

Extracción de arabinosilanos de subproductos agroindustriales adaptada a la estrategia universal de recuperación de compuestos bioactivos

N. Rodríguez-Viveros¹, R. Paz-Samaniego³, A.A. Hernández-Hernández¹, L. García-Curiel², E. Pérez-Escalante¹, E. Contreras-López¹ y J.G. Pérez-Flores*¹

1 Área Académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5, Mineral de la Reforma, Hidalgo; México, C.P. 42184.

2 Área Académica de Enfermería, Instituto de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5, Mineral de la Reforma, Hidalgo; México, C.P. 42184.

3 Departamento de Ciencias Químicas Biológicas, Universidad de Sonora. Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Col. Centro Hermosillo, Sonora, México. *jesus_perez@uaeh.edu.mx

RESUMEN

Los arabinosilanos (AX) son polisacáridos de tipo hemicelulosa extraídos principalmente de cereales y subproductos agroindustriales. Están formados por una cadena de xilosas, con ramificaciones de arabinosa y otros azúcares. Además, pueden tener ácidos fenólicos como el ácido ferúlico esterificado que permite el entrecruzamiento de las cadenas y las posibles aplicaciones del polímero. Las características de los AX dependen de la fuente y el procedimiento de extracción por lo que en este trabajo se realizó una revisión de los métodos de extracción de AX partir de los subproductos de procesos agroindustriales, centrada en la estrategia universal de recuperación de compuestos bioactivos. Esta técnica se realiza en cinco etapas que van desde el nivel macroscópico al micromolecular para posteriormente aislar la sustancia bioactiva utilizando técnicas convencionales o emergentes, dependiendo de costos y beneficios en los procesos, así como de las características de la matriz. La muestra puede ser previamente tratada para facilitar la extracción. Existen otros métodos de extracción como extracción alcalina, la extracción ácida y extracción enzimática. La elección de la técnica de extracción es importante para lograr el máximo aprovechamiento y recuperación de los AX de subproductos agroindustriales, para aplicaciones en áreas como la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica.

Palabras clave: arabinosilanos, extracción, subproducto.

ABSTRACT

Arabinosylans (AX) are hemicellulose-type polysaccharides extracted mainly from cereals and agro-industrial by-products. They are formed by a chain of xylose, with ramifications of arabinose and other sugars. Also, they can have phenolic acids such as esterified ferulic acid that allows crosslinking of the chains making the polymer interesting for further applications. The characteristics of the AX depend on the source and the extraction process, so in this work a review of the extraction methods of AX from by-products of agro-industrial processes was carried out, focused on the universal strategy for the recovery of bioactive compounds. This technique is carried out in five stages, from the macroscopic to the micromolecular level to subsequently isolate the bioactive compounds using conventional or emerging techniques, depending on the costs and benefits of the processes and the characteristics of the matrix. The sample can be previously treated to facilitate extraction. Other extraction methods of interest are alkaline extraction, acid extraction and enzymatic extraction. The choice of the extraction technique is important to achieve maximum use and recovery of AX from agro-industrial by-products for applications in food, cosmetic and pharmaceutical industries.

Keywords: arabinosylans, extraction, by-product.

INTRODUCCIÓN

Las industrias de procesamiento de cereales y frutas suelen no utilizar por completo algunas materias primas, como cáscaras, semillas, salvado, etc., siendo comúnmente consideradas como un desecho agroindustrial. Sin embargo, han resultado ser potencialmente valiosas al ser catalogadas como una fuente de extracción de ingredientes funcionales y bioactivos, además de ser de bajo costo (Bosmans *et al.*, 2014; Radenkova *et al.*, 2018). Entre estos componentes encontramos compuestos fenólicos, así como polímeros como celulosa, hemicelulosa y lignina.

En las últimas décadas se ha observado un creciente interés en la utilización de recursos renovables para la obtención de materiales biológicos sostenibles. En este sentido, la extracción de compuestos antioxidantes y de hemicelulosas, como los arabinoxilanos, son una alternativa para la reutilización de la biomasa lignocelulósica no alimentaria procedente de los procesos agroindustriales (Peng *et al.*, 2019). Estos compuestos, de acuerdo con sus características estructurales, dadas por su método de extracción y la fuente de donde se obtienen, pueden presentar múltiples aplicaciones tecnológicas, ecológicas y/o económicas en algunas industrias como la agroalimentaria, cosmética y biomédica (Pérez *et al.*, 2019). Por esta razón en este trabajo se revisan las técnicas de extracción de arabinoxilanos de subproductos agroindustriales reportadas por varios autores.

Componentes de la biomasa lignocelulósica

La biomasa lignocelulósica está compuesta principalmente por tres polímeros: celulosa (38-50%), hemicelulosas (23-32%) y lignina (15-25%) (Singh *et al.*, 2018). La celulosa es el polímero más abundante y forma microfibrillas que gracias a la hemicelulosa y la lignina se mantienen unidas a través de una combinación de enlaces covalentes y puentes de hidrógeno. (Naidu, *et al.*, 2018). Por otro lado, las hemicelulosas forman la segunda mayor parte de la biomasa después de la celulosa, siendo los xilanos, las hemicelulosas más abundantes y con características estructurales que dependen de la extracción (Limayem & Ricke, 2012).

Los xilanos son un grupo diverso de polisacáridos, que estructuralmente poseen una característica en común, tienen una cadena principal constituida de unidades de β -D-xilopiranosil (β -D-Xylp) unidas en una configuración ecuatorial (Ogaji *et al.*, 2012) mediante enlaces glicosídicos β -(1 \rightarrow 4) (Cantu *et al.*, 2017). Según la fuente y el método de extracción, a la cadena principal de β -D-xilopiranosil se pueden unir ácidos urónicos como cadenas laterales, tales como el ácido 4-O-metil- α -D-glucorónico y el ácido α -D-glucorónico, además de azúcares neutros como la α -L-arabinosa, la α -D-xilosa y la α -D-galactosa (Cantu *et al.*, 2017). Esto da como resultado diferentes categorías de xilanos con composición y características estructurales particulares como los Glucuronoxilanos (GX), Homoxilanos, Arabinoglucuronoxilanos y Arabinoxilanos (AX) (Naidu *et al.*, 2018). Por su potencial aplicación en la industria este trabajo se centrará en las características y métodos de extracción de los arabinoxilanos.

Arabinoxilanos

Los arabinoxilanos (AX) son polisacáridos heterogéneos no amiláceos localizados en diversos tejidos de los granos de cereales (Izydorczyk & Biliaderis, 2007) como lo son las paredes celulares del endospermo, la capa de aleurona y el pericarpio (Rosicka *et al.*, 2016). Los AX poseen propiedades que les permiten ser utilizados en la industria alimentaria y biomédica (Paz *et al.*, 2018), las cuales dependen de ciertas características del polisacárido, entre las que se encuentran la masa molar (MW), la proporción o relación arabinosa/xilosa (Ara/Xyl) y el perfil de ácidos hidroxicinámicos (HCA). Estas particularidades

dependerán de la fuente y del método de extracción (Saulnier, 2007). Debido a esto, es importante conocer la estructura de los AX para proponer alternativas para su aplicación.

Estructura química de los arabinoxilanos

La estructura química de los AX consiste en una cadena principal de β -D-Xylopiranosa (β -D-Xylp) unidos entre sí mediante enlaces β -(1 \rightarrow 4), y grupos de α -L-arabinofuranosil (α -L-Araf) unidos a la cadena principal mediante enlaces α -(1 \rightarrow 3) y/o α -(1 \rightarrow 2) (Pérez *et al.*, 2019). Esto proporciona cuatro posibles estructuras diferentes: no sustituida, O-2 monosustituida, O-3 monosustituida y O-2,3 disustituida (Méndez *et al.*, 2019). La cantidad de unidades de α -L-Araf y el grado de sustitución suelen afectar considerablemente las propiedades fisicoquímicas de los AX (Méndez *et al.*, 2018). En la Figura I se muestra una estructura química representativa a los AX y sus posibles sustituciones. Las propiedades de los AX dependen de su composición y características estructurales, por lo que en base a la constitución de las cadenas laterales serán dichas particularidades.

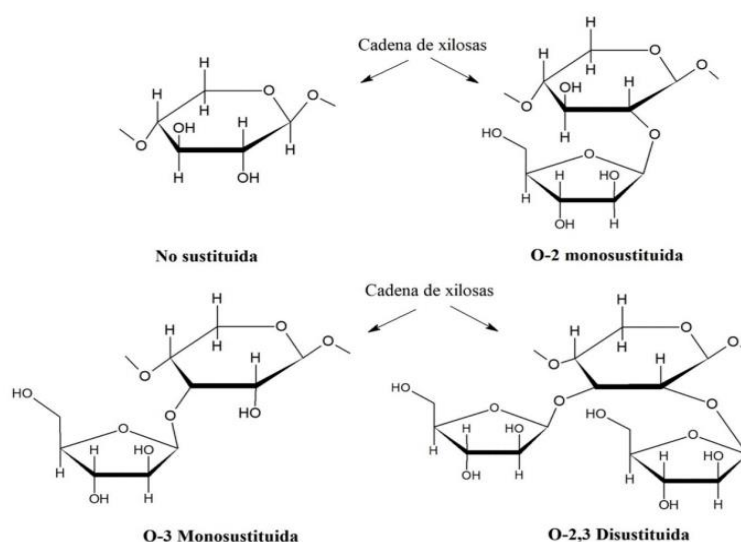


Figura 1. Estructuras representativas de arabinoxilanos sustituidos.

Arabinoxilanos sustituidos

1. Azúcares como sustituyentes

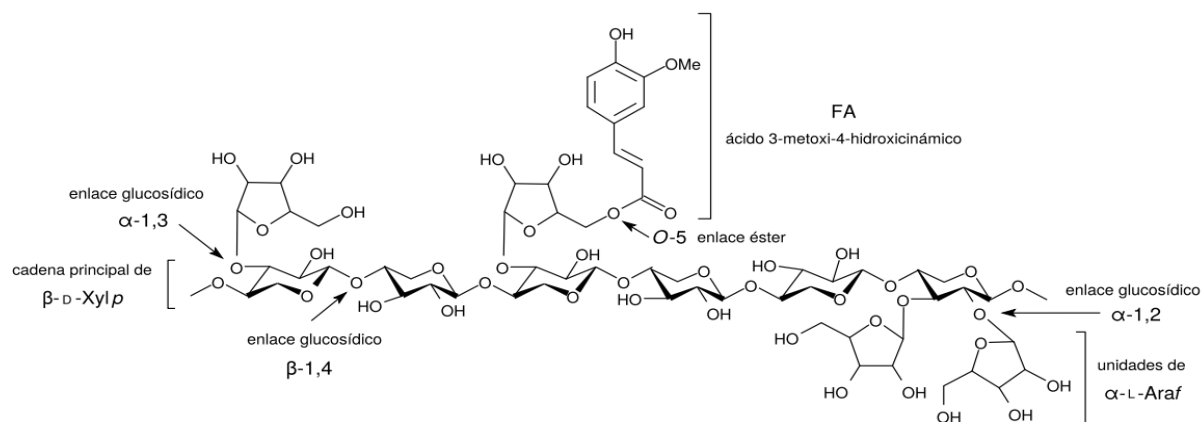
En la cadena principal de β -D-Xylp, además de unidades de α -L-Araf también pueden encontrarse algunos residuos de azúcares como galactosa, xilosa y ácido glucorónico (Méndez *et al.*, 2018). Sin embargo, se han encontrado algunas otras variaciones en las sustituciones, tales como las que se presentan en la Tabla I. La presencia de ciertos azúcares en la estructura de los arabinoxilanos permite la ramificación a partir de la cadena principal de xilosas, lo cual está relacionado con el carácter hidrofílico del polisacárido, características estructurales y propiedades de solubilidad (Niño *et al.*, 2010).

Tabla I. Sustituciones encontradas en la cadena principal de β -D-Xylp.

Sustituyente	Posición en la cadena principal	Procedencia de los AX	Referencias
β -D-Xylp(1 \rightarrow 2)- α -L-Araf(1 \rightarrow 3)	O-3	Cáscara de cebada y arroz, mazorca de maíz y espelta de avena	(Coelho <i>et al.</i> , 2016).
Ácido α -glucorónico y/o ácido 4-O-metil-D-glucorónico (glucuronoxilanos)	—	Plantas dicotiledóneas como el tomate	(Nascimento <i>et al.</i> , 2016).
Grupos acetilados	O-3 y/o O-2,	Paja de trigo	(Sun <i>et al.</i> , 2005).

2. Derivados fenólicos

Los AX suelen poseer como característica estructural particular la presencia de ácidos fenólicos, tales como el ácido 3-metoxi-4-hidroxicinámico o FA y el ácido 4-hidroxicinámico o ácido *p*-cumárico. Estos ácidos suelen estar unidos a residuos de α -L-Araf mediante enlaces éster en las posiciones O-5 (Bartolomé *et al.*, 2002) como se muestra en la Figura II. La presencia de FA influye sobre las propiedades fisicoquímicas de los AX, ya que la unión mediante un enlace covalente de al menos dos de estos residuos, genera el entrecruzamiento de las cadenas de AX, aumentando la viscosidad de la solución y favoreciendo la formación de hidrogeles (Katapodis *et al.*, 2003). Se han identificado arabinoxilanos ferulados (FAX) con estructuras de monómeros, dímeros y trímeros de FA (Ayala *et al.*, 2016). Del mismo modo, el FA puede formar enlaces covalentes con lignina (Kiszonas *et al.*, 2016), celulosa, glucosa, β -glucanos (Zhang *et al.*, 2014) y proteínas (Zhang *et al.*, 2014, Kiszonas *et al.*, 2016). Las posibles aplicaciones de los AX dependen en gran medida del FA presente en la molécula, por lo que el método y la fuente de extracción definen el contenido del ácido fenólico.


Figura 2. Estructura química representativa de una fracción de FAX.

Clasificación de los arabinosilanos

Los AX se clasifican, según su capacidad para disolverse en agua en arabinosilanos extraíbles en agua y no extraíbles en agua, es decir, WEAX y WUAX respectivamente (Fadel *et al.*, 2018). La diferencia en la solubilidad puede estar influenciada por los patrones de sustitución, la MW, el grado de entrecruzamiento, enlaces covalentes entre los grupos hidróxilo de los AX y los grupos carboxilo de ácidos urónicos (Niño *et al.*, 2010) y la formación de puentes de di-FA entre cadenas de AX adyacentes (Zhang *et al.*, 2015).

Los WEAX se localizan ligeramente unidos a la superficie de la pared celular, donde la presencia de cadenas laterales de α -L-Araf, de glucosa y galactosa, puede evitar la interacción entre cadenas de AX, incrementando su solubilidad y por tanto su extractabilidad en agua (Muralikrishna & Subba Rao, 2007). Por otro lado, los WUAX, se encuentran enlazados a través de puentes de hidrógeno y enlaces covalentes, a componentes de la matriz celular, tales como proteínas y lignina (Courtin & Delcour, 2002). En cereales y subproductos de los mismos, el contenido de WUAX es mucho mayor que el de WEAX (Zhang *et al.*, 2014), es por ello que dichos subproductos son una potencial fuente de extracción de AX.

Recuperación de WUAX

El establecimiento de una técnica de aislamiento y obtención de AX es de suma importancia para lograr el total aprovechamiento y recuperación de los compuestos de subproductos agroindustriales, para aplicaciones en diferentes áreas. Como ejemplos de posibles aplicaciones están la activación de los macrófagos murinos y el crecimiento de los pollos de engorda por el uso de AX extraídos de cáscara de maíz (Zhang *et al.*, 2004), la modulación de la microbiota colónica humana a través de la fermentación de O.acetil.arabinosilano extraído de virutas de bambú (Huang *et al.*, 2019). Así como la integración de la extracción de AX de bagazo de caña de azúcar con la producción etanol (Campbell *et al.*, 2019), la utilización de AX extraídos de bagazo de zanahoria en el sistema alimentario como agentes texturizantes y controladores de humedad, debido a su alta capacidad de retención de agua (CRA) (Yadav *et al.*, 2017). En general, el proceso de extracción de AX define las características estructurales, composición, propiedades fisicoquímicas y posibles usos del polisacárido por lo que es necesario conocer las técnicas de extracción y aislamiento.

Estrategia universal de recuperación de compuestos bioactivos

La recuperación de compuestos bioactivos de alto valor agregado a partir de subproductos agroindustriales y su reutilización en la industria puede llevarse a cabo mediante un proceso de recuperación universal de cinco etapas, aunque existen pasos que deben ejecutarse previamente (Galanakis, 2015). Una vez realizados dichos pasos, la recuperación del procedimiento posterior podría lograrse en cinco etapas distintas que siguen los principios de la química analítica. Este procedimiento se lleva a cabo realizando la separación desde el nivel macroscópico al macromolecular y luego al nivel micromolecular; para posteriormente aplicar un paso de clarificación o aislamiento y, finalmente, la formación del producto o la encapsulación de los compuestos objetivo como se observa en la Figura III (Galanakis, 2012). Cada paso puede realizarse con diferentes tecnologías convencionales (Figura IV A) o emergentes (Figura IV B) según el costo de procesamiento, la conveniencia y las restricciones específicas de cada matriz.

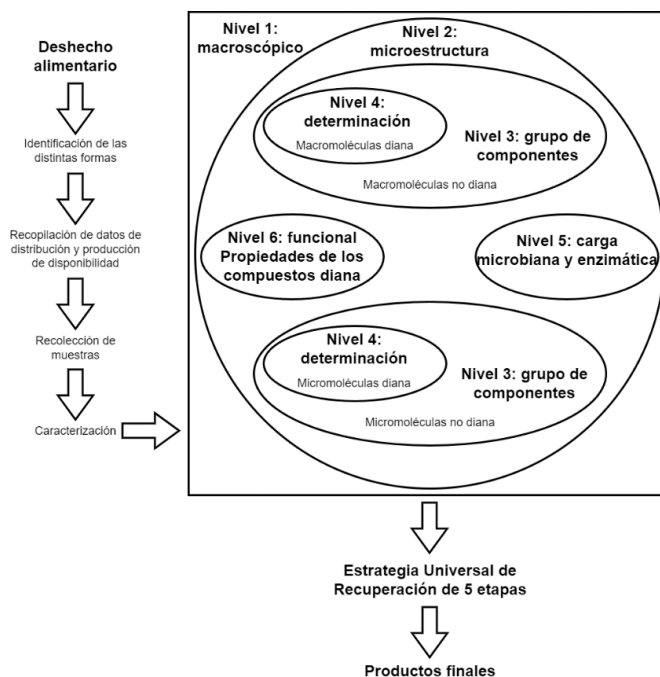


Figura 3. Desarrollo de la estrategia de recuperación universal.

Pretratamiento de la muestra

En la extracción de WUAX a partir de subproductos de la industria de cereales, se han realizado y reportado diversos pretratamientos de muestra, que se realizan con la finalidad de retirar ciertos componentes que puedan interferir. Entre estos tratamientos destacan la remoción de humedad por secado en estufa a 60°C (Stoklosa *et al.*, 2019) o por liofilización (Perez *et al.*, 2019) y la reducción de tamaño por pulverización o fraccionamiento por tamizado logrando tamaños de 30 a 60 μm (Arai *et al.*, 2019). Además, la hidrólisis enzimática del almidón utilizando Termamyl α -amilasa termoestable y eliminando las maltodextrinas con lavados de agua destilada (Stoklosa *et al.*, 2019); el desalmidonado y desproteización por tratamientos enzimáticos con α -amilasa y proteasas (Escarnot *et al.*, 2011); entre otros.

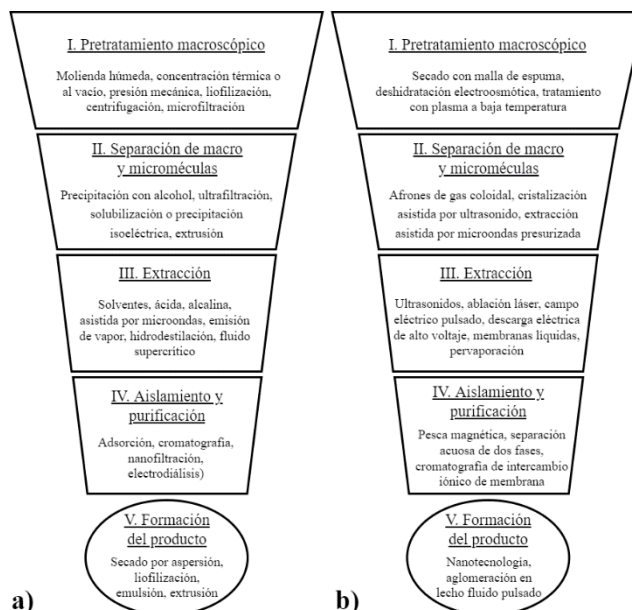


Figura 4. Proceso de recuperación universal de 5 etapas. a) Tecnologías convencionales y b) Tecnologías emergentes.

MÉTODOS DE EXTRACCIÓN

1. Extracción alcalina

Al aplicar tratamiento alcalino se genera el hinchamiento de la celulosa, lo que aumenta la solubilidad de la hemicelulosa y se afecta la estructura jerárquica nativa de esta y en donde la fracción liberada de WUAX es conocida también como arabinosilanos solubilizados en álcali (AS-AX) (Courtin & Delcour, 2002). Dicho tratamiento se realiza comúnmente con álcalis fuertes como NaOH (Pérez *et al.*, 2019), KOH (Sheikhi & Petroudy, 2018), Ba(OH)₂ (Tian *et al.*, 2015) y Ca(OH)₂ (Bender *et al.*, 2017).

2. Extracción ácida

La extracción de WUAX también puede darse en presencia de condiciones ácidas (Xu *et al.*, 2006). Por ejemplo, para lograr la extracción de 85.54% de AX de salvado de trigo se utilizó un pH de 5.5 ajustado con 0.1 mol/L de HCl, el tratamiento se realizó por 2 horas a 60°C (Zhou *et al.*, 2010).

3. Extracción enzimática

La extracción también puede ser el resultado del uso de hidrólisis enzimática con endo-β-(1,4)-xilanasas (EC 3.2.1.8, xilanasas), produciendo arabinosilanos solubilizados por enzimas (ES-AX) y que conlleva a la hidrólisis de la cadena principal y a una reducción en la MW (Van Craeyveld *et al.*, 2009). El tratamiento con dicha enzima, suele aplicarse por ejemplo, en la extracción de AX de salvado de centeno, por un tiempo de 1.5 horas a 50°C (Bender *et al.*, 2017).

Aislamiento y purificación

Los AX pueden aislarse utilizando precipitación por acidificación, con etanol, fraccionamiento de membrana, por cromatografía de exclusión por tamaño (SEC) o por cromatografía de intercambio iónico (IEC) (Peng et al., 2012). Posteriormente, para la purificación destacan los métodos de extracción enzimática con α -amilasa y proteasa y una posterior diálisis para eliminar especies con MW < 12 kDa (Anderson & Simsek, 2019). Finalmente, para la obtención de AX en polvo se necesita eliminar agua por secado a vacío a 50°C, por liofilización o aspersión (Jacquemin *et al.*, 2015).

CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó una revisión de los métodos de extracción de AX de subproductos agroindustriales, principalmente en la estrategia universal de recuperación de compuestos bioactivos. Esta estrategia se realiza en cinco etapas utilizando técnicas convencionales o emergentes, que dependerán de la matriz y de la relación costo-beneficio. Existen varios métodos de extracción de AX como la extracción con álcalis, con ácidos y por vía enzimática. La elección del método de extracción permitirá mejorar el aprovechamiento y posible aplicación del AX en áreas como la farmacéutica, cosmética y alimenticia.

BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, C., & Simsek, S. (2019). A novel combination of methods for the extraction and purification of arabinoxylan from by-products of the cereal industry. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 1-9.
- Arai, T., Biely, P., Uhliariková, I., Sato, N., Makishima, S., Mizuno, M., & Amano, Y. (2019). Structural characterization of hemicellulose released from corn cob in continuous flow type hydrothermal reactor. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 127 (2), 222-230.
- Ayala, S. F. E., Serna, S. S. O., & Welti, C. J. (2016). Effect of processing time, temperature and alkali concentration on yield extraction, structure and gelling properties of corn fiber arabinoxylans. *Food Hydrocolloids*, 60, 21-28.
- Bartolomé, B., Santos, M., Jiménez, J., Del Nozal, M., & Gómez-Cordovés, C. (2002). Pentoses and hydroxycinnamic acids in brewer's spent grain. *Journal of Cereal Science*, 36 (1), 51-58.
- Bender, D., Nemeth, R., Wimmer, M., Götschhofer, S., Biolchi, M., Török, K., & Schoenlechner, R. (2017). Optimization of arabinoxylan isolation from rye bran by adapting extraction solvent and use of enzymes. *Journal of Food Science*, 82 (11), 2562-2568.
- Bosmans, T. J., Stépén, A. M., Toriz, G., Renneckar, S., Karabulut, E., Wågberg, L., & Gatenholm, P. (2014). Assembly of debranched xylan from solution and on nanocellulosic surfaces. *Biomacromolecules*, 15 (3), 924-930.
- Cantu, J. T. M., Iacomini, M., Cipriani, T. R., & Cordeiro, L. M. (2017). Isolation and characterization of a xylan with industrial and biomedical applications from edible açai berries (Euterpe oleraceae). *Food Chemistry*, 221, 1595-1597.
- Campbell, G. M., Mustač, N. C., Alyassin, M., Gomez, L. D., Simister, R., Flint, J., Philips, D. J., Gronnow, M. J., & Westwood, N. J. (2019). Integrated processing of sugarcane bagasse: Arabinoxylan extraction integrated with ethanol production. *Biochemical Engineering Journal* 146, 31-40.
- Coelho, E., Rocha, M. A. M., Moreira, A. S., Domingues, M. R. M., & Coimbra, M. A. (2016). Revisiting the structural features of arabinoxylans from brewers' spent grain. *Carbohydrate Polymers*, 139, 167-176.

- Courtin, C. M., & Delcour, J. A. (2002). Arabinoxylans and endoxylanases in wheat flour breadmaking. *Journal of Cereal Science*, 35 (3), 225-243.
- Escarnot, E., Aguedo, M., Agneessens, R., Wathelet, B., & Paquot, M. (2011). Extraction and characterization of water-extractable and water-unextractable arabinoxylans from spelt bran: Study of the hydrolysis conditions for monosaccharides analysis. *Journal of Cereal Science*, 53 (1), 45-52.
- Fadel, A., Plunkett, A., Li, W., Tessu, G. V. E., Nyaranga, R. R., Fadel, F., & Ashworth, J. J. (2018). Modulation of innate and adaptive immune responses by arabinoxylans. *Journal of Food Biochemistry*, 42 (2).
- Galanakis, C. M. (2012). Recovery of high added-value components from food wastes: conventional, emerging technologies and commercialized applications. *Trends Food Sci. Technol.*, 26, 68-87.
- Galanakis, C. M. (2015). The universal recovery strategy. *Food Waste Recovery*, 59-81. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800351-0.00003-1>.
- Huang, J., Wang, Q., Xu, Q., Zhang, Y., Lin, B., Guan, X., Qian, L., & Zheng, Y. (2019). In vitro fermentation of O-acetyl-arabinoxylan from bamboo shavings by human colonic microbiota. *International Journal of Biological Macromolecules* 125, 27-34.
- Izydorczyk, M. S., & Biliaderis, C. G. (2007). Arabinoxylans: Technologically and nutritionally functional plant polysaccharides. En M. S. Biliaderis, C.G. & Izydorczyk (Ed.), *Functional Food Carbohydrates*, 249-283. Boca Raton, Florida, United States: CRC Press Taylor and Francis Group. doi: <https://doi.org/10.1201/9781420003512>.
- Jacquemin, L., Mogni, A., Zeitoun, R., Guinot, C., Sablayrolles, C., Saulnier, L., & Pontalier, P. Y. (2015). Comparison of different twin-screw extraction conditions for the production of arabinoxylans. *Carbohydrate Polymers*, 116, 86-94.
- Katapodis, P., Vardakou, M., Kalogeris, E., Kekos, D., Macris, B. J., & Christakopoulos, P. (2003). Enzymic production of a feruloylated oligosaccharide with antioxidant activity from wheat flour arabinoxylan. *European Journal of Nutrition*, 42 (1), 55-60.
- Kiszonas, A. M., Fuerst, E. P., & Morris, C. F. (2013). Wheat arabinoxylan structure provides insight into function. *Cereal Chemistry*, 90 (4), 387-395
- Limayem, A., & Ricke, S. C. (2012). Lignocellulosic biomass for bioethanol production: current perspectives, potential issues and future prospects. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38 (4), 449-467
- Mendez, E. M. A., Carvajal, M. E., Rascon, C. A., Astiazaran, G. H. F., & Valencia, R. D. E. (2018). Ferulated Arabinoxylans and Their Gels: Functional Properties and Potential Application as Antioxidant and Anticancer Agent. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2018.
- Mendez, E. M. A., Carvajal, M. E., Rascon, C. A., López, F. Y. L. & Lizardi, M. J. (2019). Arabinoxylans and the remaining protein fraction relationship with the gelling capability of the polysaccharide. *Acta universitaria* 29, <https://doi.org/10.15174/au.2019.1755>.
- Muralikrishna, G., & Subba Rao, M. (2007). Cereal non-cellulosic polysaccharides: structure and function relationship—an overview. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 47 (6), 599-610.
- Naidu, D. S., Hlangothi, S. P., & John, M. J. (2018). Bio-based products from xylan: A review. *Carbohydrate Polymers*, 179, 28-41.
- Nascimento, G. E. d., Baggio, C. H., Werner, M. F. D., Iacomini, M., & Cordeiro, L. M. (2016). Arabinoxylan from Mucilage of Tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.): Structure and Antinociceptive Effect in Mouse Models. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64 (6), 1239-1244

- Niño, M. G. , Carvajal, M. E. , Rascon, C. A. , Marquez, E. J., Guerrero, V. , & Salas, M. E. (2010). Feruloylated arabinoxylans and arabinoxylan gels: Structure, sources and applications. *Phytochemistry Reviews* , 9 (1), 111-120. doi: <https://doi.org/10.1007/s11101-009-9147-3>
- Paz, S. R., Rascón, C. A., Brown, B. F., Carvajal, M. E., Pedroza, M. M., Silva, C. E., & Lizar, M. J. (2018). Electrospray-assisted fabrication of coreshell arabinoxylan gel particles for insulin and probiotics entrapment. *Journal of Applied Polymer Science*, 135 (26), 46411.
- Peng, F., Peng, P., Xu, F., & Sun, R. C. (2012). Fractional purification and bioconversion of hemicelluloses. *Biotechnology Advances*, 30 (4), 879-903.
- Peng, X., Nie, S., Li, X., Huang, X., & Li, Q. (2019). Characteristics of the Water-and Alkali-Soluble Hemicelluloses Fractionated by Sequential Acidification and Graded-Ethanol from Sweet Maize Stems. *Molecules*, 24 (1), 212.
- Pérez, F. J. G., Contreras, L. E., Castañeda, O. A., Pérez, M. F., Aguilar, A. K., Álvarez, R. G. A., & Téllez, J. A. (2019). Physicochemical characterization of an arabinoxylan-rich fraction from brewers' spent grain and its application as a release matrix for caffeine. *Food Research International*, 116, 1020-1030.
- Radenkovs, V., Juhnēvica, R. K., Górnas, P., & Seglina, D. (2018). Non-waste technology through the enzymatic hydrolysis of agro-industrial by-products. *Trends in Food Science & Technology*, 77, 64-76.
- Rosicka, K. J., Komisarczyk, A., Nebesny, E., & Makowski, B. (2016). The influence of arabinoxylans on the quality of grain industry products. *European Food Research and Technology*, 242 (3), 295-303.
- Saulnier, L., Sado, P. E., Branlard, G., Charmet, G., & Guillon, F. (2007). Wheat arabinoxylans: exploiting variation in amount and composition to develop enhanced varieties. *Journal of Cereal Science*, 46 (3), 261-281.
- Sheikhi, P., & Petroudy, S. R. D. (2018). Comparative Study of Xylan Extracted by Sodium and Potassium Hydroxides (NaOH and KOH) from Bagasse Pulp: Characterization and Morphological Properties. *Journal of Polymers and the Environment*, 26 (9), 3710-3717.
- Singh, J. K., Vyas, P., Dubey, A., Upadhyaya, C. P., Kothari, R., Tyagi, V., & Kumar, A. (2018). Assessment of different pretreatment technologies for efficient bioconversion of lignocellulose to ethanol. *Frontiers in Bioscience (Scholar Edition)*, 10, 350-371
- Stoklosa, R. J., Latona, R. J., Bonnaille, L. M., & Yadav, M. P. (2019). Evaluation of Arabinoxylan Isolated from Sorghum Bran, Biomass, and Bagasse for Film Formation. *Carbohydrate Polymers*, 213, 382-392.
- Sun, X. F., Sun, R., Fowler, P., & Baird, M. S. (2005). Extraction and characterization of original lignin and hemicelluloses from wheat straw. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53 (4), 860-870.
- Tian, L., Gruppen, H., & Schols, H. A. (2015). Characterization of (glucurono) arabinoxylans from oats using enzymatic fingerprinting. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63 (50), 10822-10830.
- Van Craeyveld, V., Holopainen, U., Selinheimo, E., Poutanen, K., Delcour, J. A., & Courtin, C. M. (2009). Extensive dry ball milling of wheat and rye bran leads to in situ production of arabinoxylan oligosaccharides through nanoscale fragmentation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57 (18), 8467-8473.
- Xu, F., Liu, C., Geng, Z., Sun, J., Sun, R., Hei, B., & Je, J. (2006). Characterisation of degraded organosolv hemicelluloses from wheat straw. *Polymer Degradation and Stability*, 91 (8), 1880-1886.
- Yadav, M. P., Kale, M. S., Hicks, K. B., & Hanah, K. (2017). Isolation, characterization and the functional properties of cellulosic arabinoxylan fiber isolated from agricultural processing by-products, agricultural residues and energy crops. *Food Hydrocolloids*, 63, 545-551.

- Zhang, S., Li, W., Smith, C., & Musa, H. (2015). Cereal-derived arabinoxylans as biological response modifiers: extraction, molecular features, and immune-stimulating properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55 (8), 1035-1052
- Zhang, Z., Smith, C., & Li, W. (2014). Extraction and modification technology of arabinoxylans from cereal by-products: A critical review. *Food Research International*, 65, 423-436.
- Zhang, P., Wampler, J., Bhunia, A. K., Burkholder, K. M., Patterson, J. A., & Whistler, R. L. (2004). Effects of Arabinoxylans on Activation of Murine Macrophages and Growth Performance of Broiler Chicks. *Cereal Chemistry*, 81 (4), 511-514.
- Zhou, S., Liu, X., Guo, Y., Wang, Q., Peng, D., & Cao, L. (2010). Comparison of the immunological activities of arabinoxylans from wheat bran with alkali and xylanase-aided extraction. *Carbohydrate Polymers*, 81 (4), 784-789.