

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

TRATAMIENTO ANAEROBIO Y VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE NIXTAMALIZACIÓN DEL MAÍZ: UNA REVISIÓN

Montserrat Vázquez-López ¹
Ulises Emmanuel Jiménez-Ocampo ¹
* Iván Moreno-Andrade ¹

ANAEROBIC TREATMENT AND ENERGY RECOVERY OF WASTEWATER FROM THE CORN NIXTAMALIZATION PROCESS: A REVIEW

Recibido el 20 de mayo de 2022. Aceptado el 20 de septiembre de 2022

Abstract

In Mexico, the generation of wastewater from the corn nixtamalization industry (also named nejayote) is 14.4 million m³/year. This type of wastewater is characterized by an alkaline pH>10, high content of organic matter (33.2 gCOD/L on average), and a BOD₅/COD ratio of 0.4, indicating a high biodegradability through anaerobic biological processes with energy recovery. Dark fermentation and anaerobic digestion processes offer alternatives for using this residual water. In addition to stabilizing the residue, it generates value-added by-products such as volatile fatty acids, methane, hydrogen, and digestate. Few investigations have focused on the production of biogas from nejayote, reporting maximum yields of 282 mLCH₄/gCOD and 49.3 NmLH₂/gCOD, offering organic matter removal from 50% to 95% in terms of COD. The energy recovery of wastewater from nixtamalization has an energy potential that can reach up to 20.4 kWh/m³, which can be used to cover the energy requirements of the dynamic equipment and auxiliary services in the treatment, and the rest can be used in the industry.

Keywords: anaerobic digestion, dark fermentation, hydrogen, methane, nejayote.

¹ Laboratorio de Investigación en Procesos Avanzados para el Tratamiento de Aguas, Instituto de Ingeniería, Unidad Académica Juriquilla, Universidad Nacional Autónoma de México, Querétaro, México.

* *Autor correspondiente:* Laboratorio de Investigación en Procesos Avanzados para el Tratamiento de Aguas, Instituto de Ingeniería, Unidad Académica Juriquilla, Universidad Nacional Autónoma de México, Blvd. Juriquilla 3001, CP 76230, Querétaro, México. Email: IMorenoA@iingen.unam.mx

Resumen

La generación de aguas residuales de la industria de nixtamalización del maíz (conocida como nejayote) en México asciende a 14.4 millones de m³/año. Este tipo de aguas residuales se distinguen por tener un pH alcalino >10, alto contenido de materia orgánica (33.2 gDQO/L en promedio) y una relación DBO₅/DQO de 0.4, indicando que corresponde a un residuo con alta biodegradabilidad a través de su tratamiento por procesos biológicos anaerobios con valorización energética. En este sentido, la fermentación oscura y la digestión anaerobia son procesos que ofrecen alternativas de aprovechamiento de esta agua residual, ya que además de estabilizar el residuo, genera subproductos de valor agregado como los ácidos grasos volátiles, metano, hidrógeno y digestato. Pocas investigaciones se han centrado en la producción de biogás a partir del nejayote, reportando rendimientos máximos de 282 mLCH₄/gDQO y 49.3 NmLH₂/gDQO, remociones entre el 50% hasta el 95% en términos de DQO. La valorización energética del agua residual de la nixtamalización tiene un potencial energético que puede alcanzar hasta 20.4 kWh/m³, la cual puede ser utilizada para cubrir el requerimiento energético de los equipos dinámicos y servicios auxiliares dentro del tratamiento y el remante puede ser utilizado dentro del giro industrial.

Palabras clave: digestión anaerobia, fermentación oscura, hidrógeno, metano, nejayote.

Introducción

Desde el establecimiento de Mesoamérica entre los siglos XII y XV, las culturas prehispánicas y diversos grupos étnicos han utilizado el maíz como la base de su alimentación, siendo actualmente un producto esencial en las naciones modernas (Serna-Saldivar y Chuck-Hernández, 2019). En ese sentido, se han desarrollado amplias técnicas de siembra y aprovechamiento del maíz, una de ellas, es el proceso de *nixtamalización*, el cual consiste en sumergir los granos de maíz en una solución alcalina a una temperatura elevada obteniendo como producto el *nixtamal* (del náhuatl, que significa maíz cocido en agua con cal) que posterior a su molido, se obtiene masa de maíz la cual es empleada como materia prima para la elaboración de harinas, tortillas y otros productos alimenticios locales como tamales, atoles, y otros productos derivados (Serna-Saldivar, 2021).

En México se produce cada año 23 millones de toneladas de maíz destinados a semillas de siembra, consumo humano y pecuario (SAGARPA, 2017) en relación con la producción de tortilla se tiene un consumo per cápita de 75 kg/año (Pérez, 2018). España-Gamboa *et al.* (2018) indican que por cada tonelada de maíz procesada se generan 3 m³ de aguas residuales llamadas "nejayote", derivado del náhuatl *nextli* (ceniza) y *ayotl* (líquido). Por otra parte, Buitimae-Cantúa *et al.* (2020) reportan una generación de nejayote de 50 millones de m³/año. Este tipo de agua residual es producida en micro y pequeñas industrias e incluso en producción convencional rural, en donde existe una disposición final inadecuada, es decir, se descarga directamente al drenaje y en los casos rurales en la superficie de suelo, derivando impactos ambientales en los ecosistemas, cambios en la composición del suelo, contaminación en los mantos freáticos y en algunos casos la muerte de organismos acuáticos y terrestres (Chai *et al.*, 2021; Meena *et al.*, 2021; Ribas-Agustín *et al.*, 2017).

El nejayote de acuerdo con sus características puede ser valorizado, por ejemplo, contiene compuestos fenólicos los cuales se pueden extraer, estos se encuentran ligados a la hemicelulosa, celulosa y paredes celulares del pericarpio (estructura externa del grano de maíz). Los compuestos fenólicos son considerados productos de valor agregado y son utilizados en la industria farmacéutica como agentes antioxidantes y nutricionales (Buitimae-Cantúa *et al.*, 2020; Acosta-Estrada *et al.*, 2019). De igual forma se han aprovechado los sólidos insolubles presentes en el nejayote, los cuales contienen 45% de fibra dietética que es utilizada en la industria alimentaria para la producción de cereales, mejorando la actividad antioxidante y el contenido de fenólico, sin afectar las propiedades organolépticas del producto elaborado (Acosta-Estada *et al.*, 2014). Por otro lado, López-Maldonado y Oropeza-Guzmán (2021) indican que el nejayote contiene compuestos arabinosilanos ferulados con glucurónico, que tienen capacidad de funcionar como agentes coagulantes, floculantes y macroquelantes en el tratamiento de aguas residuales. Incluso Domínguez-Hernández *et al.* (2019) han utilizado el nejayote en combinación con estiércol de oveja para obtener fertilizantes orgánicos y emplearlo durante la siembra del maíz. También, el nejayote se ha utilizado como medio de cultivo para el crecimiento de microalgas como *Arthrospira máxima* y *Chlorella vulgaris*, utilizadas en la industria cosmética, nutricional y farmacéutica (López-Pacheco *et al.*, 2019). Por consiguiente, el objetivo de este artículo es establecer el estado del arte sobre el proceso de nixtamalización del maíz, la composición del nejayote, su aprovechamiento y valorización energética través de tratamientos biológicos anaerobios y la producción de productos de valor agregado como el metano (CH₄) e hidrógeno (H₂) para la producción de energía.

Proceso de nixtamalización del maíz

En la Figura 1 se plasma el diagrama de bloques del proceso de nixtamalización, el cual se encuentra dividido en cuatro etapas principales: cocción, almacenamiento temporal, separación y lavado del maíz. La cocción se realiza durante 35 minutos en promedio en un reactor a temperatura entre 80 y 95 °C, un pH de 10 a 14, con 5 L de agua/kg_{maíz procesado} y una adición de 10 a 50 g cal (hidróxido de calcio) /kg_{maíz procesado} (Del Angel-Acosta *et al.*, 2021; España-Gamboa *et al.*, 2018; Díaz-Montes *et al.*, 2018; Escalante-Aburto *et al.*, 2019).

Durante el almacenamiento temporal, el maíz cocido (*nixtamal*) permanece en reposo dentro del reactor entre 12-20 h, el tiempo de cocción dependerá de las tradiciones culturales y el tipo de maíz, el cual debe ser ablandado acorde al producto final a elaborar (Santiago-Ramos *et al.*, 2018). Durante el proceso de nixtamalización el grano de maíz absorbe agua en la cocción y el almacenamiento (primera y segunda etapa) en un 29 y 13 %, respectivamente. (Santiago-Ramos *et al.*, 2018). La tercera etapa radica en la separación del nixtamal y nejayote por decantación, este último integrado por 81% de agua y 19% de masa seca, conformada a su vez por el pericarpio, el cual se encuentra compuesto por fibra (10-30.1%), almidón (6.4-32%), proteínas (1.3-8.9%) y

calcio (0.1-5.7%) (Ramírez-Jiménez y Castro-Muñoz, 2020). En la cuarta etapa el nixtamal es lavado con exceso de agua con el fin de eliminar cal, olores y sabores no deseados, para finalmente ser molido ya sea en equipos industriales o bien por medios convencionales, conocidos como *metate*, este último utilizado en comunidades rurales para obtener como producto final la masa de maíz (Ramírez-Araujo *et al.*, 2019).

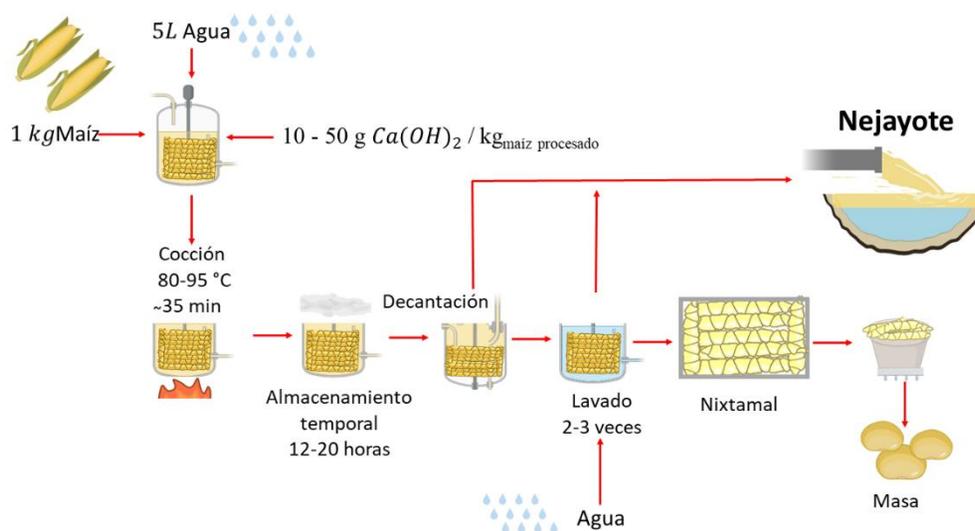


Figura 1. Diagrama de bloques del proceso de nixtamalización del maíz.

Caracterización fisicoquímica del nejayote

El nejayote tiene un pH > 10 (Del Angel-Acosta *et al.*, 2021) con una composición fisicoquímica diversa, que varía dependiendo de la raza de maíz procesado, en rangos de 37.8-55.7% de carbohidratos, 22.8-25.5% de fibras, 4.9-7.4% de proteínas y 0.4-1.5% de lípidos (Díaz-Montes y Castro Muñoz, 2022). Además, presenta importantes cantidades de materia orgánica biodegradable suspendida y disuelta de 2.5 y 22.3 g/L, respectivamente. Adicionalmente, contiene bajas cantidades de metales los cuales coadyuvar al crecimiento de microorganismos y la síntesis de proteínas (Wang *et al.*, 2021).

En la Figura 2 se muestra el nejayote generado en el proceso de nixtamalización del maíz amarillo para la elaboración de masa. Derivado de las características y composición fisicoquímica del nejayote, mostradas en la Tabla 1, con respecto a la disposición final de esta agua residual debe realizarse bajo requerimientos específicos, de acuerdo con la normatividad mexicana (NOM-001-SEMARNAT-2021), ya que contiene contaminantes (altos valores de DQO, SSV, entre otros) con valores superiores de 6% hasta 68% de acuerdo con los indicadores que define la comisión nacional del agua de México (CONAGUA, 2020).

Una de las estrategias para el tratamiento y disposición final del nejayote que utilizan las grandes industrias es combinar toda el agua residual y dirigirla a un tren de tratamiento, que remueve sólidos de gran tamaño, sólidos sedimentables, y mediante el proceso de lodos activados, la materia orgánica. En estos procesos convencionales de tratamiento tiene la finalidad de eliminar o estabilizar los contaminantes que contenga mediante cuatro etapas las cuales son pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario, en la que cada etapa tiene una función específica.

El pretratamiento se encarga de remover sólidos de gran tamaño ajenos a la composición del agua residual, el tratamiento primario remueve sólidos sedimentables y materia flotante como grasas y aceites, el tratamiento secundario (basado en procesos biológicos) consiste en remover compuestos solubles y coloidales, siendo principalmente la materia orgánica y finalmente en el tratamiento terciario se remueven contaminantes específicos ya sea remanentes de nutrientes y microorganismos patógenos (Crini y Lichtfouse, 2019). A pesar de esto, el tratamiento del nejayote por medio del proceso biológico como la digestión anaerobia tiene la ventaja de poder obtener su valorización energética por medio de la generación de biogás, minimizando el requerimiento de equipos dinámicos y estáticos, y costos de operación y mantenimiento.



Figura 2. Nejayote derivado del proceso de nixtamalización

Además, el nejayote es considerado como uno de los 20 sustratos prioritarios para la producción de biogás en México, debido a su alta disponibilidad, biodegradabilidad y su alto potencial energético que ofrece a través de procesos biológicos anaerobios (Harder *et al.*, 2020; Kang *et al.*, 2020) Asimismo, de acuerdo con los valores mostrados en la Tabla 1 tiene una relación DBO_5/DQO (indicador de biodegradabilidad) de un valor de 0.4, el cual indica una buena biodegradabilidad en relación con el valor óptimo de 0.5 (Andrio *et al.*, 2019). Hasta la fecha se ha reportado un buen potencial de producción de biogás con rendimientos de hasta $49.3 \text{ NmLH}_2/\text{gDQO}$ (Del Angel-Acosta *et al.*, 2021) y $282 \text{ mLCH}_4/\text{gDQO}$ mediante la digestión anaerobia (España-Gamboa *et al.*, 2018).

Tabla 1. Características fisicoquímicas del Nejayote

Parámetro	Valor	Unidades
pH	10-14	-
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	13.6 – 52.8	g/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	7.9-15.9	g/L
Temperatura	40-70	°C
Sólidos suspendidos totales	2.5	g/ L
Alcalinidad Total	0.2-3.3	g CaCO ₃ /L
Nitrógeno total	0.4	g/L
Nitrógeno Total Kjeldahl	0.4	g/L
Carbón Orgánico Total	8.7	g/L
Fenoles totales	0.6	g ácido gálico/L
Sólidos Totales	13.3-24.5	g/L
Sólidos Volátiles Totales	14-19.3	g/L
Sólidos Disueltos Totales	16.1-22.3	g/L
Carbohidratos totales	16.0	g/L
Azúcares reductores totales	0.2	g/L
Sulfato	0.2	g/L
Proteínas	1.3	g/L
Fosforo (P)	0.007-0.027	g/L
Cobalto (Co)	< 1x10 ⁻³	g/L
Calcio (Ca)	1.5	g/L
Molibdeno (Mo)	< 1x10 ⁻³	g/L
Potasio (K)	54.74x10 ⁻²	g/L
Azufre (S)	6.47x10 ⁻²	g/L
Magnesio (Mg)	9.9x10 ⁻³	g/L
Cobre (Cu)	< 1x10 ⁻³	g/L
Zinc (Zn)	1.6x10 ⁻³	g/L
Níquel (Ni)	< 1x10 ⁻³	g/L
Sodio (Na)	11.2x10 ⁻³	g/L
Hierro (Fe)	< 1x10 ⁻³	g/L
Manganeso (Mn)	< 1x10 ⁻³	g/L

Fuente: Adaptada de (Valderrama-Bravo et al., 2022; Del Angel-Acosta et al., 2021; García-Depraect et al., 2017; Valderrama-Bravo et al., 2012; Rosentrater, 2006).

Procesos biológicos anaerobios para el tratamiento del nejayote

El proceso de digestión anaerobia es un tratamiento biológico en ausencia de oxígeno que involucra cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis (fermentación), acetogénesis y metanogénesis, donde la materia orgánica es metabolizada como fuente de carbono por diferentes consorcios de microorganismos, generando biogás (22 MJ/kg), el cual es una alternativa para reemplazar los combustibles fósiles como el petróleo, carbón y gas natural. El biogás está compuesto principalmente por metano (50-60%), dióxido de carbono (38-48%) y trazas de otros compuestos como hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, amoníaco y sulfuro de hidrógeno (2%), (Yadav et al., 2022; Bolzonellaa et al., 2018; Indrawan et al.,

2018). El biogás representa valor agregado más allá del tratamiento del residuo, ya que su poder calorífico es suficiente para calentar, iluminar o producir electricidad de manera similar que con combustibles fósiles no renovables (Indrawan *et al.*, 2018). Adicionalmente, se genera un efluente llamado digestato, el cual, de acuerdo con su importante contenido de nitrógeno, fósforo y potasio, cubre las características de mejorador de suelo y fertilizante líquido orgánico (Parralejo *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2018; Xu *et al.*, 2018).

Con respecto a la fermentación oscura es una etapa intermedia del proceso de digestión anaerobia, en la que es posible producir H_2 por medio de la inhibición de los microorganismos metanogénicos (Strazzeria *et al.*, 2018; Zhou *et al.*, 2018). Los procesos de fermentación oscura y digestión anaerobia son sensibles a perturbaciones ambientales, responsables de modificar las rutas metabólicas involucradas de los diferentes grupos de microorganismos que trabajan en secuencia para la producción de hidrógeno y metano, por lo que es indispensable mantener un ambiente que ofrezca condiciones favorables para incrementar la eficiencia global de los procesos.

La generación de H_2 ocurre a partir de la fermentación de monosacáridos mediante la acción de bacterias fermentativas y por oxidación de ácidos grasos volátiles a través de bacterias homoacetogénicas (Meena *et al.*, 2020; Strazzeria *et al.*, 2018; Yang y Wang, 2018; Zhou *et al.*, 2018). Adicionalmente, se genera un efluente rico en ácido acético (precios en el mercado de 600 dólares americanos/ton, USD/ton), ácido propiónico (2000 USD/ton), ácido butírico (2163 USD/ton) y etanol (Cieciura-Włoch *et al.*, 2020; Dinesh *et al.*, 2018). Estos subproductos tienen un valor agregado, adicional al hidrógeno, los cuales pueden ser comercializados como insumos dentro de la industria farmacéutica, alimentaria o bien como sustrato para la producción de metano en combinación con el proceso de digestión anaerobia (Atsoy *et al.*, 2018; Karthikeyan *et al.*, 2018).

Actualmente las investigaciones sobre la producción de hidrógeno o metano a partir del nejayote son muy limitadas (España-Gamboa *et al.*, 2018). Del Angel-Acosta *et al.* (2021) evaluaron la capacidad de producción de H_2 por medio del proceso de fermentación oscura a partir de nejayote (30g DQO/L) con un inóculo tratado térmicamente (3 gSSV/L) en reactores en lote con un volumen de operación, tiempo de reacción, pH (ajustado) y una temperatura de 0.08 L, 21 h, 6 y 35°C, respectivamente. El análisis de la comunidad microbiana reveló la presencia de los géneros *Clostridium* y *Burkholderia* responsables de la producción de hidrógeno, alcanzando valores de 302 mL/día con una remoción de 20.4% en términos de DQO.

En la Tabla 2 se muestra las investigaciones relacionadas con el aprovechamiento del nejayote en combinación con un co-sustrato, alcanzando rendimientos desde 49.3 hasta 239.2 mL H_2 /gDQO, con una fracción de hidrógeno superior al 65% contenida en el biogás. Diversas investigaciones han establecido que la eficiencia, rapidez de reacción, producción, calidad, cantidad y rendimiento de biogás, se encuentran influenciados directamente por variables de proceso, las cuales definen las

rutas metabólicas de los microorganismos responsables de la producción de energía, destacando a la composición del sustrato, tipo y operación del reactor, tiempo de retención hidráulica (TRH), tiempo de retención de sólidos (TRS), carga orgánica, temperatura y pH, (Meena *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2019; Strazzeria *et al.*, 2018; Yang y Wang, 2018; Zhou *et al.*, 2018).

En la Tabla 3 se presentan las variables de proceso recomendadas para alcanzar la mejor producción de biogás mediante los procesos de digestión anaerobia y fermentación oscura.

Tabla 2. Producción de hidrógeno de nejayote en combinación con otro sustrato

Sustrato	pH	Alimentación (gDQO/L)	Tiempo de reacción (h)	Rendimiento (mLH ₂ /gDQO)	Productividad (mLH ₂ /Lr/h)	Volumen acumulado (mLH ₂)	%H ₂ (v/v)	Remoción (%DQO)	Referencia
V/N (80/20 ^a)	5.5	52.8	96.4	115 ^b 1.4 ^c 239.2	107	-	71	27.5	Gracia-Depraect <i>et al.</i> , 2017
V/N (80/20 ^a)	6.5 y 5.8 ^d	61.9	175	2.7 ^c 204.6	4.8	2516.5	68	19.8	García-Depraect <i>et al.</i> , 2019
V/N (80/20 ^a)		52.7	175	159.7	4.4	2315.1	71	27.5	Depraect <i>et al.</i> , 2019
ARC/N (35/65 ^e)	4.9	29.3	500	49.3	6.5	260	-	20.6	Del Angel-Acosta <i>et al.</i> , 2021

En los casos de estudio la temperatura de operación fue de 35°C y el tipo de operación de los reactores fue en lote. N: Nejayote; V: Vinazas; ARC: Aguas Residuales de Cervecería; a: Relación peso/peso (Vinaza/ Nejayote); b: NmLH₂/ gSV_{AGREGADO}; c: LH₂/LVINAZA AÑADIDO; d: Las primeras 29 horas se mantuvo el pH a 6.5 a partir de la hora 30 se manejó un valor del pH 5.8; e: Relación volumen/volumen (Aguas residuales de Cervecería/Nejayote).

Tabla 3. Parámetros de operación de la digestión anaerobia y fermentación oscura

Proceso	Digestión anaerobia		Fermentación oscura		
	Variable	Valor	Referencia	Valor	Referencia
pH		6.8 - 7.5	Zhang <i>et al.</i> , 2018	4.5 - 6.5	Cieciura-Włoch <i>et al.</i> , 2020; Dinesh <i>et al.</i> , 2018; Delavar y Wang, 2021
Tamaño de partícula		< 5 mm	Phun <i>et al.</i> , 2018	Menor a 5 mm	Castillo-Hernández <i>et al.</i> , 2015
Temperatura		20 - 40°C 50 - 80°C	Kumar y Samadder <i>et al.</i> , 2020	35 - 37°C 55 - 60°C	Zhang <i>et al.</i> , 2019; Yun <i>et al.</i> , 2018;
TRH		10 - 30 d	Buřkowska y Pokój, 2022	4 - 144 h	Jarunlumlert <i>et al.</i> , 2018; Moreno-Andrade <i>et al.</i> , 2015.
TRS		10 - 15 d	López <i>et al.</i> , 2017	16 - 60 d	Santiago <i>et al.</i> , 2019
Carga orgánica		1.2 - 15 g SV/L/d	Phun <i>et al.</i> , 2018	8 y 38 gSV/L/d 20 y 64 g DQO/L/d	De Gioannis <i>et al.</i> , 2013
		2.2 - 33.7 g DQO/L/d	Zhang <i>et al.</i> , 2019	Cerca de la sobrecarga	Torres-Zúñiga <i>et al.</i> , 2018; Dhanya <i>et al.</i> , 2020

Valorización energética del nejayote por producción de biogás

A partir del valor promedio de 33.2 g DQO/L reportado en la Tabla 1, se realizó una estimación del potencial energético del nejayote en un digester anaerobio convencional de 2.5 m³ de capacidad en estado estacionario. Dicho sistema se contempla para ser implementado a un nivel local, es decir, para incluirlo dentro del funcionamiento general microempresas de procesamiento de maíz (por ejemplo, tortillerías locales), la cual puede llegar a producir hasta 2 m³ de nejayote diariamente. El digester anaerobio considera una carga inicial de 28.9 kg DQO y una remoción de DQO del 70% como se ilustra en la Figura 3.

A partir de 23.2 kg DQO transformado a metano y a biomasa, considerando una fracción de metano de 70% contenida en el biogás, es posible la producción de 5.5 m³CH₄. El potencial energético del nejayote puede alcanzar hasta 20.4 kWh/m³. Cabe mencionar que la energía requerida para elevar la temperatura del sustrato a las condiciones mesofílicas establecidas en el proceso equivale a sólo el 22 % del total de energía generada por el sistema. Por lo anterior, se cuenta con una disponibilidad del 78% de energía en excedente, que puede ser utilizada para cubrir el requerimiento energético de los equipos dinámicos y servicios auxiliares que son indispensables para el funcionamiento del sistema de producción de metano como también direccionar la energía producida a otras actividades indispensables que se llevan a cabo dentro de las empresas como tortillerías, harineras, etc.

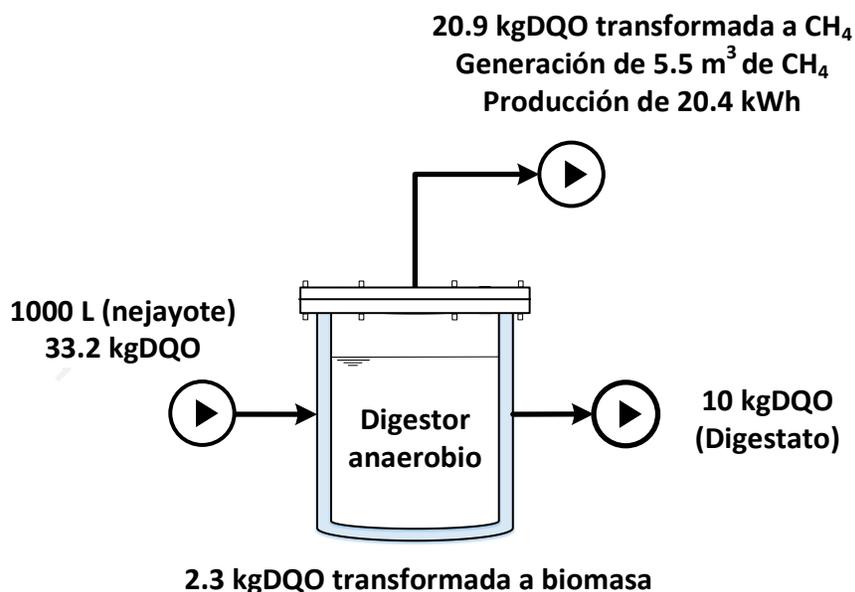


Figura 3. Balance másico del nejayote para la producción de metano

Los primeros estudios enfocados en el proceso de digestión anaerobia a partir del nejayote se centraron en el tratamiento del residuo sin centrarse en la optimización de la producción del biogás. Civit *et al.* (1984) estudiaron un sistema de producción de metano integrado por cinco reactores en cascada de lecho empacado con un volumen de trabajo de 23.3 L a una temperatura de 34°C, modificando los valores de TRH de 1 a 23 días, en la parte superior de cada reactor se almacenó y cuantificó el biogás generado. Se consideró una carga orgánica de alimentación de 0.5-1.7 kgDQO/m³/d, con la cual se logró una remoción del 92.6% en términos de DQO y una producción máxima de 60 L de biogás.

En el caso de González-Martínez *et al.* (1984) utilizaron un reactor anaerobio de mezcla completa, lodos activados, reactor de película fija aeróbica sumergida y un reactor de lecho empacado para remover la materia orgánica presente en el nejayote, logrando una remoción en términos de DQO de 31, 90, 68 y 91%, respectivamente. Lo anterior para establecer el tratamiento idóneo para este tipo de agua residual. Se identificó que el tratamiento con lodos activados es un proceso viable para el nejayote, ya que alcanzó la segunda mayor remoción de materia orgánica con un TRH de 2.5 días. Sin embargo, el tratamiento por medio de un reactor de lecho empacado, además al alto porcentaje de remoción de DQO, generó biogás con un porcentaje de CH₄ del 58%, es decir, además de la estabilización del agua residual se produce un gas con importante valor agregado.

La mayoría de las investigaciones se centran en el aprovechamiento del metano, pero en el caso de Ferreira-Rolón *et al.* (2014), utilizaron el dióxido de carbono generado en el proceso como pretratamiento para precipitar un 50% de calcio contenido en el nejayote, estableciendo que la actividad metanogénica puede descender 20 veces al no eliminarlo. La evaluación de la producción de metano se realizó en un reactor de flujo ascendente con un volumen de operación de 1.9 L inoculado con lodo granular con 28.8 gSSV/L a una temperatura, TRH y pH de 32°C, 1 y 8 días, respectivamente. Para lo anterior se diluyó el nejayote con agua residual municipal a diferentes cargas orgánicas (de 1 a 3 KgDQO/m³), alcanzando una productividad de biogás de 2.45 L/L_{reactor}/d con una fracción de metano del 0.8 y una remoción del 83% en términos de DQO. Lo anterior se logró debido a la aplicación de un pretratamiento, el cual consistió en la precipitación de calcio mediante el burbujeo con dióxido de carbono durante 35 minutos.

Por otra parte, España-Gamboa *et al.*, (2018) analizaron el incremento en la producción de metano a través del proceso de digestión anaerobia en dos etapas a partir del nejayote. La operación de la primera etapa se realizó en un reactor de columna empacada con un volumen de operación de 3 L como un pretratamiento para hidrolizar el nejayote y optimizar la fase acidogénica. El efluente de la primera etapa, con una carga orgánica de 1.9gDQO/L/d, fue alimentado a la segunda etapa, a un reactor de flujo ascendente para la producción de metano con un volumen de operación de 2.8 L,

operado bajo condiciones de temperatura, TRH y pH de 37°C, 9.2 días y 6.8-7.4, respectivamente. La operación del sistema en dos etapas alcanzó una remoción del 96% en términos de DQO, un rendimiento de 282 LCH₄/kgDQO y una fracción de metano de 0.84 contenida en el biogás.

Finalmente, Valero *et al.*, (2018) implementaron una estrategia que se plasma en la Tabla 4, la cual aumenta la producción de metano a partir del nejayote, adicionando carbón activado granular (GAC), para promover la transferencia directa de electrones entre bacterias del género *Geobacter*, *Proxilibacter*, *Bacteroides*, y *Syntrophomonas*. Logrando incrementar el rendimiento metano de 34% respecto la relación nejayote/inóculo y 54% inoculando el reactor con una biopelícula de CAG durante 10 días, alcanzando una remoción superior al 98% en términos de DQO.

Tabla 4. Producción de metano a partir de nejayote con la adición de un material conductor

Condición de experimentos	pH	Concentración de nejayote (gDQO/L)	Tipo de operación	Nivel de operación (L)	Rendimiento (LCH ₄ /KgSV)	% CH ₄	Remoción (% DQO)
¹ N/I/	7.3				222	64	96.6
¹ N/I/CAG	7.2	15443	Lote	0.11	297	71	98.0
¹ N/I/CAG ^f	7.3				342	77	98.6

N: Nejayote; I: Inóculo, CAG: Carbón Orgánico Granular; f: Antes de comenzar el experimento se realizó una incubación previa de 10 días. ¹ Valero *et al.*, 2018

Por lo anterior y a pesar de la limitada información existente, se ha demostrado la factibilidad de usar procesos biológicos anaerobios como estrategia para la valorización energética del nejayote. Estos procesos ofrecen remociones del 50% hasta el 95% en términos de DQO y fracciones de metano e hidrógeno de 0.91 y 0.71, respectivamente. El aprovechamiento de esta agua residual debe ser considerada en la inclusión a la economía circular, la cual está asociada a la transformación de residuos en nuevos productos de importante valor agregado (Pratt, 2022).

Es necesario explorar la implementación de diferentes estrategias para incrementar la producción energética como la codigestión con sustratos complementarios, adición de metales en concentraciones traza, adición de enzimas, optimización de parámetros de proceso o control automático por mencionar algunos (Alavi-Borazjani *et al.*, 2022).

Conclusiones

Generalmente, el agua residual del proceso de nixtamalización presenta valores altos de pH y DQO (superiores a 10 y 33.2 g/L, respectivamente) y al ser descargada inadecuadamente al drenaje y al suelo sin ningún tratamiento previo, provoca problemas de contaminación de mantos freáticos y en algunos casos muerte de organismos acuáticos y terrestres.

Sin embargo, existe limitada información sobre tratamiento y la posible valorización energética del nejayote a través del proceso de digestión anaerobia. Se han logrado establecer rendimientos de hasta 282 mLCH₄/gDQO y 49.3 mLH₂/gDQO, con una remoción de DQO del 95%, y fracciones de metano e hidrógeno contenidas en el biogás de 0.91 y 0.71, respectivamente. El potencial energético del nejayote, puede alcanzar hasta 20.4 kWh/m³ utilizando procesos complementarios, por lo que es necesario establecer estrategias de aprovechamiento y atender directamente la problemática social y ambiental que representa el nejayote, ofreciendo alternativas de mejora en la eficiencia, rapidez de reacción y calidad de biogás para su futura valorización generalizada tanto a nivel industrial como en microempresas de la transformación del maíz.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de la DGAPA-UNAM a través del proyecto IN102722.

Referencias bibliográficas

- Acosta-Estrada, B. A., Gutiérrez-Urbe, J. A., Serna-Saldívar, S. O. (2014) Bound phenolics in foods, a review. *Food Chemistry*, **152**, 46–55. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.093>
- Acosta-Estrada, B. A., Villela-Castrejón, J., Perez-Carrillo, E., Gómez-Sánchez, C. E., Gutiérrez-Urbe, J. A. (2019) Effects of solid-state fungi fermentation on phenolic content, antioxidant properties and fiber composition of lime cooked maize by-product (nejayote). *Journal of Cereal Science*, **90**, 102837. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.102837>
- Alavi-Borazjani, S. A., Capela, I., Tarelho, L. A. (2020) Over-acidification control strategies for enhanced biogas production from anaerobic digestion: A review. *Biomass and Bioenergy*, **143**, 105833. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105833>
- Andrio, D., Asmura, J., Yenie, E., Putri, K. (2019) Enhancing BOD₅/COD ratio co-substrate tofu wastewater and cow dung during ozone pretreatment, *MATEC Web of Conferences*, **276**, 06027. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201927606027>
- Atasoy, M., Eyice, O., Schnürer, A., Cetecioglu, Z. (2019) Volatile fatty acids production via mixed culture fermentation: Revealing the link between pH, inoculum type and bacterial composition. *Bioresource Technology*, **292**, 121889. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121889>
- Bolzonellaa, D., Battistaa, F., Cavinato, C. (2018) Recent developments in biohythane production from household food wastes: A review, *Bioresource Technology*, **257**, 311-319. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.092>

- Buitimea-Cantúa, N. E., Antunes-Ricardo, M., Gutiérrez-Urbe, J. A., del Refugio Rocha-Pizaña, M., de la Rosa-Millán, J., Torres-Chávez, P. I. (2020). Protein-phenolic aggregates with anti-inflammatory activity recovered from maize nixtamalization wastewaters (nejayote), *LWT*, **134**. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109881>
- Bułkowska, K., Pokój, W. M. R., (2022) Enhancement of biogas production from cattle manure using glycerine phase as a co-substrate in anaerobic digestion, *Fuel*, **317**, 123456. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123456>
- Castillo-Hernández, A., Mar-Alvarez, I., Moreno-Andrade, I. (2015) Start-up and operation of continuous stirred-tank reactor for biohydrogen production from restaurant organic solid waste, *Hydrogen Energy*, **40**(48), 17239-17245. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.046>
- Castro-Muñoz, R., Fíla, V., Durán-Páramo, E. (2017) A Review of the Primary By-product (Nejayote) of the Nixtamalization During Maize Processing: *Potential Reuses, Waste and Biomass Valorization*, **10**(1), 13–22. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0029-4>
- Chai, W. S., Tan, W. G., Halimatul Munawaroh, H. S., Gupta, V. K., Ho, S. H., Show, P. L. (2021) Multifaceted roles of microalgae in the application of wastewater biotreatment: A review. *Environmental Pollution*, **269**, 116236. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116236>
- Cieciura-Włoch, W., Borowski, S., Otlewska, A. (2020) Biohydrogen production from fruit and vegetable waste, sugar beet pulp and corn silage via dark fermentation, *Renewable Energy*, **153**, 1226-1237. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.085>
- Civit, E., De Bazúa, C. D., Engelmann, G., González, S., Hartmann, L. (1984) Anaerobic treatment of maize processing wastewater (Nejayote) in a packed bed reactor cascade. *Environmental Technology Letters*, **5**(1–11), 89-96. <https://doi.org/10.1080/09593338409384257>
- CONABIO Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2022) Fecha de publicación: 25 de marzo del 2022. Nixtamalización; la vía para aumentar el valor nutricional del maíz <https://www.facebook.com/CONABIO/videos/993576254867896>
- CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2021) Razas de maíz de México, 08 de octubre del 2021, Fecha de acceso: 02 febrero del 2021. Disponible en: <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/maices/razas-de-maiz>
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua (2015) *Monitoreo de la Calidad del Agua en México*. 08 junio del 2015 Fecha de acceso 02 de noviembre 2021. Disponible en <https://www.gob.mx/conagua/documentos/monitoreo-de-la-calidad-del-agua-en-mexico>
- Crini, G., Lichtfouse, E. (2019) Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, **17**, 145–155. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9>
- Delavar, M.A., Wang, J. (2021) Numerical investigation of pH control on dark fermentation and hydrogen production in a microbioreactor, *Fuel*, **292**, 120355. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120355>
- De Gianninis, G., Muntoni, A., Poletti, A. (2013) A review of dark fermentative hydrogen production from biodegradable municipal waste fractions, *Waste Management*, **33**(6), 1345-1361. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.02.019>
- Del Angel-Acosta, Y. A., Alvarez, L. H., Garcia-Reyes, R. B., Carrillo-Reyes, J., Garcia-Gonzalez, A., Meza-Escalante, E. R. (2021) Co-digestion of corn (nejayote) and brewery wastewater at different ratios and pH conditions for biohydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*, **46**(54), 27422-27430. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.208>
- Dhanya, B., Mishra, A., Chandel, A. K., Verma, M. L. (2020) Development of sustainable approaches for converting the organic waste to bioenergy, *Science of The Total Environment*, **723**, 138109. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138109>
- Díaz-Montes, E., Barragán-Huerta, B.E., Yáñez-Fernández, J. (2018) Identification and Evaluation of Antioxidant Activity of Hydroxycinnamic Acids Extracted by Ultrafiltration from Three Varieties of Mexican Maize, *Waste Biomass Valorization*, **11**, 1799–1808. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0420-9>

- Díaz-Montes, E., Castro-Muñoz, R. (2022) Analyzing the phenolic enriched fractions from Nixtamalization wastewater (Nejayote) fractionated in a three-step membrane process. *Current Research in Food Science*, **5**, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.crf.2021.11.012>
- Dominguez-Hernández, M. E., Zepeda-Bautista, R., Dominguez-Hernandez, E., Valderrama-Bravo, M. D. C., Hernández-Simón, L. M. (2019) Effect of lime water – manure organic fertilizers on the productivity, energy efficiency and profitability of rainfed maize production. *Archives of Agronomy and Soil Science*, **66**(3), 370–385. doi: <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1616287>
- Elbeshbishy, E., Ranjan Dhar, B., Nakhla, Lee, H.-S. (2017) A critical review on inhibition of dark biohydrogen fermentation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **79**, 656-668. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.075>
- Escalante-Aburto, A., Mariscal-Moreno, R. M., Santiago-Ramos, D., Ponce-García, N. (2019) An Update of Different Nixtamalization Technologies, and Its Effects on Chemical Composition and Nutritional Value of Corn Tortillas. *Food Reviews International*, **36**(5), 456–498. <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1649693>
- España-Gamboa, E., Domínguez-Maldonado, J. A., Tapia-Tussell, R., Chale-Canul, J. S., Alzate-Gaviria, L. (2018) Corn industrial wastewater (nejayote): a promising substrate in Mexico for methane production in a coupled system (APCR-UASB), *Environmental Science and Pollution Research*, **25**(1), 712-722. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0479-z>
- Ferreira-Rolón, A., Ramírez-Romero, G., Ramírez-Vives, F. (2020). Granular sludges methanogenic activity increase due to CO₂ bubbling calcium precipitation over nejayote. *Revista Mexicana De Ingeniería Química*, **13**(2), 517-525.
- García-Depraect, O., Gómez-Romero, J., León-Becerril, E., López-López, A. (2017) A novel biohydrogen production process: Co-digestion of vinasse and Nejayote as complex raw substrates using a robust inoculum, *International Journal of Hydrogen Energy*, **42**(9), 5820–5831. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.204>
- García-Depraect, O., Rene, E. R., Gómez-Romero, J., López-López, A., León-Becerril, E. (2019) Enhanced biohydrogen production from the dark co-fermentation of tequila vinasse and nixtamalization wastewater: Novel insights into ecological regulation by pH, *Fuel*, **253**, 159–166. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.147>
- Gokfiliz-Yildiz, P., Karapinar, I. (2018) Optimization of particle number, substrate concentration and temperature of batch immobilized reactor system for biohydrogen production by dark fermentation, *International Journal of Hydrogen Energy*, **43**(23), 10655-10665. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.036>
- González-Martínez, S. (1984). Biological treatability of the wastewaters from the alkaline cooking of maize (Indian corn). *Environmental Technology Letters*, **5**(1–11), 365–372. <https://doi.org/10.1080/09593338409384287>
- Harder, B., Noyola, A., Durán-Hinojosa, U., Moreno-Andrade, I., Morgan-Sagastume, J. M., Alariste-Mondragón, F., López-Hernández, J. E., Ramírez-Higareda, B. L., Castro-Martínez, M., Leyva-Huitrón, R. (2020) *Feedstock database for biogas in Mexico*. Fecha de acceso 13 agosto 2021. Disponible en https://ibtech.com.mx/uploads/medios/Feedstock%20database_final_230419.pdf
- Indrawan, N., Thapa, S., Wijaya, M. E., Ridwan, M., Park, D. H. (2018) The biogas development in the Indonesian power generation sector, *Environmental Development*, **25**, 85–99. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2017.10.003>
- Jarunglumert, T., Prommuak, C., Putmai, N. (2018) Scaling-up bio-hydrogen production from food waste: Feasibilities and challenges, *International Journal of Hydrogen Energy*, **43**(2), 634-648. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.013>
- Kang, J. N., Wei, Y. M., Liu, L. C., Han, R., Yu, B. Y., Wang, J. W. (2020) Energy systems for climate change mitigation: A systematic review, *Applied Energy*, **263**, 114602. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114602>
- Karthikeyan, O. P., Trably, E., Mehariya, S., Bernet, N., W.C. Wong, J., Carrere, H. (2018) Pretreatment of food waste for methane and hydrogen recovery: A review, *Bioresource Technology*, **249**, 1025-1039. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.105>

- Kumar, A., Samadder, S. (2020) Performance evaluation of anaerobic digestion technology for energy recovery from organic fraction of municipal solid waste: A review, *Energy*, **197**, 117253. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117253>
- Dinesh, G.K., Chauhan, R., Chakma, S. (2018) Influence and strategies for enhanced biohydrogen production from food waste, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **92**, 807-822. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.009>
- Li, L., Peng, X., Wang, X., Wu, D. (2018) Anaerobic digestion of food waste: A review focusing on process stability, *Bioresource Technology*, **248**, 20-28. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.012>
- López, E., Ramírez, B., Bayer, C. (2017). *Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales*. 1a edición, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GIZ GMBH. México, 240. 47-65.
- López-Maldonado, E. A., Oropeza-Guzmán, M. T. (2021) Nejayote biopolyelectrolytes multifunctionality (glucurono feruloylated arabinoxylans) in the separation of hazardous metal ions from industrial wastewater, *Chemical Engineering Journal*, **423**, 130210. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130210>
- López-Pacheco, I. Y., Carrillo-Nieves, D., Salinas-Salazar, C., Silva-Núñez, A., Arévalo-Gallegos, A., Barceló, D., Afewerki, S., Iqbal, H. M., Parra-Saldívar, R. (2019) Combination of nejayote and swine wastewater as a medium for *Arthrospira maxima* and *Chlorella vulgaris* production and wastewater treatment, *Science of The Total Environment*, **676**, 356–367. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.278>
- Meena, M., Yadav, G., Sonigra, P., Shah, M. (2021) A comprehensive review on application of bioreactor for industrial wastewater treatment, *Letters in Applied Microbiology*, **74**(2), 131–158. <https://doi.org/10.1111/lam.13557>
- Meena, R. A. A., Rajesh Banu, J., Yukesh Kannah, R., Yogalakshmi, K. (2020) Biohythane production from food processing wastes - Challenges and perspectives, *Bioresource Technology* **298**, 122449. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122449>
- Moreno-Andrade, I., Carrillo-Reyes, J., Santiago, S. G., Bujanos-Adame, M. C. (2015). Biohydrogen from food waste in a discontinuous process: Effect of HRT and microbial community analysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, **40**(48), 17246-17252. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.084>
- Parralejo, A., Royano, L., González, J., González, J. (2019) Small scale biogas production with animal excrement and agricultural residues, *Industrial Crops and Products*, **131**, 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.01.059>
- Pérez; R. L. S. (2018) *GRUMA: Inicio de cobertura Septiembre/2018*, Grupo Financiero Monex, 10pp, 05 de septiembre del 2018, México, Fecha de acceso 14 diciembre 2021; Disponible en: [https://www.monex.com.mx/portal/download/reportes/Inicio%20de%20Cobertura%20de%20Gruma%20\(Septiembre%202018\).pdf](https://www.monex.com.mx/portal/download/reportes/Inicio%20de%20Cobertura%20de%20Gruma%20(Septiembre%202018).pdf)
- Phun, C., Lim, L. Y., Lee, C. T. (2018) The characterisation and treatment of food waste for improvement of biogas production during anaerobic digestion – A review, *Journal of Cleaner Production*, **172**, 1545-1558. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.199>
- Pratt, A. C. (2022) Toward circular governance in the culture and creative economy: Learning the lessons from the circular economy and environment. *City, Culture and Society*, 100450. <https://doi.org/10.1016/j.ccs.2022.100450>
- Ramírez-Araujo, H., Gaytán-Martínez, M., Reyes-Vega, M. L. (2019) Alternative technologies to the traditional nixtamalization process: Review. *Trends in Food Science & Technology*, **85**, 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.12.007>
- Ramírez-Jiménez, A. K., Castro-Muñoz, R. (2020) Emerging techniques assisting nixtamalization products and by-products processing: an overview, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **61**(20), 3407–3420. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1798352>

- Ribas-Agustí, A., Martín-Belloso, O., Soliva-Fortuny, R., Elez-Martínez, P. (2017) Food processing strategies to enhance phenolic compounds bioaccessibility and bioavailability in plant-based foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **58**(15), 2531–2548. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1331200>
- Rosentrater, K. A. (2006) A review of corn masa processing residues: Generation, properties, and potential utilization. *Waste Management*, **26**(3), 284–292. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.03.010>
- SAGARPA, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2017) *Planeación agrícola nacional 2017-2030*, 28pp, 14 de septiembre del 2017, México. Fecha de acceso: 25 de enero del 2022; Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura/acciones-y-programas/planeacion-agricola-nacional-2017-2030-126813>
- Santiago, S. G., Morgan-Sagastume, J. M., Monroy, O., Moreno-Andrade, I. (2019) Biohydrogen production from organic solid waste in a sequencing batch reactor: An optimization of the hydraulic and solids retention time, *International Journal of Hydrogen Energy*, **45**(47), 25681–25688. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.224>
- Santiago-Ramos, D., Figueroa-Cárdenas, J. D. D., Mariscal-Moreno, R. M., Escalante-Aburto, A., Ponce-García, N., Véles-Medina, J. J. (2018) Physical and chemical changes undergone by pericarp and endosperm during corn nixtamalization-A review, *Journal of Cereal Science*, **81**, 108–117. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.04.003>
- SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2022) *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021*, Diario Oficial de la Federación, viernes 11 de marzo 2022.
- Serna-Saldivar, S. O. (2021) Understanding the functionality and manufacturing of nixtamalized maize products. Sergio O. Serna-Saldivar (EdS) *Journal of Cereal Science*, **99**, 103205. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103205>
- Strazzera, G., Battista, F., Herrero Garcia, N., Frison, N., Bolzonella, D. (2018) Volatile fatty acids production from food wastes for biorefinery platforms: A review, *Journal of Environmental Management*, **226**, 278–288. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.039>
- Torres-Zúñiga, I., Villa-Leyva, A., Vargas, A. B. (2018) Experimental validation of online monitoring and optimization strategies applied to a biohydrogen production dark fermenter, *Chemical Engineering Science*, **190**, 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.05.039>
- Valderrama-Bravo, C., Fuentes-Prado, E., Porras-Godínez, M., Ramírez-Ortiz, M., Reyna-Granados, M., Gutiérrez-Cortez, E. (2022) Mechanical separation of a nixtamalization by-product (nejayote) and scaling of filtration conditions from a pilot filter to a press filter of higher área, *Journal of Food Engineering*, 111058. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111058>
- Valderrama-Bravo, C., Gutiérrez-Cortez, E., Contreras-Padilla, M., Rojas-Molina, I., Mosquera, J. C., Rojas-Molina, A., Beristain, F., Rodríguez-García, M. E. (2012) Constant pressure filtration of lime water (nejayote) used to cook kernels in maize processing. *Journal of Food Engineering*, **110**(3), 478–486. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.12.018>
- Valero, D., Rico, C., Canto-Canché, B., Arturo Domínguez-Maldonado, J., Tapia-Tussell, R., Cortes-Velazquez, A., Alzate-Gaviria, L. (2018) Enhancing Biochemical Methane Potential and Enrichment of Specific Electroactive Communities from Nixtamalization Wastewater using Granular Activated Carbon as a Conductive Material, *Energies*, **11**(8), 2101. <https://doi.org/10.3390/en11082101>
- Wang, S., Wang, J., Li, J., Hou, Y., Shi, L., Lian, C., Shen, Z., Chen, Y. (2021) Evaluation of biogas production potential of trace element-contaminated plants via anaerobic digestion. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **208**, 111598. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111598>
- Xu, F., Lia, Y., Gea, X., Yang, L., Li, Y. (2018) Anaerobic digestion of food waste – Challenges and opportunities, *Bioresource Technology* **247**, 1047–1058. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.020>
- Yadav, M., Joshi, C., Paritosh, K., Thakur, J., Pareek, N., Masakapalli, S. K., Vivekanand, V. (2022) Organic waste conversion through anaerobic digestion: A critical insight into the metabolic pathways and microbial interactions, *Metabolic Engineering*, **69**, 323–337. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2021.11.014>

- Yang, G., Wang, J. (2018) Various additives for improving dark fermentative hydrogen production: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **95**, 130-146. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.029>
- Yun, Y.-M., Lee, M.-K., Im, S.-W., Marone, A., Trably, E., Shin, S.-R. (2018) Biohydrogen production from food waste: Current status, limitations, and future perspectives, *Bioresource Technology*, **248**, 79-87. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.107>
- Zhang, D., Strawn, M., Novak, J. T., Wang, Z.-W. (2018) Kinetic modeling of the effect of solids retention time on methanethiol dynamics in anaerobic digestion, *Water Research*, **138**, 301-311. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.035>
- Zhang, L., Loh, K.-C., Zhang, J. (2019) Enhanced biogas production from anaerobic digestion of solid organic wastes: Current status and prospects, *Bioresource Technology Reports*, **5**, 280-296. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.07.005>
- Zhou, M., Yan, B., Wongc, J. W., Zhang, Y. (2018) Enhanced volatile fatty acids production from anaerobic fermentation of food waste: A mini-review focusing on acidogenic metabolic pathways, *Bioresource Technology*, **248**, 68-78. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.121>
- Valderrama-Bravo, C., López-Ramírez, Y., Jiménez-Ambríz, S., Oaxaca-Luna, A., Domínguez-Pacheco, A., Hernández-Aguilar, C., Moreno-Martínez, E. (2015) Changes in chemical, viscoelastic, and textural properties of nixtamalized dough with nejayote, *LWT - Food Science and Technology*, **61**(2), 496-502. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.12.038>