

Potencial de los residuos de papel como materia prima para la producción de bioetanol: revisión

Potential of paper waste as raw material for bioethanol production: review

DOI: 10.46932/sfjdv3n4-127

Received in: April 14th, 2022

Accepted in: June 30th, 2022

Rogelio Pérez Cadena

Dr. en Ciencias en Biotecnología

Institución: Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo (UPMH)

Dirección: Boulevard Acceso a Tolcayuca No. 1009, Ex Hacienda de San Javier, C.P. 43860,
Tolcayuca - Hidalgo, México

Correo electrónico: roperez@upmh.edu.mx

Alejandro Téllez Jurado

Dr. en Ciencias con especialidad en Microbiología Molecular

Institución: Universidad Politécnica de Pachuca (UPP)

Dirección: Carretera Pachuca-Cd, Sahagún, km 20, Ex Hacienda de Santa Bárbara, C.P. 43830,
Zempoala - Hidalgo, México

Correo electrónico: tejual@hotmail.com

Elizabeth González Escamilla

Maestría en Gestión y Auditorías Ambientales

Institución: Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo (UPMH)

Dirección: Boulevard Acceso a Tolcayuca No. 1009, Ex Hacienda de San Javier, C.P. 43860,
Tolcayuca - Hidalgo, México

Correo electrónico: egonzalez@upmh.edu.mx

Angélica Evelin Delgadillo López

Dra. en Ciencias Ambientales

Institución: Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo (UPMH)

Dirección: Boulevard Acceso a Tolcayuca No. 1009, Ex Hacienda de San Javier, C.P. 43860,
Tolcayuca - Hidalgo, México

Correo electrónico: adelgadillo@upmh.edu.mx

Gabino Espejo López

Dr. en Ciencias con especialidad en Física

Institución: Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo (UPMH)

Dirección: Boulevard Acceso a Tolcayuca No. 1009, Ex Hacienda de San Javier, C.P. 43860,
Tolcayuca - Hidalgo, México

Correo electrónico: gespejo@upmh.edu.mx

Andrés Salazar Texco

Maestría en eficiencia energética y Energías Renovables

Institución: Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo (UPMH)

Dirección: Boulevard Acceso a Tolcayuca No. 1009, Ex Hacienda de San Javier, C.P. 43860,
Tolcayuca - Hidalgo, México

Correo electrónico: asalazar@upmh.edu.mx

Cristian Sarmiento Gómez

Maestría en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables

Institución: Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo (UPMH)

Dirección: Boulevard Acceso a Tolcayuca No. 1009, Ex Hacienda de San Javier, C.P. 43860,
Tolcayuca - Hidalgo, México

Correo electrónico: csarmiento@upmh.edu.mx

RESUMEN

Actualmente los residuos de papel se reciclan de forma limitada, esta fracción de los residuos municipales contiene una fuente significativa de azúcares fermentables en forma de polisacáridos que podrían convertirse en etanol por fermentación. Algunos tipos de papel podrían no ser reutilizables o presentan limitaciones en su uso debido a sus propiedades. En países como México, la producción anual de papel y cartón equivale a 3.97 millones de toneladas que; teóricamente podrían generar 2.54 millones de toneladas equivalentes a glucosa fermentable y podría significar una producción de 1.63 millones de litros de etanol. Debido a que la composición del papel y los residuos de la industria del papel tienen fibras de celulosa, hemicelulosa y lignina en cantidades variadas, el pretratamiento y la hidrólisis químico-enzimático son importantes para mejorar el rendimiento. Adicionalmente, un factor a considerar en los pretratamientos es la carga de biomasa siendo un límite a superar el 6 % en función del tipo de residuo de papel a emplear.

Palabras clave: biomasa, bioetanol, residuos de papel, rendimiento, fermentación.

ABSTRACT

Currently paper waste is recycled to a limited extent; this fraction of municipal waste contains a significant source of fermentable sugars in the form of polysaccharides that could be converted to ethanol by fermentation. Some types of paper cannot be reused or have limitations on their use due to their properties. In countries like Mexico, the annual production of paper and cardboard is equivalent to 3.97 million tons; Theoretically they could generate 2.54 million tons of fermentable glucose equivalent and could mean a production of 1.63 million liters of ethanol. Because the composition of paper and waste from the paper industry has cellulose fibers, hemicellulose and lignin in varying amounts, pretreatment and chemical-enzymatic hydrolysis are important to improve performance. Additionally, a factor to consider in the pretreatments is the biomass load, being a limit to exceed 6% depending on the type of paper waste to be used.

Keywords: biomass, bioethanol, paper waste, yield, fermentation.

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los residuos municipales son un problema en el desarrollo de las ciudades. Uno de los principales constituyentes de este tipo de residuos es el papel (Vynios et al., 2009). Los materiales de papel pueden clasificarse como productos de uso múltiple, entre sus principales aplicaciones están: presentar información impresa, material de protección, empaque, entre otros. Se sabe que los productos de papel usados se reciclan de forma limitada debido a que las fibras se vuelven demasiado cortas y desgastadas para ser útiles al crear una nueva hoja de papel o caja de cartón (Zhang et al., 2015). Por ejemplo, el papel de oficina se convierte a papel de revista y de cartón a productos sanitarios (Ikeda et al., 2006), esto hace que al final de su vida útil se tiren o se incineren, lo que agrava aún más la contaminación ambiental (Varotkar, 2016).

Como materia prima para la producción de etanol lignocelulósico, el papel tiene algunas ventajas tales como: (1) los pretratamientos termo físicos de alta energía no son necesarios para mejorar la sacarificación enzimática porque los pretratamientos se han realizado previamente en la fabricación de papel; (2) el papel usado es abundante, barato y renovable (Nishimura et al., 2016). Por tanto, esta fracción perteneciente a los residuos municipales contiene una fuente significativa de azúcares fermentables que podrían convertirse en etanol y usarse como una fuente energética con beneficios ambientales (Franceschin et al., 2010). En el presente documento se hace una revisión del potencial teórico que tienen los diversos residuos de papel como sustrato para la sacarificación y su potencial transformación en bioetanol.

2 FUENTES DE PRODUCCIÓN DE RESIDUOS DE PAPEL

A nivel mundial la industria de la pulpa y el papel es de las industrias más importantes del mundo, con una producción de alrededor de 400 millones de toneladas de papel y cartón (Branco et al., 2018). Ocupa el 31% del mercado global de envases y son los más utilizados para el envasado de alimentos, el transporte y almacenamiento de envases primarios (Deshwal et al., 2019).

La producción anual de residuos sólidos en países como Nigeria es de alrededor de 25 millones de toneladas y los residuos de papel representan entre el 7.5 % y el 23.1% del total de residuos sólidos (Melekwe et al., 2016). En Malasia, se ha reportado que el 20 % de 7.34 millones de toneladas de residuos sólidos son principalmente papel desperdiciado y papel de desecho (Hossain et al., 2007). En Reino Unido se estimó que en 2019 se recolectó aproximadamente 4.7 millones de toneladas de papel y cartón, existiendo aun 3.5 millones de toneladas sin recolectar, de los cuales 2.5 millones de toneladas no se pueden recuperar para ser reciclado (WRAP, 2020). En México, para el 2017, la generación de residuos sólidos alcanzó 44.6 millones de toneladas, de los cuales el 14.2 % correspondieron a residuos de papel y sus derivados (SEMARNAT, 2019). De los 38, 431 kg/día de residuos reciclables que se reciben en centros de acopio en México, el 28.30 % corresponde al papel y cartón lo que equivale a 3.97 millones de toneladas anuales (SEMARNAT, 2020). Por tanto, el papel usado y el cartón son las principales fracciones celulósicas de los residuos sólidos urbanos tanto municipales como industriales (Annamalai et al., 2020; Wang et al., 2013). A su vez, el papel de desecho puede estar en varias categorías, como las revistas, el papel de oficina, el papel normal, periódicos antiguos, papeles impresos con láser, los exámenes, los libros entre otros (Chander Kuhad et al., 2010; Hossain et al., 2007; Saini et al., 2020). En general los materiales de papel pueden clasificarse como un producto de uso múltiple por la infinidad de usos que puede tener (Varotkar, 2016).

3 COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS DE PAPEL

Como parte de la biomasa lignocelulósica, el papel y los residuos de la industria del papel tienen principalmente fibras de celulosa, hemicelulosa y lignina en cantidades variadas, además de carbonato de calcio y algo de tinta generada a partir del mecanismo de despulpado o del proceso de reciclaje (Al-Azkawi et al., 2019) (Tabla 1). Dependiendo del tipo o fuente de obtención del residuo el componente principal del residuo de papel; es la celulosa, un homopolisacárido compuesto de β -D-glucosa (Vynios et al., 2009). La presencia de celulosa en los residuos de papel le confiere propiedades de formación de fibras, largas y paralelas. Por otro lado las hemicelulosas son responsables de la hidratación de la pulpa y de la unión de estas durante el proceso de batido y finalmente la lignina es un componente de unión natural de las células de la madera sin capacidad para formar fibras (Deshwal et al., 2019).

Tabla 1. Composición % (p/p) de los residuos de papel *

Tipo de papel	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Cenizas	Humedad	Fuente
Papel periódico	35-44	9-25	16-22	≈19	≈ 7.25	(Wang et al., 2013, Hossain et al., 2007, Annamalai et al., 2020, Byadgi & Kalburgi, 2016)
Papel usado	63.7	8.5-14	16.31	12.5	8.28	(Dubey et al., 2012, Tadmourt et al., 2020)
Cartón	49-61	12-16	14-18	7-14	4-6	(Wang et al., 2013)
Papel de oficina	52-62	5-14	1-15	≈ 30	≈ 5	Wang et al., 2013, Hossain et al., 2007, Annamalai et al., 2020 (Byadgi & Kalburgi, 2016, Franceschin et al., 2010)
Papel blanco	63.13-99	≈12	0-15	≈ 14	nd	(Franceschin et al., 2010)
Lodos de tratamiento de aguas residuales de plantas de celulosa y papel	51	12.8	1.9	nd	58.7	(Sebastião et al., 2016)
Papel reciclado (impreso)	53.07	nd	23.89	nd	4.07	(Brummer et al., 2014)
Pulpa de celulosa	93.10	nd	nd	0.05	4.12	
Fábrica de papel y celulosa kraft	40.9	11.5	21.3	32.2	73.8	(Gurram et al., 2015)
Papel de empaque	60	11	7	20	nd	(Hossain et al., 2007)
Servilletas	58	6	4	29	nd	
Revistas	34.35	13.56	14.19	nd	4.4	(Wang et al., 2013)
Promedio de las formas comunes de residuos de papel	57.22	12.04	11.5	19.28	5.98	Este documento

*intervalos estimados de los datos publicados por los autores, nd= no determinado

Chander Kuhad et al., (2010) encontró que el papel periódico contenía, α -celulosa (51.0 %), pentosanos (19.0 %), lignina (16.0%), humedad (8.0%) y cenizas (2.0 %). Estos datos se encuentran en el

intervalo mostrado en la tabla 1 para cada componente, donde se observó que el periódico contiene más de un 35 % de celulosa y un 9 % de hemicelulosas; mientras que el papel de oficina contiene un 52 % de celulosa. En contraste se puede observar que la pulpa de celulosa y el papel blanco se encuentra constituido principalmente por celulosa con hasta más de un 90 %. Por otro lado, la lignina presente en la composición de la biomasa de papel es variada, comprende de 0 hasta 30% de tal forma que papel de tipo oficina, papel blanco, papel de empaque y servilletas contienen una baja cantidad de lignina (<15%) (Tabla 1). Por otro lado, se ha reportado que el papel de fotocopidora prácticamente no contiene lignina ni hemicelulosas como resultado del extenso procesamiento durante la fabricación de pulpa y papel en la cual la lignina se disuelve para producir fibras individuales y que posteriormente se reforman en hojas de papel (Elliston et al., 2015). Por otro lado, en el papel usado, cartón y papel periódico su contenido de lignina es ligeramente superior al 16%, debido a que los grupos cromofóricos de la lignina son responsables del color de la pulpa y se pueden eliminar durante el blanqueo con cloro, dióxido de cloro o peróxido de hidrógeno (Tabla 1) (Deshwal et al., 2019). En general, si se considera la composición promedio de los residuos de papel más comunes; se tiene un 57.22 % de celulosa, 12.04 % de hemicelulosa, 11.5 % de lignina, 19.28 % de cenizas y hasta un 6 % de humedad. Estos polímeros que componen a los diferentes tipos de papel hacen de este, una fuente potencial de celulosa para el biorrefinado de segunda generación porque el proceso de fabricación del papel ha eliminado eficazmente el componente de lignina y la mayor parte de la hemicelulosa (Elliston et al., 2015). Por tanto, la composición de los residuos de papel podría ser de gran importancia para su aplicación como una fuente renovable para la producción de etanol.

Por otro lado, algunos tipos de papel podrían no ser reutilizables o presentan limitaciones en su uso como sustrato para la fermentación; debido a sus propiedades tales como la presencia de tinta, carga microbiana severa, resistencia a la humedad y otros factores inhibidores (Aghmashhadi et al., 2020). Si embargo, la tinta que se utiliza para imprimir en papeles es en su mayoría a base de carbono por lo que se puede eliminar fácilmente agregando ácido sulfúrico concentrado, generalmente con una concentración del 10% p/p podría transformar por completo la estructura de este componente del residuo de papel (Rajasekaran et al., 2014). En un estudio, Aghmashhadi et al., (2020) aplicó NaOH a diferentes concentraciones (1%, 2%, 3% y 4%) y en combinación con tratamientos ultrasónicos aplicados a un proceso de destintado obtuvieron buenos resultados. Chander Kuhad et al., (2010) mencionan que un tratamiento enzimático de celulasa puede destintado el papel de forma más eficiente, mientras que sistemas enzimáticos con xilanasas y lacasas su eficiencia disminuye considerablemente. El mismo proceso de destintado se ha aplicado a papel periódico con enzimas celulasas (15 PFU/g) y la isoenzima lacasa para el destintado de papel de exámenes con 150 UA/g (Saini et al., 2020).

4 OBTENCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE PAPEL

Las estimaciones revelan que, a nivel mundial, la producción de etanol celulósico de papel y cartón usados podría ascender a 82.9 mil millones de litros (Shi et al., 2009). Para la obtención de etanol, la hidrólisis enzimática se puede aplicar en diferentes niveles de integración del proceso: hidrólisis y fermentación separadas (SHF), sacarificación y fermentación simultáneas (SSF), sacarificación y cofermentación simultáneas (SSCF) principalmente (Buruiana et al., 2013). La sacarificación y cofermentación simultánea de azúcares hexosa y pentosa (SSCF) es un proceso similar a SSF excepto que la fermentación de las hexosas y pentosas ocurren en un solo paso. También se ha reportado que el rendimiento de la SSF se encuentra en el rango de 74 a 80% en base al glucano (Kang et al., 2010). La SSCF ofrece un potencial elevado para procesamiento más ágil y un costo de capital más bajo (J. Zhang & Lynd, 2010), comparado con la hidrólisis y fermentación separadas (SHF), donde se operan la sacarificación y la fermentación por separado. Sin embargo; el costo de la hidrólisis enzimática en SHF puede ser un gran obstáculo para la aplicación comercial (Wang et al., 2012). Por otro lado, con la tecnología SHF, cada etapa tiene lugar en condiciones óptimas de funcionamiento de pH y temperatura (Buruiana et al., 2013). Comparado con SSF, este último tiene como principales ventajas: i) obtener mayores rendimientos de etanol con una pequeña cantidad de enzimas; ii) incrementar la tasa de hidrólisis por conversión de azúcares; y iii) menor requisitos en condiciones estériles, porque la glucosa se elimina inmediatamente mediante la producción de bioetanol. En el proceso SSCF, la hidrólisis enzimática libera continuamente azúcares de hexosa, por lo que se fermentan más rápido y con mejores rendimientos (Buruiana et al., 2013). En estos casos, los microorganismos aptos para la fermentación de azúcares de los residuos de papel obtenidos como producto de hidrólisis enzimática deben de tener la capacidad de fermentar una amplia gama de sacáridos (Rocha et al., 2016). En general debe tener las siguientes características: crecimiento con requisitos nutricionales simples; tolerancia al pH ácido y/o altas temperaturas; rendimiento de etanol superior al 90% del valor teórico; tolerancia a altas concentraciones de etanol (40 g/L) y productividad superior a 10 g/L.h (Branco et al., 2018).

5 DETERMINACIÓN TEÓRICA DE PRODUCCIÓN DE ETANOL

En general, dependiendo de las condiciones experimentales, cantidades variadas de azúcares pueden ser liberados como resultado de la hidrólisis ácida o de un tratamiento enzimático (Lima et al., 2015). Un factor a considerar es la carga de biomasa en el tratamiento. Por encima del 15% (p/p), la absorción de agua por el papel da como resultado un sólido que requiere fuerzas muy altas para agitar y mezclar en comparación con los sustratos de primera generación por lo que los rendimientos esperados de glucosa se reducen a medida que aumenta la concentración de sustrato, por tanto; no se puede esperar que una carga del 15% (p/v) produzca más del 3.75% (p/v) de etanol (Elliston et al., 2013). Boshoff et al.,

(2016) mostró que para lodos de papel con cargas sólidas de 3 a 6% las mezclas se comportaban como un fluido pseudoplástico mientras que con pulpa virgen la viscosidad aumento hasta 6 veces. Los efectos de las cargas sólidas sobre la hidrólisis enzimática de los desechos papel de oficina y papel periódico fueron investigados por Annamalai et al., (2020) y los resultados sugirieron que el rendimiento de azúcar aumentó significativamente mientras que las cargas sólidas aumentaron del 1 al 3% y disminuyeron aún más con un 4%, obtenido un máximo con 3% (23.48 y 13.12 g/L) para los dos sustratos. Entonces, el contenido de bioetanol depende de las diversas composiciones del papel usado (Rajasekaran et al., 2014) y de la carga usada. En términos generales, a partir de la ecuación 1, es posible determinar la glucosa máxima teórica de un sustrato a partir del contenido de celulosa del material incluyendo un factor de 1.111 (tabla 2) (Elliston et al., 2015).

$$\text{Glucosa teórica} = (\text{masa de la muestra})(\text{porcentaje celulosa})(1.111) \quad \text{ecuación 1}$$

A partir del estimado teórico, se puede observar en la tabla 2 que, para una base de cálculo de 1 g, es posible obtener 0.9 g de glucosa empleando únicamente papel blanco, el cual como se describió previamente presenta cantidades mínimas de lignina y los pretratamientos pueden estar orientados a potencializar la cantidad de glucosa. Por otro lado, si se consideran los residuos de papel más comunes como materia prima principal, se estima que es posible generar 0.64 g de glucosa, lo que equivale al 71.11 % comparado con el papel blanco. A partir del estimado de residuos de papel y cartón que se generan en México, teóricamente se podrían generar 2.54 millones de toneladas equivalentes a glucosa fermentable lo cual podría significar una producción de 1.63 millones de litros de etanol.

Tabla 2. Estimación teórica máxima de glucosa y etanol a partir de residuos de papel.

Tipo de papel	Glucosa teórica máxima (g)	Etanol teórico máximo (g)
Papel periódico	0.44	0.22
Papel usado	0.71	0.36
Cartón	0.61	0.31
Papel de oficina	0.63	0.32
Papel blanco	0.90	0.46
Lodos de tratamiento de aguas residuales de plantas de celulosa y papel	0.57	0.29
Papel reciclado (impreso)	0.59	0.30
Pulpa de celulosa	1.03	0.53
Fábrica de papel y celulosa kraft	0.45	0.23
Papel de empaque	0.67	0.34
Servilletas	0.64	0.33
Revistas	0.38	0.20
Promedio de las formas comunes de residuos de papel	0.64	0.32

Rocha et al., (2016) menciona que, a gran escala, en condiciones óptimas para un pretratamiento ácido de residuos de papel, se puede obtener un rendimiento estimado de etanol de 163 Kg/1000 kg de papel de oficina de desecho, equivalente a 206 L/1000 kg de sustrato. En la tabla 2 se muestra el etanol máximo teórico que se puede obtener de los diversos tipos de residuos de papel calculados a partir de la ecuación 2 donde el factor de 1.111 tiene en cuenta el agua de hidrólisis y el 51.1% representa la cantidad de la glucosa que se convierte en etanol durante la fermentación (Elliston et al., 2015).

$$\text{Etanol teórico} = (\text{Masa de muestra})(\text{porcentaje de celulosa}) * 0.511 * 1.111 \quad \text{ecuación 2}$$

Para alcanzar altos rendimientos reales, es necesario seleccionar los microorganismos con capacidad de fermentar una amplia gama de sacáridos (Rocha et al., 2016). Al respecto, J. Zhang & Lynd, (2010) investigó la sacarificación y co-fermentación simultáneas (SSCF) de lodos de papel de desecho utilizando *Zymomonas mobilis* 8b y *Saccharomyces cerevisiae* RWB222 recombinantes fermentadores de xilosa, obteniendo más de 40 g / L de etanol con un rendimiento de 0.39 g/g para ambos microorganismos. De forma similar, se ha descrito que la fermentación de hidrolizado enzimático por lotes (14.64 g/L azúcares) produjeron 5.64 g/L de etanol con rendimiento y productividad de 0.39 g/g y 0.71 g/Lh respectivamente; después de 8 h de incubación. Adicionalmente, se observó que el hidrolizado enzimático en lote alimentado que contenía 38.21 g/L de azúcares, cuando fue fermentado con *S. cerevisiae*, produjo 14.77 g/L de etanol con rendimiento (0.39 g/g) y productividad (0.74 g/Lh), después de 20 h (Chander Kuhad et al., 2010). Adicionalmente Nishimura et al., (2016) encontró que el uso de una pre-sacarificación, sacarificación y fermentación simultánea (PSSF) logró un rendimiento de etanol de 91.8 % y una productividad de 0.53 g/(L h) con una concentración de etanol de 32 g/L y al operar el mismo sistema en lote alimentado se obtuvieron rendimientos de etanol del 75 al 81 % del máximo teórico con una disminución en la cantidad de enzimas utilizadas. Estos estudios muestran que cuando la SSF y el SSCF se hacen funcionar en modo de alimentación por lotes, la concentración de etanol en el caldo de fermentación aumenta, con dos consideraciones importantes, la concentración de etanol puede estar limitada por la tolerancia del microorganismo y un alto contenido de sólidos en el biorreactor puede crear efectos adversos sobre la reacción de celulasa y limitar la concentración de azúcares liberados (Kang et al., 2010).

6 CONCLUSIÓN

Como materia prima, el residuo de papel tiene algunas ventajas como sustrato para la fermentación debido a que pretratamientos de alta energía se han realizado previamente en su fabricación lo que garantiza una abaja cantidad de lignina. Al ser un residuo abundante, barato y renovable, a nivel mundial

y en países como México, el papel usado y el cartón son las principales fracciones celulósicas de los residuos sólidos urbanos tanto municipales como industriales susceptibles a ser tratados para la fermentación. De los 38,431 kg/día de residuos reciclables en México, el 28.30 % corresponde al papel y cartón lo que equivale a 3.97 millones de toneladas anuales. Considerando una composición promedio de los residuos de papel mas comunes se tiene un 57.22 % de celulosa, 12.04 % de hemicelulosa, 11.5 % de lignina principalmente, de los cuales teóricamente se podrían generar 2.54 millones de toneladas equivalentes a glucosa fermentable lo cual podría significar una producción de 1.63 millones de litros de etanol. Sin embargo; para alcanzar altos rendimientos en la fermentación, es necesario seleccionar microorganismos con capacidad de fermentar una amplia gama de sacáridos, los cuales combinados en procesos SSF y el SSCF operando en lote alimentado podría aumentar la concentración de etanol.

REFERENCIAS

- Aghmashhadi, O. Y., Asadpour, G., Garmaroody, E. R., Zabihzadeh, M., Rocha-Meneses, L., & Kikas, T. (2020). The Effect of Deinking Process on Bioethanol Production from Waste Banknote Paper. *Processes*, 8(12), 1563. <https://doi.org/10.3390/pr8121563>
- Al-Azkawi, A., Elliston, A., Al-Bahry, S., & Sivakumar, N. (2019). Waste paper to bioethanol: Current and future prospective. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 13(4), 1106–1118. <https://doi.org/10.1002/bbb.1983>
- Annamalai, N., Al Battashi, H., Anu, S. N., Al Azkawi, A., Al Bahry, S., & Sivakumar, N. (2020). Enhanced Bioethanol Production from Waste Paper Through Separate Hydrolysis and Fermentation. *Waste and Biomass Valorization*, 11(1), 121–131. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0400-0>
- Boshoff, S., Gottumukkala, L. D., van Rensburg, E., & Görgens, J. (2016). Paper sludge (PS) to bioethanol: Evaluation of virgin and recycle mill sludge for low enzyme, high-solids fermentation. *Bioresource Technology*, 203, 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.12.028>
- Branco, R., Serafim, L., & Xavier, A. (2018). Second Generation Bioethanol Production: On the Use of Pulp and Paper Industry Wastes as Feedstock. *Fermentation*, 5(1), 4. <https://doi.org/10.3390/fermentation5010004>
- Brummer, V., Jurena, T., Hlavacek, V., Omelkova, J., Bebar, L., Gabriel, P., & Stehlik, P. (2014). Enzymatic hydrolysis of pretreated waste paper – Source of raw material for production of liquid biofuels. *Bioresource Technology*, 152(2014), 543–547. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.11.030>
- Buruiana, C.-T., Garrote, G., & Vizireanu, C. (2013). Bioethanol production from residual lignocellulosic materials: A review- part 2. *The Annals of the University of Dunarea de Jos of Galati. Fascicle VI. Food Technology*, 37(1), 25–38. <http://search.proquest.com/openview/ebaa4dc71ee108423052a08e414f722f/1?pq-origsite=gscholar>
- Byadgi, S. A., & Kalburgi, P. B. (2016). Production of Bioethanol from Waste Newspaper. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 555–562. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.040>
- Chander Kuhad, R., Mehta, G., Gupta, R., & Sharma, K. K. (2010). Fed batch enzymatic saccharification of newspaper cellulose improves the sugar content in the hydrolysates and eventually the ethanol fermentation by *Saccharomyces cerevisiae*. *Biomass and Bioenergy*, 34(8), 1189–1194. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.03.009>
- Deshwal, G. K., Panjagari, N. R., & Alam, T. (2019). An overview of paper and paper based food packaging materials: health safety and environmental concerns. *Journal of Food Science and Technology*, 56(10), 4391–4403. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03950-z>
- Elliston, A., Collins, S. R. A., Wilson, D. R., Roberts, I. N., & Waldron, K. W. (2013). High concentrations of cellulosic ethanol achieved by fed batch semi simultaneous saccharification and fermentation of waste-paper. *Bioresource Technology*, 134, 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.084>
- Elliston, A., Wilson, D. R., Wellner, N., Collins, S. R. A., Roberts, I. N., & Waldron, K. W. (2015). Effect of steam explosion on waste copier paper alone and in a mixed lignocellulosic substrate on saccharification and fermentation. *Bioresource Technology*, 187, 136–143. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.089>
- Franceschin, G., Favaron, C., & Bertucco, A. (2010). Waste paper as carbohydrate source for biofuel production: An experimental investigation. In *Chemical Engineering Transactions* (Vol. 20, pp. 279–284). <https://doi.org/10.3303/CET1020047>

- Gurram, R. N., Al-Shannag, M., Lecher, N. J., Duncan, S. M., Singasaas, E. L., & Alkasrawi, M. (2015). Bioconversion of paper mill sludge to bioethanol in the presence of accelerants or hydrogen peroxide pretreatment. *Bioresource Technology*, *192*, 529–539. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.010>
- Hossain, N., Hoong, L. L., Barua, P., Soudagar, M. E. M., & Mahlia, T. M. I. (2007). *Enzymatic hydrolysis by Trichoderma reesei of diluted acid-pretreated wastepaper for bioethanol production*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-202497/v1>
- Ikeda, Y., Park, E., & Okuda, N. (2006). Bioconversion of waste office paper to gluconic acid in a turbine blade reactor by the filamentous fungus *Aspergillus niger*. *Bioresource Technology*, *97*(8), 1030–1035. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.04.040>
- Kang, L., Wang, W., & Lee, Y. Y. (2010). Bioconversion of Kraft Paper Mill Sludges to Ethanol by SSF and SSCF. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, *161*(1–8), 53–66. <https://doi.org/10.1007/s12010-009-8893-4>
- Lima, D. A., de Luna, R. L. N., Martín, C., & Gouveia, E. R. (2015). Comparison of bioethanol production from acid hydrolyzates of waste office paper using *saccharomyces cerevisiae* and *spathaspora passalidarum*. *Cellulose Chemistry and Technology*, *49*(56), 463–469.
- Melekwe, E., Lateef, S., & Ana, G. (2016). Bioethanol Production Potentials of Corn Cob, Waste Office Paper and Leaf of *Thaumatococcus daniellii*. *British Journal of Applied Science & Technology*, *17*(4), 1–10. <https://doi.org/10.9734/BJAST/2016/27101>
- Nishimura, H., Tan, L., Sun, Z.-Y., Tang, Y.-Q., Kida, K., & Morimura, S. (2016). Efficient production of ethanol from waste paper and the biochemical methane potential of stillage eluted from ethanol fermentation. *Waste Management*, *48*(2015), 644–651. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.051>
- Rajasekaran, R., Vijayaraghavan, G., & Marimuthu, C. (2014). Synthesis of bio-ethanol by *saccharomyces cerevisiae* using lignocellulosic hydrolyzate from pretreated waste paper fermentation. *International Journal of ChemTech Research*, *6*(14), 5638–5646.
- Rocha, J. M. T. S., Alencar, B. R. A., Mota, H. G., & Gouveia, E. R. (2016). Enzymatic Hydrolysis of Waste Office Paper for Ethanol. *Cellulose Chemistry and Technology*, *50*(2), 243–246.
- Saini, S., Chutani, P., Kumar, P., & Sharma, K. K. (2020). Development of an eco-friendly deinking process for the production of bioethanol using diverse hazardous paper wastes. *Renewable Energy*, *146*, 2362–2373. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.087>
- Sebastião, D., Gonçalves, M. S., Marques, S., Fonseca, C., Gírio, F., Oliveira, A. C., & Matos, C. T. (2016). Life cycle assessment of advanced bioethanol production from pulp and paper sludge. *Bioresource Technology*, *208*, 100–109. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.049>
- SEMARNAT. (2019). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, edición 2018*. (Vol. 1, Issue 1). <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/index.html>
- SEMARNAT. (2020). *Diagnóstico básico para la gestión de los residuos* (S. de M. A. y R. Naturales (ed.); Primera ed). www.gob.mx/semarnat
- Shi, A. Z., Koh, L. P., & Tan, H. T. W. (2009). The biofuel potential of municipal solid waste. *GCB Bioenergy*, *1*(5), 317–320. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2009.01024.x>
- Varotkar, P. (2016). Bioconversion of Waste Paper into Bio-Ethanol by Co-Culture of Fungi Isolated from Lignocellulosic Waste. *International Journal of Pure & Applied Bioscience*, *4*(4), 264–274. <https://doi.org/10.18782/2320-7051.2329>

Vynios, D. H., Papaioannou, D. A., Filos, G., Kariannidis, G., Tziala, T., & Lagios, G. (2009). Enzymatic production of glucose from waste paper. *BioResources*, 4(2), 509–521. <https://doi.org/10.15376/biores.4.2.509-521>

Wang, L., Sharifzadeh, M., Templer, R., & Murphy, R. J. (2013). Bioethanol production from various waste papers: Economic feasibility and sensitivity analysis. *Applied Energy*, 111(2012), 1172–1182. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.08.048>

Wang, L., Templer, R., & Murphy, R. J. (2012). High-solids loading enzymatic hydrolysis of waste papers for biofuel production. *Applied Energy*, 99(October 2012), 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.045>

WRAP. (2020). *Paper market; situation report; 2020*. <https://wrap.org.uk/resources/market-situation-reports/paper-2020>

Zhang, J., & Lynd, L. R. (2010). Ethanol production from paper sludge by simultaneous saccharification and co-fermentation using recombinant xylose-fermenting microorganisms. *Biotechnology and Bioengineering*, 107(2), 235–244. <https://doi.org/10.1002/bit.22811>

Zhang, Z., Macquarrie, D. J., De bruyn, M., Budarin, V. L., Hunt, A. J., Gronnow, M. J., Fan, J., Shuttleworth, P. S., Clark, J. H., & Matharu, A. S. (2015). Low-temperature microwave-assisted pyrolysis of waste office paper and the application of bio-oil as an AI adhesive. *Green Chemistry*, 17(1), 260–270. <https://doi.org/10.1039/C4GC00768A>