

Aprovechamiento energético del Nejayote y bagazo de cerveza, para el impulso de la simbiosis industrial como herramienta del modelo de economía circular

Ing. José Raúl Sánchez Ramírez^a, Dr. Ricardo López Zavala^a, Dra. Mydory Oyuky Nakasima López^{b*}, Ing. Daniel Alfredo Ortiz Torres^a, Dra. Sukey Sayonara Nakasima López^b, Dr. Nicolás Velázquez Limón^b

^a Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, raul.sanchez94@uabc.edu.mx; rlopez99@uabc.edu.mx; daniel.alfredo.ortiz.torres@uabc.edu.mx; nicolas.velazquez@uabc.edu.mx;

Mexicali, Baja California, México.

^b Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, nakasima.mydory@uabc.edu.mx*; snakasima@uabc.edu.mx; Tijuana, Baja California, México.

Resumen

El modelo de economía lineal ha ocasionado un crecimiento proporcional entre la generación de productos y residuos, resultando en un modelo no sostenible, dejando en segundo término al medio ambiente y el aspecto social. La economía circular es un modelo que tiene como finalidad ampliar la vida de los recursos explotados en una línea de producción, reutilizándolos y/o aplicándolos a otros procesos; es decir, se puede aplicar una sinergia de residuos entre industrias y obtener resultados favorecedores en conjunto, tal es el caso de la Simbiosis Industrial (SI). En México existen dos industrias con potencial para implementar una SI, debido a su alta demanda de consumo y generación de residuos. Estas industrias son las del maíz y la cerveza, generadoras de Nejayote (agua residual) y Bagazo de cerveza (residuo sólido orgánico) en sus respectivos procesos de producción. Los tratamientos para estos residuos se han venido estudiando de forma separada, los cuales se basan principalmente en procesos mecánicos, químicos y biológicos. Por lo que, en este artículo se propone llevar a cabo una SI de estos residuos, a través de un tratamiento biológico basado en el proceso de co-digestión anaeróbica (Co-DA), donde los residuos pasan a ser subproductos aprovechables para un nuevo proceso de conversión energética que abastecería a los distintos procesos de producción (nixtamalización y cerveza).

Palabras clave— Bagazo de cerveza, Co-digestión Anaeróbica, Economía Circular, Nejayote y Simbiosis Industrial.

Abstract

The linear economy model has caused a proportional growth between the generation of products and waste, resulting in an unsustainable model, leaving the environment and the social aspect in second place. The circular economy is a model that aims to extend the life of the resources exploited in a production line, reusing them and/or applying them to other processes; that is, a synergy of waste can be applied between industries and obtain favorable results as a whole, such is the case of Industrial Symbiosis (IS). In Mexico there are two

industries with the potential to implement an IS, due to their high demand for consumption and waste generation. These industries are the corn and beer industries, which generate Nejayote (wastewater) and Bagasse (organic solid waste) in their respective production processes. The treatments for these wastes have been studied separately, which are mainly based on mechanical, chemical and biological processes. Therefore, this article proposes to carry out a SI of these wastes, through a biological treatment based on the process of anaerobic co-digestion (Co-DA), where the wastes become usable by-products for a new energy conversion process that would supply the different production processes (nixtamalization and beer).

Keywords— Anaerobic Co-digestion, Beer Bagasse, Circular Economy, Industrial Symbiosis, Nejayote.

1. INTRODUCCIÓN

El modelo de economía lineal ha ocasionado una constante generación de residuos, ya que se basa en el uso de recursos naturales, transformación, consumo de productos y desecho de los mismos, provocando el deterioro de los ecosistemas. Una de las causas principales de este deterioro ambiental, se debe a que los procesos de producción han generado una acumulación excesiva de residuos y explotado de manera descontrolada recursos finitos como el agua y combustibles fósiles; los cuales aún no han podido ser regenerados en un lapso de tiempo más corto del que han sido utilizados [1].

Por lo tanto, el modelo de economía lineal no es sostenible, ya que solamente se centra en la producción en masa y el aspecto económico, dejando en segundo término al medio ambiente y el aspecto social. Por otro lado, existe un modelo económico que tiene como base la sostenibilidad, y es conocido como el modelo de economía circular.

La economía circular es un modelo que tiene como finalidad ampliar la vida de los recursos explotados en una línea de producción, reutilizándolos y/o aplicándolos a otro proceso; es decir, se puede aplicar una sinergia de residuos entre industrias y obtener resultados favorecedores en conjunto, tal es el caso de la Simbiosis Industrial (SI). La SI se puede definir como el “intercambio físico de materiales, energía, agua y subproductos” entre diferentes entidades [2]. Esta herramienta ha sido aplicada mayormente en Europa mostrando procesos más eficientes, reduciendo el desperdicio y aumentando la efectividad y uso sostenible de los recursos [3, 4, 5]. En los últimos años, el modelo de economía circular y la SI se han posicionado como alternativas para la disminución de las problemáticas ambientales y promover un aprovechamiento máximo de los recursos [6].

Un ejemplo en donde se aplica la SI entre más de dos industrias es la ciudad de Kalundborg en Dinamarca. Esta SI se base en el aprovechamiento de desechos, en el que una planta eléctrica vende vapor a una refinería y a una industria farmacéutica de la ciudad. A su vez, la energía térmica de los generadores de la planta eléctrica, es utilizada para

calefacción de los edificios de la ciudad. Respecto al uso de agua, la planta eléctrica (hidroeléctrica) redujo el consumo de agua en un 60% debido a cambiar el uso de agua superficial por aguas tratadas [7].

Otra aplicación de SI, es la que se desarrolló en el 2015, entre un relleno sanitario que utiliza el biogás generado como combustible, con un cultivo de microalgas. En esta SI se aprovechan los gases de CO₂, generados en la combustión del biogás obtenido de pozos del relleno sanitario, para el desarrollo de las microalgas [8]. Con lo anterior se mitiga la emanación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a la vez que se reducen los costos del cultivo de microalgas.

Si bien, la SI es una alternativa para la mejora de aspectos económicos, energéticos y ambientales, no todas las industrias son compatibles para llevar a cabo una sinergia adecuada de sus subproductos. Por lo que, para poder llevar a cabo una SI, se requiere la investigación, análisis y/o experimentación de los subproductos y procesos, con la finalidad de obtener información que permita visualizar la viabilidad de las propuestas de sinergias industriales. Además de lo anterior, se puede analizar cuáles son las SI que más se han implementado y su impacto. Tal es el caso de un artículo enfocado en una investigación exhaustiva de casos de SI en todo el mundo. En el artículo se menciona que existen bases de datos que muestran casos de SI y número de sinergias existentes; estas bases de datos resultaron de los proyectos MAESTRI, SCALER y EPOS [9]. Gracias a ello, identificaron 179 sinergias exitosas, relacionadas con el agua, las cuáles las dividieron en 6 categorías, 1) Recursos hídricos alternativos compartidos; 2) Tratamiento compartido de aguas residuales; 3) Recuperación de agua; 4) Recuperación de energía del agua; 5) Recuperación de materiales del agua; 6) Intercambio de materiales para la mejora del tratamiento de aguas [9]. Lo anterior, muestra que la implementación de la SI es una alternativa para cuidar el recurso hídrico, debido al uso responsable de este líquido vital.

2. JUSTIFICACIÓN

En México existen dos industrias con potencial para implementar una SI con un enfoque de tratamiento de recurso hídrico, debido a su alta demanda en la población y a su alta generación de residuos. Estas industrias son las del maíz y la cerveza, generadoras de Nejayote (agua residual) y Bagazo de cerveza (residuo sólido orgánico).

Particularmente en la industria del maíz se lleva a cabo el proceso de nixtamalización, el que consiste en el pre-tratamiento térmico (cocción parcial del grano en una solución de agua con hidróxido de cal) para la limpieza del maíz. El agua utilizada para este proceso absorbe nutrientes tanto del grano de maíz, como de la cal utilizada en la solución, formando así, una de las aguas residuales con mayor carga orgánica, conocida como Nejayote.

La carga orgánica puede ser medible a partir de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la cual se define como la cantidad de materia apta para oxidación, sea orgánica o

inorgánica (se mide en mg/L), representando el nivel de contaminación del agua. En ese sentido existe una clasificación realizada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en la cual catalogan los diferentes niveles de calidad del agua, dependiendo del DQO. Para considerar que el agua está en condiciones excelentes, el valor de DQO debe ser menor a 10 mg/L. El Nejayote ha sido reportado por diferentes autores desde 9,000 a 53,000 mg/L aproximadamente [11, 12, 13, 14], lo que demuestra que el Nejayote, presenta una elevada DQO, por ende, implica un problema severamente grave para el medio ambiente.

La producción de maíz a nivel mundial en el 2021, de acuerdo a datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), fue de 1,210.235 millones de toneladas en el año, representando un crecimiento de hasta 618.215 millones de toneladas durante 20 años [15]. El total de producción de maíz en México en el año 2021, fue de 27.503 millones de toneladas, donde aproximadamente, el maíz amarillo fue de 3.15 millones de toneladas, el blanco de 24.235 millones de toneladas y el grano pozolero de 25,646.21 toneladas [16]. En Baja California México, la producción total de maíz fue de 26,270.62 toneladas en el año 2021, dónde Mexicali figura como el municipio con mayor porcentaje del total, siendo el 99.84% (el restante le corresponde a Ensenada). En el mismo año, Mexicali contó con producción de 2,600.41 toneladas de maíz amarillo, 23,627.09 toneladas de maíz blanco [16]. En la Tabla 1 se puede visualizar los datos de producción de maíz anteriormente mencionados.

Tabla 1. Producción de Maíz en 2021.

	Mundial	México	Baja California	Mexicali
Maíz Amarillo	-	3.15 millones de toneladas	-	2,600.41 toneladas
Maíz Blanco	-	24.235 millones de toneladas	-	23,627.09 toneladas
Pozolero	-	25,646.21 toneladas	-	-
Total	1,210.235 millones de toneladas	27.503 millones de toneladas	26,270.62 toneladas*	26,227.5 toneladas

Fuente: Elaboración propia a partir de [16]. * Mexicali (99.84%) y Ensenada (0.16%).

Es importante mencionar que para que el maíz sea consumido debe pasar por un proceso de nixtamalización [17]. Según Niño-Medina et al., [18], una instalación básica para el proceso de nixtamalización, con una capacidad de entrada de 50 kg de maíz por día, requiere de una cantidad de 75 litros

de agua al día. Por lo que la generación de Nejayote depende de la cantidad procesada de maíz en el proceso de nixtamalización. Considerando las equivalencias anteriormente mencionadas se realizó una estimación propia, reflejando que, en el año 2021, a partir de la nixtamalización del maíz blanco producido, México generó 36,352.5 millones de litros de nejayote. A su vez, la producción estimada de nejayote producido en Mexicali, fue de 35,440,635 litros, lo que demuestra ser una problemática real y compleja respecto a contaminación y tratamiento del recurso hídrico.

Por otro lado, en la industria cervecera, se utiliza grano de malta pre triturado en combinación con agua. El grano lleva un proceso de cocción, en donde el agua absorbe los azúcares del grano, el cual ya no se vuelve a utilizar en el proceso, y se convierte en grano gastado (bagazo de cerveza), siendo un residuo de producción.

La industria cervecera estima que, por cada 1,000 toneladas de producto, se generan 137-173 toneladas de residuo, las cuáles se dividen en bagazo de cerveza, turbio de mosto y levadura de desecho [19]. El bagazo de cerveza, es el residuo con mayor porcentaje de generación en la industria cervecera, siendo el 85% [20]. En el 2021, México generó 134.7 millones de hectolitros de cerveza, lo que representa 1,576,424.41 toneladas de bagazo de cerveza [21]. Se estima que la generación de cerveza irá en aumento en los próximos años, ya que la tasa de crecimiento en el 2022 fue del 13.5% en comparación con 2020 [21]. Con estos datos, se puede visualizar que, si no se tiene la disposición adecuada del bagazo de cerveza, la generación de GEI irá en aumento y por lo tanto, se incrementará la contaminación ambiental.

El presente artículo tiene como finalidad presentar una alternativa de SI entre el proceso de nixtamalización y de producción de cerveza. Para llevar a cabo lo anterior se propone un tratamiento por Co-DA de sus residuos (nejayote y bagazo de cerveza), con la finalidad de obtener beneficios que apoyen al desarrollo sostenible y así, promover un modelo de economía circular.

3. CONTENIDO

3.1. METODOLOGÍA

Este estudio consiste en realizar una búsqueda bibliográfica sobre los diferentes tipos de tratamientos que lleva a cabo el Nejayote y el Bagazo de Cerveza. Lo anterior tiene la finalidad de identificar si existen tratamientos que puedan tratar de manera simultánea ambos residuos o bien que tratamientos se pueden utilizar para realizar una SI. La búsqueda bibliográfica se realizó en las principales bases de datos científicas como Science Direct, Scopus, Web of Science, Google Scholar, entre otras. Por otra parte las palabras utilizadas para la búsqueda de la información fueron “Nejayote”, “Nixtamalización”, “Cervecería”, “Bagazo de Cerveza”, “Co-Digestión Anaeróbica” y “Tratamiento de Aguas Residuales”.

3.2. TRATAMIENTOS CONVENCIONALES DEL NEJAYOTE

3.1.1 Tratamientos mecánicos

El método mecánico más utilizado para el tratamiento del Nejayote es el de filtración. Este proceso consiste hacer pasar el Nejayote a través de una membrana, la cual retiene los sólidos, permitiendo el paso del agua con menor cantidad de contaminantes sólidos. Para el tratamiento del Nejayote, los procesos de filtración a partir de celdas (cedazos), tienen una efectividad de reducción de contaminantes cercana al 50%. Por otro lado, el método de filtración tiene como finalidad reutilizar el permeado final (agua tratada) del proceso, pero a su vez, los sólidos extraídos del Nejayote se han sometido a análisis para ver posibles potenciales usos en otros sectores. Por ello, se han utilizado métodos de filtrado más eficientes, siendo el caso de la ultrafiltración, el cual se lleva a cabo a través de distintas etapas, con la finalidad de extraer una mayor cantidad de sólidos, con la finalidad de someterlos a posteriores análisis en la búsqueda de alternativas de aprovechamiento. Se ha encontrado que los sólidos extraídos del Nejayote, son aptos para formulaciones de cereales, aportando ciertos nutrientes a alimentos como panes, tortillas, galletas, entre otros [22, 23]. También los sólidos obtenidos de los procesos de filtración pueden ser aprovechados en el sector farmacéutico, como antioxidantes [24, 25, 26]. Sin embargo, la infraestructura a nivel industrial puede ser más costosa, debido a las diferentes etapas de filtración requeridas para la reducción de sólidos (implicaría un inminente mantenimiento por la incrustación de sólidos) además de que se utilizan procesos como centrifugado, que requiere de aireación, que resultará en un alto consumo de energía.

3.1.2 Tratamiento químico

Este procedimiento consiste en la reacción de un agente químico junto a los sólidos encontrados en el Nejayote, llevando a cabo un fenómeno coagulante y floculante, donde los sólidos se unen, permitiendo que su extracción por filtración sea menos compleja. Se ha mencionado que, con la implementación de métodos químicos, la reducción de contaminantes puede llegar a ser del 70% [27]. Por ejemplo, en un estudio presentado en el 2016, se utilizó quitosano para el tratamiento de Nejayote y se realizó una evaluación del costo-beneficio de este tratamiento. Se reportó que el costo del quitosano fue de 18 dólares/día en un proceso de nixtamalización básico de alrededor de 250 litros de agua al día [11]. Sin embargo, en general, el costo operativo debido a la implementación de sustancias químicas y de sistemas de filtración, puede elevar el costo de este tipo de tratamientos.

También existe un tratamiento químico con aplicaciones eléctricas, utilizando una celda de electrocoagulación que flocula los sólidos y hace más fácil su extracción a partir de sedimentación. Este tratamiento ha mostrado una eficiencia de eliminación de contaminantes de 98% [28]. Sin embargo, este procedimiento se realizó a escala laboratorio y no se ha

mostrado los costos operativos de dicho tratamiento a escala industrial.

3.1.3 Tratamientos Biológicos

Se trata de procesos naturales de la degradación de materia orgánica a partir de microorganismos que se encuentran en los residuos. Se han utilizado distintas técnicas para el tratamiento del Nejayote, las cuáles se mencionan a continuación:

Aeróbicos

Este tipo de tratamiento se lleva a cabo a partir de la degradación de materia orgánica, llevada a cabo por microorganismos que requieren de la presencia de oxígeno. Los productos obtenidos son biomasa y CO₂. Normalmente este tipo de procesos se aplican para tratamiento de aguas residuales de baja concentración de contaminación (DQO < 1000 mg/L) [29].

Se realizó un estudio para el tratamiento de Nejayote a partir de un proceso aeróbico con biorreactores de columna de burbujas (reacción gas-líquido). Para mantenerlo estable le agregaron sustancias (sulfato y fosfato) con las cuáles se mostraron una eficiencia de remoción de contaminantes máxima de 87.6% [30]. Se menciona que si bien, el agua tratada requiere de un proceso de purificación para su reutilización, la cantidad de contaminantes es considerablemente menor, es decir, que el post-tratamiento será menos complejo que empezando con el total de contaminantes. Sin embargo, dado que el Nejayote, presenta una alta carga orgánica, los métodos aeróbicos pueden llegar a ser muy costosos, además de generar grandes volúmenes de lodos aeróbicos, los cuales requieren de un tratamiento para su disposición.

Microalgas

El tratamiento a partir de microalgas se basa en la capacidad de estas para absorber contaminantes que para las microalgas cumplen una función de alimento. Los resultados de estos cultivos son la obtención de polímeros y una mejor calidad de agua. En 2019 se realizó un estudio de caso, dónde a partir de un cultivo de microalgas se realizó la combinación sinérgica de nejayote con aguas residuales porcinas para el tratamiento de ambos residuos, donde se obtuvo como resultado la reducción de contaminación en un 96% [13]. Esta efectividad muestra viable este procedimiento para el tratamiento del Nejayote, sin embargo, ubicar juntas una industria porcina con una industria alimentaria que lleva a cabo un proceso de nixtamalización, puede no ser la mejor opción, debido al tipo de residuos generados en las granjas porcinas. Lo anterior, lleva al supuesto de que alguno de los dos residuos tenga que ser transportado hacia otro sitio, lo que incrementa los costos operativos, disminuyendo la pertinencia de este tratamiento.

Digestión Anaeróbica

La Digestión Anaeróbica (DA) es un proceso natural en el que un conjunto de bacterias degrada la materia orgánica (residuo orgánico) en ausencia de oxígeno, obteniendo como resultado efluentes aprovechables como un biocombustible gaseoso y fertilizantes orgánicos. A su vez, también se tiene la alternativa de la Co-Digestión Anaeróbica (Co-DA), mismo proceso de la DA pero entre dos o más fuentes residuales, donde las propiedades de cada uno se complementan entre sí. Existen estudios que aplican la Co-DA de Nejayote con agua residual de cervecería y con Vinaza respectivamente con la finalidad de producir Biohidrógeno [31, 32]. Sin embargo, las eficiencias de eliminación de contaminantes de estos estudios fueron bajas, debido a que no se completó el proceso anaeróbico para buscar la producción de biogás. Por otro lado, el rendimiento de la Co-DA, depende de que las propiedades fisicoquímicas de los residuos mantengan una sinergia positiva para asegurar una adecuada generación de biogás.

Por ejemplo, un estudio presentado en 2014, en el que se lleva a cabo una Co-DA de Nejayote, junto a un inóculo de lodos granulares obtenidos de una planta de tratamiento de aguas residuales de una industria de alimentos. A partir de esa Co-DA, con un añadido de precipitado de Calcio, se reportó una eliminación de contaminantes superior al 90% [33], mostrando un claro beneficio de sinergia de residuos como alternativa de tratamiento de residuos orgánicos con alto contenido de humedad.

Otro estudio realizado en 2020, concluyó que la Co-DA entre lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales junto a bagazo de cerveza es más eficiente en comparación con la DA, respecto a producción de biogás [38]; además de diversas ventajas del bagazo, que aportan a la sinergia con los lodos, como su alta carga orgánica, presencia de sales minerales, vitamina B, aminoácidos y relación de C/N beneficiosa.

Por lo anterior se menciona entonces que para que la Co-DA sea eficiente y viable para la aplicación de una SI, se debe encontrar una Co-DA de residuos con propiedades afines entre sí.

En la Tabla 2, se presentan las principales ventajas y desventajas de los tratamientos del Nejayote. Si bien, los tratamientos químicos y mecánicos se presentan como eficientes en la eliminación de contaminantes, resultan tener costos elevados a través del tiempo debido al constante mantenimiento y costo operativo debido a la compra de productos químicos y uso de filtros para llevar a cabo el tratamiento. Cabe mencionar, que estos tratamientos no tienen degradación de materia, por lo que implica que se debe buscar otro proceso para utilizar los sólidos removidos; lo anterior muestra que se ha tratado el problema en el agua, pero no en cuanto al tratamiento de los sólidos presentes. Por otro lado, las microalgas también resultan tener un método de extracción de biomasa complejo, debido a que requieren de métodos igual de costosos que de los tratamientos mecánicos y químicos.

La implementación de los procesos de DA y Co-DA, dependiendo de la tecnología implementada, pueden presentar una inversión inicial elevada. Sin embargo, el funcionamiento de estas tecnologías requiere de menos energía, respecto a los tratamientos mecánicos y químicos. Además, la DA y Co-DA son procesos que transforman la materia orgánica en un biocombustible gaseoso y en dos bioabonos sólido y líquido. El biogás puede producir energía eléctrica o térmica; y los bioabonos son productos que sirven para devolver nutrientes a la tierra. Estas características permiten que, derivado de su implementación, sea posible tener reducción de costos en la operación y una recuperación de la inversión inicial. Por lo anterior, las implementaciones de estos procesos claramente representan el modelo de economía circular y SI.

Tabla 2. Ventajas y Desventajas de los tratamientos de nejayote.

Tipo de tratamiento		Ventajas	Desventajas
Mecánico (filtración)		1)Eficiencia de eliminación de contaminantes.	1) Alto costo de operación y mantenimiento, debido al reemplazo de filtros, alto consumo energético del sistema de bombeo y aireación.
		2)Sólidos aprovechables para otros sectores (alimentos y farmacéuticos).	2) No se enfoca en la degradación de la materia orgánica.
Químico (Coagulante)		1)Eficiencia de eliminación de contaminantes.	1) Alto costo debido al uso de sustancias químicas, así como costos asociados al sistema de filtración. 2) No se enfoca en la degradación de la materia orgánica.
Biológicos	Digestión aeróbica	1)Eficiencia de descomposición de residuos orgánicos.	1)Inversión inicial elevada. 2)Alto costo operativo 3) No produce Biogás.
	DA y Co-DA	1)Bajo costo operativo. 2)Producción de biogás, bio-abono sólido y líquido. 3)El post-tratamiento de agua es más viable (menor cantidad de sólidos).	1)Inversión inicial elevada. 2)Análisis fisicoquímico de las combinaciones de residuos.
	Microalgas	1)Alta eficiencia de eliminación de contaminantes. 2)Productos aprovechables en otros sectores.	1)Los procedimientos de cosecha son complejos.

Fuente: Elaboración propia de [11, 13, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 32].

3.2. TRATAMIENTOS CONVENCIONALES DE BAGAZO DE CERVEZA

El bagazo de cerveza, por ser el residuo del proceso de producción cervecera que se produce en mayor cantidad, se han buscado alternativas para su aprovechamiento, con la finalidad de evitar que sean dispuestos en vertederos, ya que esto implica el aumento en la emanación de GEI [34].

Aprovechamiento en el sector salud

El bagazo de cerveza ha sido estudiado para analizar sus potenciales usos en distintos sectores de la salud. Uno de ellos se enfoca en compuestos bioactivos, beneficiosos para la salud humana, actuando como antioxidantes, anti alergénicos, antiinflamatorios y antimicrobianos, con la finalidad de disminuir la diabetes y el cáncer [41]. El bagazo de cerveza ha sido procesado por métodos de extracción asistida por microondas, reacciones enzimáticas y alcalinas para obtención de antioxidantes, siendo una buena alternativa ya que los compuestos comerciales actuales son caros [35]. Sin embargo, el costo operativo de la transformación del bagazo para estos usos, presenta un alto costo.

Reutilización como fuente de alimento

También se ha aplicado como fuente de alimento para animales como aves de corral, cerdos y peces; debido a su amplio contenido de componentes nutritivos. El bagazo representa un costo más bajo a diferencia de otro tipo de alimentos comerciales, además de que genera beneficios en la cría de los animales, como aumento en producción de leche [36]. Sin embargo, la demanda de los ganados es baja respecto a la producción de bagazo de cerveza, teniendo como resultado nuevamente la disposición de este residuo en vertederos [42]; también implica que se tenga un alto costo por el transporte del bagazo, debido a las distancias y al peso del bagazo, el cual es de considerar debido al alto contenido de humedad.

Aprovechamiento para fines energéticos

Entre los principales procesos para aprovechar energéticamente el bagazo de cerveza, está la DA y esto se debe principalmente a que el bagazo de cerveza presenta un alto contenido de humedad y alta carga orgánica; pero presenta un bajo nivel de pH, lo que dificulta el proceso de DA. Para resolver esta problemática, además de obtener el máximo aprovechamiento energético de este residuo, se ha buscado la Co-DA del bagazo de cerveza con otros residuos como estiércol de vaca, lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, entre otros. La utilización del biogás resultante de las Co-DA del bagazo de cerveza, como fuente de energía térmica o eléctrica para las SI, se visualiza como una opción viable y así obtener ahorros económicos, energéticos y ambientales [37, 38, 39, 40].

4. BIOMETANIZACIÓN DEL NEJAYOTE Y BAGAZO DE CERVEZA COMO MODELO DE ECONOMÍA CIRCULAR

En la figura 1 se puede observar la propuesta de Simbiosis Industrial entre la industria de la nixtamalización junto a la de producción de cerveza. Se presentan los dos procesos mencionados anteriormente, de los cuáles, se dispondrá de sus residuos (Nejayote y Bagazo de cerveza particularmente), para que estos sean ingresados a un sistema de Co-DA, conectado a las salidas de dichos residuos. En este sistema los residuos actuarían en sinergia para obtener diversos productos: agua tratada, biogás, biofertilizantes y CO₂. El agua tratada del proceso de Co-DA, puede ser reutilizada en el proceso de nixtamalización en la etapa de cocción; y/o en el proceso de producción de cerveza en las etapas de maceración, cocción, tanque de precalentamiento y/o para el lavado de los equipos de molienda. Por otro lado, el biogás obtenido puede ser aprovechado como energía térmica y/o eléctrica para ambos procesos de producción, lo que reduce los costos operativos. En la tabla 3 se puede observar las etapas de producción en las que se pueden aprovechar los productos obtenidos de la Co-DA.

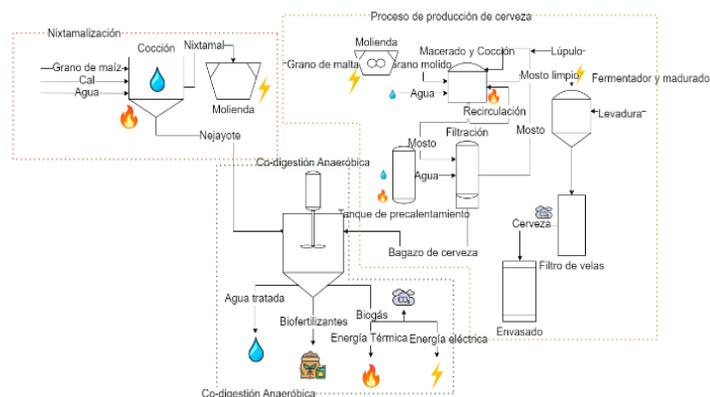
Tabla 3. Aprovechamiento de los productos de la Co-DA en las etapas de producción de Nixtamalización y cerveza de la SI propuesta.

Figura	Nombre	Nixtamalización	Producción de cerveza
	Agua tratada	Cocción	- Macerado y cocción. - Tanque de precalentamiento.
	Energía térmica autónoma suministrada		
	Energía eléctrica autónoma suministrada	Molienda	- Molienda. - Fermentador y madurador. - Envasado.
	Biofertilizantes	*Uso en el suelo para la nutrición de plantas	
	CO ₂ aprovechable de la purificación de biogás	-	Carbonatación de cerveza

Fuente: Elaboración propia.

Otro de los beneficios de esta SI, se puede ver en el aprovechamiento del CO₂ (producto de la purificación de biogás), el cual puede ser utilizado en el proceso de producción de cerveza. Por otro lado, el bioabono sólido de la Co-DA se puede utilizar para remediación de suelos en área verdes. Finalmente, teniendo una sinergia óptima de residuos se puede obtener un tratamiento de Nejayote eficiente en la remoción de contaminantes, lo cual haría menos complejo un post-tratamiento si es requerido (ósmosis inversa, filtración, etc).

Fig. 1. Diagrama de la simbiosis industrial propuesta entre el proceso de nixtamalización y de producción de cerveza



Fuente: Elaboración propia

Lo mencionado anteriormente, plantea la generación de ahorros económicos debido al uso del biogás como fuente de energía térmica/eléctrica y a la reutilización del agua; sin embargo, existen todavía otras bondades asociadas a esta SI y que impactan en la sociedad.

Socioeconómicos

- Precios accesibles de los productos derivados de la nixtamalización. Ambos procesos, al ser menos costosos para la industria nixtamalera y cervecera, es posible manejar precios más accesibles de los productos derivados de estas industrias.
- El tratamiento del Nejayote, ayuda a preservar la calidad y cantidad del agua; lo que impacta directamente en la sociedad, ya que el acceso al agua cada vez es más limitado.
- Se contribuye con la salud humana, ya que se puede tener una mejor calidad del aire al tratar los residuos sólidos orgánicos, además se disminuye la emanación de gases de efecto invernadero a partir de la sustitución de combustible GLP a biogás y el tratamiento anaeróbico del bagazo de cerveza [43].

Ambientales

- Con el uso del biogás como fuente térmica o eléctrica se reduce el uso de combustibles fósiles con lo que se tiene una reducción de GEI.
- Reutilización de agua tratada, menor uso del recurso hídrico, por lo que se garantiza la reserva del mismo.
- Generación de biofertilizantes para su uso en remediación de suelos.

La simbiosis entre industrias reduce el gasto en materia prima, en energéticos y reduce la generación de residuos. La implementación de un Parque Industrial de Nixtamalización y Cerveceras podría ser un proyecto factible, autónomo que traería múltiples beneficios tanto internos como externos [44].

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La economía circular es una de las mejores alternativas para mitigar diversas problemáticas ambientales, económicas y sociales; ya que el objetivo es imitar los ciclos de la naturaleza, dónde la materia prima, proceso, producto y residuos se manejen de una forma sostenible, es decir, que los recursos utilizados puedan regenerarse en un tiempo más corto del que son utilizados, se tengan procesos de producción eficientes y que los residuos sean aprovechados dentro del mismo proceso o en sinergia con otras industrias.

Los tratamientos mecánicos, químicos y biológicos (siendo estos últimos los de microalgas) del Nejayote y bagazo de cerveza tienen la desventaja de ser costosos a lo largo de su ciclo de vida, esto implica que los procesos tengan un alto costo operativo, por lo que su retorno de inversión es mayor. Otro aspecto que también se encuentra implícito en el gasto económico es el energético, que, para cubrirlo, se tiene que obtener a través de un tercero, por lo que también se requiere de inversión constante.

La propuesta de simbiosis industrial mostrada en este artículo lleva a cabo el tratamiento biológico de los residuos a partir de Co-DA, dónde los residuos pasan a ser subproductos aprovechables para un nuevo proceso de conversión de energía que abastecería a los distintos procesos de producción (nixtamalización y cerveza). En el caso de la Co-DA, si bien se tendría una inversión inicial más elevada, las inversiones a lo largo del ciclo de vida del proceso serán significativamente menores, así como su retorno de inversión. Esto se debe principalmente a: 1) la disminución de gastos en recursos, 2) el agua tratada puede ser reutilizada, y 3) se obtiene un biocombustible gaseoso llamado biogás, el cual puede ser utilizado energéticamente en ambos procesos.

Para llevar a cabo esta propuesta de SI, se requiere de distintos estudios de caracterización fisicoquímica de la Co-DA del Nejayote y bagazo de cerveza, viabilidad económica, energética y ambiental. Con lo mostrado en este artículo, se puede observar que la Co-DA de estos residuos es una alternativa viable de SI, en donde el tratamiento de residuos se lleva a cabo con un enfoque de economía circular trayendo beneficios sociales, económicos y ambientales.

Actualmente se está trabajando en un estudio tecno-económico y ambiental de esta propuesta de SI, en Mexicali BC, México con una empresa de Nixtamalización, y distintas cervecerías de la localidad.

5.1 Agradecimientos

Se agradece a CONAHCYT por el apoyo durante esta investigación a través de la beca de posgrado, así como al Instituto de Ingeniería y Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería de la UABC, que proporcionaron y facilitaron los medios para llevar a cabo esta investigación.

6. REFERENCIAS

[1] Salvador, R., Barros, M. V., Freire, F., Halog, A., Piekarski, C. M., & De Francisco, A. C. (2021). Circular economy strategies on business modelling: Identifying the

greatest influences. *Journal of Cleaner Production*, 299, 126918. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126918>

[2] Chertow, M. R. (2000). Industrial symbiosis: literature and taxonomy. *Annual review of energy and the environment*, 25(1), 313-337.

[3] MacArthur, E. (2013). Towards the circular economy, economic and business rationale for an accelerated transition. *Ellen MacArthur Foundation: Cowes, UK, 1*.

[4] Charter, M. (Ed.). (2018). *Designing for the circular economy*. Routledge.

[5] Heck, P. (2006). Circular economy-related international practices and policy trends. *Consulting Report for the World Bank Project on Policies for Promotion of a Circular Economy in China*.

[6] Aderemi T. Adeleye, Hitler Louis, Ozioma U. Akakuru, Innocent Joseph, Obieze C. Enudi, Dass P. Michael. A Review on the conversion of levulinic acid and its esters to various useful chemicals[J]. *AIMS Energy*, 2019, 7(2): 165-185. doi: 10.3934/energy.2019.2.165]

[7] Pinzón Latorre, A. (27 de mayo de 2009). *Revistas Uniandes*. Obtenido de

<https://revistas.uniandes.edu.co/index.php/dearq/article/view/3071/1874>

[8] DíezMartínez, C. V., Villalobos, J. A., & Ruiz, K. O. (2015). Desarrollo sustentable e innovación: una simbiosis industrial para la biomitigación del CO₂. In *13th LACCEI Annual International Conference: "Engineering Education Facing the Grand Challenges, What Are We Doing"* (pp. 1-7).

[9] Ramin, E., Faria, L., Gargalo, C. L., Ramin, P., Flores-Alsina, X., Andersen, M. M., & Gernaey, K. V. (2024). Water innovation in industrial symbiosis - A global review. *Journal of Environmental Management*, 349, 119578. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2023.119578>

[10] CONAGUA. (junio de 2020). SEMARNAT, GOBIERNO DE MEXICO. Obtenido de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2020/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/approot/dgeia_mce/html/R_ECUADROS_INT_GLOS/D3_AGUA/D3_AGUA04/D3_R_AGUA05_01.htm.

[11] Meraz, K. A. S., Vargas, S. M. P., Maldonado, J. T. L., Bravo, J. M. C., Guzman, M. T. O., & Maldonado, E. A. L. (2016). Eco-friendly innovation for nejayote coagulation-flocculation process using chitosan: Evaluation through zeta potential measurements. *Chemical Engineering Journal*, 284, 536-542. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2015.09.026>

[12] España-Gamboa, E., Domínguez-Maldonado, J.A., Tapia-Tussell, R. et al. Corn industrial wastewater(nejayote): a promising substrate in Mexico for methane production in a coupled system (APCR-UASB). *Environ Sci Pollut Res* 25, 712-722 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0479-z>

[13] López-Pacheco, I. Y., Carrillo-Nieves, D., Salinas-Salazar, C., Silva-Núñez, A., Arévalo-Gallegos, A., Barceló, D., Afewerki, S., Iqbal, H. M. N., & 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.SCIOTENV.2019.04.278>

[14] Valderrama-Bravo, C., Fuentes-Prado, E., Porrás-Godínez, M. R., Ramírez-Ortiz, M. E., Reyna-Granados, M.

- A., & 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 area. *Journal of Food Engineering*, 328, 111058. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2022.111058>
- [15] FAO. (24 de marzo de 2023). Obtenido de <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- [16] SIAP. (13 de junio de 2022). Obtenido de <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>
- [17] YARA. (2010). YARA México. Obtenido de <https://www.yara.com.mx/nutricion-vegetal/maiz/mercados-Del-maiz/#:~:text=El%20ma%C3%ADz%20blanco%20es%20si%20muy%20alto.>
- [18] Niño-Medina, G., Carvajal-Millán, E., Lizardi, J., Rascon-Chu, A., Marquez-Escalante, J. A., Gardea, A., Martínez-Lopez, A. L., & Guerrero, V. (2009). Maize processing waste water arabinosylans: Gelling capability and cross-linking content. *Food Chemistry*, 115(4), 1286–1290. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2009.01.046>
- [19] Caliskan, G., Giray, G., Gundogdu, T. K., & Azbar, N. (2014). Anaerobic biodegradation of beer production wastewater at a field scale and exploitation of bioenergy potential of other solid wastes from beer production. *Int. J. Renew. Energy Biofuels*, 2014, h1-15.
- [20] Reinold, M. R. (1997). Manual práctico de cervejaria. *São Paulo: Aden*, 214.
- [21] Cerveceros de México . (2022). Cerveceros de México. Obtenido de <https://cervcerosdemexico.com/revistas/produccion.pdf>
- [22] 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>
- [23] 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, 109881. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2020.109881>
- [24] Asaff Torres, A. (2009). *PHYTOCEUTIC COMPOSITIONS FOR PETS*. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/041558953/publication/MX2009008889A?q=US20120220662>
- [25] Asaff Torres, A., & Reyes Vidal, M. Y. (2013). *Un método y un sistema para el tratamiento integral de aguas residuales de una industria del maíz* (Patent MX/a/2013/002096). www.gob.mx/imp
- [26] Acosta Estrada, B. A., Gutiérrez Uribe, J. A., Lazo Vélez, M. A., & Serna Saldívar, S. R. O. (2014). *Productos alimenticios adicionados con fibra dietaria, ácido ferúlico y calcio obtenidos de sólidos de nejayote* (Patent MX/a/2014/008049). <https://doi.org/10.10911/CCHEM-8ç1-2-0162>
- [27] García-Zamora, J. L., Sánchez-González, M., Lozano, J. A., Jáuregui, J., Zayas, T., Santacruz, V., Hernández, F., & Torres, E. (2015). Enzymatic treatment of wastewater from the corn tortilla industry using chitosan as an adsorbent reduces the chemical oxygen demand and ferulic acid content. *Process Biochemistry*, 50(1), 125–133. <https://doi.org/10.1016/J.PROCBIO.2014.10.012>
- [28] Torres Mendoza, Á., Cruz Díaz, M. R., Almazán Ruíz, F. J., Caballero Domínguez, F. V., Rivero Martínez, E. P., Ambríz García, J. J., Ramírez Romero, M. A. G., & González Martínez, I. (2013). *Proceso para el tratamiento del nejayote por electrocoagulación* (Patent MX/a/2013/008235). <https://siga.impi.gob.mx/detalle/OTI3MTI5NA%3D%3D/idNumber/Ng%3D%3D>
- [29] Mishra, S., Singh, V., Ormeci, B., Hussain, A., Cheng, L., & Venkiteswaran, K. (2023). Anaerobic-aerobic treatment of wastewater and leachate: A review of process integration, system design, performance and associated energy revenue. *Journal of Environmental Management*, 327, 116898. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.116898>
- [30] Salmerón-Alcocer, A., Rodríguez-Mendoza, N., Pineda-Santiago, V., Cristiani-Urbina, E., Juárez-Ramírez, C., Ruiz-Ordaz, N., & Galíndez-Mayer, J. (2003). Aerobic treatment of maize-processing wastewater (nejayote) in a single-stream multi-stage bioreactor. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2(5), 401-406.
- [31] 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>
- [32] 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>
- [33] Ferreira-Rolón, A., Ramírez-Romero, G., & Ramírez-Vives, F. (2014). Aumento de la actividad metanogénica en lodos granulares, precipitando calcio en el nejayote mediante el burbujeo de CO₂. *Revista mexicana de ingeniería química*, 13(2), 517-525. Recuperado en 05 de febrero de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382014000200016&lng=es&tlng=es.
- [34] Ferreira, S., Monteiro, E., Brito, P., Castro, C., Calado, L., & Vilarinho, C. (2019). Experimental analysis of brewers' spent grains steam gasification in an allothermal batch reactor. *Energies*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/en12050912>
- [35] Mussatto, S. I., Moncada, J., Roberto, I. C., & Cardona, C. A. (2013). Techno-economic analysis for brewer's spent grains use on a biorefinery concept: The Brazilian case. *Bioresource technology*, 148, 302-310.
- [36] Emmanuel, J. K., Nganyira, P. D., & Shao, G. N. (2022). Evaluating the potential applications of brewers' spent grain in biogas generation, food and biotechnology industry: A

- review. *Heliyon*, 8(10), e11140.
<https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2022.E11140>
- [37] Tewelde, S., Eyalarsan, K., Radhamani, R., & Karthikeyan, K. (2012). Biogas production from co-digestion of brewery wastes [BW] and cattle dung [CD]. *Int. J. Latest Trends Agric. Food Sci*, 2(2), 90-93.
<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84893448301&origin=inward&txGid=a63c4c7765396211ae a881b66b809f8c>
- [38] Szaja A, Montusiewicz A, Lebiocka M, Bis M. 2020 . El efecto de la aplicación de grano gastado de cervecería en los rendimientos de biogás y la cinética en la codigestión con lodos de depuradora. *PeerJ* 8 : e10590
<https://doi.org/10.7717/peerj.10590>
- [39] Bougrier, C., Dognin, D., Laroche, C., & Cacho Rivero, J. A. (2018). Use of trace elements addition for anaerobic digestion of brewer's spent grains. *Journal of Environmental Management*, 223, 101–107.
<https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2018.06.014>
- [40] Lima Moraes dos Santos, A., de Sousa e Silva, A., Sales Morais, N. W., & Bezerra dos Santos, A. (2023). Brewery Spent Grain as sustainable source for value-added bioproducts: Opportunities and new insights in the integrated lignocellulosic biorefinery concept. *Industrial Crops and Products*, 206, 117685.
<https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2023.117685>
- [41] Patrignani, M., Brantsen, J. F., Awika, J. M., & Conforti, P. A. (2021). Application of a novel microwave energy treatment on brewers' spent grain (BSG): Effect on its functionality and chemical characteristics. *Food Chemistry*, 346, 128935.
<https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2020.128935>
- [42] Castro, L. E. N., Sganzerla, W. G., Matheus, L. R., Mançano, R. R., Ferreira, V. C., Barroso, T. L. C. T., da Rosa, R. G., & Colpini, L. M. S. (2023). Application of brewers' spent grains as an alternative biomass for renewable energy generation in a boiler combustion process. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 4, 100039.
<https://doi.org/10.1016/J.SCENV.2023.100039>
- [43] Ziero, H. D. D., Ampese, L. C., Buller, L. S., Costa, J. M., Berni, M., & Forster-Carneiro, T. (2023). Corn ethanol production with thin stillage anaerobic digestion for bioenergy recovery: A technical and economic evaluation. *Industrial Crops and Products*, 206, 117618.
<https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2023.117618>
- [44] Saldaña Oyarzábal, I. (2023). *Method of Production of Alcoholic Beverages From Corn Using an Alkaline Cooking Process, Treatment-Use of Alkaline Cooking Residues for Production of Distilled Alcohol for Purposes of Human Consumption And/or Industrial Use*.
<https://www.lens.org/lens/patent/005-652-609-607-618/frontpage?l=en>