

Residuos líquidos provenientes de las bebidas espirituosas mexicanas: su tratamiento y valorización

Liquid waste from mexican spirits: its treatment and valorization

Miguel Ángel de la Torre Anguiano¹, Guillermo Flores Cosío¹, y Lorena Amaya Delgado^{1*}

¹*Biología Industrial, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Camino Arenero 1227, El Bajío, Zapopan, Jal., México 45019.*

**Autor de correspondencia: Lorena Amaya Delgado, lamaya@ciatej.mx*

Palabras clave:

economía circular, agave, vinaza, tequila, bioproceso

Keywords:

circular economy, agave, vinasse, tequila, bioprocess

Resumen

La demanda de bebidas destiladas mexicanas (tequila y mezcal) se ha incrementado y seguirá en aumento a nivel nacional y mundial. Esto es preocupante, ya que por cada litro de destilado elaborado se producen, en promedio, 12 litros de residuos líquidos (vinazas). La descarga de estos residuos a cuerpos de agua o tierras de cultivo representa un enorme riesgo ambiental. Por ejemplo, 1 litro de vinaza puede llegar a contaminar 20 litros de agua. En los últimos años se ha planteado el tratamiento de vinazas desde un punto de vista de economía circular, ya que es una estrategia que puede mitigar contaminantes obteniendo productos valiosos como el hidrógeno, biogás, proteína unicelular, enzimas y distintos productos que pueden representar una ganancia más para las destilerías. Esta revisión se enfoca en resumir y analizar las diferentes tecnologías publicadas hipotetizando la mejor reducción de contaminantes en las vinazas con ganancias implícitas.

Abstract

The demand for Mexican distilled beverages (tequila and mezcal) has increased and will continue to grow both nationally and globally. This is concerning because, for each liter of distilled product produced, an average of 12 liters of liquid waste (vinasse) are generated. The discharge of these residues into bodies of water or agricultural land causes a significant environmental risk; for example, one liter of vinasse can contaminate up to 20 liters of water. In recent years, vinasse treatment has been approached from a circular economy perspective, as it is a strategy that can mitigate pollutants while generating valuable products such as hydrogen, biogas, single-cell protein, enzymes, and others byproducts that could provide additional economic income for distilleries revenue for distilleries. This review focuses on summarizing and analyzing different published technologies, hypothesizing the best reduction of contaminants in vinasse with implicit economic benefits.

Recibido: 30 de abril 2025

Revisado: 06 de junio 2025

Aceptado: 13 de junio 2025

Publicado: 21 de julio 2025



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



Introducción

A nivel global, el consumo de bebidas espirituosas ha ido aumentando por factores como la globalización y la evolución de los hábitos de consumo. Esto significa que a mayor elaboración de bebidas también se incrementa la producción de residuos industriales difíciles de tratar, amenazando al ambiente a un paso alarmante. A manera de conceptualización, por 1 litro de tequila o mezcal se generan 12 litros de vinazas (López-López et al., 2010), resultando en una evidente y muy significativa huella de carbono por parte de las destilerías de diferentes bebidas. En años recientes se han apoyado muchas iniciativas con la meta de reducir, reusar y reciclar los residuos industriales para desarrollar una industrialización más amigable con el medio ambiente. La gran ola del interés colectivo de disminuir el daño que provocamos al planeta ha puesto en tendencia a ciertos modelos de economía circular donde se busca aprovechar los residuos para la fabricación de productos que representen una ganancia dentro del tratamiento de los desechos industriales. Por el momento la industria de los destilados está creciendo a marchas aceleradas haciéndose cada vez más difícil el tratar apropiadamente las vinazas, por lo cual ya no basta con clasificar y tratar los desechos industriales; sino que es imperativo que se reincorporen a alguna cadena de producción para generar algún producto con valor económico suficiente para solventar el gasto por procesamiento. Sin embargo, actualmente si no se procesan correctamente los residuos orgánicos industriales, representan un gasto por el simple hecho de resguardarlos, lo que deriva en malas prácticas de disposición. Es por ello que el concepto de economía circular se basa en la idea de aprovechar los residuos de forma inteligente para que se logren manejar de la mejor manera, al mismo tiempo que se lucra con los productos obtenidos (Corvellec et al., 2022). Toda la lógica detrás del concepto de economía circular es poder obtener una ganancia extra dentro de la misma industria que produce los residuos, con la finalidad que represente una inversión antes que un gasto. Existen diversas publicaciones relacionadas con el tratamiento de vinazas pertenecientes de diferentes industrias, pero solo unas pocas se han reportado a una escala industrial (Díaz-Vázquez et al., 2022).

Dentro de la industria de los destilados existen dos grandes categorías de desechos generados: los sólidos y los líquidos, que dentro de la elaboración de tequila son conocidos como bagazo y vinaza, respectivamente. El bagazo se produce una vez que la materia prima, en este caso el agave, es cocido, molido y exprimido dejando únicamente las fibras rígidas para la obtención de jugo de agave cocido. Para extraer jugo de agave crudo se tritura, desgarrar, se recolectan los lixiviados y prensan el bagazo para su fácil manejo dejando fibras más agotadas que las del agave cocido. La vinaza en todos los destilados es prácticamente el efluente del proceso de destilado de algún fermento con la finalidad de capturar la mayor cantidad de alcohol etílico posible.



En el caso del tequila, es necesario hacer dos destilaciones separadas. La primera llamada “destrozamiento”; y la segunda, “rectificación”, con la finalidad de separar la mayor cantidad de alcoholes que contiene la fermentación obteniéndose el “ordinario”. Para un producto del destrozamiento oscila de los 20 a 30% de etanol, el cual posee todos alcoholes más volátiles producidos durante la fermentación que están mezclados y se pueden separar incluso por arrastre de vapor. Se les llaman “cabezas o puntas” para los alcoholes superiores, el “corazón” para el etanol y las “colas” para el metanol. Dentro de este proceso es donde formalmente se producen las vinazas, siendo todo el resto del fermento que no es volátil. Para la segunda destilación se toma el ordinario producido y se realiza una destilación en alambique, la cual se denomina “rectificación”, con la meta de separar las cabezas (alcoholes superiores) y colas (metanol en su mayoría) del corazón (etanol o alcohol etílico) que no se volatilizaron en el destrozamiento para así obtener el tequila como producto final que después es diluido a 55 - 35% v/v de alcohol para su posterior envasado (Cedeño, 1995). Durante la rectificación se genera otro desecho conocido como flemazas, las cuales son indiscriminadamente fusionadas y desechadas con las vinazas (Iñiguez, 2010).

Dentro de los retos que se presentan para el tratamiento de vinazas, el más difícil es el de poder homogenizar y sistematizar el tratamiento, ya que cada lote creado de vinazas pose diferentes niveles de pH de entre 3.0 – 5.0, diferente cantidad de sólidos e incluso diferentes niveles de DBO y DQO (demanda biológica y química de oxígeno respectivamente) que oscilan entre los 10,000 y 60,000 mg/L obstaculizando la estandarización de una única forma de tratar las vinazas (Robles-González et al., 2012). La mayor concentración de DQO dificulta las interacciones aerobias para bacterias y levaduras, al igual que un pH bajo puede actuar de manera inhibitoria en el metabolismo celular. (Calderón et al., 2025). Dentro de los tratamientos y pretratamientos más comunes y recurrentes está la fermentación oscura o digestión anaerobia, la cual ocurre dentro de un biodigestor para producir metano, el cual puede ser utilizado como biogás y otras opciones de bioenergías (Díaz-Cruces et al., 2020). Por otro lado, algunos experimentos han demostrado la utilidad de las vinazas como medios de cultivo para ciertos organismos eucariontes (levaduras y hongos) (Díaz-Vázquez et al., 2022). Al ser la vinaza un residuo orgánico, se puede aprovechar para la producción de biomasa microbiana de diferente tipo, llamando la atención en los últimos años la elaboración de proteína unicelular (SCP por sus siglas en inglés) que se vuelve una alternativa atractiva para añadir proteína en la dieta (Jach et al., 2022). Bajo la misma lógica de la economía circular, se han desarrollado estudios donde también se pueden obtener metabolitos específicos útiles para la industria farmacéutica y cosmética (Rodríguez-Romero et al., 2020). Sin embargo, como ya se mencionó, las vinazas son muy diferentes entre ellas, ya que cada paso de la cadena de producción de la bebida suma



o resta componentes en la elaboración y fermentación del mosto; incluso el mismo suelo donde crece el agave puede otorgarle una mayor o menor cantidad de azúcares fermentables y, en consecuencia, producir vinazas con composiciones diversas. A pesar de estas diferencias, en todos los tratamientos de las vinazas estudiados se busca y evidencia una reducción de la DBO y la DQO para transformar a este residuo menos peligroso para el ambiente (López-López et al., 2010). Este estudio analiza y resume la amplia gama de tratamientos relacionados con la reducción de contaminantes de las vinazas junto con la obtención de productos de valor industrial.

Desarrollo

Hasta ahora la industria de los destilados está creciendo a marchas aceleradas, lo que complica el manejo apropiado de los residuos generados causando un gran deterioro en el ambiente. Es imperativo reducir y mitigar la contaminación creada por la elaboración de tequila y mezcal, pero a la par es necesario generar y valorar productos en mercados competentes para así incentivar a la industria de bebidas destiladas a invertir en una gestión de residuos bajo un modelo de economía circular (Corvellec et al., 2022).

Métodos para la degradación de vinazas

Las vinazas son efluentes muy agresivos y recalcitrantes, y su vertido directo a cuerpos de agua y suelo puede provocar graves daños ambientales, como la lixiviación de metales del suelo a las aguas subterráneas, la disminución del pH del suelo, la acidificación del ecosistema, un alto potencial de emisiones de CH_4 (Eduardo et al., 2019; Oliveira et al., 2013), muerte de la vida acuática y numerosos problemas graves de salud (Cruz et al., 2017). El destino más común de este efluente en las plantas de etanol de caña de azúcar es la fertirrigación, ya que esta actividad requiere una inversión prácticamente nula y reduce los costos de mantenimiento de la caña de azúcar, donde la vinaza se libera directamente al *suelo in natura* (sin tratamiento previo) con el argumento de que es una fuente de nutrientes, como potasio y nitrógeno (Ferreira et al., 2011). Estos procesos pueden provocar efectos a largo plazo en las propiedades físicas del suelo, aumentando la capacidad de infiltración y contaminando las aguas subterráneas (Christofolletti et al., 2013). Se han estudiado tratamientos como la incineración y la biodigestión anaeróbica, pero el proceso de incineración requiere altos costos operativos y genera niveles muy altos de contaminación atmosférica, mientras que la biodigestión, si bien es interesante para la generación de energía concomitante (biogás), no es capaz de degradar los compuestos fenólicos presentes en la vinazas (Christofolletti et al., 2013; Navarro et al., 2000). Lo anterior pone de manifiesto la necesidad urgente de desarrollar tecnologías más eficientes y ambientalmente seguras para el manejo y aprovechamiento



de las vinazas. Los procesos para el tratamiento de las vinazas se pueden clasificar según el tipo de tratamiento: pretratamiento, tratamiento primario, fisicoquímico, biológico y procesos avanzados.

Pretratamiento

El pretratamiento o acondicionamiento de la vinaza consiste en reducir la temperatura y elevar el pH de 3.5 a 6-7. La práctica común para reducir la temperatura de 90 a 40 °C es el transporte de las vinazas a tanques o estanques de almacenamiento en condiciones ambientales adecuadas (Linerio-Gil & Guzmán-Carrillo, 2004). La neutralización del pH de la vinaza se realiza en los mismos tanques receptores y, en algunos casos, en lagunas, utilizando $\text{Ca}(\text{OH})_2$. El pretratamiento es una práctica común tanto en sistemas de pequeña escala (laboratorio) como a gran escala (industrial).

Tratamiento primario

Lagunas de sedimentación

A escala industrial, las lagunas han sido empleadas tanto para el almacenamiento de vinazas como para la remoción de sólidos sedimentables (SSPV). Aunque esta tecnología puede alcanzar eficiencias de eliminación superiores al 80% de sólidos suspendidos mediante la adición de polímeros coagulantes, ya sea antes o después de un tratamiento biológico, la concentración de sólidos disueltos (DS) y la demanda biológica de oxígeno (DBO) no se reducen de manera significativa. Además, incluso cuando se logra una alta remoción de SSPV, más del 90% de la materia orgánica permanece en el efluente. A pesar de estos avances, esta alternativa ha sido aplicada de forma limitada debido a su elevado costo y a que la mayoría de las lagunas no están técnicamente acondicionadas para cumplir eficazmente con este propósito, lo que representa un riesgo constante de contaminación del suelo y del subsuelo (Bautista-Zuñiga & Durán-de-Bazúa, 1998; Íñiguez-Covarubias & Peraza-Luna, 2007).

Procesos fisicoquímicos

Dada la problemática que representan las descargas directas de vinazas a cuerpos de agua y suelos, varios ensayos se han publicado dirigidos a reducir los contaminantes de este residuo líquido. Los tratamientos fisicoquímicos para efluentes líquidos están enfocados en separar materia orgánica del agua o de usar agentes oxidantes potentes, de este modo se reduce los contaminantes químicos y/o la cantidad de vinaza a tratar. (Hoarau et al., 2018). La finalidad de los tratamientos es hacer más amigable con el ecosistema los desechos producidos por la industria, desgraciadamente hay veces que es tanta la carga de contaminantes y moléculas recalcitrantes como los fenoles, sulfatos y metales pesados,



que es necesario utilizar métodos que no son biodegradables solo para poder disminuir la carga hasta niveles operables de polución. Aquí se presentan algunos de los métodos más amigables con el medioambiente que existen y se tiene registro.

Adsorción

El carbón activado es ampliamente utilizado como adsorbente de compuestos orgánicos presentes en aguas residuales. No obstante, su aplicación a gran escala se ha visto limitada debido a su elevado costo (Sowmeyan & Swaminathan, 2008). Gracias a su alta proporción de microporos y mesoporos, el carbón activado ha demostrado ser altamente eficiente en la adsorción de melanoidinas y compuestos oscuros presentes en la vinaza. El proceso de adsorción implica fenómenos complejos que incluyen interacciones químicas entre los solutos y los grupos funcionales en la superficie del adsorbente, tales como interacciones electrostáticas, fuerzas de van der Waals, enlaces de hidrógeno, intercambio de ligandos e interacciones hidrofóbicas (Figaro et al., 2009).

Ante el elevado costo del carbón activado comercial, se han explorado alternativas de producción artesanal orientadas a la decoloración de vinazas. Satyawali y Balakrishnan (2007) reportaron una reducción del color del 50.3% y una disminución del 23.6% en la demanda química de oxígeno (DQO) al tratar vinaza mediante un sistema anaerobio complementado con adsorción empleando carbón activado preparado a partir de bagazo de caña y tratado con ácido fosfórico. Sin embargo, estos niveles de eficiencia fueron inferiores a los logrados con carbón activado comercial, el cual alcanza eficiencias de remoción de color entre 93–95% y reducciones de DQO del 76–88%.

El uso del carbón activado como única estrategia de tratamiento para la decoloración de vinazas ha mostrado ser insuficiente. Por ello, se ha propuesto el uso de tratamientos combinados, como la coagulación–floculación seguida de adsorción, los cuales permiten una remoción más completa de compuestos colorantes (Satyawali & Balakrishnan, 2008).

En términos de capacidad de adsorción de melanoidinas (q , en g de melanoidina por g de carbón activado), el carbón activado comercial presenta valores de hasta $2.85 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$. No obstante, esta capacidad puede variar según la materia prima utilizada. Por ejemplo, el carbón activado producido a partir de bagazo de caña tailandés mostró una capacidad de $1.72 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$, mientras que el proveniente de Brasil alcanzó los $2.45 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$, valor comparable al del carbón activado comercial (Bernardo et al., 1997).

Coagulación-floculación

El proceso fisicoquímico de coagulación–floculación es uno de los más utilizados, tanto a escala piloto como industrial, para el tratamiento de vinazas provenientes de la producción de tequila. Este proceso implica la adición de sales de aluminio o

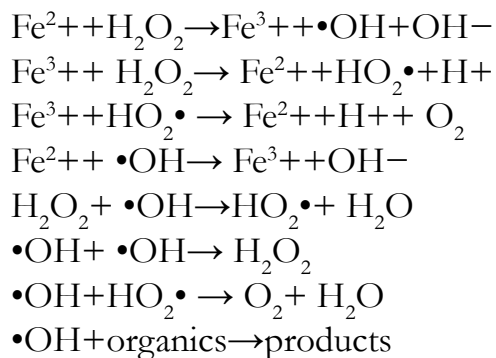


hierro como coagulante (por ejemplo $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) y se adiciona un polímero comercial como floculante. A nivel industrial, su principal objetivo es la remoción de sólidos suspendidos (SS) y sólidos coloidales, con eficiencias reportadas entre el 20 y el 30%. A escala de laboratorio, Meza-Pérez et al. (1996) lograron una remoción del 70% del color y del 37% de la DQO al tratar un efluente anaerobio de vinaza con 3.3 g/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ a pH 6. Por su parte, Linerio-Gil y Guzmán-Carrillo (2004) emplearon 5 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ en combinación con 1.5 mg/L de un polímero comercial para tratar vinazas crudas previamente decantadas, obteniendo una remoción de sólo el 25% de la DQO.

En estudios a escala piloto, Iñiguez-Covarrubias y Peraza-Luna (2007) demostraron la eficiencia de un polímero catiónico en la remoción de sólidos suspendidos, alcanzando eficiencias de hasta el 100%. Los autores estimaron un costo operativo de 0.076 USD por litro de vinaza tratada, considerando un precio del polímero de 3.80 USD/kg. No obstante, en las distintas etapas del tratamiento, la remoción de sólidos disueltos fue muy limitada, al igual que la reducción de materia orgánica (DQO y DBO). Además, este proceso presenta desventajas operativas relevantes, tales como la generación de grandes volúmenes de lodos y el aumento de costos asociado a las dosis requeridas de coagulantes y floculantes. Los coagulantes de uso más común en la industria poseen una composición metálica; sin embargo, se están investigando alternativas más amigables con el medio ambiente. Entre estas destacan los polímeros naturales obtenidos de diversas especies vegetales, como la goma de mezquite, el quitosano derivado de camarón y otras gomas vegetales (por ejemplo, gomas exudadas) (Torres. 2012). Estas sustancias han mostrado eficiencias de remoción superiores a las alcanzadas con las sales metálicas convencionales. No obstante, los procesos de obtención de estos biocoagulantes aún presentan limitaciones importantes, principalmente en términos de costo y disponibilidad, lo que restringe su aplicación a escala industrial.

Reacción de Fenton

La reacción de Fenton es un proceso químico que utiliza una combinación de peróxido de hidrógeno y una sal de hierro (generalmente sales ferrosas) para generar radicales hidroxilos altamente reactivos. Estos radicales son capaces de oxidar y degradar una amplia variedad de compuestos orgánicos, lo que hace que la reacción de Fenton sea útil en tratamientos de aguas residuales y otros procesos de descontaminación. Su funcionamiento se muestra en las siguientes ecuaciones (De Laat, & Gallard, 1999; Ameta, et al 2018).



La reacción de Fenton es ampliamente usada en el tratamiento de vinazas del bioetanol y es una de las opciones con menor impacto al ambiente. Otra de sus características es su habilidad de degradar compuestos orgánicos en dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y iones inorgánicos. Se ha evidenciado que este método trabaja en condiciones acidas (2-6 pH) y con cargas de 5000 a 20,000 mg/L de DQO y reduciéndola hasta un 48% haciéndolo candidato perfecto para las vinazas tequileras. (Hoarau et al 2018).

Membranas

Este tipo de tratamiento está hecho para tratar vinazas mediante filtración a presión con microfiltración (MF) y ultrafiltración (UF) eliminando así materia seca, nitrógeno total, sólidos suspendidos y, por consiguiente, disminuye la DBO y DQO. Además, se puede considerar como un pretratamiento perfecto que incrementa la eficiencia de cualquiera que sea el próximo tratamiento biológico. Por otra parte, se pudiese aumentar su efectividad añadiendo carbón activado en el proceso, pero esto elevaría los costos reduciendo la viabilidad económica. Además, todo lo que se capta por los diferentes filtros puede ser utilizado como subproducto por ejemplo para el cultivo de algas como la *Spirulina* spp. (Mikucka & Zielińska, 2020).

Electrocoagulación

La electrocoagulación es un proceso que utiliza electricidad para tratar aguas residuales o eliminar tejido anormal. El tratamiento de aguas desestabiliza contaminantes para facilitar su remoción. Esta técnica no es nada novedosa ya que se tiene registrada desde el siglo XIX para la elaboración de agua potable en Inglaterra. De igual manera, es una de las menos invasivas con respecto a sus productos. Consiste en generar coagulantes *in situ* gracias a la oxidación eléctrica de ánodos de sacrificio cuando se les hace pasar una corriente eléctrica a través de los electrodos. Los electrodos son usualmente hechos de aluminio o hierro por su alta conductividad y abundancia de estos minerales en el planeta, por lo que se posicionan como materiales poco costosos y además son



más amigables con el ambiente ya que los hidróxidos de hierro y aluminio son poco tóxicos y presentan un manejo más seguro. Otra ventaja que esta técnica posee es la de su alta capacidad de oxidación donde si se oxida el agua crea cationes de hidronio (H_3O) y gas de oxígeno, los cuales en presencia de aniones de cloruro los (Cl^-) oxida a Cl_2 lo que da como resultado un potente oxidante para materia orgánica (Hakizimana et al 2017). Se ha demostrado que se puede remover alrededor del 95% de la DQO en diferentes aguas residuales industriales siendo un método poco costoso, bastante accesible y decentemente amigable con el ambiente (Rodríguez Díaz et al 2021).

Procesos biológicos

Los tratamientos biológicos son un poco más exigentes con los intervalos de DQO y pH con los que pueden operar por lo cual a primera instancia no resultan tan atractivos ni prácticos como los métodos fisicoquímicos donde se ha demostrado que trabajan en pH ácidos y con cargas de hasta 100,000 mg/L de DQO. Aún así los tratamientos biológicos a diferencia de los fisicoquímicos pueden producir productos valiosos para diferentes industrias que aún dependen de enzimas y biomasa proveniente de animales, algas, hongos y bacterias. De igual manera un solo método limita bastante la apropiada descontaminación de los efluentes y se requiere combinar diferentes métodos tanto biológicos como fisicoquímicos para poder no solo retirar los contaminantes a niveles aceptables sino también para poder tener el mayor capital posible proveniente de los subproductos con valor industrial.

El tratamiento de los efluentes por bacterias, tanto en procesos anaeróbicos como aerobios, ha sido uno de los más estudiados, ya que tienen la capacidad de degradar materia orgánica compleja y reducir la carga contaminante. Las especies microbianas que mayormente se emplean dentro de estos tratamientos son *Pseudomonas aeruginosa*, *P. fluorescens*, *Stenotrophomonas matophila* y *Proteus mirabilis*, al igual que ciertas bacterias ácido acéticas y ácido lácticas (BAC y BAL respectivamente), las cuales pueden llegar a ser aerobias facultativas. Desafortunadamente, por la naturaleza de los organismos es necesario agregar una fuente de carbono y nitrógeno para cubrir las demandas metabólicas de los microorganismos. Sin embargo, no solo se debe adicionar macronutrientes, sino también es necesario complementar la fermentación con micronutrientes para obtener una degradación considerable, al igual que una notable cantidad de subproductos con la finalidad de poder ser comercializados. La adición de nutrientes incrementa los costos de producción por cada litro que debe ser tratado. Por lo tanto, este esquema está pensado como pre o post tratamiento para así tener que diluirlas lo menos posible y no tener que adicionar numerosas cantidades de macro y micronutrientes, haciendo este proceso rentable (Sari & Juliastuti, 2019).



La descomposición de la materia orgánica suele ser realizada por hongos filamentosos. Tienen la capacidad para degradar compuestos recalcitrantes presentes en las vinazas, como fenoles, lignina, taninos y otros compuestos. En su mayoría los tratamientos utilizan hongos saprofitos pertenecientes al phylum Basidiomycota. Esta división de hongos es a la que pertenecen aquellos que comúnmente conocemos como hongos con cuerpo fructífero caracterizados por degradar lignina, celulosa y xilosa. Esta habilidad es ampliamente aplicada en el tratamiento de desechos agroindustriales. Por otra parte, es uno de los tratamientos que genera distintos subproductos con gran valor en el mercado tanto industria como científico, ya que se sintetizan las enzimas como la lignina peroxidasa (LiP), manganoso peroxidasa (MnP), peroxidasa versátil (VP) y lacasas, usualmente utilizadas para la degradación de fenoles y polifenoles. Este procedimiento se lleva a cabo en una fermentación sólida con el objetivo de reducir contaminantes para posteriormente cosechar las enzimas producidas. A pesar de que puede llegar a ser costoso, el costo de operación de este método es restaurado por la reincorporación a mercados ya establecidos y valorados de las enzimas (Zielińska et al., 2021).

Tratamientos anaeróbicos

Es un proceso biológico en el que microorganismos anaerobios degradan la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Este proceso es uno de los más comunes y abundantes dentro de los tratamientos de vinazas y aguas negras, esto debido a su bajo costo operacional. En adición al ser tan utilizado hay diferentes formas de emplearlo según se requiera y sea más conveniente para el usuario (Robles-González et al., 2012). Todos realizan la misma función bajo condiciones similares donde se utilizan microorganismos anaerobios estrictos o facultativos, donde se metaboliza toda la materia orgánica e incrementando el pH de 3 hasta 5.25 y bajando la DBO y DQO (Jouanneau et al., 2014). Por otra parte, este tipo de tratamiento elabora subproductos ya valorados en industrias como el metano, hidrógeno y los mismos lodos activados. Por lo tanto, es un tratamiento adecuado que se introduce dentro de la economía circular. El hidrógeno es un subproducto de la glucólisis realizada por bacterias anaerobias, las cuales también generan CO_2 . Este hidrógeno como subproducto tiene gran potencial energético que, mediante su combustión, puede utilizarse en calderas industriales y mediante su reacción electroquímica con celdas de combustible como generadores estacionarios de energía. Convirtiéndose en una buena alternativa no solo por su practicidad, sino también porque sus emisiones se limitan a dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua (Hallenbeck, & Benemann, 2002; Staffell et al., 2019). De igual manera el metano formado se puede usar como biogás. Por otra parte, los lodos activados tienen la ventaja de ser un medio donde se resguardan y se multiplica un consorcio microbia-

no que ayuda a degradar los residuos, y que además sirve como inóculo para otro lote de desechos a degradar, disminuyendo el costo operacional considerablemente (Vargas-Hernández & Medrano, 2019).

Tratamientos aeróbicos

Es un proceso biológico en el cual microorganismos aerobios degradan la materia orgánica en presencia de oxígeno. Aunque los efluentes con una gran carga de materia orgánica son mejor tratados con procesos anaeróbicos evidenciado por una reducción considerable de DQO, también tienen un papel importante en etapas posteriores ya con un pH más neutro y menor DQO y DBO genera un ambiente más apto para proliferar diferentes organismos. La mayoría de los tratamientos aeróbicos se utilizan para remover el color (melanoidinas) y los polifenoles para así reducir la toxicidad. Se han descrito varios tipos de microorganismos como hongos (*Penicillium decumbens*, *Aspergillus* sp., *Aspergillus niger*, *Flavodon flavus*), hongos de podredumbre blanca (*Phanerochaete* sp., *Phanerochaete chrysosporium*, *Trametes vesicolour*, *Coriolus* sp.), levaduras (*Citeromyces* sp.) y bacterias (*Bacillus* sp., *Pseudomonas* sp., bacterias acetogénicas) que eliminan melanoidinas (Satyawali & Balakrishnan, 2008). Por otra parte, los tratamientos aeróbicos son bastante atractivos por su diversidad y cantidad de subproductos que se pueden obtener a través de estos. A manera de ejemplo, se pueden obtener ácidos orgánicos, lípidos, hidrocarburos, biomasa activa, enzimas y SCP. Además, se pudiese utilizar como medio de cultivo en cepas con importancia medica de *Escherichia coli* y *Sacharomyces cerevisiae* modificadas para la producción de farmacos (Robles-González et al., 2012).

Reactor de lecho fluidizado

Es un tipo de biorreactor en el que el medio soporte (normalmente partículas inertes como arena, antracita, o partículas plásticas de baja densidad) se mantiene en suspensión por el flujo ascendente del líquido (las vinazas). Sobre las partículas se forma una biopelícula microbiana. Por lo tanto, con unas cuantas alimentaciones de vinazas se puede resuspender constantemente la biomasa dentro del reactor otorgando mayor contacto con la vinaza. Además, ya que el movimiento no para, se vuelve más eficiente la degradación de partículas grandes obteniendo menores niveles de DBO y DQO y eliminando con mayor eficiencia los contaminantes (Abdalla, K. Z., & Hammam, 2014). Por otra parte, el reactor de lecho fluidizado puede operar a grandes escalas ya evidenciado a nivel piloto, lo cual nos da libertad de suponer que pudiese soportar las cargas industriales de la demanda de tratamiento de residuos. No obstante, otorga una notable cantidad de biogás como subproducto (Robles-González et al., 2012).



Filtros anaeróbicos

Los filtros anaeróbicos son columnas de relleno con un tipo de soporte de medio estático en el que los microorganismos degradan la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Esta técnica funciona con una carga baja de sólidos ya que tiende a obstruirse. Por lo tanto, este método está diseñado para trabajar con barreras de consorcios microbianos específicos que el efluente tendrá que pasar para así reducir la carga de sólidos suspendidos que tengan. De tal manera que la vinaza, al penetrar las diferentes capas de medio estático, se detoxifica y se produce biogás como subproducto. Dependiendo de las condiciones, este tratamiento se puede llevar a cabo en flujo ascendente o descendiente (de Oliveira Cruz et al., 2019).

Compostaje de vinazas con residuos sólidos

En México es común la práctica de fusionar residuos orgánicos para después introducirlos al suelo con el objetivo de incorporar materia orgánica. A pesar de lo que se ha creído en los últimos 30 años, este tipo de prácticas son únicamente aceptadas en zonas rurales con suelos pobre de nutrientes, como serían los desiertos. En algunas zonas con alta salinidad esta técnica ayuda a prevenir la erosión del suelo. Por otra parte, es una estrategia que afecta varias características del suelo como su conductividad, pH e incluso la cantidad de microorganismos presentes que, como consecuencia, perjudica más de lo que ayuda al suelo (Robles-González et al., 2012).

Procesos avanzados

El ozono es un agente oxidante altamente potente y de amplio uso en procesos de potabilización de agua y tratamiento de aguas residuales (Beltrán, 2004; López-López y Pic, 2006). Su aplicación ha sido particularmente efectiva en la degradación de compuestos orgánicos complejos presentes en vinazas alcohólicas, tales como fenoles, colorantes y pesticidas, tanto en etapas previas como posteriores a tratamientos biológicos. La eficacia de esta tecnología se basa en su capacidad oxidativa directa y en la formación de radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) como productos secundarios de la reacción, los cuales presentan una elevada reactividad frente a compuestos recalcitrantes (Sangave et al., 2007; Hoarau et al., 2018).

Diversos estudios han demostrado el potencial de la ozonación como tecnología de pretratamiento. Por ejemplo, Sangave et al. (2007) reportaron una mejora de hasta 25 veces en la eficiencia de reducción de la demanda química de oxígeno (DQO) en efluentes de destilería tratados con digestión aerobia posterior, alcanzando un 45.6% de remoción de DQO frente a un 1.8% en el control sin ozono. Asimismo, la ozonación previa a la digestión anaerobia de vinazas permitió reducir el contenido de fenoles y aumentar en un 13.6% el rendimiento de metano, aunque sin impacto significativo en el carbono orgánico total (COT) (Siles et al., 2011).



En tratamientos combinados, el uso conjunto de ozono con radiación ultravioleta (UV), peróxido de hidrógeno o catalizadores como dióxido de titanio TiO_2 ha demostrado mejorar notablemente la eficiencia de remoción de contaminantes. Estas combinaciones potencian la formación de radicales libres, especialmente $\bullet\text{OH}$, que incrementan la capacidad oxidativa del sistema (Benítez et al., 2003; Satyawali y Balakrishnan, 2008). Beltrán et al. (2001) aplicaron la ozonación como pos-tratamiento de un proceso biológico en aguas residuales procedentes de la destilación de jugo de uva fermentado, logrando eficiencias de remoción de 95% en DQO y 80% en COT. Sin embargo, la reducción de polifenoles mediante el tratamiento biológico fue limitada (<35%), mientras que la ozonación posterior elevó la remoción hasta el 80%.

En experimentos de laboratorio, la aplicación de ozono como pre y pos tratamiento aeróbico en vinazas diluidas al 10% produjo una decoloración completa y una reducción de DQO del 79%, en comparación con una remoción del 27% con ozono solo y del 34.9% sin tratamiento oxidativo (Sangave et al., 2007). Streethawong y Chavadej (2008) estudiaron la influencia de óxido de hierro como catalizador heterogéneo en la ozonación de vinazas de whisky diluidas 20 veces, alcanzando reducciones del 62% en DQO y del 87% en color con un caudal de ozono de $4.6 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$ y un tiempo de retención hidráulica de 18 minutos. Asimismo, tratamientos con agua subcrítica y supercrítica a 450°C y 31 MPa, con y sin adición de peróxido de hidrógeno, lograron una conversión del 97% de la materia orgánica presente en la vinaza en menos de 3.5 minutos, dejando como subproductos gases de combustión y agua con algún contenido de sal (Goyes y Bolaños, 2005). En ausencia del agente oxidante, se obtuvieron materiales carbonosos con alta área superficial, lo que sugiere la posibilidad de valorizar subproductos con alto valor agregado.

En conjunto, estos estudios evidencian que los procesos de oxidación avanzada, particularmente la ozonación y sus combinaciones, constituyen estrategias prometedoras para el tratamiento de vinazas alcohólicas, incluyendo aquellas generadas por la industria tequilera, tanto por su eficacia en la remoción de contaminantes como por su potencial en la valorización de residuos.

Subproductos derivados de vinazas

Los subproductos son metabolitos complementarios elaborados a partir de un proceso biotecnológico específico. El hecho de bajar los niveles de DBO y DQO de las vinazas es una forma de hacerlas mayormente biodegradables por organismos o simples interacciones con elemento abióticos (Abdalla & Hammam, 2014). De cualquier forma, no es posible eliminar estos residuos por completo, por lo que en algún punto del proceso será necesario reincorporarlos al ambiente. Por lo que es conveniente realizar esta operación de forma segura y sana para el ambiente de tal manera



que no represente un problema adicional en el futuro o algún daño al medio. Por otra parte, los microorganismos aerobios que pueden degradar las vinazas podrían servir de bioindicadores ante el microbiota edáfica para saber en qué momento es prudente desechar las vinazas al suelo sin riesgo a ninguna repercusión (Robles-González et al., 2012). Además, la mayoría de los organismos aeróbicos capaces de degradar residuos industriales producen subproductos como podría ser la proteína unicelular, enzimas y metabolitos utilizados a diario en las diferentes industrias (Díaz-Vázquez et al., 2022).

BIO-Energía

Los subproductos obtenidos mayormente registrados en el tratamiento de vinazas es el metano y el hidrogeno que representan una alternativa más sustentable de energía (Arellano-García et al., 2021). A pesar de que existe el conocimiento y la tecnología para remediar todo el daño ecológico que se ha generado, muchos de estas tecnologías rebasan el presupuesto de las mismas compañías que generan una huella de carbono significativa. Por otra parte, muchos de los estudios relacionados a mitigación del deterioro que provocan los residuos orgánicos industriales no se ejecutan en escalas industriales ya que solo se quedan a nivel laboratorio (García-Gómez et al., 2011). Por lo tanto existe la posibilidad de revertir el cambio en el planeta provocado por la especie humana (también conocido como el Antropoceno, la 6ta extinción masiva o el primer exterminio mundial de especies), pero aún falta bastante práctica para llevarse a un panorama mundial.

Producción de biohidrógeno

El hidrógeno es una alternativa de energía en la que varios científicos han mostrado interés en los últimos días. De tal manera que varios experimentos se han efectuado y demuestran que, dependiendo del tiempo de retención hidráulica (HRT por sus siglas en inglés), cambiará el rendimiento a obtener. La mayoría de las fermentaciones oscuras donde llevan a cabo este subproducto utilizan de manera frecuente a diferentes especies del género *Clostridium* spp. (Kannah et al., 2021).

Proteína unicelular (SCP)

Una alternativa segura y sostenible es la producción de SCP donde los residuos con gran carga de materia orgánica funcionan como un buen cultivo para diferentes organismos como algas, bacterias, levaduras y hongos. Este tratamiento es económicamente factible ya que la biomasa producida es el mismo subproducto que se reincorpora de diferentes formas que puede ser como biofertilizante, una alternativa vegana de proteína y/o comida para ganado, al mismo tiempo que se utiliza las vinazas de una manera más directa (Vargas-Hernández & Medrano, 2019). Además, se ha visto que *Candida utilis* es una de las levaduras con una mayor producción de biomasa en las



vinazas donde la SCP usualmente es destinada para alimentar ganado y fertilizantes sin repercusión de dañar el suelo. Por otra parte, a pesar de que *C. utilis* posee una gran producción, se ha demostrado que un consorcio entre *Rhodotorula mucilaginosa* y *Kluyveromyces marxianus* pose mayor capacidad de degradar moléculas recalcitrantes con una biomasa comparable con la obtenida con *C. utilis*. Por el momento esta es la estrategia más prometedora para la degradación y obtención de subproductos con la desventaja que en los estudios realizados a nivel laboratorio se demostró que entre más grande sea el lote menor será el rendimiento de biomasa (Díaz-Vázquez et al., 2022).

Metabolitos 2-feniletanol (2-PE) y 2-feniletil acetato (2-PEA)

Dentro de la industria farmacéutica y alimentaria se utilizan algunos compuestos como es el caso del 2-feniletanol (2-PE) y el 2-feniletil acetato (2-PEA) que dan las notas aromáticas características de miel y rosas. Además, 2-PE y 2-PEA son los segundos aromas más usados en el mundo con 10,000 toneladas producidas por año. En la antigüedad estos compuestos eran extraídos de plantas, pero no solo no cubrió la demanda global, sino que generan altos niveles de desechos, por lo que cambiar la fuente de producción de plantas a microorganismos fue una decisión inteligente por la practicidad y costos de producción. Por otra parte, se ha demostrado que se pueden obtener hasta 65 mg/L de 2-PEA y 162 mg/L de 2-PE a partir de una fermentación con vinazas de tequila y la levadura *Candida parapsilosis* (dos Reis et al., 2018). De igual manera, este tipo de fermentaciones son capaces de reducir hasta el 50% de la DQO. Estos resultados son de casos aislados con cepas específicas, lo cual sugiere mayor experimentación para poder saber el potencial de cepas autóctonas (Rodríguez-Romero et al., 2020).

Discusión

Esta revisión busca analizar las opciones más viables para reducir la contaminación causada por las vinazas, considerando las condiciones de la mayoría de las regiones del país. Los resultados se tomaron de diferentes bases de datos de destilerías de tequila, sotol, mezcal y caña de azúcar. En las Tablas 1 y 2 se muestra la cantidad de DBO y DQO junto con ciertos contaminantes que son comunes en las vinazas. Las vinazas, como residuo agroindustrial, presentan una gran variabilidad en su composición, incluso cuando provienen del mismo tipo de producción. Esto hace que haya diferentes concentraciones y tipos de contaminantes. Esta variabilidad complica su tratamiento y evaluación, ya que las características pueden cambiar entre lotes según el proceso, la materia prima o las condiciones operativas. Además, los estudios realizados sobre vinazas no siempre son consistentes, ya que cada uno puede enfocarse en distintos parámetros, considerando algunos como importantes



y dejando otros de lado. Esto dificulta la comparación directa de resultados y la implementación de soluciones generalizadas, haciendo necesario un enfoque más contextualizado y adaptado a cada región o planta productora.

Tabla 1. Contaminantes promedio en vinazas crudas de destilados provenientes de *Agave* spp.

Procedencia de la vinaza	pH	DQO g/L	DBO g/L	Nitrógeno total g/L	Fenoles g/L	Sólidos totales g/L
Destilación de <i>Agave tequilana</i>	3.75	44	31	.061	.123	34
Destilación de <i>Agave agustifolia</i>	3.7	26.9	22	9.81	.223	24.41

Fuente: Dias-Vazquez et al., 2022 y Robles-González et al., 2012.

Tabla 2. Contaminantes promedio en vinazas crudas de destilados provenientes de *Agave* spp. después de haber pasado por un tipo de tratamiento

Procedencia de la vinaza	pH	DQO g/L	DBO g/L	Nitrógeno total g/L	Fenoles g/L	Sólidos totales g/L	Tipo de tratamiento
Destilación de <i>Agave tequilana</i>	5.24	17	8	1.6	*	80	SCP
Destilación de <i>Agave agustifolia</i>	7.5	5.3	.007	0.39	*	0.001	Digestión anaeróbica

Fuente: Dias-Vazquez et al., 2022 y Robles-González et al., 2012

En los últimos años los investigadores han centrado sus esfuerzos en desarrollar estrategias para degradar una vasta cantidad de residuos orgánicos de manera que sean aceptables para una reincorporación segura y sin daño al ambiente y al mismo tiempo procurar obtener alguna ganancia de los subproductos obtenidos (Tabla 3). Aunque se han descrito muchas estrategias para aprovechar las vinazas, falta conocimiento para escalarlo y que cumpla la demanda industrial dejando incompleto el trabajo por falta de inversión, ya que aún se ve a la ciencia como un gasto y no como una inversión. A pesar de que existe una necesidad imperativa por reducir los desechos industriales, muchas compañías omiten una buena gestión de residuos por sus elevados costos y votan por las soluciones menos costosas que tienden a ser las menos efectivas. Por eso la economía circular como tendencia ayuda a las empresas a no ver como un gasto el tratamiento adecuado de sus residuos, sino como una oportunidad de obtener unas ganancias a través de ellos (Figura 1) (Vargas-Hernández & Medrano, 2019). Es evidente que un solo tratamiento no puede degradar de manera adecuada las vinazas, lo cual nos da pauta a pensar que al unir varios de estos procesos se puede potencializar la eficiencia y ganancias en conjunto con la consecuencia que sería más costoso (Figura 2). De tal manera que se necesita una mayor inversión para mejorar el estudio del tratamiento de residuos agroindustriales.

Tabla 3. Métodos para la degradación de vinazas y sus subproductos obtenidos

Método	Beneficio	Subproducto
Digestión anaerobia	50%-90% menos DQO	Biogás
Reactor anaeróbico de lodos de flujo ascendente	65-95% menos DQO	Biogás
Reactor de lecho fijo	73% menos DQO	Biogás
Reactor de lecho fluidizado	83% menos DQO	Biogás
Tratamiento con Bacterias	44-81% menos DQO 26-96% menos color	Biomasa
Tratamientos Fúngicos	99% menos DQO 70% menos color	Biomasa y enzimas
Consorcio de microorganismos	90% menos DQO	Biomasa, enzimas y metabolitos
Acidogénesis	3 - 6.5 pH	Hidrogeno
Electrocoagulación	80% menos DQO	Transformación de contaminantes
Adsorción	70% menos de color	Briquetas de carbón
Floculación	72% menos DQO 92% menos color	CO ₂

Fuente: España-Gamboa et al., 2011, López-López et al., 2010 y Mikucka & Zielińska, 2020

Valorización de residuos

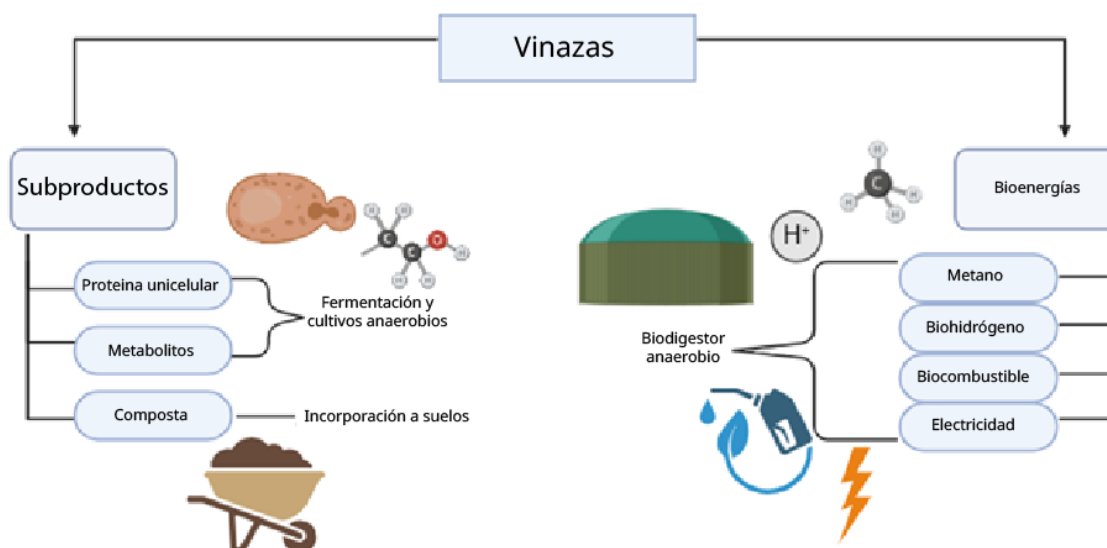


Figura 1. Diferentes vías de valorización de las vinazas

Fuente: Bolívar Caballero et al., 2022, Dias-Vazquez et al., 2022, Arellano-García et al., 2021 y Diaz-Cruces et al., 2020.

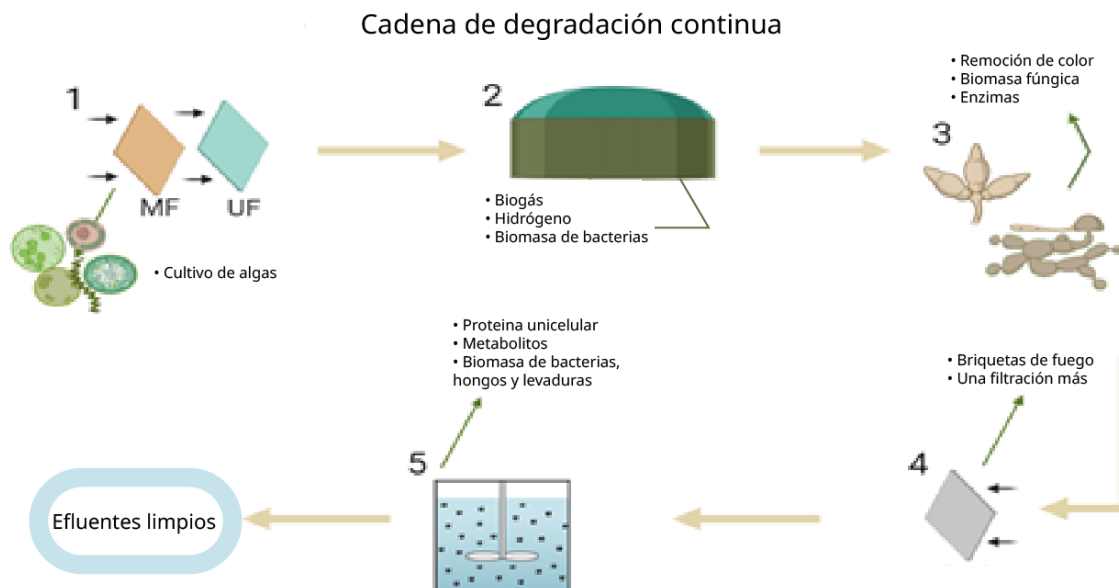


Figura 2. Cadena de degradación continua donde cada bioproceso genera subproductos de valor y el remanente del proceso es el iniciador del siguiente proceso hasta drásticamente limpiar los efluentes. 1) Tratamiento de membranas; 2) Fermentación oscura; 3) Tratamiento fúngico; 4) Filtración con carbón activado; 5) Biorreactor para procesos biológicos aerobios
Fuente: Bolívar Caballero et al., 2022, Dias-Vazquez et al., 2022, Arellano-García et al., 2021 y Diaz-Cruces et al., 2020.

Las ventajas de utilizar estos métodos es que es mínimo el peligro que pueda correr algún operador al momento de accionar los métodos. Esto se traduce a seguros de vida menos costosos ya que existen menos peligros en el área de trabajo, pensando en que se quiera habilitar una planta tratadora de vinazas. Por otra parte, al poseer técnicas menos riesgosas como la filtración por membranas (potencializada con carbón activado), se puede añadir en diferentes etapas de la cadena de degradación continua con la finalidad de recolectar la mayor cantidad de sólidos y poderlos incorporar a diferentes bioprocesos como producción de biomasa como algas, bacterias, hongos y arqueas. Ya que los residuos industriales son de alta carga de contaminantes; lo último que se quisiera para una planta de tratamiento es añadir sustancias altamente tóxicas dentro del procesamiento.

La desventaja de este listado es su lenta descontaminación, que lleva a repetir o modificar protocolos, llegando a elevar costos de manera que pudiera ser muy pobre de tratar el efluente con los métodos descritos. Es necesario cambiar algún otro que si bien será más efectivo en la descontaminación, no será más seguro ni amigable con el ambiente resultando en otro foco de contaminación. Otra desventaja es que por el momento muchos de los bioprocesos para valorizar la vinaza están en la etapa de laboratorio, la cual no contempla el flujo de las cantidades industriales.

Conclusión

La creciente demanda de alcohol, impulsada por diversas aplicaciones industriales y comerciales, conlleva un incremento proporcional en la generación de vinazas, independientemente del tipo de destilado producido. Esta situación plantea un desafío ambiental significativo, ya que los procesos de destilación generan como mínimo 10 veces más residuos que la cantidad de alcohol etílico obtenida a partir de los fermentos. Por tanto, se hace imprescindible desarrollar estrategias sostenibles para el manejo y aprovechamiento de estos subproductos, con el fin de mitigar su impacto ambiental.

Las vinazas, comúnmente consideradas como simples desechos, poseen en realidad un alto potencial para la generación de subproductos como biomasa, SCP, metabolitos y diversas formas de energía alternativa. Esta valorización representa una mejora significativa en el manejo de residuos, a la vez que ofrece una fuente adicional de ingresos para los productores, como es el caso del sector tequilero.

Los modelos de economía circular son necesarios no solo por la indispensable reducción de residuos, sino que también incentivan a los productores a invertir en la reparación y mitigación de los daños ambientales originados de sus procesos. Esta perspectiva transforma la gestión de residuos en una oportunidad de inversión estratégica, más que en un gasto operativo, promoviendo así prácticas más sostenibles y responsables dentro de la industria. Los métodos aquí presentados son de los más nuevos y económicamente viables para una parte de las destilerías del país. Los subproductos que se elaboran a través de los diferentes bioprocesos pretenden ser comercializados en mercados de gama industrial y los efluentes restantes podrán ser reutilizados para iniciar el siguiente bioproceso al momento de armar una cadena de degradación continua (Figura 2). A pesar de que el aprovechamiento de las vinazas ofrece un panorama prometedor dentro de la economía y la industria, la realidad actual muestra importantes limitaciones ya que aún no existe un tratamiento que soporte la demanda industrial. Adicionalmente, el constante cambio en la composición de las vinazas dificulta su propia optimización. Por lo tanto, es necesario acelerar la investigación sobre la valorización de los residuos, con el objetivo de obtener una base de datos sólida sobre microorganismos específicos con potencial biotecnológico, así como generar comparaciones entre distintos tratamientos capaces de degradar eficientemente compuestos recalcitrantes. Dada la amplia diversidad en la composición de estos residuos, contar con este conocimiento permitirá establecer criterios más precisos para su tratamiento.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un potencial conflicto de interés.



Financiamiento

Los autores declaran los siguientes intereses financieros/relaciones personales que pueden considerarse como posibles intereses en conflicto.

Referencias

- Abdalla, K. Z., & Hammam, G. (2014). Correlation between biochemical oxygen demand and chemical oxygen demand for various wastewater treatment plants in Egypt to obtain the biodegradability indices. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research*, 13(1), 42-48. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=26299e0f5b734f1b1b14de684c79caa4d91f081b>
- Ameta, R., Chohadia, A. K., Jain, A., & Punjabi, P. B. (2018). Fenton and photo-Fenton processes. En S. C. Ameta & R. Ameta (eds.) *Advanced oxidation processes for waste water treatment* (pp. 49-87). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810499-6.00003-6>
- Arellano-García, L., Velázquez-Fernández, J. B., Macías-Muro, M., & Marino-Marmolejo, E. N. (2021). Continuous hydrogen production and microbial community profile in the dark fermentation of tequila vinasse: Response to increasing loading rates and immobilization of biomass. *Biochemical Engineering Journal*, 172, 108049. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.108049>
- Bautista-Ziñiga, F., & Durán-de-Bazúa, M. del C. (1998). Análisis del beneficio y riesgo potenciales de la aplicación al suelo de vinazas crudas y tratadas biológicamente. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 14(1), 13-19. <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/32919>
- Beltran, F. J. (2003). *Ozone reaction kinetics for water and wastewater systems*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203509173>
- Beltrán, F. J., Álvarez, P. M., Rodríguez, E. M., García-Araya, J. F., & Rivas, J. (2001). Treatment of high strength distillery wastewater (cherry stillage) by integrated aerobic biological oxidation and ozonation. *Biotechnology progress*, 17(3), 462-467. <https://doi.org/10.1021/bp010021c>
- Benitez, F. J., Real, F. J., Acero, J. L., Garcia, J., & Sanchez, M. (2003). Kinetics of the ozonation and aerobic biodegradation of wine vinasses in discontinuous and continuous processes. *Journal of Hazardous Materials*, 101(2), 203-218 [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(03\)00175-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(03)00175-4)
- Bolívar Caballero, J. J., Zaini, I. N., & Yang, W. (2022). Reforming processes for syngas production: A mini-review on the current status, challenges, and prospects for biomass conversion to fuels. *Applications in Energy and Combustion Science*, 10, 100064. <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2022.100064>

- Calderón, R. R., Boza, F. A., Benmites-Alfaro, E., Gómez, O. T., & Flores, J. C. (2025). Consortium of *Candida utilis*, *Kluyveromyces marxianus* and *Saccharomyces cerevisiae* Yeasts for Vinasse Fermentation of *Agave americana* L. Liquor for Biomass Production and Reduction in Chemical Oxygen Demand. *Fermentation*, 11(5), 281. <https://doi.org/10.3390/fermentation11050281>
- Castro, L. E. N., Santos, J. V. F., Fagnani, K. C., Alves, H. J., & Colpini, L. M. S. (2019). Evaluation of the effect of different treatment methods on sugarcane vinasse remediation. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 54(9), 791–800. <https://doi.org/10.1080/03601234.2019.1669981>
- Cedeño, M. C. (1995). Tequila Production. *Critical Reviews in Biotechnology*, 15(1), 1–11. <https://doi.org/10.3109/07388559509150529>
- Christofoletti, C. A., Escher, J. P., Correia, J. E., Marinho, J. F. U. & Fontanetti, C. S. (2013). Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. *Waste Management*, 33(12), 2752–2761. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.005>
- Cipriano, M. A. P., Suleiman, A. K. A., da Silveira, A. P. D., do Carmo, J. B., & Kuramae, E. E. (2019). Bacterial community composition and diversity of two different forms of an organic residue of bioenergy crop. *PeerJ*, 2019(4). <https://doi.org/10.7717/peerj.6768>
- Corvellec, H., Stowell, A. F., & Johansson, N. (2022). Critiques of the circular economy. *Journal of industrial ecology*, 26(2), 421-432. <https://doi.org/10.1111/jiec.13187>
- Cruz-Salomón, A., Ríos-Valdovinos, E., Pola-Albores, F., Meza-Gordillo, R., Lagunas-Rivera, S. & Ruíz-Valdiviezo, V. M. (2017). Anaerobic treatment of agro-industrial wastewaters for COD removal in expanded granular sludge bed bioreactor. *Biofuel Research Journal*, 4(4), 715-720. doi: 10.18331/BRJ2017.4.4.3
- De Laat, J., & Gallard, H. (1999). Catalytic decomposition of hydrogen peroxide by Fe (III) in homogeneous aqueous solution: mechanism and kinetic modeling. *Environmental science & technology*, 33(16), 2726-2732. <https://doi.org/10.1021/es981171v>
- de Oliveira Cruz, L. M., Gomes, B. G. L. A., Tonetti, A. L., & Figueiredo, I. C. S. (2019). Using coconut husks in a full-scale decentralized wastewater treatment system: the influence of an anaerobic filter on maintenance and operational conditions of a sand filter. *Ecological engineering*, 127, 454-459. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.12.021>
- Díaz-Cruces, V. F., García-Depraect, O., & León-Becerril, E. (2020). Effect of Lactate Fermentation Type on the Biochemical Methane Potential of Tequila Vinasse. *Bioenergy Research*, 13(2), 571–580. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10093-z>
- Díaz-Vázquez, D., Orozco-Nunnelly, D. A., Yebra-Montes, C., Senés-Guerrero, C., & Gradilla-Hernández, M. S. (2022). Using yeast cultures to valorize tequila



- vinasse waste: An example of a circular economy approach in the agro-industrial sector. *Biomass and Bioenergy*, 161, 106471. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106471>
- dos Reis, K. C., Arrizon, J., Amaya-Delgado, L., Gschaedler, A., Schwan, R. F., & Silva, C. F. (2018). Volatile compounds flavoring obtained from Brazilian and Mexican spirit wastes by yeasts. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 34(10), 152. <https://doi.org/10.1007/s11274-018-2535-3>
- España-Gamboa, E., Mijangos-Cortes, J., Barahona-Perez, L., Dominguez-Maldonado, J., Hernández-Zarate, G., & Alzate-Gaviria, L. (2011). Vinasses: Characterization and treatments. *Waste Management and Research*, 29(12), 1235-1250. <https://doi.org/10.1177/0734242X10387313>
- Ferreira, L., Aguiar, M, Messias, T., Pompeu, G., Lopez, A., Silva, D., Monteiro, R. (2011). Evaluation of Sugar-Cane Vinasse Treated with *Pleurotus Sajor-Caju* Utilizing Aquatic Organisms as Toxicological Indicators. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 74(1), 132–137. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2010.08.042>
- García-Depraect, O., & León-Becerril, E. (2018). Fermentative biohydrogen production from tequila vinasse via the lactate-acetate pathway: Operational performance, kinetic analysis and microbial ecology. *Fuel*, 234, 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.06.126>
- García-Depraect, O., Rene, E. R., Diaz-Cruces, V. F., & León-Becerril, E. (2019). Effect of process parameters on enhanced biohydrogen production from tequila vinasse via the lactate-acetate pathway. *Bioresource Technology*, 273, 618–626. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.11.056>
- García-Gómez, C., Gortáres-Moroyoqui, P., & Drogui, P. (2011). Contaminantes emergentes: efectos y tratamientos de remoción. *Química Viva*, 10(2), 96-105. <https://www.redalyc.org/pdf/863/86319141004.pdf>
- Goyes, A., & Bolaños, G. (2005). Un estudio preliminar sobre el tratamiento de vinazas en agua supercrítica. *XXIII Congr Colomb Ing Química*, 1, 13. https://www.researchgate.net/profile/Gustavo-Bolanos-2/publication/266499709_Un_estudio_preliminar_sobre_el_tratamiento_de_vinazas_en_agua_supercritica/links/580e8e7e08ae47535247b6bd/Un-estudio-preliminar-sobre-el-tratamiento-de-vinazas-en-agua-supercritica.pdf
- Grant, S., & Christian, S. (2018). Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR) Pilot-scale Treatment of Stillage from Tequila Production. *Water Environment Federation*, 15, 2203-2208. <https://www.accesswater.org/publications/proceedings/-297422/anaerobic-membrane-bioreactor--anmbr--pilot-scale-treatment-of-stillage-from-tequila-production>



- Hakizimana, J. N., Gourich, B., Chafi, M., Stiriba, Y., Vial, C., Drogui, P., & Naja, J. (2017). Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination*, 404, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.011>
- Hallenbeck, P. C., & Benemann, J. R. (2002). Biological hydrogen production; fundamentals and limiting processes. *International journal of hydrogen energy*, 27(11-12), 1185-1193. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00131-3](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00131-3)
- Hoarau, J., Caro, Y., Grondin, I., & Petit, T. (2018). Sugarcane vinasse processing: Toward a status shift from waste to valuable resource. A review. *Journal of water process engineering*, 24, 11-25. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.05.003>
- Hoarau, J., Caro, Y., Grondin, I., & Petit, T. (2018). Sugarcane vinasse processing: Toward a status shift from waste to valuable resource. A review. *Journal of water process engineering*, 24, 11-25. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.05.003>
- Ilangovan, K., & Noyola, A. (1993). Availability of micronutrients during anaerobic digestion of molasses sludge using an Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactor. *Environmental technology*, 14(8), 795-799. <https://doi.org/10.1080/09593339309385351>
- Íñiguez, J. (2010). Algunas consideraciones teorico-practicas sobre la destilacion intermitente en alambique simple de mostos fermentados, y ordinarios. *Revista Ingeniería Primero*, 17, 31-51. https://fgsalazar.net/LANDIVAR/ING-PRI-MERO/boletin17/URL_17_QUI01_FERMENTACION.pdf
- Íñiguez-Covarrubias, G., & Peraza-Luna, F. (2007). Reduction of solids and organic load concentrations in tequila vinasses using a polyacrylamide (PAM) polymer flocculant. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 23(1), 17-24. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992007000100002&script=sci_arttext
- Jach, M. E., & Malm, A. (2022). Yarrowia lipolytica as an Alternative and Valuable Source of Nutritional and Bioactive Compounds for Humans. *Molecules*, 27(7), 2300. <https://doi.org/10.3390/molecules27072300>
- Jach, M. E., Serefko, A., Ziaja, M., & Kieliszek, M. (2022). Yeast Protein as an Easily Accessible Food Source. *Metabolites*, 12(1), 63. <https://doi.org/10.3390/metabo12010063>
- Jiménez, A. M., Borja, R., Martín, A., & Raposo, F. (2005). Mathematical modelling of aerobic degradation of vinasses with *Penicillium decumbens*. *Process Biochemistry*, 40(8), 2805–2811. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.12.011>
- Jouanneau, S., Recoules, L., Durand, M. J., Boukabache, A., Picot, V., Primault, Y., ... & Thouand, G. (2014). Methods for assessing biochemical oxygen demand (BOD): A review. *Water research*, 49, 62-82. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.066>



- Kannah, R. Y., Kavitha, S., Karthikeyan, O. P., Kumar, G., Dai-Viet, N. V., & Banu, J. R. (2021). Techno-economic assessment of various hydrogen production methods—A review. *Bioresource technology*, 319, 124175. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124175>
- López-López A, Pic JS (2006) Desarrollo de un proceso de oxidación avanzada basado en ozono para degradar compuestos recalcitrantes en agua. *Proceedings of the V Congreso Internacional de Ciencias Ambientales* (pp 820–827). https://www.researchgate.net/publication/267414961_DESARROLLO_DE_UN_PROCESO_DE_OXIDACION_AVANZADA_BASADO_EN_OZONO_PARA_DEGRADAR_COMPUESTOS_RECALCITRANTES_EN_AGUA
- Rodríguez Garay, B., Gutiérrez Mora, A., Arrizon Gaviño, J., Loera Quezada, M. Flores Berrios, E., Rincón Enriquez, G., Quiñonez, E., & Qui Zapata, J. (2015). La materia prima: Agave tequilana Weber Var. Azul. En A. Gschaedler Mathis, *Ciencia y Tecnología del Tequila: Avances y perspectivas 2ª Edición* (pp. 343-378). CIATEJ. <http://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1023/455>
- López-López, A., & Contreras-Ramos, S. M. (2015). Tratamiento de efluentes y aprovechamiento de residuos. En A. Gschaedler Mathis, *Ciencia y Tecnología del Tequila: Avances y Perspectivas* (pp. 343-378). CIATEJ.
- 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(2), 109–116. <https://doi.org/10.1007/s11157-010-9204-9>
- Lutosławski, K., Ryznar-Luty, A., & Cibis, E. (2024). Efficiency of aerobic biodegradation of sugar beet distillery stillage under dissolved oxygen tension-controlled conditions. *Plos one*, 19(7), e0306330. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306330>
- Ma, C., Xia, S., Song, J., Hou, Y., Hao, T., Shen, S., Li, K., Xue, C., & Jiang, X. (2024). Yeast protein as a novel protein source: Processing, functional properties, and potential applications in foods. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 93, 103606. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2024.103606>
- Ma, J., Sun, Y., Meng, D., Zhou, Z., Zhang, Y., & Yang, R. (2023). Yeast proteins: The novel and sustainable alternative protein in food applications. *Trends in Food Science and Technology*, 135, 190-201. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.04.003>
- Maldonado Maldonado, J. I., Márquez Romance, A. M., Guevara Pérez, E., José Rey Lago, D., & Pérez Pacheco, S. A. (2020). Models for design of upflow anaerobic filters separated in two and three phases. *Journal of Environmental Engineering*, 146(3), 04020007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001577](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001577)

- Márquez R, A. M., Maldonado M, J. I., Guevara P, E., Rey L, D. J., & Pérez P, S. A. (2021). An approach to models for the design of upflow anaerobic filters. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 9(2), 107-132. <https://doi.org/10.1080/23249676.2020.1831972>
- Meza-Pérez, A., Briones-Méndez, R., & Ilangovan, K. (1996). Floculación-coagulación como postratamiento del efluente de un reactor anaerobio que trata vinazas tequileras. *Proceedings of the XXV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. https://repositorio.unam.mx/contenidos/floculacion-coagulacion-como-postratamiento-del-afluente-de-un-reactor-anaerobico-trata-vinazas-tequileras-3489097?c=Lr2lDa&d=false&q=*&i=2&v=1&t=search_1&as=1
- Mikucka, W., & Zielńska, M. (2020). Distillery Stillage: Characteristics, Treatment, and Valorization. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 192(3), 770-793. <https://doi.org/10.1007/s12010-020-03343-5>
- Moran-Salazar, R. G., Sanchez-Lizarraga, A. L., Rodriguez-Campos, J., Davila-Vazquez, G., Marino-Marmolejo, E. N., Dendooven, L., & Contreras-Ramos, S. M. (2016). Utilization of vinasses as soil amendment: consequences and perspectives. *SpringerPlus*, 5, 1007. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2410-3>
- Navarro, A. R., Sepulveda, M. C., & Rubio, M. C. (2000). Bio-Concentration of Vinasse from the Alcoholic Fermentation of Sugar Cane Molasses. *Waste Manage*, 20(7), 581–585. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00026-X](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00026-X)
- Oliveira, B. G., Carvalho, J., Cerri, C., Cerri, C., Feigl, B. (2013). Soil Greenhouse Gas Fluxes from Vinasse Application in Brazilian Sugarcane Areas. *Geoderma*, 200-201, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.02.005>
- Robles-González, V., Galíndez-Mayer, J., Rinderknecht-Seijas, N., & Poggi-Varaldo, H. M. (2012). Treatment of mezcal vinasses: A review. *Journal of Biotechnology*, 157(4), 524–546. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2011.09.006>
- Rodríguez Díaz, Y., Fuentes Guevara, M., Beleño Díaz, O., & Montoya Armenta, L. (2021). Electrocoagulación como alternativa de tratamiento de aguas residuales mixtas originadas en la industria del procesamiento de lácteos y cárnicos. *Tecnura*, 25(67), 26-39. <https://doi.org/10.14483/22487638.15769>
- Rodríguez-Romero, J. de J., Aceves-Lara, C. A., Silva, C. F., Gschaedler, A., Amaya-Delgado, L., & Arrizon, J. (2020). 2-Phenylethanol and 2-Phenylethylacetate production by nonconventional yeasts using tequila vinasses as a substrate. *Biotechnology Reports*, 25, e00420. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00420>
- Sangave, P. C., Gogate, P.R. & Pandit, A.B. (2007). Combination of ozonation with conventional aerobic oxidation for distillery wastewater treatment. *Chemosphere*, 68, 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.12.053>



- Sari, V. A., & Juliastuti, S. R. (2019). Degradation of Hydrogen Sulfide in Stillage as Ethanol Industrial Waste by *Acidithiobacillus thiooxidans* and *Pseudomonas putida* with Aerobic Biofiltration Method in Bioreactor. *Jurnal Teknik ITS*, 8(2), 109-114. <http://dx.doi.org/10.12962/j23373539.v8i2.49728>
- Satyawali Y and Balakrishnan M (2007) Removal of color from bio- methanated distillery spentwash by treatment with activated carbons. *Bioresource Technology*, 98, 2629–2635. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.09.016>
- Satyawali, Y. & Balakrishnan, M. (2008). Wastewater treatment in molasses-based alcohol distilleries for COD and color removal: A review. *Journal of Environmental Management*, 86, 481–497. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.12.024>
- Satyawali, Y., & Balakrishnan, M. (2008). Wastewater treatment in molasses-based alcohol distilleries for COD and color removal: a review. *Journal of environmental management*, 86(3), 481-497. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.12.024>
- Siles, J. A., García-García, I., Martín, A., & Martín, M. A. (2011). Integrated ozonation and biomethanization treatments of vinasse derived from ethanol manufacturing. *Journal of Hazardous Materials*, 188(1-3), 247-253. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.096>
- Sowmeyan, R. & Swaminathan, G. (2008) Effluent treatment process in molasses-based distillery industries: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 152, 453–462. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.11.033>
- Sreethawong, T., & Chavadej, S. (2008). Color removal of distillery wastewater by ozonation in the absence and presence of immobilized iron oxide catalyst. *Journal of Hazardous Materials*, 155(3), 486-493. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.11.091>
- Staffell, I., Scamman, D., Abad, A. V., Balcombe, P., Dodds, P. E., Ekins, P., ... & Ward, K. R. (2019). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*, 12(2), 463-491. <https://doi.org/10.1039/C8EE01157E>
- Teymennet-Ramírez, K., García-Morales García-Morales, S., Hernández-Fernández, O., & Barrera-Martínez, I. (2023). Detoxication of tequila vinasse by *Trametes sanguineus*: a biotechnological approach to laccase production and water reuse in seedling growth. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3228310/v1>
- Torres, L.G., Carpinteyro-Urban, S.L. (2012). Use of *Prosopis laevigata* seed gum and *Opuntia ficus-indica* mucilage for the treatment of municipal wastewaters by coagulation-flocculation. *Natural Resources Research*, 3(2), 35. <http://dx.doi.org/10.4236/nr.2012.32006>
- Torres-Altamirano, J. A. (2024). *Estimación económica de la producción de agua desmineralizada de una planta de ciclo combinado de 850 MW*. Academia.<https://www.academia>.



edu/122128981/Estimaci%C3%B3n_econ%C3%B3mica_de_la_produc-
ci%C3%B3n_de_agua_desmineralizada_de_una_planta_de_ciclo_combi-
nado_de_850_MW

- Vargas-Hernández, J. G., & Medrano, M. D. J. M. (2019). The circular economy. *Revista Gestão & Sustentabilidade*, 1(1), 298-309. https://www.researchgate.net/profile/Jose-Vargas-Hernandez/publication/330643989_A_Critical_Analysis_of_Scenarios_for_Small_and_Medium_Enterprise_in_NAFTA_renegotiations/links/60e36203a6fdccb7450ac2e1/A-Critical-Analysis-of-Scenarios-for-Small-and-Medium-Enterprise-in-NAFTA-renegotiations.pdf?sg%5B0%5D=started_experiment_milestone&origin=journalDetail&rtd=e30%3D
- Vera, I. G. C. (2017). Diseño e implementación de un sistema de tratamiento de Aguas residuales. *Dominio de las Ciencias*, 3(1), 536-560. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6134928>
- Zielińska, M., Bulkowska, K., & Mikucka, W. (2021). Valorization of distillery stillage for bioenergy production: a Review. *Energies*, 14(21), 7235. <https://doi.org/10.3390/en14217235>

