

Extracción de prebióticos mediante el procesamiento hidrotérmico de residuos agroindustriales

Extraction of prebiotics through hydrothermal processing of
agro-industrial waste

Jorge R. Carrales-Briones¹ , Rosa M. Rodríguez-Jasso^{1*} , Héctor A. Ruiz^{1*} 

¹ Biorefinery Group, Food Research Department, School of Chemistry, Universidad Autónoma de Coahuila. Saltillo, Coahuila, México. Saltillo, Coahuila, 25280.

*Correspondencia: Correo electrónico: rrodriguezjasso@uadec.edu.mx (Rosa M. Rodríguez-Jasso);

hector_ruiz_leza@uadec.edu.mx (Héctor A. Ruiz)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v20i1.2211>

Recibido: 23 de enero de 2026; Aceptado: 19 de junio de 2026

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editor de Sección: Dr. Johan Mendoza-Chacón

Resumen

Los residuos agroindustriales comprenden una amplia variedad de materiales; entre ellos, la biomasa lignocelulósica (BLC) ha recibido especial atención como materia prima para la producción de prebióticos. Su compleja estructura permite desarrollar estrategias sustentables orientadas a la ruptura de la pared celular, lo que favorece la biodisponibilidad de compuestos de interés para su aplicación en los sectores alimentario, químico, cosmetológico, farmacéutico y energético. Los prebióticos, al ser fibras no digeribles y oligosacáridos, viajan directamente al colon (que contiene una densidad bacteriana mayor que en el intestino delgado), para mediante un proceso de fermentación interno producir ácidos grasos de cadena corta (AGCC) que ofrecen beneficios saludables al sistema digestivo. Este trabajo revisa los avances reportados en literatura sobre la extracción y aplicación de prebióticos específicamente los xilooligosacáridos (XOS) a partir de residuos agroindustriales, con énfasis en el procesamiento hidrotérmico (altas presiones) como tecnología sostenible para la producción de estos, y las ventajas y desventajas que ofrece contra otras tecnologías de extracción reportadas en investigaciones (ejemplo: hidrólisis enzimática, ácida y alcalina, y procesos de fermentación). Asimismo, se realzan las propiedades funcionales que los prebióticos ofrecen, como su actividad prebiótica, antioxidante, antiinflamatoria y potencial anticancerígeno. La revisión y análisis de este trabajo identifica que la integración de tecnologías sustentables para el fraccionamiento de BLC puede mejorar la viabilidad y factibilidad en la implementación industrial y promover de una manera eficiente los beneficios en el consumo humano e impacto ambiental.

Palabras clave: biomasa lignocelulósica, autohidrólisis, ingredientes funcionales, microbiota intestinal, probióticos.

Abstract

Agroindustrial waste comprises a wide variety of materials; among them, lignocellulosic biomass (LCB) has received special attention as a raw material for prebiotic production. Its complex structure allows for the development of sustainable strategies aimed at disrupting the cell wall, which enhances the bioavailability of compounds of interest for application in food, chemical, cosmetic, and pharmaceutical sectors. Prebiotics, being indigestible fibers and oligosaccharides, travel directly to the colon (which contains a higher bacterial density than the small intestine) to produce short-chain fatty acids (SCFAs) through an internal fermentation process, which offers health benefits to the digestive system. This paper reviews the advances reported in the literature on the extraction and application of prebiotics specifically xylooligosaccharides (XOS) from agroindustrial waste, with an emphasis on hydrothermal processing (high pressure) as a sustainable technology for their production, and the advantages and disadvantages it offers compared to other extraction technologies reported in research (e.g., enzymatic, acid, and alkaline hydrolysis, and fermentation processes). It also highlights the functional properties offered by prebiotics, such as their prebiotic, antioxidant, anti-inflammatory, and potential anti-carcinogenic activity. The review and analysis in this work identifies that the integration of sustainable technologies for the fractionation of LCB can improve the viability and feasibility of industrial implementation and efficiently promote the benefits for human consumption and environmental impact.

Keywords: lignocellulosic biomass, autohydrolysis, functional ingredients, gut microbiota, probiotics.

1. Introducción

Problemas intestinales, malnutrición, obesidad y diabetes, son algunas de las enfermedades comunes que enfrenta la sociedad en relación de una alimentación desequilibrada en nutrientes. Una fuente alternativa para minimizar estos problemas y mejorar la absorción de nutrientes, es el consumo de prebióticos como complemento en la dieta humana y animal. Los prebióticos son considerados ingredientes funcionales que suelen ser carbohidratos no digeribles, como fibras dietéticas u oligosacáridos como los xilooligosacáridos (XOS), fructooligosacáridos (FOS), galactooligosacáridos (GOS), isomalto-oligosacáridos (IMO) y oligosacáridos pectídicos (POS), de biopolímeros como la inulina, y derivados de polisacáridos, como las pectinas y fructanos, entre otros, que se encuentran presentes de forma natural en distintas fuentes vegetales, como almendras, alcachofa, cebada, semillas de chía, avena, frutas, verduras, frijoles, cereales, espárragos, cebolla, ajo crudo, por mencionar algunos, o en forma de suplementos alimenticios de venta en el mercado (Shie-Lih et al., 2020; Kaur et al., 2021; Belmonte-Izquierdo et al., 2023). El concepto “prebiótico” fue utilizado por primera vez en el año 1995, por Glenn Gibson y Marcel Roberfroid, definiéndolo como un ingrediente alimentario no digerible que estimula selectivamente la proliferación de una o más bacterias benéficas en el colon, generando beneficios que mejoran sustancialmente la salud del huésped (Kaur et al., 2021; Essa et al., 2023). Además, como un efecto secundario, se suprime la proliferación de patógenos (Nogueira-Prieto et al., 2025). Al consumirse, los prebióticos no logran digerirse por las enzimas presentes en la boca (amilasa salival y lipasa lingual), ni por la lipasa

gástrica ni la pepsina, presentes en el estómago, y por el corto tiempo que estos permanecen en el estómago no son degradados por el ácido clorhídrico, siendo estos estables al pH estomacal (McQuilken, 2021). Los prebióticos viajan hasta llegar directamente al colon y alimentan selectivamente a los probióticos. Los probióticos son microorganismos vivos que habitan en mayor magnitud en el colon que en el intestino delgado, estos son beneficiosos para la salud intestinal; modulan y equilibran el sistema digestivo (Ahn et al., 2023). Existen especies probióticas como *Lactobacillus* y *Bifidobacterium* que transforman a los prebióticos por medio de una fermentación anaerobia (Xiao et al., 2021), para obtener energía para el crecimiento microbiano y para la producción de ácidos grasos de cadena corta (AGCC), como el ácido acético, propiónico y butírico (comúnmente se encuentran en su forma ionizada como sales acetato, propionato y butirato) (Kushkevych et al., 2021). Los AGCC, son absorbidos por las vellosidades del colon para ser transportados por medio del flujo sanguíneo (Abreu y Abreu et al., 2021).

Las bacterias presentes en la microbiota intestinal, de la piel y mucosas aprovechan los prebióticos como una fuente de nutrientes para crecer y mantener un equilibrio en la microbioma humano y animal. En estudios humanos, el consumo de XOS está relacionado con base en su peso corporal. Una dosis de 0.12 g/kg de peso corporal en adultos, mejora la absorción de calcio y magnesio, reduciendo el riesgo de desarrollar cáncer, enfermedades cardiovasculares y aumenta la densidad ósea (Yan et al., 2022). Por otra parte, en estudios clínicos sobre el envejecimiento prematuro de la salud de la piel, con la intervención de jugos con XOS mejoraron los niveles promedio de luminosidad, hidratación, elasticidad, pigmentación, protección UV y manchas marrones de la piel (Huang et al., 2022). Se han realizado ensayos con la suplementación de inulina para mejorar el metabolismo de la glucosa y reducir el riesgo de desarrollar diabetes tipo 2 (DT2), con una alimentación controlada de 10 g de inulina por día durante 6 semanas se comprobó un aumento en las *Bifidobacterias* intestinales (Mitchell et al., 2021). También, se han incluido estudios con la suplementación dietética de lactulosa (azúcar sintético derivado de la lactosa), donde en dosis bajas de 0.26 g/ kg de peso corporal en adultos ha mostrado un efecto prebiótico con la proliferación de bacterias intestinales beneficiosas (ejemplo: *Bifidobacterium* y *Lactobacillus*), aumentando la producción de AGCC, abundando principalmente el acetato (Karakan et al., 2021). La autoridad europea de seguridad alimentaria reconoce la lactulosa en dosis de 10 g/día como complemento alimentario. Por otro lado, en estudios con animales, se han administrado XOS para pollos de engorde, suplementando 2.5 g de XOS/ kg del peso, mejorando la actividad de la hormona tiroidea y el recuento total de animales viables en el íleon (última sección del intestino delgado de las aves) y el ciego (colon), mejorando así el índice de conversión alimenticia (Akter y Akter, 2021). En estudios similares con gallinas ponedoras, se suplementaron XOS (derivados de hojas de maíz) e inulina, donde las gallinas mejoraron su salud intestinal con el crecimiento de *Bifidobacterium* y el crecimiento de ácido butírico en el ciego de estas (Huang et al., 2022). También, se han realizado estudios en peces Carpa (*Cyprinus carpio*), donde la suplementación de XOS entre 1 y 3 % en peso, ha mejorado el crecimiento, las enzimas digestivas y un efecto antioxidante (Abasubong et al., 2022).

La presencia natural de los prebióticos en fuentes naturales limita su uso industrial debido a sus bajas concentraciones, lo que implica efectos prebióticos reducidos (Valladares-Diestra et al., 2023). Una de las alternativas estudiadas es el uso de BLC, que al ser procesadas bajo los conceptos de una biorrefinería de segunda generación (plataforma tecnológica que procesa y transforma los residuos de origen vegetal en productos de interés industrial) y bajo un esquema de bioeconomía circular, permiten aprovecharse al máximo produciendo oligosacáridos no digeribles de bajo peso molecular, como se puede mostrar en la Fig. 1, con grados de despolimerización de 2 a 7, que en literatura

muestran beneficios a la salud intestinal (Chen et al., 2021; Sri et al., 2021; Chikezie y Nnaemeka, 2023; Shiva et al., 2023; Valladares-Diestra et al., 2023). Este trabajo de revisión tiene como objetivo mostrar el potencial del aprovechamiento de BLC para producir prebióticos y más específicamente los XOS, así como revisar métodos de extracción sustentables a fin de maximizar el rendimiento de los prebióticos producidos.

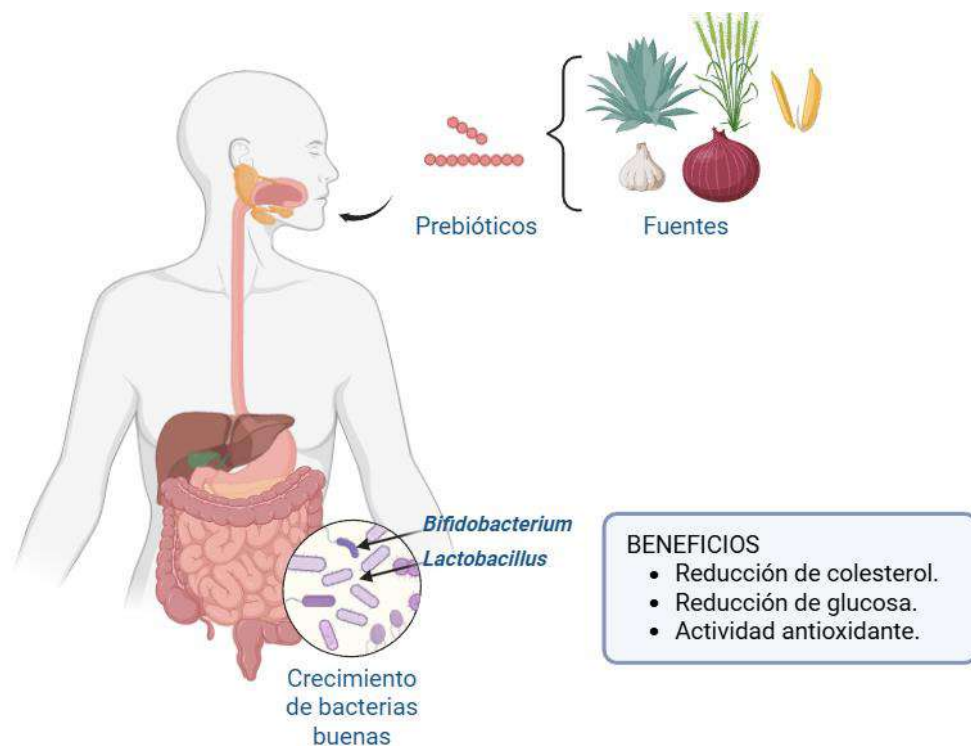


Figura 1. Efectos del consumo de prebióticos en la microbiota intestinal, modificado y adaptado de (Valladares-Diestra et al., 2023).

Figure 1. Effects of prebiotic consumption on the intestinal microbiota, adapted and modified from (Valladares-Diestra et al., 2023).

2. Potencial de la biomasa lignocelulósica como fuente de prebióticos

Todos aquellos residuos que quedan en la postcosecha, como tallos, bagazos, hojas, y cáscaras son considerados BLC (Singh et al., 2021). La BLC es aquella que contiene en su composición química biopolímeros de celulosa, hemicelulosa y lignina principalmente (Segers et al., 2024). Dentro de estas biomásas se pueden encontrar, por ejemplo: el bagazo de caña de azúcar de la industria de la refinación de azúcar; el orujo de uva después del proceso de producción del vino y la cascarilla de arroz después de la separación grano del arroz, por mencionar algunos (López-Astorga et al., 2023; Ungureanu et al., 2023; Gargiulo et al., 2024). También, se considera como BLC, a los residuos forestales y a residuos sólidos orgánicos de plantas de reciclaje de papel y madera (Mujtaba et al., 2023). La mayoría de estos residuos son incinerados en el campo de cultivo como método de limpieza para una nueva siembra, lo cual genera gases nocivos y de efecto invernadero como el CO, CO₂, SO₂,

óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles que contaminan la atmósfera y afecta la calidad del aire (Yoro y Daramola, 2020; Pinakana et al., 2024; Zhao et al., 2024). La acumulación mundial de residuos agroindustriales, según estadísticas recientes, demuestran que la producción anual mundial de BLC es de aproximadamente 181.5 mil millones de toneladas, de las cuales solo 8.2 mil millones de toneladas se utilizan en distintas áreas de aplicación (Mujtaba et al., 2023). Además, la disposición de los residuos vegetales que se aglomeran en campos de cultivo y/o almacenes, también son llevados a rellenos sanitarios, generando lixiviados tóxicos que contaminan la tierra y mantos acuíferos (Dávila et al., 2021).

Asimismo, se han implementado estrategias para aprovechar estas biomásas, convirtiéndolas en materias primas para nuevas cadenas de valor en la industria, como; **1) Industria energética:** producción de biogás por digestión anaerobia, producción de bioetanol, producción de biodiésel y obtención de biochar (Pauline y Joseph, 2020; Beluhan et al., 2023; Garg et al., 2023; Singh et al., 2023); **2) Industria agrícola:** compostaje, producción de fertilizantes líquidos, uso de biochar en suelos (Tan et al., 2023; Zhao et al., 2024; Lamba et al., 2025); **3) Industria cosmética y farmacéutica:** extracción de compuestos fenólicos y antioxidantes para cremas y suplementos, producción de biosurfactantes para la elaboración de jabón, shampoos y producción de ácido láctico (Espro et al., 2021; Manandhar y Shah, 2023; Vučurović et al., 2024; Ariyanta et al., 2025; Pereira et al., 2025); **4) Industria de materiales y construcción:** fabricación de bioempaques, producción de papel y cartón reciclado, aditivos para cemento y ladrillos, y fabricación de textiles (Sabino et al., 2022; Beia et al., 2023; Regmi et al., 2024; Dias et al., 2025); **5) Industria ambiental:** producción de bioadsorbentes a partir de cascara y bagazos para el tratamiento de aguas residuales (Lemessa et al., 2023; de Aquino Lima et al., 2024); y **6) Industria ganadera y alimentaria:** piensos para animales, sustratos para cultivo de hongos comestibles, extracción de compuestos fenólicos y antioxidantes, obtención de colorantes naturales y extractos aromáticos, y la producción de prebióticos como los XOS y GOS a partir de la fracción de hemicelulosa (Álvarez et al., 2022; Balan et al., 2022; Huang et al., 2022; Yan et al., 2022).

3. Procesamiento hidrotérmico como estrategia para la extracción de prebióticos derivados de biomásas lignocelulósicas

Un reto importante en la producción de prebióticos a partir de BLC es la selección del método de extracción, que no solo debe promover la ruptura de la pared celular, sino también maximizar la selectividad hacia la formación de oligómeros, evitando su degradación en compuestos indeseables (ejemplos de subproductos inhibidores indeseables: furfural e hidroximetilfurfural (HMF)) (Shie-Lih et al., 2020; Shiva et al., 2023; Yan et al., 2022). Los métodos de extracción pueden clasificarse en:

- A. Procesos fisicoquímicos: Procesamiento hidrotérmico (también llamado autohidrólisis), que utiliza agua como solvente; además otra alternativa del proceso hidrotérmico es el proceso de explosión a vapor, donde se usa vapor sobresaturado, ambos procesos a alta presión y temperatura, por otro lado, un proceso que puede mejorar las velocidades de reacción es usando CO₂, sometiendo BLC a altas presiones para la ruptura de la pared celular.
- B. Procesos químicos: Hidrólisis ácida, con ácidos sulfúrico, nítrico o fosfórico; hidrólisis alcalina, que utiliza hidróxido de sodio o potasio comúnmente (principalmente usando concentraciones bajas) y uso de organosolv (usando solventes como etanol).

- C. Procesos biológicos: Hidrólisis enzimática, con el uso de enzimas específicas; microorganismos como los hongos, capaces de hidrolizar las BLC y el uso de levaduras que logran por medio de fermentaciones, la biodisponibilidad de los prebióticos.

Sin embargo, difieren significativamente en términos de eficiencia, sostenibilidad y viabilidad industrial. Por ejemplo, los procesos químicos, como la hidrólisis ácida, permiten altos rendimientos de solubilización y despolimerización de la hemicelulosa, pero presentan limitaciones asociadas a la corrosividad, a la generación de subproductos inhibidores (furfural, HMF) y a los altos costos de neutralización, lo que compromete su sostenibilidad. En contraste, los tratamientos alcalinos son eficaces para la remoción y solubilización de lignina, pero pueden provocar la degradación de carbohidratos y generar residuos químicos. Por otro lado, los procesos biológicos, como la hidrólisis enzimática, ofrecen alta selectividad y condiciones de operación suaves, pero su aplicación a escala industrial se ve limitada por el elevado costo de las enzimas, los tiempos de reacción prolongados y la sensibilidad a las condiciones del medio.

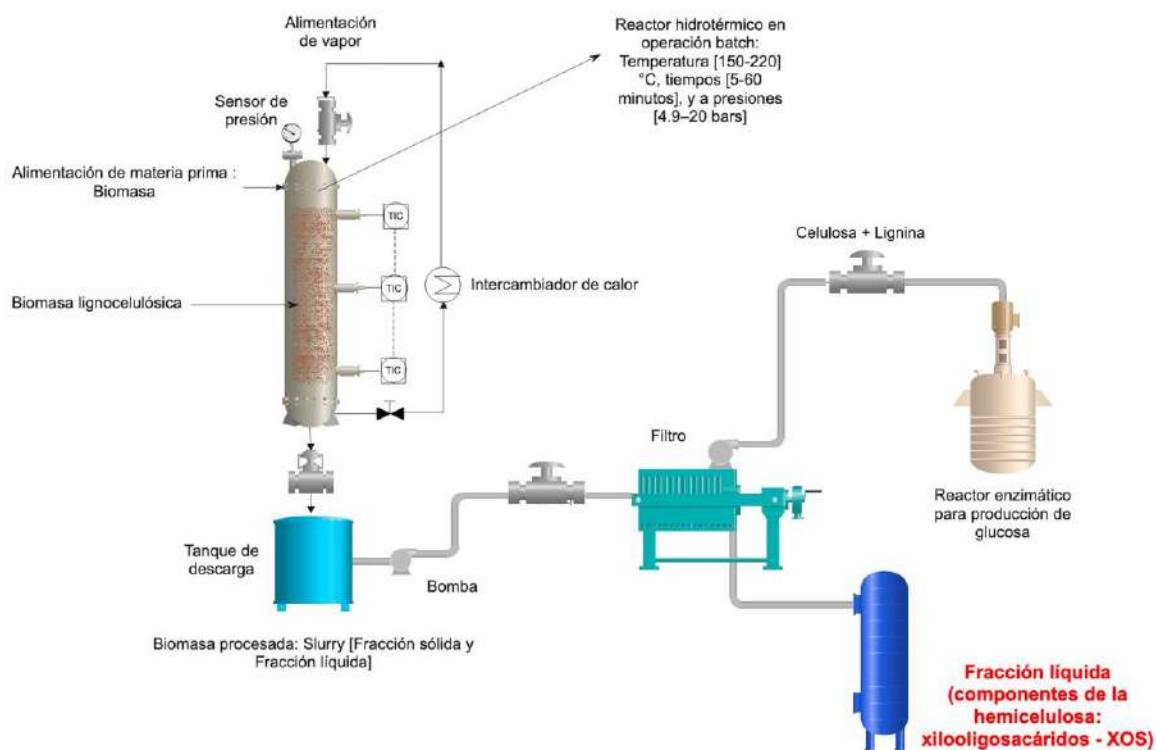


Figura 2. Esquema del proceso y fraccionamiento de biomasa lignocelulósica mediante el proceso hidrotérmico en términos de una biorrefinería de segunda generación.

Figure 2. Scheme of the lignocellulosic biomass process and fractionation by the hydrothermal process in terms of a second generation biorefinery.

En este contexto, los métodos fisicoquímicos, en particular el procesamiento hidrotérmico, han emergido como una alternativa atractiva por su equilibrio entre eficiencia y sostenibilidad. Este proceso utiliza únicamente agua/vapor como solvente, lo que reduce el uso de químicos y puede

minimizar el impacto ambiental. Además, durante este proceso, se genera la autoionización de las moléculas del agua y la hidrólisis de los grupos acetil de la hemicelulosa, provocando una disminución del pH que permite una solubilización y despolimerización selectiva de la hemicelulosa, lo que favorece la producción de XOS, aunque a condiciones severas pueden inducir su degradación a monosacáridos y a compuestos inhibidores (Corrales et al., 2023; Shiva et al., 2023). Este proceso hidrotérmico es realizado a condiciones de operación entre 150-220 °C, con tiempos desde los 5-60 minutos, además de condiciones no isotérmicas, y a presiones entre (~ 4.9–20 bares), las relaciones biomasa -agua pueden variar dependiendo de las condiciones de operación y productos deseados, sin embargo, las más típicas con una relación 1:10 o 1:20 (biomasa: agua), peso/peso. La Fig. 2, muestra un esquema del proceso y fraccionamiento de biomasa mediante el proceso hidrotérmico en términos de una biorrefinería.

Por otro lado, es importante mencionar, que principalmente los procesos hidrotérmicos son usados en modo de operación por lotes, por otro lado, a nivel piloto y demostrativo ya se encuentran reactores en modo de operación en continuo. Estos modos de operación a diferentes escalas, lo hace un proceso robusto con niveles de madurez tecnológica desde 4-5 o superiores. Actualmente, existen a nivel mundial plantas piloto y a nivel industrial procesos hidrotérmicos para el fraccionamiento de hemicelulosa. Un ejemplo es la compañía Meliora Bio, la cual es una biorrefinería moderna de última generación, en la cual se recicla la paja trigo para obtener prebióticos, bioetanol y lignina. Meliora Bio busca minimizar su huella de carbono, con un consumo mínimo de energía y agua, y reducir a cero sus residuos de producción. El proceso de fraccionamiento de biomasa usa la tecnología de BioTrac de Valmet es una tecnología clave en esta biorrefinería de paja de trigo y está basada en procesamiento hidrotérmico - explosión de vapor (steam explosion) en modo de operación en continuo. Meliora Bio en colaboración con la compañía COMET BIO produce una fibra prebiótica de la fracción de la hemicelulosa para el sector alimentario (Ruiz et al., 2020; Comet Bio, 2026; Meliora Bio, 2026; Valmet, 2026).

Desde una perspectiva de escalamiento de procesos, el proceso hidrotérmico presenta ventajas importantes, como la simplicidad operativa y la posibilidad de integrarse en esquemas de biorrefinería de segunda generación; sin embargo, su eficiencia depende en gran medida del control de parámetros como la temperatura, el tiempo de residencia, los cuales están relacionados con un parámetro denominado factor de severidad $\text{Log}_{10}(\text{Ro})$, que combina el efecto de la temperatura y el tiempo de residencia en el proceso, permitiendo correlacionar diferentes condiciones y biomasa (Ruiz et al., 2021; Lobato-Rodríguez et al., 2025). En este sentido, valores óptimos de severidad permiten maximizar la producción de XOS, manteniendo un equilibrio entre la despolimerización de la hemicelulosa y la preservación de estructuras oligoméricas.

Los datos presentados en la Tabla 1 evidencian una amplia variabilidad en los rendimientos de XOS (3.70 a 27.86 g/100 g de biomasa), la cual está fuertemente influida por la naturaleza de la biomasa y por el método de extracción empleado, así como por las condiciones de operación. En general, los tratamientos químicos, particularmente la hidrólisis ácida, tienden a presentar mayores rendimientos; sin embargo, estos procesos carecen de selectividad y favorecen la formación de monosacáridos y de productos de degradación.

En contraste, los procesos hidrotérmicos presentan rendimientos moderados, pero una mayor selectividad hacia la formación de oligómeros, lo cual resulta deseable para aplicaciones prebióticas. Esta diferencia resalta la importancia de no solo maximizar el rendimiento, sino también de controlar la distribución de productos.

Tabla 1. Tipos de prebióticos generados a partir de biomásas lignocelulósicas y el método de extracción utilizado.

Table 1. Types of prebiotics generated from lignocellulosic biomass and the extraction method used.

Cultivo	Residuo agroindustrial generado	Método de extracción	Prebiótico extraído	Rendimiento de XOS (g XOS/ 100 g biomasa)	Referencias
Álamo tulipán	Tallo de Álamo	Autohidrólisis (200 °C).	XOS	9.81	(Yoon et al., 2018)
Trigo	Paja de trigo	Autohidrólisis (215 °C, no isotérmico).	XOS	10.50	(Conrad y Smirnova, 2020)
Plátano	Cáscara de plátano	Hidrólisis enzimática (<i>Aspergillus versicolor</i> , 30 UI/g del sustrato durante 12 a 48 h), solubilizada con KOH. 1 UI = la cantidad de enzima que cataliza la transformación de 1 micromol (1 µmol) de sustrato por minuto.	XOS	15.01	(Pereira et al., 2022)
Guayaba	Bagazo de guayaba	Hidrólisis enzimática (<i>Aspergillus versicolor</i> , 30 UI/g del sustrato durante 12 a 48 h), solubilizada con H ₂ O.	XOS	6.61	(Pereira et al., 2022)
Maíz	Mazorca de maíz	Hidrólisis ácida oxidativa (Peróxido de hidrógeno-ácido acético).	XOS	5.83	(Hao et al., 2022)
Maíz	Mazorca de maíz	Hidrólisis alcalina (1 % NaOH, 120 °C, 40 min).	XOS	5.90	(Capetti et al., 2023)
Maíz	Mazorca de maíz	Autohidrólisis e Hidrólisis enzimática secuencial (160 °C por 60 min, y Endoxilanas GH10 y GH11).	XOS	11.50	(Capetti et al., 2023)
Maíz	Mazorca de maíz	Hidrólisis ácida (0.6 M de ácido glucónico, 154 °C durante 47 min).	XOS	18.00	(Han et al., 2020)
Álamo	Madera de álamo	Hidrólisis ácida (Clorito de sodio (4.8 % de NaClO ₂ , 70 °C por 3h) y ácido acético (5 %, 170 °C por 30 min).	XOS	4.00	(Wen et al., 2020)
Caña de azúcar	Bagazo de caña de azúcar	Autohidrólisis (190 °C por 20 min).	XOS	3.70	(de Oliveira et al., 2021)

Caña de azúcar	Bagazo de caña de azúcar	Autohidrólisis (143 – 186 °C, 20 – 60 min).	XOS	24.46	(Pereira et al., 2025)
Caña de azúcar	Bagazo de caña de azúcar	Hidrólisis alcalina (acetato de 1-etil-3-metilimidazolio líquido iónico, a 100 °C durante 30 min). Base de cálculo: 1L	XOS	10.23	(Ávila et al., 2020)
Bambú	Cáscara de bambú	Procesamiento hidrotérmico (170 °C por 50 min).	XOS	6.60	(Wang et al., 2022)
Ajo	Residuos de ajo (cáscara, gajo aplastado)	Hidrólisis hidrotérmica a 80 °C por 45 min.	Inulina	8.17	(Lara-Fiallos et al., 2021)
Alcachofa	Raíz de alcachofa	Hidrólisis hidrotérmica (agua a 80 °C, 2 h y ultrasonido a 80 °C, 70 % amplitud por 5 min).	Inulina	20.90	(Castellino et al., 2020)
Yuca	Cáscara de yuca	Hidrólisis enzimática (3 % endo-1-4- β -xilanasas, 48 h), antes pretratada con 2 % NaOH, 121 °C y 30 min	XOS	3.27	(Rogoski et al., 2024)
Piña	Cáscara de piña	Extracción alcalina asistida hidrotermalmente (10 % álcali durante 1.5 h; 121 °C y 15 psi) e hidrólisis enzimática (<i>Trichoderma viride</i>).	XOS	27.86	(Banerjee et al., 2019)
Naranja	Bagazo de naranja	Hidrólisis enzimática (<i>Aspergillus versicolor</i> , 30 UI/g del sustrato durante 12 a 48 h), solubilizada con KOH.	XOS	12.54	(Pereira et al., 2022)
Aguacate	Cáscara de aguacate	Pretratamiento hidrotérmico 150 °C, $\text{Log}_{10}(\text{Ro}) = 1.90$.	POS	14.30	(Del Castillo-Llamosas et al., 2021)

XOS = xilooligosacáridos.

POS = oligosacáridos pectídicos.

$\text{Log}_{10}(\text{Ro})$ = factor de severidad

4. Aplicaciones de prebióticos derivados de biomasa lignocelulósica en sistemas alimentarios

En la Fig. 3 se presentan diversas aplicaciones de los prebióticos como ingredientes funcionales; sin embargo, su implementación práctica depende no solo de su estabilidad fisicoquímica (pH, temperatura, solubilidad y digestibilidad) (Ferreira-Lazarte et al., 2021; Corrales et al., 2023), sino también de su funcionalidad biológica (actividad antioxidante, antiinflamatoria y prebiótica) y su comportamiento en matrices alimentarias específicas (de Freitas et al., 2019; Capetti et al., 2021; Álvarez et al., 2022; Yan et al., 2022).

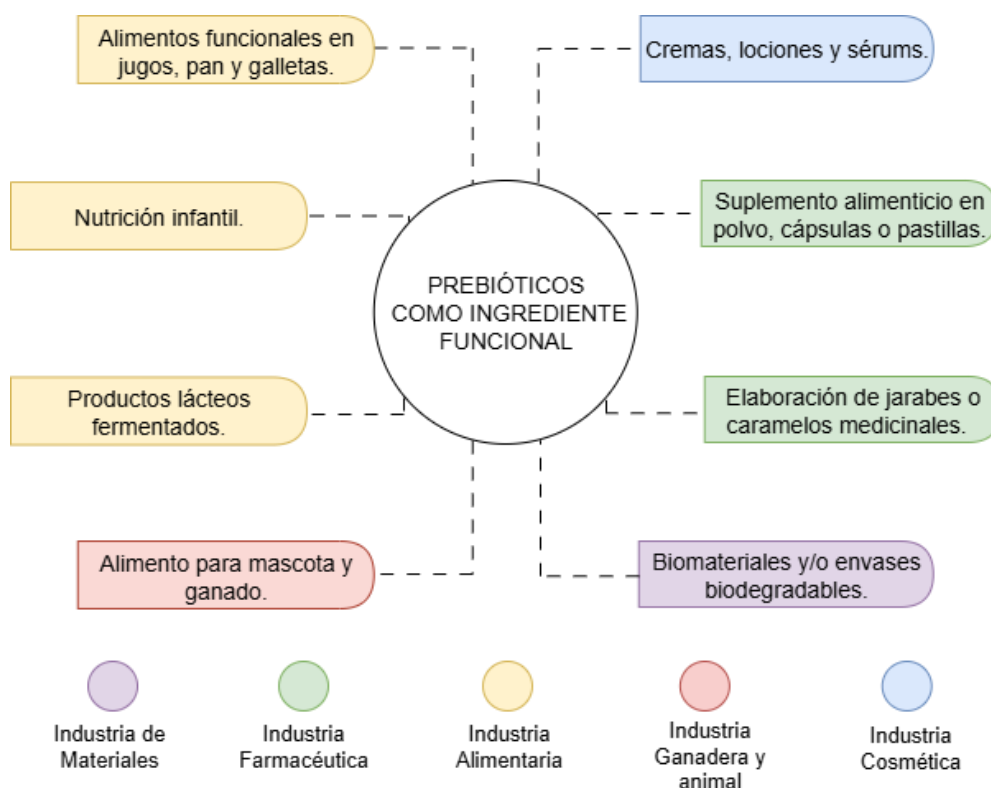


Figura 3. Aplicaciones de los prebióticos como ingrediente y/o excipiente funcional, información adaptada de (Capetti et al., 2021; Chelliah et al., 2024).

Figure 3. Applications of prebiotics as an ingredient and/or functional excipient, information adapted from (Capetti et al., 2021; Chelliah et al., 2024).

En el ámbito alimentario, los prebióticos, como los XOS, se han incorporado a productos como pan, galletas y bebidas, donde actúan como fibras solubles con efectos tecnológicos y fisiológicos. Estudios en galletas han demostrado que su consumo en concentraciones de 1-4 g/día promueve el

crecimiento selectivo de bacterias benéficas como *Bifidobacterium* y *Lactobacillus*, favoreciendo la producción de AGCC, los cuales están asociados con la salud intestinal y la regulación metabólica (Juhász et al., 2020). Desde una perspectiva industrial, la aplicación de prebióticos requiere considerar factores como la dosis efectiva, la estabilidad durante el procesamiento (temperatura, pH), la interacción con otros componentes de la matriz y el impacto sensorial. Por ejemplo, en productos horneados, los XOS pueden mejorar la retención de humedad y la textura, mientras que en productos lácteos fermentados pueden actuar como sustrato para microorganismos probióticos, generando un efecto sinérgico.

Adicionalmente, más allá del sector alimentario, los prebióticos han encontrado aplicaciones en la industria farmacéutica y cosmética, donde se emplean como moduladores de la microbiota cutánea y como agentes bioactivos con propiedades antioxidantes y antiinflamatorias (Pereira et al., 2025). Por lo que el desarrollo de procesos de extracción eficientes, como el procesamiento hidrotérmico, no solo debe evaluarse en términos de rendimiento, sino también en función de la calidad funcional del producto obtenido y su aplicabilidad en sistemas reales. Esto permite establecer una conexión directa entre la etapa de obtención y el potencial de uso industrial de los prebióticos derivados de la biomasa lignocelulósica.

5. Conclusión

La evidencia presentada en este trabajo identifica el potencial del uso de las biomásas lignocelulósicas como materia prima para extraer prebióticos con rendimientos a nivel industrial. También se muestra una visión de las metodologías de extracción utilizadas en la actualidad para la recuperación de oligosacáridos y biopolímeros, como fibra alimentaria no digerible, con potencial antioxidante, antiinflamatorio y prebiótico que mejoran la salud en consumos humanos y animales. Se recuperaron condiciones estratégicas para la evaluación de los parámetros con mayor relevancia en la determinación de conversión de las biomásas lignocelulósicas a prebióticos. Los prebióticos no solo nutren la microbiota intestinal, sino que también ayudan a reducir la oxidación y la inflamación, claves para prevenir enfermedades. Así se valida su potencial como ingrediente funcional en alimentos y suplementos. Por tanto, el procesamiento hidrotérmico, es una tecnología eficiente y sostenible para extraer compuestos prebióticos a partir de biomasa. Desde la perspectiva de la sostenibilidad y biorrefinerías de segunda generación, los procesos hidrotérmicos son una alternativa factible para su implementación a nivel industrial en el sector alimentario con impacto en la alimentación y beneficio a la sociedad.

Contribuciones de los autores

J.R.C.B.: contribuyó a la redacción del borrador original, la conceptualización, la edición y la compilación del manuscrito. **R.M.R.J.:** participó en la visualización, supervisión, revisión y edición del manuscrito. **H.A.R.:** participó en la visualización, supervisión, revisión y edición del manuscrito. Todos los autores leyeron y aprobaron la versión final del manuscrito.

Agradecimientos

El autor, Jorge R. Carrales-Briones, desea agradecer al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (ahora SECIHTY) por su apoyo con la Beca de Doctorado, con número de subvención 1013330.

Conflicto de interés

Los autores manifiestan que no tienen conflicto de interés con la publicación, ni relaciones personales que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo de revisión.

5. Referencias

- Abasubong, K. P., Li, X., Adjoumani, J. Y., Jiang, G., Desouky, H. E., & Liu, W. (2022). Effects of dietary xylooligosaccharide prebiotic supplementation on growth, antioxidant and intestinal immune-related genes expression in common carp *Cyprinus carpio* fed a high-fat diet. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 106(2), 403–418. <https://doi.org/10.1111/jpn.13669>
- Abreu y Abreu, A. T., Milke-García, M. P., Argüello-Arévalo, G. A., Calderón-de la Barca, A. M., Carmona-Sánchez, R. I., Consuelo-Sánchez, A., Coss-Adame, E., García-Cedillo, M. F., Hernández-Rosiles, V., Icaza-Chávez, M. E., Martínez-Medina, J. N., Morán-Ramos, S., Ochoa-Ortiz, E., Reyes-Apodaca, M., Rivera-Flores, R. L., Zamarripa-Dorsey, F., Zárate-Mondragón, F., & Vázquez-Frias, R. (2021). Fibra dietaria y microbiota, revisión narrativa de un grupo de expertos de la Asociación Mexicana de Gastroenterología. *Revista de Gastroenterología de México*, 86(3), 287–304. <https://doi.org/10.1016/j.rgmx.2021.02.004>
- Ahn, J.-S., Lkhagva, E., Jung, S., Kim, H.-J., Chung, H.-J., & Hong, S.-T. (2023). Fecal Microbiome Does Not Represent Whole Gut Microbiome. *Cellular Microbiology*, 2023, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2023/6868417>
- Akter, M., & Akter, N. (2021). Effect of Xylo-Oligosaccharides (XOS) on Growth Performance, Blood Biochemistry and Total Viable Count in Ileum and Caecum of Broiler Chickens from Day 13-26. *International Journal of Poultry Science*, 20(4), 158–164. <https://doi.org/10.3923/ijps.2021.158.164>
- Álvarez, C., González, A., Ballesteros, I., Gullón, B., & Negro, M. J. (2022). In Vitro Assessment of the Prebiotic Potential of Xylooligosaccharides from Barley Straw. *Foods*, 12(1), 83. <https://doi.org/10.3390/foods12010083>
- Ariyanta, H. A., Sholeha, N. A., & Fatriasari, W. (2025). Current and Future Outlook of Research on Renewable Cosmetics Derived From Biomass. *Chemistry & Biodiversity*, 22(7). <https://doi.org/10.1002/cbdv.202402249>
- Ávila, P. F., Martins, M., de Almeida Costa, F. A., & Goldbeck, R. (2020). Xylooligosaccharides production by commercial enzyme mixture from agricultural wastes and their prebiotic and antioxidant potential. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 24, 100234. <https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2020.100234>
- Balan, V., Zhu, W., Krishnamoorthy, H., Benhaddou, D., Mowrer, J., Husain, H., & Eskandari, A. (2022). Challenges and opportunities in producing high-quality edible mushrooms from

- lignocellulosic biomass in a small scale. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106(4), 1355–1374. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11749-2>
- Banerjee, S., Patti, A. F., Ranganathan, V., & Arora, A. (2019). Hemicellulose based biorefinery from pineapple peel waste: Xylan extraction and its conversion into xylooligosaccharides. *Food and Bioproducts Processing*, 117, 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.06.012>
- Beia, I. S., Ciceoi, R., Micu, M. M., & Beia, V. E. (2023). Lignocellulosic Biomass as Agricultural Bioresource and Input to the Circular Economy. *Romanian Agricultural Research*, 40, 667–676. <https://doi.org/10.59665/rar4062>
- Belmonte-Izquierdo, Y., López-Pérez, M. G., & González-Hernández, J. C. (2023). Máquinas biológicas que producen prebióticos (FOS). *Milenaria, Ciencia y Arte*, 21, 8–10. <https://doi.org/10.35830/mcya.vi21.331>
- Beluhan, S., Mihajlovski, K., Šantek, B., & Ivančić Šantek, M. (2023). The Production of Bioethanol from Lignocellulosic Biomass: Pretreatment Methods, Fermentation, and Downstream Processing. *Energies*, 16(19), 7003. <https://doi.org/10.3390/en16197003>
- Capetti, C. C. de M., Pellegrini, V. O. A., Espirito Santo, M. C., Cortez, A. A., Falvo, M., Curvelo, A. A. da S., Campos, E., Filgueiras, J. G., Guimaraes, F. E. G., de Azevedo, E. R., & Polikarpov, I. (2023). Enzymatic production of xylooligosaccharides from corn cobs: Assessment of two different pretreatment strategies. *Carbohydrate Polymers*, 299, 120174. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120174>
- Capetti, C. C. de M., Vacilotto, M. M., Dabul, A. N. G., Sepulchro, A. G. V., Pellegrini, V. O. A., & Polikarpov, I. (2021). Recent advances in the enzymatic production and applications of xylooligosaccharides. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 37(10), 169. <https://doi.org/10.1007/s11274-021-03139-7>
- Castellino, M., Renna, M., Leoni, B., Calasso, M., Difonzo, G., Santamaria, P., Gambacorta, G., Caponio, F., De Angelis, M., & Paradiso, V. M. (2020). Conventional and unconventional recovery of inulin rich extracts for food use from the roots of globe artichoke. *Food Hydrocolloids*, 107, 105975. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105975>
- Chelliah, R., Kim, N. H., Park, S., Park, Y., Yeon, S.-J., Barathikannan, K., Vijayalakshmi, S., & Oh, D.-H. (2024). Revolutionizing Renewable Resources: Cutting-Edge Trends and Future Prospects in the Valorization of Oligosaccharides. *Fermentation*, 10(4), 195. <https://doi.org/10.3390/fermentation10040195>
- Chen, Y., Xie, Y., Ajuwon, K. M., Zhong, R., Li, T., Chen, L., Zhang, H., Beckers, Y., & Everaert, N. (2021). Xylo-Oligosaccharides, Preparation and Application to Human and Animal Health: A Review. *Frontiers in Nutrition*, 8, 731930. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.731930>
- Chikezie Ogbu, C., & Nnaemeka Okey, S. (2023). Agro-Industrial Waste Management: The Circular and Bioeconomic Perspective. In Ahmad, F. & Sultan, M. (Eds) *Agricultural Waste - New Insights*. (Chapter 5) IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.109181>
- Comet Bio. (2026). <https://comet-bio.com/>
- Conrad, M., & Smirnova, I. (2020). Two-Step Autohydrolysis Pretreatment: Towards High Selective Full Fractionation of Wheat Straw. *Chemie Ingenieur Technik*, 92(11), 1723–1732. <https://doi.org/10.1002/cite.202000056>
- Corrales Centeno, A., Sanchez Muñoz, S., Severo Gonçalves, I., Sanchez Vera, F. P., Soares Forte, M. B., da Silva, S. S., dos Santos, J. C., & Terán Hilaes, R. (2023). Valorization of rice husk by hydrothermal processing to obtain valuable bioproducts: Xylooligosaccharides and Monascus biopigment. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 6, 100358. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100358>

- Dávila Sámano, A. R., Linares Hernández, I., Castillo Suárez, L. A., & Martínez Miranda, V. (2021). Gestión de los residuos sólidos urbanos y su efecto en el aire, agua y suelo. *Revista Alfa*, 5(15): 428–452. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v5i15.128>
- de Aquino Lima, F., dos Santos Júnior, A. C., Sarrouh, B., & Lofrano, R. C. Z. (2024). Application of sugarcane bagasse and peanut shell in natura as bioadsorbents for vinasse treatment. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 26(3), 785–802. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02650-9>
- de Freitas, C., Carmona, E., & Brienzo, M. (2019). Xylooligosaccharides production process from lignocellulosic biomass and bioactive effects. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 18, 100184. <https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2019.100184>
- de Oliveira, M. G. de, Forte, M. B. S., & Franco, T. T. (2021). A serial membrane-based process for fractionation of xylooligosaccharides from sugarcane straw hydrolysate. *Separation and Purification Technology*, 278, 119285. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119285>
- Del Castillo-Llamosas, A., Rodríguez-Martínez, B., del Río, P. G., Eibes, G., Garrote, G., & Gullón, B. (2021). Hydrothermal treatment of avocado peel waste for the simultaneous recovery of oligosaccharides and antioxidant phenolics. *Bioresource Technology*, 342, 125981. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125981>
- Dias, J. C., Marques, S., Branco, P. C., Rodrigues, T., Torres, C. A. V., Freitas, F., Evtuyugin, D. V., & Silva, C. J. (2025). Biopolymers Derived from Forest Biomass for the Sustainable Textile Industry. *Forests*, 16(1), 163. <https://doi.org/10.3390/f16010163>
- Espro, C., Paone, E., Mauriello, F., Gotti, R., Uliassi, E., Bolognesi, M. L., Rodríguez-Padrón, D., & Luque, R. (2021). Sustainable production of pharmaceutical, nutraceutical and bioactive compounds from biomass and waste. *Chemical Society Reviews*, 50(20), 11191–11207. <https://doi.org/10.1039/D1CS00524C>
- Essa, M. M., Bishir, M., Bhat, A., Chidambaram, S. B., Al-Balushi, B., Hamdan, H., Govindarajan, N., Freidland, R. P., & Qoronfleh, M. W. (2023). Functional foods and their impact on health. *Journal of Food Science and Technology*, 60(3), 820–834. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05193-3>
- Ferreira-Lazarte, A., Moreno, F. J., & Villamiel, M. (2021). Bringing the digestibility of prebiotics into focus: update of carbohydrate digestion models. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(19), 3267–3278. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1798344>
- Garg, R., Sabouni, R., & Ahmadipour, M. (2023). From waste to fuel: Challenging aspects in sustainable biodiesel production from lignocellulosic biomass feedstocks and role of metal organic framework as innovative heterogeneous catalysts. *Industrial Crops and Products*, 206, 117554. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117554>
- Gargiulo, V., Di Natale, F., & Alfe, M. (2024). From agricultural wastes to advanced materials for environmental applications: Rice husk-derived adsorbents for heavy metals removal from wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(5), 113497. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113497>
- Han, J., Cao, R., Zhou, X., & Xu, Y. (2020). An integrated biorefinery process for adding values to corncob in co-production of xylooligosaccharides and glucose starting from pretreatment with gluconic acid. *Bioresource Technology*, 307, 123200. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123200>
- Hao, X., Xu, F., & Zhang, J. (2022). Effect of pretreatments on production of xylooligosaccharides and monosaccharides from corncob by a two-step hydrolysis. *Carbohydrate Polymers*, 285, 119217. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119217>
- Huang, C., Yu, Y., Li, Z., Yan, B., Pei, W., & Wu, H. (2022). The preparation technology and application of xylo-oligosaccharide as prebiotics in different fields: A review. *Frontiers in Nutrition*, 9: 996811. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.996811>

- Juhász, R., Penksza, P., & Sipos, L. (2020). Effect of xylo-oligosaccharides (XOS) addition on technological and sensory attributes of cookies. *Food Science & Nutrition*, 8(10), 5452–5460. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1802>
- Karakan, T., Tuohy, K. M., & Janssen-van Solingen, G. (2021). Low-Dose Lactulose as a Prebiotic for Improved Gut Health and Enhanced Mineral Absorption. *Frontiers in Nutrition*, 8: 672925. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.672925>
- Kaur, A. P., Bhardwaj, S., Dhanjal, D. S., Nepovimova, E., Cruz-Martins, N., Kuča, K., Chopra, C., Singh, R., Kumar, H., Şen, F., Kumar, V., Verma, R., & Kumar, D. (2021). Plant Prebiotics and Their Role in the Amelioration of Diseases. *Biomolecules*, 11(3), 440. <https://doi.org/10.3390/biom11030440>
- Kushkevych, I., Martinková, K., Vítězová, M., & Rittmann, S. K.-M. R. (2021). Intestinal Microbiota and Perspectives of the Use of Meta-Analysis for Comparison of Ulcerative Colitis Studies. *Journal of Clinical Medicine*, 10(3), 462. <https://doi.org/10.3390/jcm10030462>
- Lamba, R., Sangwan, S., Sehrawat, N., Singh, A., Singh, S., & kumari, A. (2025). Development of Liquid Organic Fertilizers Using Agro-Industrial Wastes for the Hydroponic Cultivation of Lettuce. *International Journal of Environmental Research*, 19(4), 124. <https://doi.org/10.1007/s41742-025-00791-x>
- Lara-Fiallos, M. V., Bastidas-Delgado, L. A., Montalvo-Villacreses, D. T., Espín-Valladares, R. C., Núñez-Pérez, J., Martínez, A. P., Vispo, N. S., Cabrera, H. R., Suárez, E. G., & Pais-Chanfrau, J. M. (2021). Optimization of Crude Inulin Extraction from Garlic (*Allium sativum* L.) Agro-industrial Waste using the Response Surface Methodology. PREPRINT (Version 1). *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-136719/v1>
- Lemessa, G., Gabbiye, N., & Alemayehu, E. (2023). Waste to resource: Utilization of waste bagasse as an alternative adsorbent to remove heavy metals from wastewaters in sub-Saharan Africa: A review. *Water Practice and Technology*, 18(2), 393–407. <https://doi.org/10.2166/wpt.2023.011>
- Lobato-Rodríguez, Á., Gullón, B., Garrote, G., & Del-Río, P. G. (2025). Enhancing Acacia dealbata valorization through microwave-assisted autohydrolysis: An energy-efficient approach to oligosaccharides and bioethanol production. *Process Safety and Environmental Protection*, 201, 107470. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.107470>
- López-Astorga, M., Molina-Domínguez, C. C., Ovando-Martínez, M., & Leon-Bejarano, M. (2023). Orujo de Uva: Más que un Residuo, una Fuente de Compuestos Bioactivos. *EPISTEMUS*, 16(33), 115–122. <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.283>
- Manandhar, A., & Shah, A. (2023). Techno-Economic Analysis of the Production of Lactic Acid from Lignocellulosic Biomass. *Fermentation*, 9(7), 641. <https://doi.org/10.3390/fermentation9070641>
- McQuilken, S. A. (2021). The mouth, stomach and intestines. *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*, 22(5), 330–335. <https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2021.04.001>
- Meliora Bio. (2026). <https://meliora-bio.com/what-we-make/>
- Mitchell, C. M., Davy, B. M., Ponder, M. A., McMillan, R. P., Hughes, M. D., Hulver, M. W., Neilson, A. P., & Davy, K. P. (2021). Prebiotic Inulin Supplementation and Peripheral Insulin Sensitivity in adults at Elevated Risk for Type 2 Diabetes: A Pilot Randomized Controlled Trial. *Nutrients*, 13(9), 3235. <https://doi.org/10.3390/nu13093235>
- Mujtaba, M., Fernandes Fraceto, L., Fazeli, M., Mukherjee, S., Savassa, S. M., Araujo de Medeiros, G., do Espírito Santo Pereira, A., Mancini, S. D., Lipponen, J., & Vilaplana, F. (2023). Lignocellulosic biomass from agricultural waste to the circular economy: a review with focus on biofuels, biocomposites and bioplastics. *Journal of Cleaner Production*, 402, 136815. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136815>

- Nogueira-Prieto, N.-M., Ansín-Vallejo, C., Becerra-Fernández, M., & González-Siso, M.-I. (2025). A review of the capacity of xylooligosaccharides to modulate gut microbiota and promote health. *Food & Function*, 16(12), 4654–4672. <https://doi.org/10.1039/D5FO00169B>
- Pauline, A. L., & Joseph, K. (2020). Hydrothermal carbonization of organic wastes to carbonaceous solid fuel – A review of mechanisms and process parameters. *Fuel*, 279, 118472. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118472>
- Pereira, B. S., de Freitas, C., Contiero, J., & Brienzo, M. (2022). Enzymatic Production of Xylooligosaccharides from Xylan Solubilized from Food and Agroindustrial Waste. *BioEnergy Research*, 15(2), 1195–1203. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10373-2>
- Pereira, M. J., Pedrosa, S. S., Costa, J. R., Carvalho, M. J., Neto, T., Oliveira, A. L., Pintado, M., & Madureira, A. R. (2025). Sugarcane Straw Hemicellulose Extraction by Autohydrolysis for Cosmetic Applications. *Molecules*, 30(6), 1208. <https://doi.org/10.3390/molecules30061208>
- Pinakana, S. D., Raysoni, A. U., Sayeed, A., Gonzalez, J. L., Temby, O., Wladyka, D., Sepielak, K., & Gupta, P. (2024). Review of agricultural biomass burning and its impact on air quality in the continental United States of America. *Environmental Advances*, 16, 100546. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100546>
- Regmi, S., Paudel, S., & Janaswamy, S. (2024). Development of Eco-Friendly Packaging Films from Soyhull Lignocellulose: Towards Valorizing Agro-Industrial Byproducts. *Foods*, 13(24), 4000. <https://doi.org/10.3390/foods13244000>
- Rogoski, W., Pereira, G. N., Cesca, K., da Silva, M. A., Zanella, E., Stambuk, B. U., Ávila, P. F., Goldbeck, R., de Oliveira, D., & de Andrade, C. J. (2024). Production of cassava peel-based xylooligosaccharides using endo-1,4- β -xylanase from *Trichoderma longibrachiatum*: the effect of alkaline pretreatment. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(10), 11351–11363. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03287-2>
- Ruiz, H. A., Conrad, M., Sun, S.-N., Sanchez, A., Rocha, G. J. M., Romani, A., Castro, E., Torres, A., Rodríguez-Jasso, R. M., Andrade, L. P., Smirnova, I., Sun, R.-C., & Meyer, A. S. (2020). Engineering aspects of hydrothermal pretreatment: From batch to continuous operation, scale-up and pilot reactor under biorefinery concept. *Bioresource Technology*, 299, 122685. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122685>
- Ruiz, H. A., Galbe, M., Garrote, G., Ramirez-Gutierrez, D. M., Ximenes, E., Sun, S. N., Lachos-Perez, D., Rodríguez-Jasso, R. M., Sun, R. C., Yang, B., & Ladisch, M. R. (2021). Severity factor kinetic model as a strategic parameter of hydrothermal processing (steam explosion and liquid hot water) for biomass fractionation under biorefinery concept. *In Bioresource Technology*, 342: 125961. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125961>
- Sabino, T. P. F., Coelho, N. P. F., Andrade, N. C., Metzker, S. L. O., Viana, Q. S., Mendes, J. F., & Mendes, R. F. (2022). Lignocellulosic materials as soil–cement brick reinforcement. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(15), 21769–21788. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17351-3>
- Segers, B., Nimmegeers, P., Spiller, M., Tofani, G., Jasiukaitytė-Grojsdek, E., Dace, E., Kikas, T., Marchetti, J. M., Rajić, M., Yildiz, G., & Billen, P. (2024). Lignocellulosic biomass valorisation: a review of feedstocks, processes and potential value chains and their implications for the decision-making process. *RSC Sustainability*, 2(12), 3730–3749. <https://doi.org/10.1039/D4SU00342J>
- Shie-Lih, T., Chen-Chung, K., & Siew-Ling, H. (2020). Recent Advance in Extraction of Prebiotics from Plants: A Review. *International Journal of Biomass and Renewables*, 9(2), 14–21. <https://goo.su/SINxtz>
- Shiva, Rodríguez-Jasso, R. M., Rosero-Chasoy, G., López-Sandin, I., Morais, A. R. C., & Ruiz, H. A. (2023). Enzymatic Hydrolysis, Kinetic Modeling of Hemicellulose Fraction, and Energy Efficiency

- of Autohydrolysis Pretreatment Using Agave Bagasse. *BioEnergy Research*, 16(1), 75–87. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10442-0>
- Singh, R., Das, R., Sangwan, S., Rohatgi, B., Khanam, R., Peera, S. K. P. G., Das, S., Lyngdoh, Y. A., Langyan, S., Shukla, A., Shrivastava, M., & Misra, S. (2021). Utilisation of agro-industrial waste for sustainable green production: a review. *Environmental Sustainability*, 4(4), 619–636. <https://doi.org/10.1007/s42398-021-00200-x>
- Singh, R., Hans, M., Kumar, S., & Yadav, Y. K. (2023). Thermophilic Anaerobic Digestion: An Advancement towards Enhanced Biogas Production from Lignocellulosic Biomass. *Sustainability*, 15(3), 1859. <https://doi.org/10.3390/su15031859>
- Sri Shalini S., Palanivelu K., Ramachandran A., & Raghavan, V. (2021). Biochar from biomass waste as a renewable carbon material for climate change mitigation in reducing greenhouse gas emissions—a review. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11(5), 2247–2267. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00604-5>
- Tan, S., Zhou, G., Yang, Q., Ge, S., Liu, J., Cheng, Y. W., Yek, P. N. Y., Wan Mahari, W. A., Kong, S. H., Chang, J.-S., Sonne, C., Chong, W. W. F., & Lam, S. S. (2023). Utilization of current pyrolysis technology to convert biomass and manure waste into biochar for soil remediation: A review. *Science of The Total Environment*, 864, 160990. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160990>
- Ungureanu, E. L., Mocanu, A. L., Stroe, C. A., Panciu, C. M., Berca, L., Sionel, R. M., & Mustatea, G. (2023). Agricultural Byproducts Used as Low-Cost Adsorbents for Removal of Potentially Toxic Elements from Wastewater: A Comprehensive Review. *Sustainability*, 15(7), 5999. <https://doi.org/10.3390/su15075999>
- Valladares-Diestra, K. K., de Souza Vandenberghe, L. P., Vieira, S., Goyzueta-Mamani, L. D., de Mattos, P. B. G., Manzoki, M. C., Soccol, V. T., & Soccol, C. R. (2023). The Potential of Xylooligosaccharides as Prebiotics and Their Sustainable Production from Agro-Industrial by-Products. *Foods*, 12(14), 2681. <https://doi.org/10.3390/foods12142681>
- Valmet. (2026). <https://www.valmet.com/industries/bio/bioethanol-and-bioplastics/feeding-technology/>
- Vučurović, D., Bajić, B., Trivunović, Z., Dodić, J., Zeljko, M., Jevtić-Mučibabić, R., & Dodić, S. (2024). Biotechnological Utilization of Agro-Industrial Residues and By-Products—Sustainable Production of Biosurfactants. *Foods*, 13(5), 711. <https://doi.org/10.3390/foods13050711>
- Wang, Q., Su, Y., Gu, Y., Lai, C., Ling, Z., & Yong, Q. (2022). Valorization of bamboo shoot shell waste for the coproduction of fermentable sugars and xylooligosaccharides. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10: 1006925. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1006925>
- Wen, P., Zhang, T., Xu, Y., & Zhang, J. (2020). Co-production of xylooligosaccharides and monosaccharides from poplar by a two-step acetic acid and sodium chlorite pretreatment. *Industrial Crops and Products*, 152, 112500. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112500>
- Xiao, Y., Zhao, J., Zhang, H., Zhai, Q., & Chen, W. (2021). Mining genome traits that determine the different gut colonization potential of *Lactobacillus* and *Bifidobacterium* species. *Microbial Genomics*, 7(6). <https://doi.org/10.1099/mgen.0.000581>
- Yan, F., Tian, S., Chen, H., Gao, S., Dong, X., & Du, K. (2022). Advances in xylooligosaccharides from grain byproducts: Extraction and prebiotic effects. *Grain & Oil Science and Technology*, 5(2), 98–106. <https://doi.org/10.1016/j.gaost.2022.02.002>
- Yoon, J., Sim, S., Myint, A. A., & Lee, Y.-W. (2018). Kinetics of the hydrolysis of xylan based on ether bond cleavage in subcritical water. *The Journal of Supercritical Fluids*, 135, 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.01.013>

- Yoro, K. O., & Daramola, M. O. (2020). Chapter 1 - CO₂ emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect. In Reza Rahimpour, M., Farsi, M., & Makarem, M. A. (Eds.) *Advances in Carbon Capture* (pp. 3–28). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819657-1.00001-3>
- Zhao, K., Tian, X., Lai, W., & Xu, S. (2024). Agricultural production and air pollution: An investigation on crop straw fires. *PLOS ONE*, 19(5), e0303830. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0303830>
- Zhao, L., Zhao, M., Gao, W., Xie, L., Zhang, G., Li, J., Song, C., & Wei, Z. (2024). Different *Bacillus* sp. play different roles on humic acid during lignocellulosic biomass composting. *Journal of Cleaner Production*, 434, 139901. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139901>

2026 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>