.00	31.00	18.00
Cáscara de arroz	40.00	21.00	22.00
Tallo de maíz	36.89	20.42	17.38
Cáscara de nuez de areca	34.18	20.83	31.60
Cáscara de sábila	57.72	16.39	13.73
Vaina de Palmera real	61.10	38.00	1.80
Tallo de milo	70.12	12.64	17.10
Pedúnculo de planta de plátano Nandran	73.20	10.85	15.32
Tallo de algodón	30.00	25.00	22.00
Tallo de rosa	28.60	29.00	24.90
Paja de arroz	41.94	25.58	0.80
Paja de Bambú	45.78	23.94	14.46
Cáscara de maní	35.08	10.48	25.06
Cáscara de castaño	21.51	16.25	36.61
Salvado de arroz	5.65	2.99	1.47
Paja de trigo	38.00	36.00	22.00
Paja de colza	36.00	37.00	24.00
Corteza de abeto	42.00	27.00	26.00

Dentro de los principales sectores generadores de biomasa lignocelulósica en el estado de Puebla se encuentra las actividades agrícolas (cultivos como maíz, caña de azúcar, trigo), forestales (restos de corte y tala, como ramas, cortezas y aserrín) e industriales (la industria del agave, del café y desulpado de la planta de sábila). Un ejemplo es el proceso de desulpado de la planta de aloe vera en donde se generan alrededor de 10 toneladas por semana (Figura 11).

Selección de posibles candidatos para la localización de una biorrefinería

La selección de un material lignocelulósico como materia prima, por ejemplo para una biorrefinería, se basa en diferentes factores

como lo son: su rendimiento como residuo de un cultivo, su composición química, la facilidad de reunir la mayor cantidad del material sin invertir más energía para su acopio y transporte, es decir, abordarlo como un problema de logística. Además, también se debe considerar el mercado donde tendrán su fin como producto terminado.



Figura 11. Residuo lignocelulósico de aloe vera (cáscara), izquierda durante corte, derecha después del desulpe.

En el contexto de las actividades del estado de Puebla, se propone que los cultivos potenciales son el grano de maíz, la caña de azúcar y el café en cereza porque son los que presentan una mayor producción. Estas siembras generan entre sus residuos tres materiales que son el olote de maíz, el bagazo de caña y la pulpa del café. El olote maíz representa entre el 16.16 – 17.00 % de rendimiento en función del grano de maíz [13, 14]. El bagazo de caña que se genera tiene un rendimiento del 13.00 – 17.44% en función de la caña de azúcar [15, 16, 17]. La pulpa del café tiene un rendimiento del 40.00 – 42.00 % del café en cereza [18, 19, 20].

Para estimar la cantidad total de material lignocelulósico disponible se realiza la

multiplicación de la fracción masa del rendimiento por la producción total del cultivo de interés, por ejemplo, el olote de maíz disponible en el estado de Puebla es de 120,051.33 - 126,291.62 Ton, para el bagazo es de 242,096.95 - 324,782.38 Ton y la pulpa de café es de 83,316.74 - 87,482.58 Ton [13-15, 17, 18, 20].

Esta biomasa es lignocelulósica y por ende está conformada de celulosa hemicelulosa y lignina como es el caso del olote de maíz y el bagazo de caña, pero para la pulpa de café se tiene que considerar también la fracción de pectina que constituye este residuo. El procedimiento para estimar estas fracciones se abordará de manera profunda en la siguiente sección.

Respecto a la distribución de las biorrefinerías y su localización se pueden proponer al menos cuatro regiones en el estado (Figura 12), una en el norte donde existe la producción de maíz y café en cereza, otra en el centro del estado donde se encuentra solo producción de maíz, al sur oriente donde hay producción cañera y de maíz y por último en el sur poniente donde existen los tres cultivos.

La localización idónea de estas biorrefinerías se debe estudiar como un problema de optimización donde se considerará también los mercados que recibirán los productos que se elaboren, pero ese no es el alcance de este documento, sin embargo, con esta información se tiene esta propuesta general de la distribución [21].

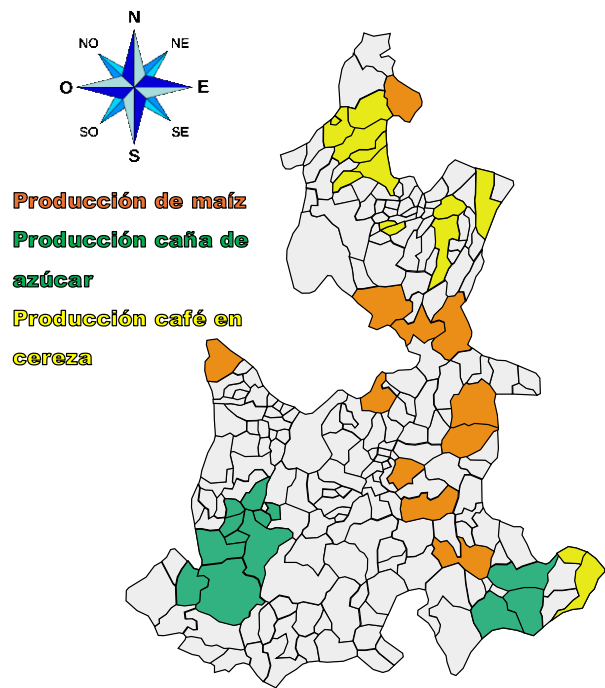


Figura 12. Distribución de cultivos de maíz, caña de azúcar y café en cereza en el estado. Los municipios con colores diferentes a los de cada cultivo individual se debe a que en esa región se tiene dos cultivos de interés [8].

Composición química de los residuos agroindustriales que son candidatos a ser materia prima de una biorrefinería

Bajo el concepto de una biorrefinería resulta necesario conocer la composición de los materiales lignocelulósicos a procesar porque a partir de esta información se propone la ruta o plataforma a la que se destinará el material. Además, esta información resulta valiosa para proponer el conjunto de pretratamientos que son la pieza angular de un esquema de biorrefinación [22].

Se utiliza como ejemplo el olote de maíz para calcular la cantidad de componentes a partir de la composición química del material. La Tabla 3 presenta los intervalos de la composición

química de este material reportados en la literatura. Para estimar el potencial de sus constituyentes como materia prima se multiplica la producción total del olote de maíz por cada fracción de la composición. Debido a que se trabaja con intervalos se debe utilizar el valor con menor magnitud para que al momento de estimar el rendimiento de un producto en la biorrefinería se tenga un valor que es alcanzable y factible.

Tabla 3. Composición química del olote de maíz extraída de la literatura [22, 23, 24, 25].

Componente	Literatura ^a [%]
Hemicelulosa	30.44 - 44.40
Celulosa	34.14 - 45.10
Lignina	11.90 - 20.90
Cenizas	1.30 - 4.15
Volátiles	NR

NR: No reportado.

En este caso se tienen 120,051.33 Ton de olote lo que equivale a 40,985.52 Ton de celulosa, 36,543.62 Ton de hemicelulosa y 14,286.10 Ton de lignina que son la base para poder realizar una propuesta de la(s) ruta(s) que podrían plantear la biorrefinería para el aprovechamiento del olote [8].

Con las cantidades determinadas se puede plantear que este material tiene una alta cantidad de polisacáridos que pueden utilizarse después de su extracción y separación dependiendo de la ruta que se desee desarrollar en una biorrefinería. La lignina representa una cantidad considerable de un compuesto fenólico que puede incidir como un material

con diversas aplicaciones, desde la aplicación en el área de biomateriales, compositos hasta como mejorador de suelo. En la siguiente sección se explica cómo estas fracciones del material pueden proyectar diferentes rutas para la propuesta de una biorrefinería enfocada a los bioplásticos.

Posibles plataformas de biorrefinería a partir de los residuos agrícolas del estado de Puebla

De acuerdo con la definición de biorrefinería (Figura 13) del Global biorefinery status report 2022. IEA, se entiende la biorrefinación como un concepto, instalaciones, procesos o conjuntos de industrias que debe ser sostenible, es decir, que tiene beneficios económicos, al medio ambiente y sociales a partir de la transformación de la biomasa en un espectro de múltiples productos energéticos y no energéticos comercializables, lo que implica que exista un mercado actual o futuro a un precio rentable. Los productos pueden ser desde ingredientes para alimentos de humano/ganado, productos químicos, materiales y bioenergía [11].

La IEA bioenergy también recomienda una clasificación para las biorrefinerías para orientar el material lignocelulósico de manera adecuada. La clasificación es en cuatro categorías que son: plataforma, productos, materia prima y procesos de conversión. Las Tablas 4 y 5, muestran la clasificación que propone esta organización, esta metodología permite tener un amplio panorama para



localizar la opción adecuada para proponer la biorrefinería que se requiere para procesar la biomasa lignocelulósica de origen agrícola [11].

Ahora que se puede aterrizar la idea de la biorrefinería gracias a este mapa, resulta necesario definir una ruta de conversión de la biomasa lignocelulósica, esta herramienta da beneficios y estos son:

a) Facilita el entendimiento del origen y la

fabricación de los diferentes tipos de bio productos comercializables.

b) Habilita a los usuarios para distinguir entre diferentes tipos de biorrefinerías.

c) Provee información más específica y reconocible sobre las diferentes partes interesada (inversionistas, fabricantes, socios).

d) Simplifica el estudio del estado presente y emergente de los sistemas de biorrefinería.

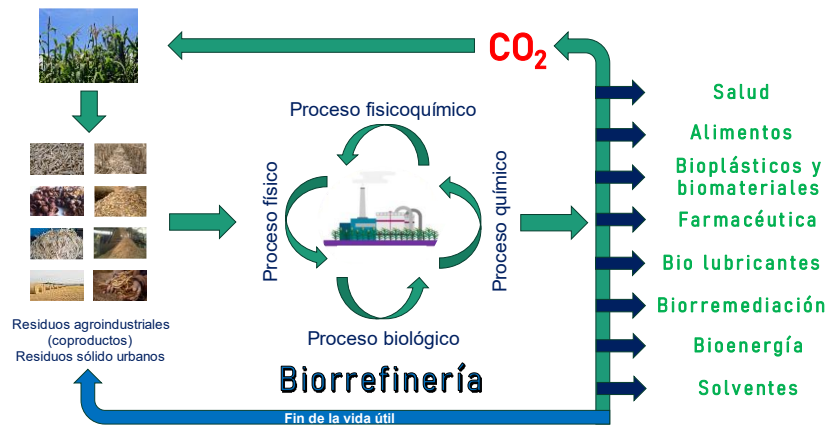


Figura 13. Esquema del concepto general de una biorrefinería a partir de residuos lignocelulósicos de sector agrícola.

Tabla 4. Clasificación de la biorrefinerías, materias primas y procesos de conversión [11].

Materias primas	Procesos de conversión	
<p>Biomasa primaria:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Biomasa acuática • Biomasa lignocelulósica de tierras de cultivo y pastizales • Biomasa lignocelulósica de madera / forestal • Cultivos de aceite • Cultivos de almidón • Cultivos de azúcares • Otras biomásas primarias <p>Biomasa secundaria:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Biomasa microbiana • Residuos de la agricultura • Residuos de biomasa acuática • Residuos forestales y la industria forestal • Residuos de la naturaleza y gestión del paisaje • Residuos del reciclado de productos base bio • Otros residuos orgánicos 	<p>Bioquímicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Conversión aeróbica • Digestión anaeróbica • Procesos enzimáticos • Fermentación • Bioconversión basada en insectos • Otras conversiones bioquímicas <p>Químicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Catalíticos • Esterificación • Hidrogenación • Hidrólisis • Metanización • Pulpeo químico • Reformado con vapor • Electrólisis del agua • Desplazamiento del gas de agua • Otras conversiones químicas 	<p>Mecánicos y termoquímicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mezclado • Extracción • Fraccionamiento y ruptura termoquímica y mecánica • Pulpeo mecánico • Procesos de separación • Otras conversiones mecánicas y termoquímicas <p>Termoquímicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Combustión • Gasificación • Licuefacción hidrotermal • Pirólisis • Conversión supercrítica • Carbonización y torrefacción • Otras conversiones termoquímicas

Tabla 5. Clasificación de la biorrefinerías, plataforma y productos [11].

Plataformas	Productos	
Biocarbón (residuos agrícolas) Biocarbón (residuos forestales) Biocrudo Biogas Bio-aceites Biohidrógeno Bio nafta Azúcares C5 / C6 Dióxido de carbono Lignina Aceites Fibras orgánicas Jugo orgánico Proteínas Líquido pirolítico Almidón Gas de síntesis Otras plataformas	Productos químicos: <ul style="list-style-type: none"> • Aditivos • Agroquímicos • Bloques de construcción • Catalizadores y enzimas • Colorantes • Cosméticos • Sabores y fragancias • Lubricantes • Nutracéuticos • Pinturas y revestimientos • Farmacéuticos • Solventes • Surfactantes • Otros productos químicos 	Materiales: <ul style="list-style-type: none"> • Compositos • Fibras • Fertilizantes orgánicos • Polímeros • Resinas • Otros productos materiales Alimento para humanos Alimento para animales Energía: <ul style="list-style-type: none"> • Agentes refrigerantes • Combustibles • Calor • Energía • Otros productos energéticos

Las principales rutas definidas por IEA bioenergy son 11 plataformas [11], estas son:

- i) Una plataforma (azúcares C6) de biorrefinería que utiliza cultivos de azúcares (caña de azúcar, remolacha, etc.).
- ii) Una plataforma (almidón) de biorrefinería que utiliza cultivos de almidón (maíz).
- iii) Una plataforma (aceite) de biorrefinería que utiliza cultivos de aceite, desperdicios y residuos de aceites.
- iv) Dos plataformas (pulpa y licor negro) de biorrefinería que utiliza maderas.
- v) Tres plataformas (azúcares C5, azúcares C6 y lignina) de biorrefinería que utiliza biomasa lignocelulósica.
- vi) Dos plataformas (fibras y jugo orgánicos) de biorrefinería que utiliza biomasa verde.
- vii) Dos plataformas (aceite y biogas) de biorrefinería que utiliza biomasa acuática.
- viii) Dos plataformas (fibras orgánicas y aceite)

de biorrefinería que utiliza fibras naturales.

ix) Una plataforma (gas de síntesis, syngas) de biorrefinería que utiliza biomasa lignocelulósica y residuos sólidos municipales.

x) Dos plataformas (líquido pirolítico y biocarbón) de biorrefinería que utiliza biomasa lignocelulósica.

xi) Una plataforma (biocrudo) de biorrefinería que utiliza biomasa lignocelulósica, biomasa acuática y residuos orgánicos.

Regresando al ejemplo del olote de maíz y conociendo sus rendimientos y composición, haciendo uso de la presente metodología se puede proponer cuatro plataformas que son: pulpa y licor negro, gas de síntesis, líquido pirolítico y biocarbón y azúcares C5, azúcares C6 y lignina. Orientando el ejemplo hacia los bioplásticos entonces las últimas tres plataformas son las apropiadas para alcanzar la fabricación de estos productos.



Aplicaciones

El desarrollo industrial, el uso y consumo continuo de productos plásticos han elevado el nivel de producción de los polímeros. Usualmente los encontramos en envases, construcciones, autos, muebles, por mencionar algunos, siendo producidos a partir de recursos no renovables como el petróleo, por lo que no se degradan fácilmente y permanecen en el medio ambiente por un largo periodo de tiempo. Ante esta situación se ha dado lugar a la creación de nuevos polímeros, obtenidos de recursos renovables, los cuales son conocidos como “biopolímeros o polímeros naturales”, ya que son biomoléculas poliméricas sintetizadas en su mayoría por los seres vivos. Las principales fuentes renovables para su producción comprenden numerosos grupos biológicos como: las algas, plantas, animales, bacterias y hongos [26].

La biomasa lignocelulósica se refiere a los materiales vegetales compuestos principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina. Esta biomasa es abundante y puede provenir de residuos agrícolas, forestales, o cultivos energéticos. Las principales aplicaciones de la biomasa lignocelulósica incluyen:

Producción de bioetanol de segunda generación

El bioetanol se obtiene a partir de la fermentación de azúcares presentes en la biomasa lignocelulósica. A diferencia del bioetanol de primera generación, que utiliza cultivos alimenticios como la caña de azúcar y

el maíz, el bioetanol de segunda generación se produce a partir de residuos no comestibles, lo que evita competir con la producción de alimentos y reduce el impacto ambiental.

Generación de bioenergía

La biomasa lignocelulósica puede ser utilizada como fuente de energía a través de procesos como la combustión directa, la gasificación, y el proceso de pirólisis. Estos procesos generan calor y electricidad, además de biocombustibles líquidos y gaseosos.

Producción de bioplásticos y materiales biodegradables

Los componentes de la biomasa lignocelulósica pueden ser transformados en productos químicos que sirven como precursores para bioplásticos y otros materiales biodegradables. Esto ofrece una alternativa sostenible a los plásticos derivados del petróleo.

Fabricación de productos químicos y bioquímicos

A través de los procesos de hidrólisis y fermentación, es posible obtener una amplia variedad de productos químicos, como ácidos orgánicos (ácido láctico, ácido acético), alcoholes (etanol, butanol) y otros productos de valor agregado como solventes, surfactantes, aromas, etc.

Uso en alimentación animal

La biomasa lignocelulósica puede ser tratada y utilizada como suplemento alimenticio para ganado. Aunque la lignina no es digerible, la

celulosa y la hemicelulosa pueden ser utilizadas como fuente de fibra.

Materiales de construcción y composites

Los residuos lignocelulósicos pueden ser utilizados en la fabricación de materiales de construcción como paneles de partículas, aislantes y composites reforzados. Estos materiales son cada vez más valorados por su sostenibilidad y bajo impacto ambiental.

Estas aplicaciones no solo aprovechan los residuos vegetales y otros recursos renovables, sino que también ayudan a reducir la dependencia de combustibles fósiles y a mitigar los problemas ambientales asociados con los residuos [26].

DISCUSIÓN

En esta estrategia se distinguen tres materiales candidatos que el sistema agrícola del estado de Puebla tiene como posibles materias primas que se pueden suministrar a un esquema de biorrefinería. Estos son: el bagazo de caña, el olote de maíz y la cereza de café, los cuales son considerados residuos que se generan durante la cosecha la caña de azúcar, el maíz de grano y el grano de café.

Después de identificar estas biomásas lignocelulósicas, el siguiente paso consistió en distinguir las principales regiones en el estado desde un punto de vista cuantitativo, utilizando información estadística de la productividad agrícola. Este análisis permitió proponer la localización de las instalaciones de biorrefinerías en las regiones norte, centro, sur

oriente y poniente del estado. Sin embargo, para poder definir de manera precisa los municipios óptimos para la ubicación de las biorrefinerías, se requiere de un estudio técnico y económico que permita evaluar la inversión necesaria, su impacto ambiental y social [27].

A pesar de que, el alcance de este trabajo es limitado debido a que no se abordan temas como el análisis profundo de la estructura de la biorrefinería. Se recomienda establecer las rutas adecuadas de pretratamiento para acondicionar estos materiales, además de los procesos biotecnológicos, químicos o fisicoquímicos para transformar las fracciones obtenidas en la etapa inicial, así como la posterior sección de purificación y empaque del producto fabricado [28]. También, es necesario integrar una metodología que permita evaluar la cadena de suministro y abasto de los materiales hacia la biorrefinería [21, 29], así como, el traslado hacia el mercado que se destine el producto [30, 31].

La selección de las plataformas de biorrefinería que permita procesar los residuos agroindustriales se debe realizar en función de la composición química del material, es decir, sus fracciones: celulosa, hemicelulosa, pectina y lignina. Además de considerar que el suministro no este limitado a un solo tipo de material sino un conjunto lo que permitirá que exista suministro suficiente e independiente de la temporada del año y el periodo de cosecha.

Por ejemplo, la región norte del estado puede proveer olote, rastrojo y la cereza de café, estos materiales son ricos en celulosa, hemicelulosa,

pectina, lignina y compuestos fenólicos. Las rutas que se pueden proponer: a) azúcares C5, azúcares C6 y lignina; b) gas de síntesis; c) líquido pirolítico y biocarbón y d) biocrudo. Aunque el alcance de este trabajo no considera un nivel de profundidad que permita realizar una toma de decisión sobre las opciones mencionadas anteriormente, da un panorama general de las propuestas tecnológicas disponibles.

CONCLUSIÓN

A pesar de los beneficios que se pueden alcanzar con lo planteado en este estudio, la valorización de residuos agrícolas enfrenta desafíos como la falta de infraestructura adecuada, conocimientos técnicos limitados y la necesidad de políticas públicas que apoyen estas iniciativas. Sin embargo, la creciente conciencia ambiental y las oportunidades de mercado para productos sostenibles están impulsando el desarrollo de proyectos de valorización en el estado.

A la luz de la evidencia presentada se puede concluir que la valorización de residuos agrícolas en Puebla no solo representa una oportunidad para reducir el impacto ambiental de la agricultura, sino que también ofrece beneficios económicos y sociales al aprovechar recursos que de otra manera serían considerados desechos.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de

interés en la colaboración del presente escrito. No se cuenta con fuente de financiamiento externa a la aportación de los autores.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHT) por su programa de Estancias Posdoctorales por México, bajo el marco en que se da este artículo, así como la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrados (VIEP) BUAP por su gestión y apoyo.

REFERENCIAS

- [1]. DO de la Unión Europea, editor. Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2009/140/L00016-00062.pdf> (Accessed on May 3 of 2024)
- [2]. Oviedo-Ocaña ER, Hernández-Gómez A, Dominguez I, Alexis Parra-Orobio B, Soto-Paz J, Sánchez A. Evaluation of Co-Composting as an Alternative for the Use of Agricultural Waste of Spring Onions, Chicken Manure and Bio-Waste Produced in Moorland Ecosystems. *Sustainability*. 2022; 14(14): 8720. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/14/8720>
- [3]. Álvarez Valencia LH, García Reyes RB, Ulloa Mercado RG, Arellano Gil M, García González A. Potencial biotecnológico para la valorización de residuos generados en granjas porcinas y cultivos de trigo. *Entreciencias*:

diálogos en la sociedad del conocimiento. 2019; 7(21): 1-21. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-80642019000300001

[4]. Biosolutions, natural fibers bioplastics. Available at: <https://www.biosolutions.mx/> (Accessed on May 5 of 2024)

[5]. Solep Tratamiento. Disponible en: <https://www.solep.com.mx/tratamiento.html> (Accessed on May 5 of 2024)

[6]. Utilizan residuos agroindustriales para elaborar productos. Disponible en: <https://www.buap.mx/node/35> (Accessed on October 9 of 2024)

[7]. Torres Berruecos MR, Arguelles Hernández E. Propuesta de tratamiento anaerobio de residuos sólidos orgánicos generados por la cámara de diputados, en la cd. de México. Coloquio Interdisciplinario de Posgrado UPAEP. 2016; 3(Mesas 2016): 1. Disponible en: <https://cipu.upaep.mx/index.php/cipu/article/view/680>

[8]. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Cierre de la producción agrícola. (2023) Disponible en: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EADTT%202022-2023.pdf> (Accessed on: May 9 of 2024)

[9]. Zoghi A, Vedadi S, Esfahani ZH, Gavlighi HA, Khosravi-Darani K. A review on pectin extraction methods using lignocellulosic wastes. *Biomass Convers Biorefin* 2021;13: 1-13. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s1339>

[9-021-02062-z](#)

[10]. Bidlack J, Malone M, Benson R. Molecular structure and component integration of secondary cell walls in plants. *Proc. Okla. Acad. Sci.* 1992; 72: 51-56. Disponible en: <https://metabolism.net/bidlack/research/publications/Cell%20Wall%20Diagram.pdf>

[11]. Global biorefinery status report 2022. IEA Bioenergy. Technology Collaboration Programme. Available at: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2022/09/IEA-Bioenergy-Task-42-Global-biorefinery-status-report-2022-220712.pdf> (Accessed on May 16 of 2024)

[12]. Juárez-Vidal O. Extracción de celulosa a partir de residuos lignocelulósicos para su potencial aplicación en la formulación de parches transdérmicos tipo matricial. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Zacatepec Morelos, México. 2023. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.22423.69288>

[13]. Córdoba JA, Salcedo E, Rodríguez R, Zamora JF, Manríquez R, Contreras H, *et al*. Caracterización y valoración química del olote: degradación hidrotérmica bajo condiciones subcríticas. *Revista Latinoamericana de Química.* 2013; 41(3): 171-184. Disponible en: <https://scielo.org.mx/pdf/rlq/v41n3/v41n3a4.pdf>

[14]. Mondragón-Sánchez A, Medina-Orozco LE, Sánchez-Duque A, Núñez-Oregel V. Efecto de la aplicación de biocarbón en el rendimiento de maíz en Michoacán, México.

Terra Latinoamericana. 2021; 39: 1-7.
Disponible en:
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792021000100138

[15]. Andrade MF, Colodette JL. Dissolving pulp production from sugar cane bagasse. *Ind Crops Prod.* 2014; 52: 58-64. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669013005554>

[16]. Stanmore BR. Generation of energy from sugarcane bagasse by thermal treatment. *Waste Biomass Valorization.* 2010; 1: 77-89. Disponible en:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-009-9000-3>

[17]. Ajala EO, Ighalo JO, Ajala MA, Adeniyi AG, Ayanshola AM. Sugarcane bagasse: a biomass sufficiently applied for improving global energy, environment and economic sustainability. *Bioresour Bioprocess.* 2021; 8: 1-25. Disponible en:
<https://bioresourcesbioprocessing.springeropen.com/articles/10.1186/s40643-021-00440-z>

[18]. Serna-Jiménez JA, Torres-Valenzuela LS, Martínez-Cortínez K, Hernández-Sandoval MC. Aprovechamiento de la pulpa de café como alternativa de valorización de subproductos. *Revista Ion.* 2018; 31(1): 37-42. Disponible en:
http://scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-100X2018000100037

[19]. Noriega Salazar A, Silva Acuña R, García de Salcedo M. Composición química de la pulpa de café a diferentes tiempos de ensilaje para su uso potencial en la alimentación animal.

Zootec. Tropic. 2009; 27(2): 135-141. Disponible en:
<https://ve.scielo.org/pdf/zt/v27n2/art04.pdf>

[20]. Fierro-Cabrales N, Contreras-Oliva A, González-Ríos O, Rosas-Mendoza ES, Morales-Ramos V. Caracterización química y nutrimental de la pulpa de café (*Coffea arabica* L.). *Agro Productividad.* 2018; 11(4): 9-13. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/326246134_CHARACTERIZACION_QUIMICA_Y_NUTRIMENTAL_DE_LA_PULPA_DE_CAFE_Coffea_arabica_L

[21]. Matindi RK, Masoud M, Hobson P, Kent G, Liu SQ. Harvesting and transport operations to optimise biomass supply chain and industrial biorefinery processes. *Int. J. Ind. Eng. Comput.* 2018, 9(3): 265-288. Disponible en:
https://www.growingscience.com/ijiec/Vol9/IJIEC_2017_31.pdf

[22]. Zhang H, Xu Y, Yu S. Co-production of functional xylooligosaccharides and fermentable sugars from corncob with effective acetic acid prehydrolysis. *Bioresour. Technol.* 2017; 234: 343-349. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852417302237>

[23]. Zhang X, Yuan Q, Cheng G. Deconstruction of corncob by steam explosion pretreatment: correlations between sugar conversion and recalcitrant structures. *Carbohydr. Polym.* 2017;156: 351-356. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0144861716310980>

- [24]. Zheng A, Zhao Z, Chang S, Huang Z, Wang X, He F, *et al*. Effect of torrefaction on structure and fast pyrolysis behavior of corncobs. *Bioresour. Technol.* 2013; 128: 370-377. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852412015696>
- [25]. Zheng A, Zhao Z, Chang S, Huang Z, Zhao K, Wei G, *et al*. Comparison of the effect of wet and dry torrefaction on chemical structure and pyrolysis behavior of corncobs. *Bioresour. Technol.* 2015; 176: 15-22. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852414015892>
- [26]. Rodríguez D, López V, Alpizar AG, Calixto ME. Biopolímeros: de principio a fin. In: ECORFAN-México, Eds. Handbook T-IX CIERMMI Mujeres En La Ciencia Biología; 2020; 107–129. Disponible en: https://www.ecorfan.org/handbooks/Handbooks_Mujeres_en_la_Ciencia_TIX/Handbooks_Mujeres_en_la_Ciencia_TIX_9.pdf
- [27]. Singhvi MS, Gokhale DV. Lignocellulosic biomass: hurdles and challenges in its valorization. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2019, 103(23): 9305-9320. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00253-019-10212-7>
- [28]. Ashokkumar V, Venkatkarthick R, Jayashree S, Chuetor S, Dharmaraj S, Kumar G. *et al*. Recent advances in lignocellulosic biomass for biofuels and value-added bioproducts - A critical review. *Bioresour. Technol.* 2022, 344, 126195. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852421015376>
- [29]. Serrano A, Faulin J, Astiz P, Sánchez M, Belloso J. Locating and designing a biorefinery supply chain under uncertainty in Navarre: a stochastic facility location problem case. *Transp. Res. Proc.* 2015, 10: 704-713. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146515002112>
- [30]. Zhang Y, Wright MM. Product selection and supply chain optimization for fast pyrolysis and biorefinery system. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2014, 53(51): 19987-19999. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie503487d>
- [31]. Ulonska K, König A, Klatt M, Mitsos A, Viell J. Optimization of multiproduct biorefinery processes under consideration of biomass supply chain management and market developments. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2018, 57(20): 6980-6991. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.iecr.8b00245>