

DOI: 10.24850/j-tyca-15-02-04

Artículos

Tratamiento de vinazas de mezcal: revisión de procesos evaluados

Mezcal vinasses treatment: A review of assessed processes

Sergio Díaz-Barajas¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3058-2665>

Iván Moreno-Andrade², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1400-7241>

Marco A. Garzón-Zúñiga³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0124-0447>

¹CIIDIR-Durango, Instituto Politécnico Nacional, Durango, México, sdiazb1800@alumno.ipn.mx

²Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Querétaro, México, IMorenoA@iingen.unam.mx

³Instituto Politécnico Nacional, Durango, México, mgarzon@ipn.mx

Autor para correspondencia: Marco Garzón-Zúñiga, mgarzon@ipn.mx, marco.cuerna@gmail.com



Resumen

El mezcal es una bebida alcohólica elaborada en México. Esta industria produce vinazas de mezcal, que son aguas residuales complejas con alta concentración de materia orgánica (de 35 000 a 122 860 mg DQO/l), pH bajo (3.60-3.94) y compuestos recalcitrantes como fenoles (478-1460 mg ácido gálico/l) y sulfatos (308-947 mg/l), cuya disposición sin tratamiento al medio ambiente representa un peligro para cuerpos de agua y suelo.

El presente estudio busca presentar y discutir el actual desarrollo tecnológico en el tratamiento de las vinazas de mezcal e identificar los sistemas con mayor potencial para su aplicación.

Los tratamientos de vinaza de mezcal con las mejores eficiencias de remoción de DQO son fúngicos y anaeróbicos (80 %). La ozonización tiene potencial como pretratamiento, eliminando más del 80 % de los fenoles. Algunos sistemas híbridos pueden eliminar más del 90 % DQO. Sin embargo, estos tratamientos no incluyen el concepto de economía circular, por lo que su implementación se ve como un gasto que en ocasiones no puede ser asumido por los productores. Una opción incluye la revalorización para generar un beneficio económico para los productores. El tratamiento de biorrefinería, en el que se han obtenido diversos tipos de energía, como biohidrógeno, metano y bioelectricidad mediante la aplicación secuencial de diferentes bioprocesos, fue identificado como el tratamiento con mayor potencial.

Palabras clave: vinazas de mezcal, tratamiento de biorrefinería de vinazas, revalorización de aguas residuales agroindustriales, tratamiento híbrido de vinazas, tratamiento biológico de vinazas.

Abstract

Mezcal is an alcoholic beverage made in Mexico. This industry produces mezcal vinasses, which are complex wastewater with a high concentration of organic matter (35 000 to 122 860 mg COD/l), low pH (3.60-3.94) and recalcitrant compounds such as phenols (478-1 460 mg gallic acid/l) and sulfates (308-947 mg/l), its disposal without treatment to the environment poses a danger to soil and water bodies.

The present study seeks to present and discuss the current technological development in the treatment of mezcal vinasses and to identify the systems with the most significant potential for its application.

The mezcal vinasses treatments with the best COD removal efficiencies are fungal and anaerobic (80 %). Ozonation has potential as a pretreatment, which can remove more than 80% of phenols. Some hybrid systems can remove > 90 % COD. However, these treatments do not include the concept of "circular economy", so its implementation is seen as an expense that sometimes cannot be afforded by producers. One option includes the revalorization for generating an economic benefit to producers. Biorefinery treatment, in which various types of energy have been obtained, such as biohydrogen, methane, and bioelectricity by applying different bioprocesses sequentially, was identified as the treatment with the best potential.

Keywords: Mezcal vinasses, vinasses biorefinery treatment, agro-industrial wastewater revalorization, mezcal vinasses hybrid treatment, mezcal vinasses biological treatment.

Recibido: 20/08/2021

Aceptado: 08/07/2022

Publicado online: 19/08/2022

Introducción

El mezcal es una bebida alcohólica elaborada en México, en los estados de Oaxaca, Durango, Guerrero, San Luis Potosí, Zacatecas, Guanajuato y Tamaulipas, con una producción de 7 145 039 l en 2019 (CRM, 2020). De acuerdo con la Norma Oficial para Producción de Mezcal (NOM-070-SCFI-2016), ésta es definida como "Bebida alcohólica destilada mexicana, hecha 100 % de maguey o agave, obtenida por destilación de jugos fermentados con microorganismos espontáneos o cultivados, extraídos de cabezas maduras de agaves o agaves cocidos, cosechados en el territorio comprendido por los estados antes mencionados". La elaboración del mezcal consta de cuatro etapas: cocción de las cabezas de agave, molienda de los corazones cocidos, fermentación de los jugos obtenidos de la fibra de agave molida y, finalmente, destilación. Sin embargo, la producción de mezcal trae consigo la generación de residuos líquidos altamente contaminantes conocidos como "vinazas" (Robles-González, Galíndez-Mayer, Rinderknecht-Seijas, & Poggi-Valardo, 2012). Las vinazas son el líquido de desecho de todo el proceso de producción, e incluye los subproductos de fermentación, destilación y lavado de las instalaciones.



Las vinazas son aguas residuales de la producción de diferentes licores, compuestas por material particulado, levaduras y alcoholes superiores. Un litro de mezcal genera de 7 a 11 litros de aguas residuales vinazas (Acosta & Iñiguez, 2009). Las vinazas presentan altas concentraciones de materia orgánica (5 340-122 860 mg DQO/l); pH ácido (3.7-6); fenoles (478-1 460 mg ácido gálico/l); sulfatos (308-947 mg/l), y temperaturas por encima de 70 °C (Tabla 1). Estos residuos son altamente nocivos para el medio ambiente, por lo que su disposición sin tratamiento en el suelo genera los siguientes daños: deteriora la estructura del suelo, al aumentar la fitotoxicidad (por el aumento de la concentración de ácido acético, ácido láctico, glicerol y nitrógeno amoniacal); reduce su porosidad (genera zonas anaeróbicas en el suelo) e inhibe la capacidad de germinación de las semillas (por la presencia de fenoles) (Gómez-Guerrero, Caballero-Caballero, & Hernández-Gómez, 2014; Robles-González *et al.*, 2012). Cuando las vinazas son dispuestas en cuerpos de agua, su elevada concentración de materia orgánica (MO) y nutrientes provoca la eutrofización del agua, disminuyendo el contenido de oxígeno disuelto (OD) (Retes-Pruneda, Jáuregui-Rincón, & Lozano-Álvarez, 2014; Robles-González *et al.*, 2012). Además, la alta temperatura y acidez de las vinazas crean un ambiente hostil para varios organismos (Robles-González *et al.*, 2012). También se ha informado que el color marrón y la turbidez de las vinazas pueden afectar la penetración de la luz, reduciendo la presencia de organismos fotosintéticos (Mostafa, Mostafa, & Keikhosro, 2019; Retes-Pruneda *et al.*, 2014; Robles-González *et al.*, 2012; López-López, Davila-Vazquez, León-Becerril, Villegas-García, & Gallardo-Valdez, 2010).

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica comparativa de vinazas de distinto origen.

Parámetro	Tequila ¹	Etanol ²	Cerveza ³	Vino ⁴	Mezcal ⁵
pH	3.9	4.83	6.0	3.76	3.78 ± 0.17
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /l)	510	-	2 450	-	-
Ácidos grasos volátiles (mg/l)	-	1 360	-	-	9 615
DQO (mg /l)	37 000	65 180	5 340	15 000-16 500	61 169 ± 12 091
DBO ₅ (mg /l)	15 076		3 215		29 169 ± 6 513
Nitrógeno de Kjeldhal (mg NH ₃ /l)	243	-	-	-	-
Nitritos (mg/l)	-	-	0.37	-	70
Nitratos (mg/l)	-	-	4.30	-	90
Sólidos totales (mg/l)	16 920	56 230	5 698	-	265 726 ± 454 346
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	338	3 240	1 826	-	41 106 ± 38 226
Sólidos suspendidos volátiles (mg/l)	297	43 330	1 090	-	2 966 ± 3 364
Ortofosfatos (mg/l)	-	-	23	-	-
Conductividad (mS/cm)	4.1	-	1.52	-	4.2 ± 1.6

Fuentes: 1) Ferral-Pérez, Torres-Bustillos, Méndez, Rodríguez-Santillan y Chairez (2016; 2) Barrera, Spanjers, Romero, Rosa y Dewulf (2019); 3); Enitan, Adeyemo, Kumari, Swalaha y Bux (2015); 4) Beltran-de-Heredia, Dominguez and Partido (2018); 5) valores promedio de diferentes caracterizaciones de vinazas de mezcal presentadas en la Tabla 2.

Existen pocas referencias a trabajos de caracterización de vinazas de mezcal. Estas vinazas tienen altas concentraciones de materia orgánica (DBO₅: 22 500-35 000 mg/l y DQO: 35 000-122 860 mg/l); conductividad eléctrica (2.6-5.81 mS/cm); fenoles (58-542 mg/l); sólidos totales (45 000-96 000 mg/l); sólidos suspendidos totales (8 400-83 130 mg/l); acidez (pH 3.5-3.94), y una temperatura elevada de descarga (70 a 90 °C) (Tabla 2).

Tabla 2. Caracterización fisicoquímica de vinazas de mezcal de diferentes regiones.

Parámetro	Mezcal (Oaxaca) ¹	Mezcal (Oaxaca) ²	Mezcal (Oaxaca) ³	Mezcal (Durango) ⁴
pH	3.6-3.8	-	-	3.94
Temperatura (°C)	90	-	-	70
Color (475 nm)	4.6-10.6	-	-	
Ácidos grasos volátiles (mg/l)	-	-	-	9 615
DQO (mg/l)	56 230-122 860	42 000	35 000-50 000	60 925
DBO ₅ (mg /l)	26 500-33 600	25 576	35 000	22 500
Fenoles (mg ácido gálico/l)	478-542	-	-	58
Nitritos (mg/l)	-	70	-	-
Nitratos (mg/l)	-	91	-	-
Sólidos totales (mg/l)	26 830-94 7130	45 860	-	43 084
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	8 400-83 130	-	-	31 788
Sólidos suspendidos volátiles (mg/l)	1 130-6 850	-	-	920
Sólidos sedimentables (ml/l)	-	260	44 000-106 000	-
Fosfato (mg/l)	290-1 705	-	-	-
Sulfato (mg/l)	308-947	-	-	
Fructosa (mg/l)	14-50	-	-	-
Dureza (mg CaCO ₃ /l)	-	312	-	-
Conductividad (mS/cm)	2.6-4.2	-	-	5.81

Fuentes: 1) Robles-González *et al.* (2012); 2) Retes-Pruneda *et al.* (2014); 3) Gómez-Guerrero *et al.* (2014); 4) mezcal procedente de Durango.

Lamentablemente, la mayoría de las industrias productoras de mezcal —y en Durango, todas ellas— no cuentan con un sistema de tratamiento de las vinazas que generan. Esto se debe al desconocimiento por parte de los productores de los efectos nocivos de estos desechos hacia el medio ambiente, y al poco desarrollo de opciones tecnológicas y los altos costos de los sistemas de tratamiento utilizados en otras industrias, como la tequilera. Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo presentar una recopilación de los estudios publicados sobre el tratamiento de las vinazas de mezcal, discutir las eficiencias de remoción de contaminantes reportadas, y enfatizar qué sistemas son más prometedores y deben estudiarse más a fondo para permitir el desarrollo de opciones tecnológicas para esta industria.

La industria del mezcal cuenta con pocos estudios técnicos sobre el tratamiento de sus residuos. Por otro lado, las vinazas de mezcal comparten similitudes con las vinazas de tequila. Las vinazas generadas por ambos presentan alta acidez ($\text{pH} < 4$), temperaturas de descarga superiores a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y aunque tienen altas concentraciones de MO, las vinazas de tequila alcanzan concentraciones más bajas ($100\ 000\ \text{mg DQO/l}$) en comparación con las vinazas de mezcal ($122\ 860\ \text{mg DQO/l}$). Sin embargo, las vinazas de tequila tienen un menor contenido de ácidos grasos volátiles (AGV) que las vinazas de mezcal, asociado con una menor concentración de materia orgánica, probablemente porque el tequila se produce de modo industrial y el mezcal se produce sobre todo de forma artesanal (Tabla 3). La industria del tequila ha tenido mayor éxito comercial y expansión debido a su producción industrializada, que le permite generar cantidades significativamente mayores de tequila

(173.42 millones de litros por año) que de mezcal (7.14 millones de litros por año), además de atraer mayor interés académico, lo que se refleja en diferentes caracterizaciones y estudios dedicados al tratamiento de sus vinazas (CRM, 2020).

Tabla 3. Caracterización comparativa de vinazas de tequila con vinazas de mezcal.

Parámetro	Tequila ¹	Tequila ²	Tequila ³	Mezcal ⁴
pH	3.35	3.4-4.5	3.6 ± 0.1	3.6-3.8
Temperatura (°C)	50.4	-	-	90
Color (475 nm)	-	-	-	4.6-10.6
Ácidos grasos volátiles (mg/l)	2 500-3 400	-	-	-
DQO (mg/l)	28 000-50 000	60 000-100 000	63 100 ± 6 500	56 230-122 860
DBO ₅ (mg/l)	13 000-24 000	35 000-60 000	29 200 ± 7 900	26 500-33 600
Fenoles (mg _{ácido gálico} /l)	-	-	1 460.6 ± 128.2	478-542
Sólidos totales (mg/l)	-	25 000-50 000	43 800 ± 3 600	26 830 - 94 7130
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	-	2 000-8 000	-	8 400-83 130
Sólidos suspendidos volátiles (mg/l)	-	1 990-7 500	-	1 130-6 850
Fosfato (mg/l)	-	-	-	290-1 705
Sulfate (mg/l)	-	-	-	308-947
Fructosa (mg/l)	-	-	-	14-50
Conductividad (mS/cm)	-	-	-	2.6-4.2

Fuentes: 1) García-Depraect y León-Becerril (2018); 2) Robles-González *et al.* (2012); 3) Méndez-Acosta, Snell-Castro, Alcaraz-González, González-Álvarez y Pelayo-Ortiz (2010); 4) López-López, Davila-Vazquez, León-Becerril, Villegas-García y Gallardo-Valdez (2010).

La industria del mezcal, como ya se mencionó, recién ha comenzado a atraer mayor interés en la última década, lo que puede explicar la falta de estudios enfocados en el tratamiento de sus residuos. Los estudios se abordan en su mayoría localmente a nivel de laboratorio (Robles-González, Poggi-Valardo, Galíndez-Mayer, & Ruíz-Ordaz, 2017; Retes-Pruneda *et al.*, 2014; Villalobos-Castillejos, Robles-González, & Poggi-Valardo, 2009). Dichos estudios constituyen los primeros esfuerzos para solucionar la gestión de estos residuos. Entre las tecnologías evaluadas se encuentran tratamientos fisicoquímicos, biológicos y sistemas acoplados (Robles-González *et al.*, 2017; Retes-Pruneda *et al.*, 2014; Villalobos-Castillejos *et al.*, 2009). El objetivo del presente estudio es brindar un panorama de la situación actual del desarrollo tecnológico en el tratamiento de vinazas de mezcal e identificar opciones de tratamiento sustentables que los productores podrían aceptar implementar a escala real.

Búsqueda de información

La búsqueda de información sobre los diferentes tratamientos de las vinazas de mezcal se realizó en diversas bases de datos utilizando como palabras clave las siguientes: vinazas de mezcal, aguas residuales de mezcal, tratamiento de residuos de mezcal, tratamiento de vinazas de mezcal, revalorización de vinazas de mezcal e industria del mezcal. Sin embargo, la información encontrada fue escasa, por lo que luego de presentar las tecnologías enfocadas al manejo de las vinazas de mezcal



encontradas, se amplió la búsqueda al tratamiento de un residuo similar “vinazas de tequila” para compararlo y tomar algunos ejemplos del tratamiento de las vinazas de tequila que se pueden aplicar al tratamiento de vinazas de mezcal.

Tratamiento de vinazas de mezcal

Como ya se indicó, la industria del mezcal ha atraído menos interés académico en comparación con otras bebidas alcohólicas, como el tequila. Debido a esto, al realizar una búsqueda bibliográfica exhaustiva en diferentes bases de datos, se encontró que los trabajos enfocados al tratamiento de sus vinazas son escasos (Tabla 4). Estos trabajos se revisan, comparan y discuten en las secciones siguientes.

Tabla 4. Investigaciones disponibles enfocadas en el tratamiento de vinazas de mezcal.

Tratamiento	Tipo de tratamiento	Concentración inicial de materia orgánica (mg DQO/l)	Tiempo de retención hidráulico	Eficiencia de remoción de la DQO (%)	Autor
Fúngico	Biológico	31 500	21 d	67.9 ± 0.4	Retes-Pruneda <i>et al.</i> (2014)
Lodos activados	Biológico	24 263	13 d	69.6 ± 1.3	Robles-González <i>et al.</i> (2017)
Tratamiento anaerobio	Biológico	952	25 d	81 ± 1	Villalobos-Castillejos <i>et al.</i> (2009)
Floculación con alginatos	Fisicoquímico	42 000	5 min	39	Retes-Pruneda <i>et al.</i> (2014)
Ozonación	Fisicoquímico	42 000	120 min	10.8 ± 0.2	Robles-González <i>et al.</i> (2017)
Floculación con tratamiento fúngico	Híbrido	31 500	25 d	92.5	Retes-Pruneda <i>et al.</i> (2014)
Ozonación con lodos activados	Híbrido	42 000	13 d	85	Robles-González <i>et al.</i> (2017)

Tratamiento biológico

Lodos activados

Un proceso de lodos activados aprovecha microorganismos en condiciones aerobias para la degradación de MO en aguas residuales (Varila-Quiroga & Díaz-López, 2008). Este tipo de proceso biológico para el tratamiento de vinazas de mezcal se ha evaluado solo a nivel de laboratorio, en un sistema de 1 l de capacidad con un volumen de operación (Vop) de 800 ml, con una concentración inicial de MO de 24 263 mg DQO/l, el cual fue aireado con un caudal de 3 l/min y operado a 23 °C, con un pH de 7 y un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 13 días, alcanzando una eficiencia de remoción de DQO promedio de 69.6 ± 1.3 % (Robles-González *et al.*, 2017).

Debido a que los tratamientos aerobios de aguas residuales requieren la inclusión de equipos como aireadores que pueden elevar el costo operativo, estos procesos se recomiendan para el tratamiento de afluentes con concentraciones de MO inferiores a 1 000 mg DQO/l, como por ejemplo aguas residuales municipales (290 mg DQO/l), alcanzando eficiencias de remoción de DQO cercanas al 90 % (Varila-Quiroga & Díaz-López, 2008), mientras que para afluentes con concentraciones de MO superiores a 1 000 mg DQO/l, son preferibles los tratamientos anaerobios, que operan sin equipo de aireación (Acharya, Mohana, & Madamwar, 2008).

Debido a la alta concentración de MO de las vinazas de mezcal, el tratamiento de lodos activados propuesto por Robles-González *et al.* (2017) puede no ser el más adecuado para depurar estos residuos en comparación con otros tratamientos. La tecnología más eficiente es la digestión anaeróbica que puede lograr eficiencias de eliminación de DQO superiores al 85 % en vinazas de tequila, sin necesidad de equipos de aireación, por ejemplo, para vinazas de tequila (Arreola-Vargas, Snell-Castro, Rojo-Liera, González-Álvarez, & Méndez-Acosta, 2017; Arreola-Vargas *et al.*, 2016).

Tratamiento fúngico

Los hongos ligninolíticos (HL) son un grupo de organismos heterótrofos que se encuentran por lo común en la corteza de árboles; estos HL degradan la celulosa, hemicelulosa y lignina a través de enzimas lignocelulósicas (Retes-Pruneda *et al.*, 2014). El sistema ligninolítico extracelular no específico permite que este tipo de hongos degraden a través de peroxidasas y oxidasas una amplia variedad de componentes orgánicos (compuestos fenólicos y no fenólicos), como los presentes en las vinazas. Algunos hongos utilizados anteriormente para tratar contaminantes como pesticidas, residuos de municiones, hidrocarburos aromáticos policíclicos, colorantes y conservantes de madera pertenecen a los géneros *Bjerkandera*, *Phaanerochaete*, *Pleurotus* y *Trametes* (Asif, Hai, Hou, Price, & Nghiem, 2017). Este tipo de tratamiento ha sido estudiado con vinazas de diferente origen, como las generadas en la elaboración de alcohol de caña de azúcar o la bebida "Crema de amarulla",

eliminando del 55 al 74 % de materia orgánica (DQO), respectivamente, alcanzando una eliminación del color de hasta el 98 % (Strong *et al.*, 2010).

Retes-Pruneda *et al.* (2014) estudiaron en laboratorio la capacidad de dos especies de HL, *Trametes troggi* y *Pleurotus ostreatus*, para remover MO en vinazas de mezcal, utilizando como reactor un matraz de 250 ml, con un volumen operacional de 100 ml, pH 5.5, 28 ± 2 °C, con agitación orbital a 120 rpm, TRH de 21 días y con una mezcla de 75 % de vinazas de mezcal diluidas con 25 % de agua destilada (DQO: 31 500 mg/l; DBO₅: 19 182 mg/l). En estas condiciones de operación, con *T. troggi* se alcanzó una remoción promedio de DBO₅ de 62.6 ± 4.6 %, y 67.9 ± 0.4 % de DQO. Con *P. ostreatus* se alcanzó una remoción promedio de 61.4 ± 4.4 % de DBO₅ y 67.3 ± 1.01 % de DQO. Los autores de esta investigación reportan que exponiendo hongos ligninolíticos a altas concentraciones de vinazas de mezcal se favoreció la activación de su sistema enzimático. Sin embargo, al utilizar vinazas sin diluir, los hongos no pudieron desarrollarse en este medio ni remover el contenido de MO en las vinazas; pero al reducir su concentración a 75 % no se inhibieron los HL. En el trabajo de Retes-Pruneda *et al.* (2014) se inoculó un reactor con una concentración de 100 g/l de hongos ligninolíticos (HL) que crecieron dentro de un matraz con vinazas de mezcal. Sin embargo, a medida que los hongos se desarrollaron, ocuparon más espacio dentro del matraz, absorbiendo parte de las vinazas, lo que pudo provocar la disminución observada en la concentración de DQO al final del ciclo de tratamiento. Entonces, otro aspecto que se puede mejorar en este tratamiento es cómo usar los HL para favorecer un proceso de

biodegradación en lugar de solo un proceso de absorción. Al respecto, por ejemplo, Garzón-Zúñiga, Sandoval-Villasana y Moeller-Chávez (2011) utilizaron reactores con los hongos inmovilizados sobre un soporte orgánico (astillas de madera) sobre el que se forma una biopelícula fúngica activa que realiza la biotransformación de compuestos complejos, y el reactor funciona como un tratamiento continuo. En otro trabajo, Garzón-Zúñiga *et al.* (2018) evaluaron la capacidad de dos especies de hongos, *P. chrysosporium* y *T. versicolor*, para la remoción de MO en vinazas de tequila utilizando biofiltros aireados a escala de laboratorio de 3.5 l de volumen útil, empacados con astillas de madera de *Ficus benjamina*, operando con un flujo continuo de 2 l/d de vinazas de tequila al 60 % (5.5 kg DQO/l d). También se hizo funcionar un reactor de control en ausencia de hongos. Cuando los reactores fúngicos se operaron en estas condiciones, las eficiencias aumentaron en un 10 %.

El tratamiento de vinazas de mezcal con hongos ligninolíticos en un reactor con biomasa suspendida —propuesto por Retes-Pruneda *et al.* (2014)— presenta eficiencias de remoción alentadoras (62 %). Sin embargo, esto requirió un TRH prolongado (21 días) y una alta concentración de biomasa fúngica (100 g/l). Tales condiciones pueden ser difíciles de lograr en una fábrica tradicional de mezcal, donde se pueden generar 9 600-24 000 l_{vinazas}/mes, considerando una producción de 1 200-1 600 l_{mezcal}/mes y una relación de producción de 8 a 15 l de vinazas por cada litro de mezcal (Secretaría de Turismo de Durango, 2019; Robles-González *et al.*, 2012). Por otro lado, la tecnología fúngica evaluada por Garzón-Zúñiga *et al.* (2018), que utilizó reactores empacados con soporte orgánico, donde la formación de biomasa fúngica (*Phanerochaete*

chryso sporium y *Trametes versicolor*) alcanzó una eficiencia de remoción de 72.5 ± 0.5 % de la DQO en el tratamiento de vinazas de tequila y presentó como ventaja que puede operar continuamente mayores caudales sin necesidad de reinoculación fúngica. Sin embargo, aún se requieren más estudios para escalar el sistema a una planta piloto y a nivel industrial.

Tratamiento anaerobio

La digestión anaerobia (DA) es un proceso biológico en el que la materia orgánica es asimilada y transformada en subproductos por muchos microorganismos diferentes en ausencia de oxígeno que da lugar a una mezcla de gases conocida comúnmente como "biogás" (40-70 % metano y 60-30 % carbono de dióxido), y a una suspensión acuosa que contiene microorganismos (biomasa suspendida) responsables de la degradación de la materia orgánica y del tratamiento del efluente líquido. Los microorganismos presentes en estos procesos son por lo general bacterias acidogénicas (o fermentadoras), bacterias acetogénicas y arqueas metanogénicas, y bacterias sulfatoreductoras (Moraes, Zaiat, & Bonomi, 2015).

Villalobos-Castillejos *et al.* (2009) estudió un tratamiento anaerobio para la remoción de MO en vinazas de mezcal a nivel de laboratorio, en un matraz de 1 l, con un volumen de operación (Vop) de 400 ml y un TRH de 25 días, utilizando como inóculo biomasa de un sistema de lodos activados, con una concentración de 952 mg DQO/l (vinazas diluidas 90 %). Bajo estas condiciones se logró una eficiencia promedio de remoción

de MO de 81 ± 1 %. Sin embargo, al aumentar la concentración de vinazas al 40 % (2 272 mg DQO/l), solo se eliminó el 9 % de la DQO. Asumimos que esta baja eficiencia de remoción probablemente se deba a la falta de una estrategia de aclimatación que permita a la biomasa adaptarse para aprovechar este sustrato sin inhibirse.

Por otro lado, diferentes trabajos han sido capaces de conseguir eficiencias de eliminación cercanas al 70 % sin necesidad de aplicar diluciones tan elevadas tras la aclimatación de la biomasa. Por ejemplo, Alvillo-Rivera, Garzón-Zúñiga, Estrada-Arriaga, Buelna y Bahena-Bahena (2015) lograron eficiencia promedio de remoción de DQO de 71 ± 1 % en vinazas de tequila diluidas al 40 % ($12\,638 \pm 3\,805$ mg DQO/l), utilizando reactores discontinuos secuenciales de flujo ascendente (UASB) con lecho fluidizado, con dos tipos de inóculos (lodos activados y lodos activados con carbón activado), con un TRH de 7.16 d, 24 °C y pH neutro.

Se sabe que cuando se utiliza únicamente un tratamiento biológico para depurar aguas residuales con una composición compleja y recalcitrante, se esperan eficiencias de remoción medias o bajas de estos contaminantes, por lo que podría ser recomendable aplicar un pretratamiento para reducir el contenido de compuestos tóxicos que inhiban la actividad microbiana en estos procesos (Robles-González *et al.*, 2017).

Una de las ventajas que ofrece la digestión anaerobia es la capacidad de generar biogás con un contenido de metano que oscila entre el 40 y 70 %, que es un producto de interés energético, a partir de sustratos con altas concentraciones de materia orgánica ($> 10\,000$ mg DQO/l) (Robles-González *et al.*, 2017; Buitrón, Prato-Garcia, & Zhang,

2014a). Algunos estudios sobre producción de metano a partir de vinazas de tequila, como el de Toledo-Cervantes, Guevara-Santos, Arreola-Vargas, Snell-Castro y Méndez-Acosta (2018), produjo biogás con 82.6 ± 1.2 % de metano, con una eficiencia de remoción de DQO de 95.2 ± 1.2 %, utilizando un reactor de lecho empacado de 8 l, con tubos de PVC como material de soporte, operando a un pH de 7.7 y 35 °C. López-López, León-Becerril, Rosales-Contreras y Villegas-García (2015) produjeron biogás compuesto por 60 a 65 % de metano, con un rendimiento de 335 ml CH₄/g DQO en un reactor UASB, con pH 7 a 35 °C, con una remoción de DQO superior al 75 %; Arreola-Vargas *et al.* (2017) alcanzaron rendimientos de 280 ml CH₄/g DQO, junto con una remoción de la DQO del 89.2 ± 0.52 % en un reactor de lecho empacado, con tubos de PVC de ½ pulgada como material de soporte a escala piloto. Una investigación reciente (Gómez-Guerrero *et al.*, 2018) produjo biogás con una concentración máxima de metano del 35 %, con un rendimiento de 3 Nml/gSV, en una codigestión anaeróbica de vinazas de mezcal y bagazo de *Agave angustifolia* Haw (en una proporción 12/88 V/V), en un reactor de 1 000 ml, con un volumen operacional de 700 ml. Sin embargo, al aumentar la concentración de vinazas en el reactor disminuyó el rendimiento de producción de metano. De nuevo cabe señalar que la biomasa utilizada no fue aclimatada previamente a las vinazas de mezcal.

Tratamiento fisicoquímico

Hasta el momento solo se han reportado dos tipos de procesos fisicoquímicos para el tratamiento de las vinazas de mezcal: la floculación con alginatos y la ozonación.

Floculación con alginatos

Los alginatos son polímeros orgánicos que se pueden obtener a partir de diversas especies de algas marinas del género *Phaeophyceae* y bacterias del género *Pseudomonas* y *Azotobacter*, que se utilizan como floculantes en la industria farmacéutica, cosmética, y para la elaboración de geles dentales por su capacidad de retener metales e inmovilizar células y biomoléculas en medios líquidos. Retes-Pruneda *et al.* (2014) evaluaron alginato de sodio y floculante para el tratamiento de vinazas de mezcal a nivel de laboratorio. Utilizando un matraz con un volumen de trabajo de 100 ml, trataron vinazas crudas con concentraciones iniciales de DQO y DBO₅ de 42 000 y 25 576 mg/l, respectivamente, y aplicando 3 g de alginatos/l, pH 9, 30 °C y TRH de cinco minutos obtuvieron una eficiencia de remoción de materia orgánica del 21.6 % (DBO₅) y del 39 % (DQO). Entre las ventajas del uso de floculantes como pretratamiento de aguas residuales frente a otros sistemas, como la sedimentación o el cribado, se encuentran la reducción de TRH, al igual que la generación de un efluente más homogéneo (Retes-Pruneda *et al.*, 2014).

Otros estudios avalan el uso de alginatos en el tratamiento de aguas residuales distintas a las vinazas y con menores concentraciones de materia orgánica. Por ejemplo, Wu, Wang, Gao, Zhao y Yue (2012) lograron una eficiencia de remoción de la DQO del 80.1 %, a partir de aguas residuales sintéticas (2 860 mg DQO/l) tratadas con 1 000 mg/l de alginato de sodio y 1 000 mg/l de sulfato de aluminio. Sin embargo, el uso de alginatos como tratamiento único no es muy eficiente, en comparación con los sistemas anaeróbicos, pero como pretratamiento en vinazas de mezcal representa una mejora mayor al 20 % en la eficiencia de remoción total de MO (Retes-Pruneda *et al.*, 2014).

Ozonación

El uso del ozono en el tratamiento de aguas se debe a su capacidad oxidante, que permite romper la estructura de biomoléculas complejas en estructuras más simples, lo que aumenta su biodegradabilidad, y permite la remoción de compuestos recalcitrantes presentes en las vinazas de mezcal y tequila como melanoides y polifenoles (Robles-González *et al.*, 2017; Muñoz & Orta, 2013). Esta tecnología ha sido estudiada a nivel de laboratorio en reactores de 3 l, con un volumen útil de 500 ml, para tratar vinazas de mezcal con una concentración inicial de 42 000 mg DQO/l, pH neutro, flujo de ozono de 50 ml/s, flujo másico de 0.5 g de ozono/h, y TRH de 120 minutos. Bajo estas condiciones se obtuvieron las siguientes eficiencias de remoción: 10.8 ± 0.2 % de materia orgánica; 83.8 ± 0.6 % de fenoles, y 31.4 ± 1 % de compuestos aromáticos (Robles-González *et al.*, 2017). La ozonación en este tipo de vinazas presentó una eficiencia

de remoción de MO relativamente baja ($10.8 \pm 0.2 \%$), comparado con el logrado por métodos biológicos (cerca del 80 %). Sin embargo, lo más destacable de este tipo de tratamiento es la capacidad de eliminar el $83.8 \pm 0.6 \%$ de los fenoles, compuestos que en altas concentraciones pueden inhibir la actividad microbiana. Entonces, el potencial de la ozonación es como un tratamiento previo a un proceso biológico.

Sistemas de tratamiento híbridos

Una alternativa para mejorar la eficiencia de remoción de contaminantes en aguas residuales complejas es la combinación de procesos de tratamiento, de manera que el efluente de un primer proceso sirva de sustrato para una etapa posterior. Hasta el momento, los estudios reportados enfocados en el uso de tecnologías para el tratamiento de vinazas de mezcal son escasos. Algunos procesos que han sido evaluados son los floculantes en combinación con tratamientos fúngico y la ozonación en combinación con un proceso de lodos activados. Estos estudios son los primeros esfuerzos para identificar opciones de tratamiento combinado y solo se han realizado a escala de laboratorio.

Floculación con tratamiento fúngico

Retes-Pruneda *et al.* (2014) evaluaron ambos procesos de tratamiento por separado y posteriormente probaron un sistema combinado con las mejores condiciones encontradas en cada proceso, como se presenta a continuación. Para la floculación con alginato de sodio, las vinazas crudas se trataron con 3 g de alginato/l, pH 9, 30 °C, TRH durante cinco minutos, seguido de un tratamiento biológico inoculado con 100 g/l de hongos ligninolíticos (*T. troggi* y *P. ostreatus*), solución de vinaza de mezcal al 75 % (pretratada por floculación), pH 5.5, 28 ± 2 °C, agitado a 120 rpm, con un TRH de 21 días. En este estudio se observó un incremento en la remoción de DQO del 26 % al incluir el pretratamiento con floculante en el proceso con ambas especies de hongos. Con *T. troggi* se obtuvieron eficiencias de remoción de materia orgánica de 82.8 % (DBO₅) y 92.5 % (DQO), y con *P. ostreatus* 80 % (DBO₅), y 91.4 % (DQO). Sin embargo, es importante mencionar que el alginato de sodio utilizado en este trabajo es un reactivo comercial con un costo de \$15.01 USD/kg (Dental Packs, 2020), cuyo uso a gran escala puede no ser asequible. Otro inconveniente de estos floculantes es la ausencia de información sobre el tratamiento de los lodos generados.

Ozonación con lodos activados

Robles-González *et al.* (2017) evaluaron por separado la eficiencia en la remoción de MO de un tratamiento fisicoquímico por ozonización y un tratamiento biológico de lodos activados en vinazas de mezcal (42 000 mg DQO/l). Utilizaron un reactor de 3 l, con un Vop de 500 ml y un TRH de 120 min en el proceso de ozonación, alcanzando una remoción de la DQO del 10.8 %. En el proceso de lodos activados en condiciones aerobias, utilizando un matraz reactor de 1 l, con un volumen operacional de 800 ml, a 23 °C, pH 7, y TRH de 13 días, obtuvieron una eficiencia de remoción de DQO del 69 %. Al evaluar estas tecnologías en un sistema combinado para el tratamiento de vinazas de mezcal, se eliminó 85 % de la DQO, 83 % de fenoles y 32 % de compuestos aromáticos.

La eficiencia de eliminación de DQO conseguida en este tren de tratamiento es similar a la conseguida por otras tecnologías, como la digestión anaeróbica (Villalobos-Castillejos *et al.*, 2009), pero con la ventaja de eliminar compuestos tóxicos y recalcitrantes. Sin embargo, el uso de ozono para tratar vinazas de mezcal solo ha sido evaluado en laboratorio (Robles-González *et al.*, 2017), por lo que se requiere estudiar la eficiencia y factibilidad económica de dicho sistema a mayor escala. También es necesario considerar otros procesos complementarios que se pueden incorporar a este tren de tratamiento, como la digestión anaerobia y los tratamientos fúngicos, pues un factor limitante para aumentar la concentración de vinazas en el afluente es la concentración de compuestos recalcitrantes (Villalobos-Castillejos *et al.*, 2009; Retes-Pruneda *et al.*, 2014).

Estado actual de desarrollo de tratamientos de vinazas de mezcal

En la actualidad, el desarrollo de sistemas de tratamiento para vinazas de mezcal ha avanzado y se ha diversificado en comparación con la situación de hace 8 a 10 años, cuando la mayoría de las opciones de tratamiento eran todavía teóricas, porque solo habían sido probadas con vinazas de tequila u otro tipo de vinazas. Como se ha presentado en este documento, se han realizado diferentes estudios con procesos biológicos, físicos, químicos y procesos combinados. Sin embargo, a pesar del notable avance, estos estudios pueden considerarse los primeros esfuerzos en el desarrollo de sistemas de tratamiento aplicables a la industria del mezcal, ya que muchos de ellos se han hecho a escala de matraz. Por lo tanto, queda mucha más investigación por hacer, incluida la validación de tecnologías a escala piloto y real. El desarrollo de sistemas de tratamiento para vinazas de tequila y otras vinazas es una referencia importante que puede proporcionar información valiosa sobre hacia dónde podrían dirigirse los esfuerzos futuros para tratar las vinazas de mezcal.

Tratamiento de vinazas de tequila

Como ya se mencionó, las vinazas de tequila comparten similitudes importantes con las vinazas de mezcal. La tecnología más estudiada para el tratamiento de estas vinazas es la digestión anaerobia (Toledo-Cervantes *et al.*, 2018; Arreola-Vargas *et al.*, 2016; Méndez-Acosta *et al.*, 2010).

Como se observa en la Tabla 5, se pueden lograr eficiencias de remoción de MO superiores al 95 % a partir de vinazas de tequila (30 000-33 000 mg DQO/l), en reactores de tanque agitado continuo (CSTR) y reactores de lecho empacado (PBR) operando a 35 °C, con un pH entre 7.4-7.7 y TRH de 5-6 d (Toledo-Cervantes *et al.*, 2018; Méndez-Acosta *et al.*, 2010). Sin embargo, a nivel de planta piloto existe el problema de mantener la temperatura a 35 °C, por tal motivo, Arreola Vargas *et al.* (2017) operaron a temperatura ambiente (25 °C) un reactor empacado (PBR), con una concentración inicial de MO de 25 000 mg DQO/l, alcanzando eficiencias de remoción cercanas al 90 %. Otros problemas operativos que pueden surgir en el tratamiento de este tipo de residuos pueden deberse a la presencia de compuestos inhibidores, como fenoles, ácido láctico, ácido acético, formaldehído y furanos, que pueden inhibir más del 60 % de la actividad microbiana en varios procesos biológicos incluso después de una aclimatación. Pero aun así estos sistemas pueden remover hasta un 70 a 80 % de la DQO (Kumar & Ram, 2021; Weber, Estrada-Maya, Sandoval-Moctezuma, & Martínez-Cienfuegos, 2019; Palomo-Briones *et al.*, 2018). Los sistemas anaerobios tienen el potencial de ser utilizados como un tratamiento altamente eficiente en vinazas de

mezcal. Sin embargo, todavía se necesitan estudios que utilicen este sustrato.

Tabla 5. Tratamiento anaeróbico de vinazas de tequila.

Reactor	PBR ¹	PBR ²	UASB ³	CSTR ⁴	AnSBR
Vop	445 l	4 l	1.2	5 l	5.1
Empaque	PVC de ½ in	PVC Cloisonyle©	-	-	-
TRH (d)	5	6	1.5	5	7
Temperatura (°C)	25	35	35	35 ± 1	32
pH	5.5	7.7	6.5-6.8	7.4	7
DQO _{inicial} (mg/l)	25 000	30 000	7 500	33 000	8 100 ± 100
DQO _{remoción} (%)	89.2 ± 0.52	95.2 ± 1.2	70	95	85.4 ± 0.1

Fuentes: 1) Arreola Vargas *et al.* (2017); 2) Toledo-Cervantes *et al.* (2018); 3) Marino-Marmolejo *et al.* (2015); 4) Méndez-Acosta *et al.* (2010); 5) Arreola-Vargas *et al.* (2016).

Revalorización de vinazas

Una tendencia de interés en el tratamiento de los residuos orgánicos es su revalorización para la obtención de productos energéticos. A partir de vinazas de tequila (7 500-33 000 mg DQO/l) es posible generar biogás con alto contenido de metano (60-72 %) que puede ser utilizado como combustible (Arreola-Vargas *et al.*, 2016; Marino-Marmolejo *et al.*, 2015; Méndez-Acosta *et al.*, 2010). Sin embargo, una forma de obtener más de un compuesto energético de interés es utilizando “trenes de tratamiento” como, por ejemplo, una etapa de fermentación oscura (FO) para la generación de biohidrógeno seguida de un proceso metanogénico para producir metano. Al respecto, Buitrón, Kumar, Martínez-Arce y Moreno (2014b) obtuvieron 57.4 ± 4.0 ml H₂/l-h en un SBR (fermentación oscura) y una producción de 11.7 ± 0.7 ml CH₄/l-h en un UASB (proceso metanogénico).

El proceso de FO se caracteriza por una baja eficiencia de remoción de la DQO (5.78-13.3 %). Sin embargo, permite obtener biogás rico en biohidrógeno, con un rendimiento que oscila entre 714 y 833 mg DQO/l H₂ (Guo, Yang, Xiang, Wang, & Ren, 2010; Wang & Zhao, 2009). Esta tecnología ha sido estudiada en vinazas de tequila (57 000 mg DQO/l), generando biogás compuesto por un 70 ± 5 % de hidrógeno, con una tasa de producción de 72 ± 9 ml H₂ /l-h, removiendo hasta un 7.32 % de la DQO (García-Depraect & León-Becerril, 2018). La MO remanente de una FO, que se encuentra en forma de subproductos como alcoholes y AGV, puede utilizarse como sustrato en otros bioprocesos, como la digestión anaerobia (Guo *et al.*, 2010) o en celdas de combustible

microbianas (Wang & Zhao, 2009) para la generación de otros productos energéticos.

Las celdas de combustible microbianas (CCM) son sistemas donde es posible utilizar los electrones liberados por la degradación de sustratos orgánicos en presencia de microorganismos para la generación de electricidad (Li, Sheng, Liu, & Yu, 2011). Las CCM no han sido evaluados con vinazas de mezcal, pero sí con otro tipo de vinazas, por ejemplo, las generadas en la producción de alcohol de caña de azúcar (800 mg DQO/l), removiendo el 97 % de la MO y generando hasta 554 mV (Chi-Wen, Chih-Hung, Wan-Ting, & Shen-Long, 2015). Otros trabajos, como el de Ottoni *et al.* (2018), lograron eficiencias de remoción de MO del 54.5 % a partir de este mismo tipo de vinazas, con una concentración inicial de 24 000 mg DQO/l, produciendo hasta 800 mW/m². Por lo tanto, es importante evaluar la aplicación de CCM en el tratamiento de vinazas de mezcal.

Sin embargo, un concepto que no se ha aplicado al tratamiento de las vinazas de tequila o mezcal es el de "biorrefinería". En estos procesos se acoplan una serie de tratamientos de forma que el efluente de una etapa sirve de sustrato para la siguiente, generando productos de interés y minimizando la generación de residuos (Schievano *et al.*, 2016; Demirbas, 2009). Este tipo de procesos permite la obtención de diversos compuestos energéticos de interés a partir de residuos diversificados complejos, utilizando diferentes poblaciones microbianas que permiten obtener distintos metabolitos provenientes de un único sustrato original.

Actualmente, en el Instituto Politécnico Nacional (IPN) de México se realiza un estudio que busca generar biocombustibles a partir de vinazas de mezcal con el enfoque de biorrefinería que contempla dos bioprocesos:

una fermentación oscura seguida de un proceso de CCM. Los resultados preliminares muestran que en la fermentación oscura de vinazas de mezcal, operando con una concentración inicial de $18\,367 \pm 1\,200$ mg DQO/l, se obtuvieron eficiencias de remoción de MO del 20 ± 3 % con una producción de biogás de $1\,041 \pm 97$ ml/l-reactor. El biogás está compuesto tanto por biohidrógeno como por metano con una proporción que varía entre el 79 y 5 % de H₂, y entre el 11 y 28 % de CH₄ (Díaz-Barajas, Garzón-Zúñiga, Moreno-Andrade, Viguera-Cortés, & Barragán-Huerta, 2021). El efluente del reactor de FO con una concentración de $3\,765 \pm 519$ mg AGV/l se utilizó para alimentar la CCM; se han generado hasta $29\,55 \pm 20$ mV con una eficiencia de remoción de MO de 76 ± 9 % (Díaz-Barajas, Garzón-Zúñiga, Moreno-Andrade, Viguera-Cortés, & Barragán-Huerta, 2019). Estos resultados sugieren que este tren de tratamiento de biorrefinería puede lograr eficiencias significativas de remoción de MO y la generación de tres fuentes de energía sostenibles. Por lo tanto, es necesario llevar a cabo más trabajos de investigación con el enfoque de biorrefinería para obtener diversos compuestos de alto valor energético que puedan beneficiar a los productores de mezcal, reduciendo la descarga de efluentes altamente contaminantes al medio ambiente.

Perspectivas futuras

Respecto a los tratamientos de vinazas de mezcal publicados, el lodo activado no es una buena opción como tratamiento único, pues solo logra un 69 % de remoción de DQO y tiene una TRH de 13 días, lo que implica un enorme consumo energético y altos costos de operación. Las pruebas

fúngicas han presentado buenos resultados para la eficiencia de remoción de DQO (74 %) y color (98 %). Sin embargo, se trata de ensayos discontinuos, donde el principal mecanismo es la adsorción. Por lo tanto, se requiere mucha más investigación, como la realizada por Garzón-Zúñiga *et al.* (2018), que utilizan hongos inmovilizados en un medio de empaque orgánico para permitir la biotransformación y biodegradación de las vinazas de tequila. Esto se logra por la acción de enzimas extracelulares no específicas de hongos basidiomicetos. En cuanto al trabajo de digestión anaeróbica de las vinazas de mezcal, se logró una buena eficiencia de remoción de DQO (81 %), pero aplicando una alta dilución. Sin embargo, en trabajos con vinazas de tequila se han obtenido mejores eficiencias y aplicando concentraciones iniciales hasta 10 veces superiores (27g DQO/l). Por lo tanto, los estudios de digestión anaeróbica con vinazas de mezcal también deben enfocarse en poder trabajar con concentraciones más altas, para lo cual se requiere una aclimatación de la biomasa del reactor a sustancias recalcitrantes, presentes en las vinazas de mezcal, como fenoles y furfurales. Los procesos fisicoquímicos de floculación y ozonización mostraron bajas eficiencias de remoción de DQO entre 10 y 39 %, siendo las tecnologías menos eficientes; tampoco se recomiendan como tecnología única por el costo de los insumos (alginatos y ozono), que encarecen el tratamiento. La combinación de procesos fisicoquímicos con biológicos aumenta las eficiencias de remoción, pero incrementa los costos de tratamiento. Considerando todo lo anterior y el hecho de que los productores de mezcal ven los costos de tratamiento como un gasto —una razón importante por la que no tratan sus vinazas— lo que parece más adecuado es revalorizar los residuos. Es decir, desarrollar bioprocesos que generen subproductos con valor

comercial para interesar a los productores en invertir en ellos y al mismo tiempo reducir la contaminación ambiental. Esto es beneficioso tanto desde el punto de vista económico como desde la sostenibilidad del tratamiento. Se ha trabajado algo en esta área en el caso de las vinazas de tequila, pero muy poco se ha estudiado en el caso de las vinazas de mezcal. Por lo tanto, proponemos que es ahí donde se deben enfocar los esfuerzos de tratamiento. Finalmente, dentro de la línea de revalorización de los residuos de mezcal, proponemos que se haga con el enfoque de biorrefinería. La alta concentración de materia orgánica y la diversidad de moléculas orgánicas en las vinazas de mezcal permiten que se lleven a cabo diferentes bioprocesos para generar más de un producto con valor, por ejemplo, biohidrógeno, metano, biohydro, ácidos grasos volátiles y electricidad; energías, todas ellas, de alto valor y potencial para ser incluso reutilizadas en las mismas instalaciones productivas. Es decir, aprovechar los residuos contaminantes de la industria del mezcal como sustratos bajo el concepto de economía circular.

Conclusiones

En la última década se han presentado los primeros trabajos sobre el tratamiento de vinazas de mezcal, incluyendo lodos activados, tratamientos fúngicos, sistemas anaeróbicos, sistemas de floculación y ozonización, y algunos sistemas híbridos que combinan un tratamiento biológico y otro fisicoquímico. De estos tratamientos, los que presentan resultados más alentadores para su aplicación a gran escala son el

tratamiento fúngico en biofiltros con material de soporte orgánico y un tratamiento anaerobio, pues presentan altas eficiencias de remoción de materia orgánica, además de poder generar biogás con potencial como combustible.

La presencia de compuestos tóxicos, como los fenoles en las vinazas, pueden inhibir la actividad microbiana en los sistemas de tratamiento biológico, reduciendo la eficiencia en la remoción de materia orgánica. Por lo tanto, la inclusión de un pretratamiento fisicoquímico como la ozonación que elimine estos compuestos o realizar la aclimatación de la biomasa a estos compuestos puede mejorar el rendimiento de un sistema biológico de tratamiento.

Debido a las altas concentraciones de materia orgánica presentes en las vinazas de mezcal se propone su revalorización, ya que se han realizado pocas investigaciones aplicando sistemas de tratamiento que permitan obtener compuestos de alto valor energético como el biohidrógeno y el metano, y al mismo tiempo mejorar la eficiencia de remoción contaminantes en estos efluentes.

Sin embargo, considerando que el alto contenido de materia orgánica en las vinazas de mezcal se encuentra en forma de compuestos de diferente complejidad, se requiere de distintos grupos de microorganismos para ser biotransformados. En este trabajo se propone desarrollar trenes de tratamiento tipo biorrefinería, en los que se puedan obtener diversos tipos de compuestos energéticos aplicando diferentes bioprocesos de forma secuencial en los que los productos de un proceso sirvan de sustrato para el siguiente. Pocos trabajos recientes han demostrado el potencial de aplicar un tratamiento de biorrefinería a las

vinazas de mezcal y producir simultáneamente biohidrógeno, metano y energía eléctrica. Sin embargo, se debe investigar mucho más para desarrollar un tratamiento de biorrefinería a partir de los desechos orgánicos de la producción de mezcal.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Agradecimientos

Este estudio fue apoyado por el Instituto Politécnico Nacional (SIP 20202000). Asimismo, Sergio Díaz-Barajas fue apoyado con una beca del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt). Agradecemos también el apoyo del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Durango (COCyTED) a través del proyecto número 17 de la "Convocatoria para el Impulso a la Vinculación mediante Proyectos Academia-Empresa-Sociedad 2019-01".

Referencias

- Acharya, B. K., Mohana, S., & Madamwar, D. (2008). Anaerobic treatment of distillery spent wash - A study on upflow anaerobic fixed film bioreactor. *Bioresource Technology*, 99(11), 4621-4626. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.06.060
- Acosta, N., & Iñiguez, G. (2009). Fertilizante orgánico obtenido de las vinazas tequileras y estiércol de ganado. *Revista Científica Internacional Inter Science Place*, 2(4). Recovered from <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:185764734>

- Alvillo-Rivera, A. J., Garzón-Zúñiga, M. A., Estrada-Arriaga, E. B., Buelna, G., & Bahena-Bahena, E. O. (abril, 2015). Tequila Vinasses treatment using Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors. In: Cuevas-Rodriguez, G. (chair). *Management in México: Present and future, anaerobic bioprocesses*. 4th IWA Mexico Young Water Professionals Conference. Guanajuato, Guanajuato, México.
- Arreola-Vargas, J., Jaramillo-Gante, N. E., Celis, L. B., Corona-González, R. I., González-Álvarez, V., & Méndez-Acosta, H. O. (2016). Biogas production in an anaerobic sequencing batch reactor by using tequila vinasses: effect of pH and temperature. *Water Science & Technology*, 73(3), 550-556. DOI: 10.2166/wst.2015.520
- Arreola-Vargas, J., Snell-Castro, R., Rojo-Liera, N. M., González-Álvarez, V., & Méndez-Acosta, H. O. (2017). Effect of the organic loading rate on the performance and microbial populations during the anaerobic treatment of tequila vinasses in a pilot-scale packed bed reactor. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 93(2), 591-599. DOI: 10.1002/jctb.5413
- Barrera, E. L., Spanjers, H., Romero, O., Rosa, E., & Dewulf, J. (2019). A successful strategy for start-up of lab-scale UASB reactor treating sulfate-rich sugar cane vinasse. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. DOI: 10.1002/jctb.6222
- Beltran-de-Heredia, J., Dominguez, J. R., & Partido, E. (2018). Physico-chemical treatment for the depuration of wine distillery wastewaters (vinasses). *Water Science and Technology*, 51, 159-166. PMID: 15771112.

Buitrón, G., Prato-Garcia, D., & Zhang, A. (2014a). Biohydrogen production from tequila vinasses using a fixed bed reactor. *Water Science & Technology*, 70(12), 1919-1925. DOI: 10.2166/wst.2014.433

Buitrón, G., Kumar, G., Martinez-Arce, A., & Moreno, G. (2014b). Hydrogen and methane production via a two-stage processes (H₂-SBR D CH₄-UASB) using tequila vinasses. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(33), 19249-19255. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.04.139

Chi-Wen, L., Chih-Hung, W., Wan-Ting, H., & Shen-Long, T. (2015). Evaluation of different cell-immobilization strategies for simultaneous distillery wastewater treatment and electricity generation in microbial fuel cells. *Fuel*, 144, 1-8. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.12.009

CRM, Consejo Regulador del Mezcal. (2020). *Informe estadístico 2020*. Recuperado de https://www.crm.org.mx/PDF/INF_ACTIVIDADES/INFORME2020.pdf

Dental Packs. (2020). *Alginato max print cyan*. Recuperado de https://www.dentalpacks.mx/deposito-dental/clinica/materiales-de-impresion/alginato/max-print-cyan/?utm_source=Google%20Shopping&utm_campaign=Google%20Shop%20Feed%202020%20V2&utm_medium=cpc&utm_term=13427&gclid=CjwKCAjw9vn4BRBaEiwAh0muDDmLcmrFFEjMFUGLg3V4KnnwHEM1_bhJndFuo1MTwUALUHCVSoJCFRoCnssQAvD_BwE

- Demirbas, F. M. (2009). Biorefineries for biofuel upgrading: A critical review. *Applied Energy*, 86, S151-S161. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.04.043
- Díaz-Barajas, S. A., Garzón-Zúñiga, M. A., Moreno-Andrade, I., Viguera-Cortés, J. M., & Barragán-Huerta, B. E. (2021). Acclimation of microorganisms for an efficient production of volatile fatty acids and biogas from mezcal vinasses in a dark fermentation process. *Water Science & Technology*, 83(11), 2724-2731. DOI: 10.2166/wst.2021.176
- Díaz-Barajas, S. A., Garzón-Zúñiga, M. A., Moreno-Andrade, I., Viguera-Cortés, J. M., & Barragán-Huerta, B. E. (2019). *Generación de electricidad a partir de vinaza de mezcal en un proceso sistema de biorrefinería*. XVIII Jornadas Académicas del Doctorado en Ciencias en Biotecnología, Instituto Politécnico Nacional. Recuperado de <https://www.dcb.rsip.ipn.mx/assets/files/dcb-rsip/docs/jornadas/MemoriaDCBXVIIIIOCT19.pdf>
- Enitan, A. M., Adeyemo, J., Kumari, S., Swalaha, F. M., & Bux, F. (2015). Characterization of brewery wastewater composition. *International Journal of Environmental and Ecological Engineering*, 9(9), 1073-1076. DOI: 10.1007/s00248-013-0333-x
- Ferral-Pérez, H., Torres-Bustillos, L. G., Méndez, H., Rodríguez-Santillan, J. L., & Chairez, I. (2016). Sequential treatment of tequila industry vinasses by biopolymer-based coagulation/flocculation and catalytic ozonation. *Ozone: Science & Engineering*, 38(4), 279-290. DOI: 10.1080/01919512.2016.1158635

- García-Depraect, O., & León-Becerril, E. (2018). Fermentative biohydrogen production from tequila vinasse via the lactateacetate pathway: Operational performance, kinetic analysis, and microbial ecology. *Fuel*, 234, 151-160. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.06.126
- Garzón-Zúñiga, M. A., Alvillo-Rivera, A. J., Ramírez-Camperos, E., Buelna, G., Díaz-Godínez, G., & Estrada-Arriaga, E. B. (2018). Evaluation of *Ficus benjamina* wood chip-based fungal biofiltration for the treatment of Tequila vinasses. *Water Science & Technology*, 77(55), 1449-1459. DOI: 10.2166/wst.2018.023
- Garzón-Zúñiga, M. A., Sandoval-Villasana, A. M., & Moeller-Chávez, G. (2011). Decolorization of the AO24 azo dye and reduction of toxicity and genotoxicity. *Water Environment Research*, 83(2), 107-115. DOI: 10.2175/106143010X12780288627977
- Gómez-Guerrero, A. V., Valdez-Vázquez, I., Caballero-Caballero, M., Chiñas-Castillo, F., Alavéz-Ramírez, R., & Montes-Bernabé, J. L. (2018). Co-digestion of *Agave angustifolia* haw bagasse and vinasses for biogas production from mezcal industry. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 18(3), 1073-1083. DOI: 10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim/2019v18n3/Gomez

- Gómez-Guerrero, A. V., Caballero-Caballero, M., & Hernández-Gómez, L. H. (2014). Producción de biogás a partir de bagazo y vinaza del *Agave angustifolia* haw generada como residuo en la elaboración de mezcal (tesis de maestría). Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, México. Recuperado de http://literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx:8080/xmlui/handle/IITER_CII_DIROAX/226
- Guo, W. Q., Yang, S.-S., Y., Xiang, W. S., Wang, X. J., & Ren, N. Q. (2010). Minimization of excess sludge production by in-situ activated sludge treatment processes— A comprehensive review. *Biotechnology Advances*, 31(8), 1386-1396. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2013.06.003
- Kumar, A., & Ram, C. (2021). *Agave* biomass: A potential resource for production of value-added products. *Environmental Sustainability*, 4, 245-259. DOI: 10.1007/s42398-021-00172-y
- Li, W. W., Sheng, G. P., Liu, X. W., & Yu, H. Q. (2011). Recent advances in the separators for microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 102(1), 244-252. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.03.090
- López-López, A., Davila-Vazquez, G., León-Becerril, E., Villegas-García, E., & Gallardo-Valdez, J. (2010). Tequila vinasses: Generation and full-scale treatment processes. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 9, 109-116. DOI: 10.1007/s11157-010-9204-9

- López-López, A., León-Becerril, E., Rosales-Contreras, M. E., & Villegas-García, E. (2015). Influence of alkalinity and VFAs on the performance of an UASB reactor with recirculation for the treatment of Tequila vinasses. *Environmental Technology*, 36(19), 2468-2476. DOI: 10.1080/09593330.2015.1034790
- Marino-Marmolejo, E. N., Corbalá-Robles, L., Cortez-Aguilar, R. C., Contreras-Ramos, S. M., Bolaños-Rosales, R. E., & Davila-Vazquez, G. (2015). Tequila vinasses acidogenesis in a UASB reactor with Clostridium predominance. *SpringerPlus*, 4(1), 419. DOI: 10.1186/s40064-015-1193-2
- Méndez-Acosta, H. M., Snell-Castro, R., Alcaraz-González, V., González-Álvarez, V., & Pelayo-Ortiz, C. (2010). Anaerobic treatment of Tequila vinasses in a CSTR-type digester. *Biodegradation*, 21(3), 357-363. DOI: 10.1007/s10532-009-9306-7
- Mostafa, P., Mostafa, K. D. K., & Keikhosro, K. (2019). A review of biogas production from sugarcane vinasse. *Biomass and Bioenergy*, 122, 117-125. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.01.034
- Moraes, B. S., Zaiat, M., & Bonomi, A. (2015). Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 888-903. DOI: 10.1016/j.rser.2015.01.023
- Muñoz, J. F., & Orta, M. T. (2013). Efecto del ozono en la remoción de materia orgánica disuelta de un efluente secundario. *Revista EIA*, 9(18), 171-178. Recuperado de <https://revistas.eia.edu.co/index.php/reveia/article/view/268>

- Ottoni, C. A., Simoes, M. F., Santos, J. G., Peixoto, L., Martins, C. R., Silva, B. P., Neto, A. O., Brito, A. G., & Maiorano, A. E. (2018). Application of microbial fuel cell technology for vinasse treatment and bioelectricity generation. *Biotechnology Letters*, 41, 107-114. DOI: 10.1007/s10529-018-2624-2
- Palomo-Briones, R., López-Gutiérrez, I., Islas-Lugo, F. Galindo-Hernández, K. L., Munguía-Aguilar, D., Rincón-Pérez, J. A., Cortés-Carmona, M. A., Alatraste-Mondragón, F., & Razo-Flores, E. (2018). Agave bagasse biorefinery: Processing and perspectives. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20, 1423-1441. DOI: 10.1007/s10098-017-1421-2
- Retes-Pruneda, J. L., Jáuregui-Rincón, J., & Lozano-Álvarez, J. A. (2014). *Biorremediación de vinazas de la industria tequilera y mezcalera mediante tratamiento fisicoquímico y biológico*. Aguascalientes, México: Universidad Autónoma de Aguascalientes. Recuperado de <http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/11317/1089/387365.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Robles-González, V. S., Galíndez-Mayer, J., Rinderknecht-Seijas, N., & Poggi-Valardo, H. N. (2012). Treatment of mezcal vinasses: A review. *Journal of Biotechnology*, 157(4), 524-546. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2011.09.006
- Robles-González, V. S., Poggi-Valardo, H., Galíndez-Mayer, J., & Ruíz-Ordaz, N. (2017). Combined treatment of mezcal vinasses by ozonation and activated sludge. *Water Environment Research*, 90, 1985-1996. DOI: 10.2175/106143017X15054988926433

Schievano, A., Sciarria, T. P., Gao, Y. C., Scaglia, B., Salati, S., Zanardo, M., Quiao, W., Dong, R., & Adani, F. (2016). Dark fermentation, anaerobic digestion, and microbial fuel cells: An integrated system to valorize swine manure and rice bran. *Waste Management*, 56, 519-529.

Secretaría de Turismo de Durango. (2019). *Google Maps*. Recuperado de <https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1AB-onlKGPQmDaw6RIUKngAJVksScr5yU&hl=es&ll=23.906422500000005%2C-104.2664575&z=10>

Strong, P. J. (2009). Fungal remediation of Amarula distillery wastewater. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 26(1), 133-144. DOI: 10.1007/s11274-009-0152-x

Toledo-Cervantes, A., Guevara-Santos, N., Arreola-Vargas, J., Snell-Castro, R., & Méndez-Acosta, H. O. (2018). Performance and microbial dynamics in packed-bed reactors during the long-term two-stage anaerobic treatment of tequila vinasses. *Biochemical Engineering Journal*, 138, 12-20. DOI: 10.1016/j.bej.2018.06.020

Varila-Quiroga, J. A., & Díaz-López, F. A. (2008). Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala laboratorio. *Journal of Technology*, 7(2), 21-28. Recuperado de https://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2017-01-27_02-59-21139703.pdf.

- Villalobos-Castillejos, F., Robles-González, V. S., & Poggi-Valardo, H. (2009). *Disminución de la materia orgánica biodegradable presente en vinazas mezcaleras mediante digestión anaerobia*. Heroica Ciudad de Huajuapán de León, México: Universidad Tecnológica de la Mixteca.
- Wang, H., & Zhao, Y. (2009). A bench scale study of fermentative hydrogen and methane production from food waste in integrated two-stage process. *International Journal Hydrogen Energy*, 34(1), 245-254. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.09.100
- Weber, B., Estrada-Maya, A., Sandoval-Moctezuma, A. C., & Martínez-Cienfuegos, I. G. (2019). Anaerobic digestion of extracts from steam exploded Agave tequilana bagasse. *Journal of Environmental Management*, 245, 489-495. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.05.093
- Wu, C., Wang, Y., Gao, B., Zhao, Y., & Yue, Q. (2012). Coagulation performance and floc characteristics of aluminum sulfate using sodium alginate as coagulant aid for synthetic dyeing wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 95, 180-187. DOI: 10.1016/j.seppur.2012.05.009