

APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE LAS VINAZAS DE ALCOHOL DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum officinarum*) MEDIANTE ANAEROBIOISIS Y LA POSIBLE SEPARACIÓN DE POLIFENOLES ÚTILES USANDO CARBÓN ACTIVADO DE BAGAZO DE CAÑA. Segunda parte: bases teóricas para su factibilidad técnica y económica

COMPREHENSIVE USE OF SUGARCANE (*Saccharum officinarum*) ALCOHOL STILLAGE THROUGH ANAEROBIOISIS AND THE POSSIBLE SEPARATION OF USEFUL POLYPHENOLS USING ACTIVATED CARBON FROM CANE BAGASSE. Second part: Theoretical bases for its technical and economic feasibility

Correa López R. E.¹, Gaspar Mendoza L.¹, Pérez Barrera S.¹, Bernal González M.¹, Solís Fuentes J. A.², NavarroFrómata A. E.³, Durán-Domínguez-de-Bazúa M. del C.*¹

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química; ²Universidad Veracruzana, Instituto de Ciencias Básicas; ³Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros;

*Autor de correspondencia: mcduran@quimica.unam.mx

Recibido: 16/octubre/2023

Aceptado: 05/enero/2024

RESUMEN

Se plantea el área de oportunidad de la industria azucarera-alcoholera para aprovechar las vinazas, subproducto de la primera torre de destilación a partir de mieles finales del jugo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.), usando levaduras (*Saccharomyces cerevisiae*) como una fuente renovable de energía. Con base en una revisión de la literatura, el objetivo fue proponer un tren de tratamiento, desde vinazas crudas hasta vinazas tratadas, aprovechando cada uno de los procesos para obtener co-productos con valor agregado. Se plantea el uso combinado de métodos biotecnológicos y químicos para aprovechar estos efluentes eficientemente logrando una integración al sistema de las plantas alcoholeras actuales en beneficio del ambiente, la salud y la economía del sector cañero. De acuerdo con la revisión bibliográfica, las vinazas pueden procesarse en un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente, RALLFA, transformando una parte importante de sus compuestos carbonosos en

biogás rico en metano quedando los polifenoles disueltos que se separarían usando carbón activado (CA) obtenido a partir de las cenizas de hogares al quemar bagazo para obtener vapor de alta presión y energía. Una vez retenidos los polifenoles, se desorben y comercializan de acuerdo con sus características químicas. Puede concluirse que las vinazas tratadas resultantes tienen menor contenido de solutos medidos como demanda química de oxígeno (DQO) obteniéndose metano y polifenoles útiles para usos con valor agregado. A partir de la bibliografía consultada fue posible alcanzar el objetivo propuesto. La siguiente etapa contemplará su evaluación a escala de laboratorio, de banco y, finalmente, de planta piloto. Esto último especialmente porque el análisis de las bases teóricas, técnicas y económicas consideradas, indicaron preliminarmente la factibilidad del proceso propuesto.

Palabras clave: *Biodegradación anaerobia; carbón activado; polifenoles; RALLFA; vinazas*

ABSTRACT

An area of opportunity for the sugar-alcohol industry is proposed. It takes advantage of stillage (*vinasses*), a by-product of the first distillation tower from final molasses of sugar cane juice (*Saccharum officinarum* L.), using yeasts (*Saccharomyces cerevisiae*) as a renewable source of energy. Based on a review of the literature, the objective was to propose a treatment train, from raw stillage or vinasses to treated stillage, taking advantage of each of the processes to obtain co-products with added value. The combination of biotechnological and chemical methods is proposed for these effluents efficiently, achieving an integration into the system of current alcohol plants for the benefit of the environment, health, and the economy of the sugarcane sector. Stillage can be processed in an upflow anaerobic sludge bed reactor, UASB, transforming an important part of its carbonaceous compounds into methane-rich biogas, leaving dissolved polyphenols that would be separated using activated carbon (AC) obtained from the ashes of burning bagasse to obtain high-pressure steam and energy. Once the polyphenols are retained, they are desorbed and marketed according to their chemical characteristics. It can be concluded that the resulting treated stillage would have a lower content of solutes measured as chemical oxygen demand (COD), and that methane and polyphenols useful for added value to the process, would be the final products. Based on the consulted bibliography, it was possible to achieve the objective. The next stage will contemplate its experimental applicability on a laboratory, bench, and finally, pilot plant scales. Especially

because the analysis of the theoretical, technical, and economic bases considered, preliminarily indicated the feasibility of the proposed process.

Keywords: *Activated carbon; anaerobic biodegradation; polyphenols; stillage or vinasses; UASB reactor*

INTRODUCCIÓN

La producción de caña de azúcar es una actividad económica muy importante en México y otros países del orbe ya que, para México, aporta el 4.5% de su PIB agrícola (SADER, 2020). En la actualidad, la caña de azúcar es considerada una de las fuentes energéticas más económicas para el ser humano. Para su procesamiento se requiere de mano de obra abundante, por lo que representa una relevante fuente de empleo, generando en México 500 mil empleos directos y 2.4 millones de empleos indirectos (NTX, 2018; SADER, 2020; SIAP, 2018). De la caña no solamente se produce el azúcar, que representa una fuente de energía para el *Homo sapiens*: Es una planta que ofrece diversos productos y co-productos (Durán-Domínguez-de-Bazúa, 2022; ICIDCA, 2020), con cero residuos (Procaña, 2020). El bioetanol es considerado como la gran opción para la absorción de CO₂, ya que la planta de la que se produce usa el CO₂ en su fotosíntesis, contribuyendo así con el cuidado del ambiente (Cornejo-Arteaga, 2016). Cuando se produce a partir de la agroindustria cañera (*Saccharum officinarum* L.), pueden emplearse como materias primas carbonosas ricas en glucosa, tanto las mieles finales como el jugo de caña (Cordovés-Herrera y Valdés-Jiménez, 2006) que son las fuentes clásicas de este monoglúcido que es metabolizado por *Saccharomyces cerevisiae* en condiciones anaerobias para producir alcohol etílico y CO₂. A esta biorreacción Louis Pasteur la denominó “fermentación”. Por ello, otras biorreacciones no deben llamarse fermentaciones (Pasteur, 1879). Las mieles incristalizables se diluyen para realizar la transformación de su glucosa con *Saccharomyces cerevisiae* o levadura cervecera. Como, generalmente, no se tienen condiciones asépticas, para minimizar la presencia de otros microorganismos se le reduce a este medio de cultivo su pH a valores muy ácidos usando ácido sulfúrico para que solamente la levadura se reproduzca y tener un mayor rendimiento en la conversión de glucosa a etanol. El mosto fermentado o “vino” se destila después para obtener alcohol etílico de mayor pureza y otros productos que provienen de otras levaduras silvestres que “contaminan” a los fermentadores (como metanol, aldehídos y cetonas) y que se conocen como “cabezas y colas” en la jerga de las plantas alcoholeras. Otro de estos productos de la destilación, particularmente de la primera

torre, son las denominadas vinazas (Castro-González, 2004). Aquí es importante mencionar que esta destilación se hace poniendo en contacto directo el mosto fermentado con vapor de agua, lo que diluye la corriente pobre en etanol, aumenta el volumen de la vinaza y se pierde agua limpia de calderas. Esta puede ser una oportunidad de mejora, como se verá después.

Prato-García *et al.* (2016), señalan que las vinazas de la industria de la caña de azúcar se caracterizan por su alto contenido de sólidos totales (100-150 g/L) que, medidos como demanda bioquímica de oxígeno ($DBO_5=40-100$ g/L) y como demanda química de oxígeno ($DQO=60-200$ g/L), tienen valores muy altos (hasta mil veces más que lo permitido en las normas de descarga de aguas residuales). Tienen un bajo pH (3-5) y una coloración café intenso debida a la caramelización de la sacarosa. Además, las vinazas son ricas en sustancias inorgánicas como nitrógeno, fósforo, azufre, calcio, potasio y magnesio, provenientes de la propia caña. Sus principales componentes orgánicos son el glicerol, etanol y ácido acético, además de carbohidratos como glucosa y fructosa y compuestos aromáticos como fenoles y polifenoles (Contreras-Contreras *et al.*, 2020). Las vinazas no son un residuo contaminante, sino un producto valioso, ya que pueden ser aprovechadas de diversas formas siempre y cuando se les procese adecuadamente (CONADESUCA, 2016a). Uno de estos sistemas de transformación que desde hace tiempo se ha ofrecido como una opción viable energéticamente es convertir bioquímicamente sus compuestos carbonosos en condiciones anaerobias, obteniendo biogás rico en metano. El tratamiento anaerobio disminuye en cierta medida el contenido de estos compuestos carbonosos. Sin embargo, cerca del 33% de los compuestos disueltos medidos como demanda química de oxígeno (DQO) del efluente de los reactores anaerobios corresponde a compuestos fenólicos. Entre ellos destacan el ácido gálico, el ácido tánico y las melanoidinas (Paz-Pino, 2013). Los polifenoles actualmente se consideran compuestos valiosos, especialmente para ayudar a recuperar la salud ya que atacan de manera selectiva a bacterias, parásitos y virus (Amaro-Medina, 2018; Camelo-M. *et al.* 2010; Leyra-Tobilla, 2016; Mhatre *et al.*, 2020), aunque si se vierten al ambiente, particularmente al agua, pueden ser dañinos para la vida acuática (Bartolomé-Camacho *et al.*, 2017; Contreras-Contreras, 2019).

De acuerdo con Gaspar-Mendoza (2022), es factible llevar a cabo de forma experimental un proceso de biodegradación anaerobia seguido de la adsorción y desorción de los polifenoles mediante carbón activado para su aprovechamiento en temas de salud. Esto es posible, siempre y cuando las vinazas postratadas reciban un tercer tratamiento para que puedan cumplir con los requerimientos normativos (Correa-López, 2022).

El objetivo de esta contribución es, mediante una revisión bibliográfica, proponer un tren de tratamiento, desde vinazas crudas hasta vinazas tratadas, aprovechando cada uno de los procesos para obtener co-productos con valor agregado.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología consistió en la revisión de tesis y artículos recientes para la obtención de información sobre: (1) El proceso de obtención de bioetanol a partir de la caña de azúcar y sus subproductos, las vinazas entre ellos; (2) El tratamiento anaerobio para el reaprovechamiento de las vinazas, así como el manejo y estabilización de reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente, conocidos como RALLFA, mejorando las variables de operación para producir una mayor cantidad de metano a partir de los compuestos carbonosos presentes en vinazas de una planta productora de bioetanol; (3) Los métodos y normas vigentes (nacionales e internacionales) útiles para el seguimiento de los parámetros que intervienen en el proceso de bioconversión anaerobia de los compuestos carbonosos para obtener la mayor cantidad de metano en el biogás a la temperatura óptima; (4) La obtención de carbón activado (CA) a partir de cenizas de bagazo de caña (CBC) y del obtenido del bagazo directamente (BC) y su uso para adsorber los polifenoles de las vinazas tratadas anaerobiamente; (5) Los métodos de desorción de polifenoles adsorbidos en CA; (6) Los métodos para manejar las vinazas postratadas y cumplir con la normativa nacional e internacional vigente; y (7) Usos alternos de los polifenoles en la industria.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El proceso para obtener azúcar a partir de la caña (*Saccharum officinarum* L.) puede resumirse en nueve pasos: (1) Corte de la caña, (2) Molienda, (3) Generación de vapor, (4) Calentamiento, (5) Clarificación, (6) Filtración, (7) Evaporación, (8) Cristalización, (9) Secado. México es uno de los países de mayor producción de azúcar a partir de la caña de azúcar y mediante este proceso físico milenario se obtiene como residuo un líquido denominado melaza que es aprovechado para la producción de bioetanol mediante su fermentación debido a su alto contenido de glúcidos, específicamente glucosa (Gilces-Farías y Veloz-Pinto, 2006; Rabassa-Olazábal *et al.*, 2016; Velásquez-Ramírez, 2008). A diferencia del uso directo de jugo de caña de azúcar la melaza tiene algunas ventajas, como ser relativamente más barata y adecuada para operar como un líquido, sin necesidad de procesos de hidrólisis antes de su uso, su disponibilidad es universal ya que depende de los ingenios azucareros, es un coproducto muy

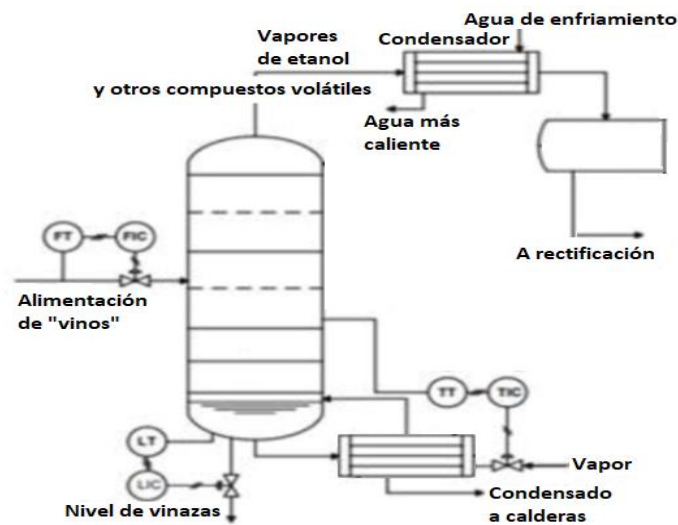
valioso porque tiene un alto contenido de glucosa que la convierte en un sustrato ideal y sostenible en los procesos de fermentación para la producción de bioetanol (López *et al.*, 2018; Navarrete-Prida *et al.*, 2016). La producción convencional de etanol a base de jugo o melaza de caña de azúcar comprende tres etapas: La preparación de mostos (etapa 1) consiste en la preparación y adición de nutrientes para que llegue en condiciones óptimas a la fermentación (etapa 2), en la que se le agrega la levadura cervecera o de panificación (*Saccharomyces cerevisiae*), encargada de actuar sobre la glucosa transformándola en alcohol etílico y, deseablemente, pocos productos secundarios a la fermentación. Dada las condiciones poco asépticas de la mayoría de los ingenios azucareros-alcoholeros se lleva a cabo en condiciones ácidas (valores de pH alrededor de 3). El alcohol producido pasa por columnas de destilación con la finalidad de quitarle impurezas disueltas y enriquecer la solución alcohólica (Figura 1). De este proceso, particularmente del fondo de la primera torre de destilación donde llegan todos los co-productos de la melaza y las levaduras muertas, es de donde se obtienen las vinazas, las cuales salen del fondo de la columna ya que son columnas agotadoras y no rectificadoras y que reciben vapor de agua en contacto directo (o “vivo” como se le conoce en la jerga industrial). Existe la opción de usar intercambiadores de calor para evaporar y después condensar el etanol sin ponerlo en contacto con el vapor de agua como ocurre en las siguientes columnas de destilación y si estos intercambiadores fueran de placas de acero inoxidable como los usados en la industria alimentaria su eficiencia se incrementaría notablemente además de reducir de forma importante el volumen de vinazas producidas.

Tratamiento anaerobio. Manejo y estabilización de reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente, conocidos como RALLFA

La vinaza se define como el efluente del fondo de la primera columna de destilación durante la producción de alcohol etílico a partir de la fermentación de una materia prima, como las mieles finales provenientes de la producción de cristales de azúcar (Gandini-Ayerbe y Zúñiga-Cerón, 2013; Jáuregui y Robles, 2017). Con el método tradicional de destilación, conocido como de “arrastre con vapor vivo”, por cada litro de alcohol etílico producido se generan alrededor de 10 litros de vinazas, por lo que se estima que, para una producción conservadora de 54,000 m³/año de etanol en México, se estarían generando anualmente 540,000 m³ de estos efluentes líquidos (Castro-González, 2004; CEDRSSA, 2020; Rodríguez-Arreola, 2019).

Contreras-Contreras (2019) obtuvo características físicas y químicas de las vinazas diferentes a las de Prato-García *et al.* (2016) señaladas antes: El mismo contenido de sólidos disueltos y suspendidos (100-150 g/L) pero valores de DBO₅ (20-100 *versus* DBO₅=40-100 g/L) y de demanda química de oxígeno (20-200 *versus* DQO=60-200 g/L) mayores en el intervalo bajo.

Figura 1. Propuesta de una primera columna de destilación de platos para la separación del bioetanol producido por *Saccharomyces cerevisiae* usando como fuente de glucosa melazas o mieles incristalizables de un ingenio azucarero-alcoholero usando intercambiadores de calor de placas de acero inoxidable como “rehervidor” y “condensador”



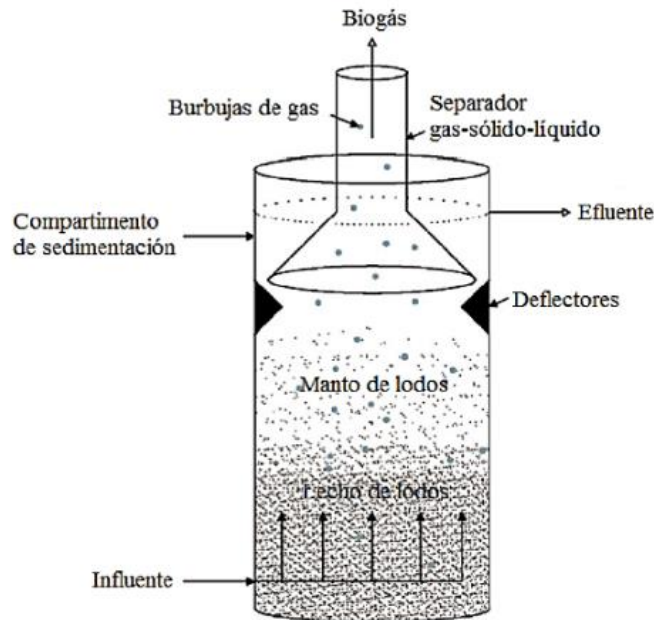
Fuente: modificada de García-Jaimes y Rodríguez-Acevedo (2016)

Esto se debe a muchos factores como se señaló en la primera parte de esta investigación (Gaspar-Mendoza *et al.*, 2022). Con estos contenidos y su elevada temperatura, color café intenso y la presencia de sustancias recalcitrantes como las melanoidinas y los compuestos fenólicos en ellas, las vinazas de caña han sido consideradas un efluente complejo que representa un problema ambiental cuando no son reaprovechadas (Contreras-Contreras *et al.*, 2020; Prato-García *et al.*, 2016), ya que provocan el incremento de la temperatura del cuerpo receptor (agua o suelo) y disminuyen la cantidad de oxígeno disuelto disponible. También, su acidez disminuye el pH del cuerpo receptor, lo cual puede llegar a disolver algunos metales.

Existen diferentes opciones adoptadas en varios países. La aplicación de unas u otras depende de las particularidades del mercado de cada región, su economía de escala y otros factores de carácter social o político (CONADESUCA, 2016b). Una de ellas es la producción de gas metano a través de la biotransformación anaerobia realizada por varios organismos procariotas en ausencia de oxígeno (Madigan *et al.*, 2015). En la Figura 2 se puede observar el

funcionamiento de los sistemas anaerobios, desarrollados por Lettinga y colaboradores en los años 80 del siglo pasado (Lettinga *et al.*, 1980). Los procesos anaerobios han ganado popularidad aún con las desventajas que presentan, las cuales se muestran en la Tabla 1.

Figura 2. Reactor de lecho de lodos de flujo ascendente, RALLFA



Fuente: Modificado de Guardia-Puebla, 2012

Tabla 1. Ventajas y desventajas del tratamiento anaerobio (Crombet-Grillet *et al.*, 2016)

Ventajas	Desventajas
Produce menor cantidad final de lodos (el desarrollo de estos microorganismos es más lento)	Es más sensible a compuestos tóxicos inhibidores y debe operar a temperaturas más altas
Se pueden cargar los digestores con grandes cantidades de materia disuelta	No son efectivos con bajas concentraciones de compuestos disueltos
Menor costo de operación por no requerir de oxígeno	Requieren de un mayor tiempo de contacto o de residencia hidráulica, así como más tiempo para la aclimatación de los microorganismos
Es más económico pues tiene un menor requerimiento energético	Los volúmenes de aguas residuales a tratar son menores (mayores tiempos de residencia hidráulica)
Se puede implementar en sistemas compactos con menor área de terreno que los sistemas aerobios tradicionales	Requieren de un postratamiento ya sea para descargar en cuerpos receptores o para su reutilización

Fuente: elaboración propia.

A estas desventajas se le suma la problemática que surge cuando el agua residual contiene sulfatos o compuestos recalcitrantes, ya que para el primer caso hay generación de H₂S y competencia entre los microorganismos sulfato-reductores y las arqueas metanogénicas (Castro-González, 2004). Para el segundo caso, al ser compuestos tóxicos, hay afectación en la

granulación de la biomasa y una pérdida de actividad biológica anaerobia (Contreras-Contreras, 2019). La operación de los RALLFA está basada en el seguimiento y control de distintos parámetros y variables. Estos se encuentran relacionados con el influente, la biomasa, el reactor, el contacto del influente con la biomasa o la forma como esté distribuido en el interior del reactor (Caicedo-Messa, 2006; Castro-González, 2004; Contreras-Contreras, 2019; Gaspar-Mendoza, 2022; Pacheco y Magaña, 2003).

Seguimiento de parámetros en la operación anaerobia

Es necesario mencionar que el inóculo termofílico no está comúnmente disponible para la inoculación de nuevos sistemas. Sin embargo, pueden ponerse en operación utilizando lodos de procesos mesofílicos. Para esto, es importante considerar que, para pasar un reactor del rango mesofílico al termofílico sin que se produzca una reducción en la producción de gas rico en metano, se debe realizar en forma muy lenta para promover la adaptación de las comunidades de microorganismos o súbita para precipitar las condiciones adecuadas para conservar la población metanogénica termofílica (Castro-González, 2004; Rincón-Acelas, 2008). Se ejemplifican algunos de los parámetros de seguimiento de la operación de un RALLFA y los métodos empleados medidos en un laboratorio se encuentran en la literatura citada: Ácidos grasos volátiles (AGV), alcalinidad, factor de alcalinidad, cantidad de biogás, conductividad eléctrica, polifenoles y temperatura (Contreras-Contreras, 2019). Cationes, metales pesados, diferentes formas de nitrógeno son otros considerados en algunos estudios (Tuesta-Popolizio, 2017).

Obtención de carbón activado (CA) a partir de bagazo de caña (BC) o de cenizas de bagazo de caña (CBC) y su uso para adsorber los polifenoles de las vinazas tratadas anaerobiamente

El tratamiento anaerobio ya ha sido muy estudiado y aunque la remoción de material orgánico en la etapa de digestión es aceptable, nunca excede del 80%, por lo que el efluente a la salida del reactor aún no cubre los requerimientos normativos de DBO_5 (150-200 mg/L teniendo 150-200 pero g/L y requiriendo eficiencias de remoción de más de 99%) para descarga en ríos que derivan a riego agrícola, por lo que es necesario implementar una o más etapas posteriores, previas a la disposición final (Linero-Gil y Guzmán-Carrillo, 2012). La etapa posterior a la biodegradación anaerobia que proponen Gaspar-Mendoza (2022) y Correa-López (2022) derivada de los experimentos de Contreras-Contreras (2019) es la adsorción, proceso donde se

busca recuperar los compuestos fenólicos recalcitrantes presentes en las vinazas tratadas anaerobiamente y que conforman una parte de esa materia orgánica. Los polifenoles son sustancias que pueden inhibir o reducir la actividad de los microorganismos, tanto de las plantas depuradoras como de los que atacan la salud de los seres humanos. Esto hace necesaria su remoción de las corrientes que los transportan para su utilización en beneficio de los seres humanos y otros seres vivos, evitando el impacto ambiental que representarían al ser descargados al ambiente.

A los polifenoles se les han atribuido diversos beneficios para la salud como antioxidantes, antiinflamatorios, vasodilatadores y por sus propiedades antivirales, antiparasitarias y antibacterianas (Delgado-Bautista, 2016). Y, considerando las principales causas de muerte en el mundo, de acuerdo con la OMS (2020), pueden ser un aporte importante para el tratamiento o cura de enfermedades importantes, reduciendo un gran número de muertes en el mundo (Gaspar-Mendoza *et al.*, 2022; Leyra-Tobilla, 2016; Quiñones *et al.*, 2012).

Adsorción en carbón activado

La adsorción es un proceso por el cual los átomos en la superficie de un sólido atraen y retienen moléculas de otros compuestos (CLARIMEX, 2022). Existen dos tipos de fenómenos de adsorción: Física y química. Los compuestos fenólicos se adhieren a la superficie del carbón activado por medio de la adsorción física (o fisisorción) -mecanismo principal por medio del cual se retienen contaminantes orgánicos en la superficie del CA y que puede revertirse cambiando las condiciones en las que se encuentra el CA favoreciendo la desorción o desprendimiento de los componentes adsorbidos retenidos y dejando libre la superficie de este. Existen diversos factores que afectan el proceso de adsorción, dependiendo del tipo de carbón activado utilizado, así como la forma y los precursores de su obtención, del componente adsorbido y de las condiciones del medio, tales como el pH y la temperatura (Gaspar-Mendoza, 2022). El carbón activado (CA) es materia carbonizada de origen vegetal o mineral. Se denomina “activado” debido a que la materia carbonizada presenta un elevado y variado grado de porosidad, una considerable superficie interna y un cierto contenido de grupos químicos superficiales, principalmente de oxígeno y nitrógeno que lo hacen tener gran capacidad para adsorber ciertas sustancias (Solís-Fuentes *et al.*, 2012). Los carbones activados son utilizados generalmente en procesos de descontaminación de aguas, recuperación de disolventes, control de emisiones, decoloración de líquidos, eliminación de olores, soportes catalíticos, entre otros

procesos. Entre los contaminantes de aguas más comunes se encuentran los compuestos fenólicos, presentes ampliamente en los efluentes industriales.

La adsorción de compuestos fenólicos con CA es uno de los métodos más usados, especialmente para efluentes con concentraciones bajas y moderadas (Ojeda *et al.*, 2019).

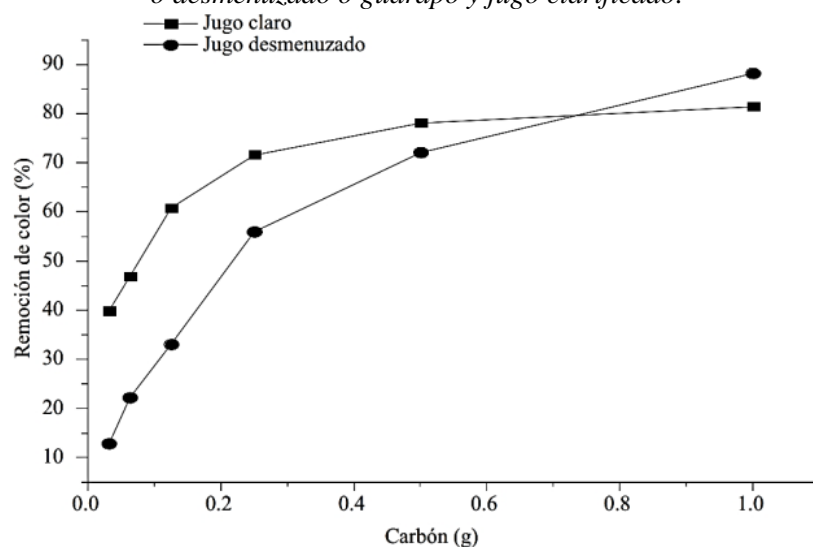
Gaspar-Mendoza (2022) luego de analizar los resultados de varios autores, consideró la activación química como la mejor opción para producir CA a partir del bagazo de caña directamente. El proceso de activación química es aplicado a la materia prima, la cual se transforma en carbón, pero adquiriendo propiedades con una gran actividad y poder de adsorción, a diferencia de la activación física donde tiene que haber una carbonización previa a la activación. Se obtiene mezclando la materia prima con un agente químico activante, principalmente H_3PO_4 . Se realiza en una retorta con una temperatura de tratamiento entre 500 a 900°C. A temperaturas altas, la activación es mayor. Concluido el proceso, se descarga y se enfría y se lava el carbón para recuperar el agente activador. Luego, el carbón activado, CA, se filtra y se seca (Grisales-Motato y Rojas-Arrieta, 2016). El tratamiento con CA es necesario y adecuado para reducir el porcentaje de DQO que aportan los polifenoles a los efluentes de los RALLFA ya que, en varias investigaciones, como la que hicieron Bernardo *et al.* (1997), Girgis *et al.* (1994), Guo *et al.*, (2020) y Solís-Fuentes *et al.* (2012), con CA obtenido de bagazo de caña observaron que es un material con capacidad de adsorber hasta el 99% de los compuestos en estudio. Solís-Fuentes *et al.* (2012) redujeron sustancialmente el color de jugos de caña (ver Figura 3).

Sin embargo, se debe destacar que, debido a que solamente es una cuarta parte de la DQO del efluente de los RALLFA, es probable que se requiera de otros métodos posteriores para que las vinazas puedan ser reutilizadas o depositadas adecuadamente en el ambiente (Gaspar-Mendoza, 2022).

Hay también propuestas sobre el aprovechamiento de las cenizas provenientes de la combustión del bagazo de caña en los ingenios azucareros, CBC (Kaushik *et al.*, 2017; Simaratanamongkol y Thiravetyan, 2010). Dada la enorme cantidad de cenizas que se acumula en los ingenios azucareros-alcoholeros e incluso en los que solamente producen azúcar, esta opción es

extraordinariamente importante cuando se desea producir azúcar refinada ya que el carbón activado sería un insumo producido internamente.

Figura 3. Efecto de la cantidad de CA en la remoción de color de jugo de caña de primera extracción o desmenuzado o guarapo y jugo clarificado.



Fuente: con la autorización de Solís-Fuentes et al., (2012)

Métodos de desorción de polifenoles adsorbidos en CA y reactivación del carbón agotado

Gracias a que el mecanismo principal de adsorción en el CA es la fisisorción y a que la estructura gráfica del CA hace que este sólido sea muy estable bajo condiciones muy distintas -ya que resiste temperaturas elevadas, así como cambios bruscos de la misma; y no se ve afectado por ácidos, álcalis ni por diversos solventes, aunque reacciona con oxidantes fuertes- se puede reactivar, ya sea para disminuir costos de operación y volverlo a utilizar, o para recuperar el o los compuestos adsorbidos. Con base en estas propiedades, existen métodos de reactivación o de regeneración, con los que pueden eliminarse compuestos adsorbidos de diversa naturaleza y sustancias orgánicas e inorgánicas depositadas sobre la superficie del CA. Para la desorción de polifenoles, el método más recomendado es el de reactivación mediante la modificación del pH en solución acuosa, ya que la adsorción en este caso es muy dependiente del pH de la solución en la que se encuentra. Al aumentar el pH, disminuye a tal grado su adsorción, que puede provocarse su desorción. Un carbón saturado con este compuesto se puede reactivar mediante una solución de sosa al 4% y agua caliente (Kow *et al.*, 2016). También pueden eliminarse compuestos inorgánicos que han precipitado en el CA, inundando el carbón en una solución con el pH que produzca la disolución de estos. La reactivación de CA mediante modificación del pH en solución acuosa es otra propuesta interesante (Gaspar-Mendoza, 2022).

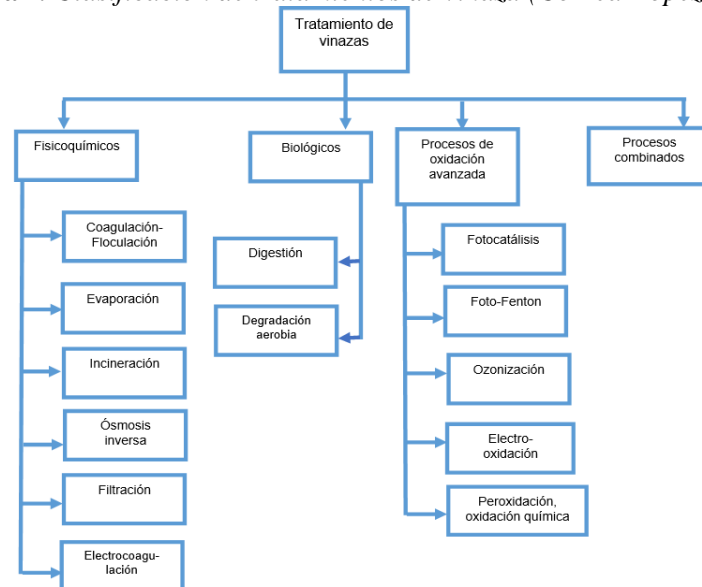
En una publicación previa (Gaspar *et al.*, 2022) se analizaron estos efectos del pH y la temperatura, así como la cantidad de material adsorbente con respecto del material adsorbido, obtenidos para la eliminación de polifenoles desarrollados a escala de laboratorio por Ziati y colaboradores (2017). Esto quiere decir que, en esas mismas condiciones, el proceso de desorción se vería beneficiado, por lo que la reactivación química del carbón activado con solución básica representa una opción viable y que puede tener una aplicación industrial, aunque todavía a pequeña escala. Además, ayudaría a reducir los costos de sustitución y eliminación.

Depuración de las vinazas postratadas (métodos complementarios de tratamiento)

Ninguno de los procesos mencionados es suficiente para poder alcanzar una remoción de contaminantes que ofrezca la concentración recomendada por las normas ambientales mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997.

Existen varios métodos fisicoquímicos (Figura 4), tales como coagulación-floculación, adsorción, electrocoagulación, oxidación electro-química y ozonización. A escala de laboratorio han demostrado ser eficaces en la remoción de materia orgánica y en el refinado de color, por lo que pueden fungir como un método de tratamiento complementario del tratamiento biológico y de adsorción descritos anteriormente (Carhuás-Pérez y Velásquez-Gutiérrez, 2018; Villalobos-Castillejos, 2009).

Figura 4. Clasificación de tratamientos de vinaza (Correa-López, 2022)



Fuente: elaboración propia.

Generalmente, se prefieren los métodos fisicoquímicos para un tratamiento posterior al tratamiento biológico por los costos, pero cada uno de ellos posee ventajas y desventajas que se muestran de manera general a continuación (Tabla 2).

Tabla 2. Comparación de ventajas y desventajas de procesos fisicoquímicos como procesos de depuración post tratamiento (elaboración propia)

Proceso	Ventajas	Desventajas
Coagulación-Floculación	Alta remoción de DQO	Usa pH ácidos
Electrocoagulación	Alta remoción de contaminantes / Económico al usar Fe	Proceso en escala de laboratorio
Filtración y ósmosis inversa	Muy alta remoción de contaminantes	Los filtros se ensucian / Alto costo a escala industrial
Procesos de oxidación avanzada	Alta remoción de DQO y carbono orgánico total, COT	Alto costo del proceso
Evaporación	Vapor reciclado a la planta / Disminuye el volumen de contaminantes	Uso de más equipos en la planta / Alto costo
Incineración-concentración	Uso de cenizas como fertilizante	Alto uso de energía en la planta / Generación de gases contaminantes
Procesos combinados	Excelente remoción de contaminantes	Alto costo del proceso

Fuente: elaboración propia.

En los procesos fisicoquímicos se emplean operaciones unitarias utilizando la diferencia entre las propiedades de las partículas y el agua, mediante principios de separación y, según Íñiguez y Hernández (2010), uno de los sistemas aplicados es la coagulación-floculación. López-López (2010) señala que el tratamiento fisicoquímico de coagulación-floculación es el más utilizado, tanto a escala de laboratorio como industrial, siendo el $Al_2(SO_4)_3$ el agente coagulante y un pH de 6, con remociones del 70% de color y 30% de sólidos suspendidos que quedan como sólidos precipitables. La electrocoagulación-electroflotación es también un tratamiento para vinazas previamente tratadas (Dávila-Rincón *et al.*, 2011). Otra opción para el postratamiento de aguas residuales como las vinazas es el uso de sistemas de filtración donde se utilizan membranas para concentrar los sólidos suspendidos en una corriente llamada concentrado y para liberar el agua tratada en la corriente denominada permeado (Castro-Moreno, 2009). Procesos, como la microfiltración, la nanofiltración, la ósmosis inversa y los biorreactores con membrana son los que ofrecen diferentes eficiencias de remoción de las partículas contaminantes. Normalmente se usan como una operación intermedia para separar los solutos o como un paso final del tratamiento antes de descargar el agua (Hoarau *et al.*, 2018; Magalhães *et al.*, 2020; Murthy y Chaudhari, 2009; Queiroga *et al.*, 2018; Serrano-Meza *et al.*, 2017).

Los procesos de oxidación avanzada (POA) también son una alternativa tecnológicamente viable para el tratamiento de aguas residuales industriales. Estos procesos actúan formando radicales hidroxilos ($\text{OH}\cdot$), que son altamente oxidantes y que contribuyen a la mineralización total de los compuestos contaminantes presentes en los efluentes. Los POA son utilizados para la degradación de contaminantes y desintoxicación de aguas residuales que contienen compuestos recalcitrantes. Algunos POA son la fotocatalisis heterogénea, fotoFenton, la ozonólisis y otras técnicas avanzadas (Garcés-Giraldo *et al.*, 2004; Hincapié-Mejía *et al.*, 2011; Terán-Solíz, 2016). Algunos de los autores indicaron que no se pueden eliminar totalmente ciertos contaminantes o que los porcentajes de remoción no son considerados tan altos (Ferral-Pérez *et al.*, 2016; Vilar *et al.*, 2018). Por ello se han estudiado procesos combinados, donde alguno de ellos cumple la función de un pre- o postratamiento para poder alcanzar porcentajes de remoción más altos de los alcanzados individualmente y así tener una mejor recuperación de los componentes de la vinaza (Carvajal-Zarrabal *et al.*, 2012; Pobleto *et al.*, 2020; Vilar *et al.*, 2018).

Discusión final

Partiendo de la revisión bibliográfica teórica realizada, a continuación, se muestran los resultados en un compendio recabado de algunas de las investigaciones de mayor importancia sobre esta temática.

Obtención de metano en los RALLFA

Los reactores termofílicos con los que se trabaja en el grupo de investigación que presenta esta revisión bibliográfica ya están operando de forma estable a 45, 55 y 65°C desde los años 80 del siglo veinte cuando el grupo de Lettinga hizo público su uso (Lettinga *et al.*, 1980). En ellos es posible convertir hasta un 60% de la DQO en metano. El más efectivo es el que opera a 45°C (Castro-González, 2004; Contreras-Contreras, 2019; Cruz-Rodríguez, 2023; Nava-Castro, 2023; Rincón-Acelas, 2008).

Desorción de polifenoles en carbón activado comercial

Experimentalmente, en el grupo se lograron remover de las vinazas tratadas anaerobiamente el 45.5 y 70.2%¹ de polifenoles utilizando 1 y 5 gramos de CA comercial, respectivamente. También, con las diferentes concentraciones en el equilibrio obtuvo que el modelo que más se ajustó al proceso de adsorción es el de Langmuir con una R² igual 0.991, de acuerdo con la Ecuación 1, de donde también pueden obtenerse las constantes ‘q₀’ y ‘K’; seguido del modelo de Freundlich con una R² de 0.973 (Contreras-Contreras, 2019):

$$\frac{1}{q} = 20.472 \times \frac{1}{c} + 0.0007 = \frac{K}{q_0} \times \frac{1}{c} + \frac{1}{q_0} \quad (1)$$

Recuperación de los polifenoles adsorbidos en carbón activado

La metodología de Kow *et al.* (2016), que consiste en utilizar una solución de hidróxido de sodio (NaOH) y agua caliente con una temperatura alrededor de 90°C es la más promisoría. Los mecanismos de reactivación de NaOH y agua caliente implican cambios de pH, reacción química, extracción y desorción térmica. Durante el proceso de reactivación, el ion hidroxilo causa que el pH en la superficie del adsorbente cambie y se cargue negativamente, lo que ayuda a reducir las fuerzas de van der Waals y los enlaces químicos entre el componente adsorbido y el adsorbente. Esto permite que los componentes adsorbidos que no reaccionan con el NaOH sean eliminados fácilmente, mientras que los componentes adsorbidos que son reactivos con NaOH se eliminan produciendo sales solubles u otros compuestos estables. Lavar el carbón con agua caliente después de tratar con NaOH acelera la velocidad de desorción del componente adsorbido del carbón, mientras se extrae la sal soluble en agua y el exceso de solución de NaOH en el carbón. Además, el método tiene bajo requerimiento de energía e implica el uso de productos químicos baratos como agentes de reactivación. Kow *et al.* (2016) concluyeron que la condición óptima de reactivación del carbón agotado es de 15 mL de solución de NaOH 6N por gramo de carbón agotado con un tiempo de contacto de 30 minutos. La condición de reactivación óptima para el carbón agotado la realizaron utilizando el método por lotes.

¹ Esta contribución usa el **punto** decimal de acuerdo con el DIARIO OFICIAL (Primera Sección). Modificación del inciso 0, el encabezado de la Tabla 13, el último párrafo del Anexo B y el apartado Signo decimal de la Tabla 21 de la Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCFI-2002, Sistema general de unidades de medida. CUARTO. -Se modifica el encabezado de la tabla 13 para quedar como sigue: Tabla 21 -Reglas para la escritura de los números y su signo decimal. Signo decimal. El signo decimal debe ser **una coma sobre la línea (,)** o **un punto sobre la línea (.)**. Si la magnitud de un número es menor que la unidad, el signo decimal debe ser precedido por un cero. Diario Oficial de la Federación: jueves 24 de septiembre de 2009. Poder Ejecutivo Federal. Ciudad de México, Estados Unidos Mexicanos

También trabajaron con un método de reactivación en columna. Una vez reactivados los carbones, se deben caracterizar obteniendo el área superficial, el volumen promedio de los microporos, así como su volumen total. Dichos valores se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Caracterización de los carbones reactivados con NaOH y agua caliente (Kow *et al.*, 2016)

	Área superficial estimada m ² /g	Volumen de microporos cm ³ /g	Volumen total de poros cm ³ /g
Obtenido por lotes	899.1	0.8702	0.9521
Obtenido en columna	849.0	0.8519	0.9450

Fuente: elaboración propia.

La capacidad de adsorción de cada carbón reactivado con respecto del CA comercial se determinó y evaluó usando el número de yodo y de azul de metileno (*MB* en inglés). Los resultados obtenidos por Kow *et al.* (2016) indican que la eficiencia de adsorción de los carbones reactivados es comparable al carbón activado comercial con un valor superior al 90% en prueba de yodo y 98% en la prueba de *MB*. Gaspar-Mendoza (2022) hizo un balance de materia de forma manual en Excel. Los porcentajes de remoción utilizados fueron los obtenidos por Contreras-Contreras (2019), 1.85 para los polifenoles y 58.35 para la DQO, que implican el uso de CA comercial. Dicho balance se hizo a partir de la producción de alcohol etílico señalada en páginas anteriores para México, lo que equivale a 540 millones de litros de vinazas producidas en un año (54,000 m³/a). Para la caracterización de las vinazas crudas provenientes del ingenio azucarero, únicamente se consideraron los valores de DQO y polifenoles contenidos en ellas. Dichos valores se encuentran en la Tabla 4. Se calcularon los flujos másicos a la entrada de los RALLFA. En la misma Tabla 4 se consideran los valores del reactor a 45°C, es decir, los kilogramos de oxígeno o de ácido gálico, según el parámetro medido, que se producirían al día, tal como se muestra en el siguiente cálculo así como la caracterización de las vinazas crudas con base en los datos obtenidos experimentalmente por Contreras-Contreras (2019). En la Tabla 5a están los flujos másicos después del tratamiento anaerobio, calculados a partir de los porcentajes de remoción con base en la caracterización inicial y final del trabajo experimental de Contreras-Contreras (2019). Este autor logró que se adsorbieran el 70.2% de los polifenoles contenidos en sus muestras. Para calcular el número de etapas requeridas, Gaspar-Mendoza (2022) tomó en cuenta tal valor experimental. Según los resultados de la Tabla 5b se requieren un total de 11 etapas para recuperar casi por completo los compuestos fenólicos, considerando

que en la mayoría de las etapas se requeriría de una reactivación (5,000 kgAG/día). Una vez adsorbidos, los polifenoles deben ser desorbidos con la finalidad de que sean utilizados para fines medicinales u otros usos (Adeboye *et al.*, 2018; Leyra-Tobilla, 2016; Mhatre *et al.*, 2020).

Kow *et al.* (2016) hicieron el proceso de reactivación con énfasis en la capacidad de adsorción que tendría el carbón agotado luego de ser reactivado.

Para esta investigación la reactivación o desorción implica la recuperación de los polifenoles que son el producto con valor agregado a partir de las vinazas tratadas en el RALLFA donde se produce metano.

Tabla 4. Caracterización de las vinazas crudas y de las vinazas diluidas al ingresar al RALLFA a 45°C según la producción de vinazas de México reportada y de los datos obtenidos por Contreras-Contreras (2019)

DQO	Polifenoles
0.06679 kgO ₂ /L de vinaza	0.0086 kgAG/L de vinaza
98,814 kgO ₂ /día	12,723 kgAG/día

AG: Polifenoles medidos como equivalentes de ácido gálico, AG

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5a. Caracterización del efluente del RALLFA a 45°C

DQO	Polifenoles
kgO ₂ /día	kgAG/día
49,724.6 (50,000)	12,016.6 (12,000)

AG: Polifenoles medidos como equivalentes de ácido gálico, AG

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5b. Flujo másico de polifenoles (kgAG/día) al final de las etapas de adsorción

Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Etapa 5	Etapa 6
3,580.9	1,067.1	618.0	94.8	28.2	8.4
Etapa 7	Etapa 8	Etapa 9	Etapa 10	Etapa 11	Etapa 12
2.5	0.8	0.2	0.07	0.02	0

AG: Polifenoles medidos como equivalentes de ácido gálico, AG

Fuente: elaboración propia.

Haciendo pruebas de yodo y azul de metileno, se determinó que la capacidad de desorción es del 90 al 98% del carbón activado original. Esto representa que la mayoría de los compuestos fueron separados del carbón activado y que, seguramente, la mayoría de los polifenoles puede

desorberse, lo que equivale a un total de 5,000 kgAG/día, de acuerdo con la Tabla 6. Pese a dichos resultados tan favorables, se debe tomar en cuenta que las vinazas contienen otras sustancias diferentes a los polifenoles que se pudieron adsorber en la superficie del carbón activado, lo que puede modificar la eficiencia de obtención de polifenoles útiles para eliminar virus, bacterias y hongos patógenos.

Tabla 6. Cantidad de polifenoles desorbidos (kgAG/día)

Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Etapa 5	Etapa 6
3,509.3	1,045.8	311.6	92.9	27.7	8.2
Etapa 7	Etapa 8	Etapa 9	Etapa 10	Etapa 11	Etapa 12
2.5	0.7	0.2	0.06	0.02	0

AG: Polifenoles medidos como equivalentes de ácido gálico. Eficiencia supuesta: 98%

Fuente: elaboración propia.

No todos los polifenoles contenidos en las vinazas tienen una utilidad potencial en el tratamiento de enfermedades (Leyra-Tobilla, 2016). Esta sería otra fase de la investigación en la que se caracterizaran los polifenoles extraídos de las vinazas y se estudiaran de la misma forma que lo hizo Leyra-Tobilla (2016) para determinar su capacidad biocida (Gaspar-Mendoza, 2022). De cualquier forma, de estos polifenoles los que no fueran útiles para propósitos medicinales o alimentarios pueden depositarse en suelos pobres donde actuarán de manera positiva para retener nutrientes, especialmente cationes metálicos, Ca y Mg y aniones como los carbonatos, sulfatos, etc. (Bautista-Zúñiga, 2000).

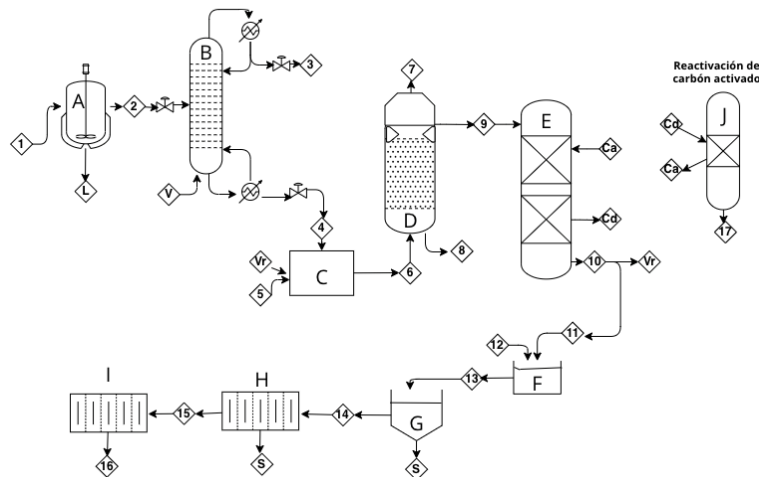
CONCLUSIONES

De esta investigación bibliográfica es posible concluir lo siguiente:

1. La agroindustria azucarera de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) es muy importante en México y en muchos países productores por todos los subproductos que se generan de ella. Sin embargo, también es una de las más contaminantes, debido a que muchos de sus subproductos han sido tradicionalmente considerados como residuos y no se están reaprovechando de forma adecuada, un ejemplo de ello son las vinazas.
2. Los procesos comúnmente usados en la industria actual para la transformación de los componentes de las vinazas son los sistemas biológicos. Por ejemplo, con el proceso de degradación anaerobia se logra convertir en metano casi el 60% de la materia carbonosa de las vinazas. Del 40% de los materiales solubles del efluente de los RALLFA, casi el 30%

corresponde a compuestos fenólicos y el resto corresponde a otros compuestos orgánicos e inorgánicos. Con la separación de los polifenoles de las vinazas tratadas anaerobiamente, no solamente se obtiene un subproducto que pueda comercializarse, sino también, una corriente de vinazas tratadas con menor DQO que la que tenía previamente (Fig. 5 y Tabla 7).

Figura 5. Diagrama de flujo de proceso o DFP



Fuente: Pérez-Barrera, (2023)

Tabla 7. Descripción de corrientes y equipos.

Corrientes	Corrientes	Equipos
1- Melaza	13- Vinaza pos-coagulación	A- Fermentador
2- Etanol, vinaza y residuos	14- Vinaza pos-floculación	B- Primera torre de destilación
3- Etanol de alta pureza	15- Vinaza sin sólidos	C- Tanque de adecuación
4- Vinaza	16- Lodos para suelos cañeros	D- RALLFA
5- Solución de adecuación de las vinazas	17- Vinaza después de la adsorción en CA	E- Columna de adsorción en CA
6- Vinazas diluidas	L- Levadura recuperada	F- Tanque de coagulación
7- Biogás rico en metano	V- Vapor de agua	G- Tanque de floculación
8- Lodos residuales	Vr- Vinaza de recirculación	H- Ultrafiltración
9- Vinaza efluente del biorreactor	Cd- Carbón desgastado*	I- Nanofiltración
10- Vinaza después de la adsorción en CA	Ca- Carbón activado	J- Reactivación del Cd**
11- Vinaza después de la adsorción en CA	S- Sólidos finales para suelos cañeros	
12- Coagulante y floculante		

*Con polifenoles adsorbidos; **Con la recuperación de los polifenoles desorbidos

Fuente: (Pérez-Barrera, 2023)

3. El postratamiento de adsorción y desorción con CA de los efluentes del RALLFA separa experimentalmente un 70.2% de los polifenoles contenidos en una sola etapa. Debido a las

altas cantidades producidas de vinazas en un día, se requerirían hasta 12 etapas para poder adsorber los polifenoles del efluente, lo que requerirá tratamientos de reactivación del CA, en cada una de las etapas. El uso de CA a partir del bagazo o incluso de las cenizas de bagazo de caña para adsorber los polifenoles ayudará a reaprovechar este subproducto con evidentes consecuencias económicas y ambientales favorables.

4. El CA puede ser reutilizado desorbiendo los compuestos antes adsorbidos, recuperando los polifenoles contenidos en las vinazas. La desorción se logra utilizando una solución acuosa a pH básico. La capacidad de desorción del CA reactivado de 90-98% de la capacidad original del CA, indica que los polifenoles podrían desorberse del carbón activado teóricamente en ese mismo porcentaje. Estos datos, sin embargo, deben corroborarse experimentalmente considerando las impurezas que pueda haber junto con los polifenoles desorbidos.
5. La cantidad de polifenoles que se obtendría a partir de la producción de alcohol etílico tomando como ejemplo la información pública de producción de etanol en México a fines de la segunda década de este siglo (54,000 m³/año) es de 5,000 kgAG/día si se consideraran las 12 etapas de adsorción/desorción.
6. La mayoría de los estudios revisados han sido realizados a escala de laboratorio y no se ha corroborado experimentalmente la eficiencia de recuperación de los materiales separados ni su calidad final a escala de banco y de planta piloto. Esta debe ser la siguiente etapa de la investigación.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen al personal de la Biblioteca Digital de la UNAM por su valioso apoyo a distancia durante la pandemia de Covid-19. Asimismo, reconocen el valioso apoyo de quienes pre-evaluaron esta contribución que mejoró su presentación.

REFERENCIAS

Adebooye, O.C., Allashi, A.M., Aluko, R.E. 2018. A brief review on emerging trends in global poluphenol research. *Journal of Food Biochemistry*. 42(4):1-7.

<https://doi.org/10.1111/jfbc.12519>

Amaro-Medina, E.A. 2018. Evaluación de la actividad antiviral de extractos polifenólicos de algas mexicanas y su efecto combinacional con la ribavirina contra el virus del sarampión. Tesis

profesional (QBP). Universidad Autónoma de Nuevo León. San Nicolás de los Garza, N.L. México.

http://www.fcb.uanl.mx/nw/images/stories/tesis/Edgar_Abraham_Amaro_Medina.pdf

Bartolomé-Camacho, M.C., García-Pérez, M.E., Ignacio-Figueroa, I., Martínez-Flores, H.E., Sosa-Martínez, E., Valencia-Avilés, E. 2017. Polifenoles: Propiedades antioxidantes y toxicológicas / *Polyphenols: Antioxidant and toxicological properties*. Revista de la Facultad de Ciencias Químicas (Ecuador). Núm. 16, pp. 15-29. ISSN 1390-1869.

<https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/29781/1/2.%201583-4794-2-PB.pdf>

Bautista-Zúñiga, F. 2000. Efecto de la aplicación de vinazas crudas y modificadas por microorganismos anaerobios y aerobios sobre las propiedades químicas de dos suelos del Municipio Miguel Alemán del Estado de Veracruz, México. Tesis de Doctorado en Ciencias (Biología). Facultad de Ciencias, UNAM. Defensa: Enero 31, 2000. Ciudad de México, México.

132.248.9.195/pd2000/272955/Index.html

Bernardo, E.C., Egashira, R., Kawasaki, J. 1997. Decolorization of molasses' wastewater using activated carbon prepared from cane bagasse. *Carbon*. 35(9):1217-1221.

[https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(97\)00105-X](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(97)00105-X)

Caicedo-Messa, F.J. 2006. Diseño, construcción y arranque de un reactor UASB piloto para el tratamiento de lixiviados. Documento para título de Especialista en Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia.

Camelo-M., G., Casas-F., N., Sotelo-D., I. 2010. BOROJÓ (*Borojoa patinoi*): Fuente de polifenoles con actividad antimicrobiana. *Vitae*. 17(3):329-336. ISSN: 0121-4004.

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=1698/169815641011>

Carhuás-Pérez, W. D., Velásquez-Gutiérrez, D. J. 2018. Determinación de las condiciones de operación y diseño del proceso coagulación floculación para el tratamiento de vinazas de Cartavio Rum Company SAC. Tesis Profesional. Universidad Nacional de Trujillo. La Libertad, Perú.

Carvajal-Zarrabal, O., Nolasco-Hipólito, C., Barradas-Dermitz, D.M., Hayward-Jones, P.M., Aguilar-Uscanga, M.G., Bujang, K. 2012. Treatment of vinasse from tequila production using polyglutamic acid. *Journal of Environmental Management*. 95: S66-S70.

Castro-González, A. 2004. Efecto de la temperatura en la actividad metanogénica y sulfato-reductora de consorcios microbianos en condiciones anaerobias. Tesis de doctorado. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Enero 28, 2004. Ciudad de México, México.

<http://www.132.248.9.195/ppt2004/0327304/Index.html>

Castro-Moreno, G.A. 2009. El tratamiento de las vinazas - la recirculación. Publicaciones e Investigación. 3(1):51-58.

CEDRSSA. 2020. La producción y el comercio de los biocombustibles en México y en el mundo. Reporte. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria.

<http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/56Producci%C3%B3n%20y%20comercio%20de%20biocombustibles.pdf>

CLARIMEX. 2022. El misterio del carbón activado.

https://www.clarimex.com/activated_carbon_mystery_es.php

CONADESUCA. 2016a. Reducción del consumo de agua en los procesos productivos del ingenio. Boletín Técnico Informativo. Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar, Ciudad de México, México.

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/114364/Boletin_Tecnico_Informativo_Abril_2016_Reducci_n_del_consumo_de_agua_en_los_procesos_productivos_del_ingenio.pdf

CONADESUCA. 2016b. Vinazas: Alternativas de uso. Nota informativa sobre innovaciones en materia de productividad del sector. Ciudad de México, México.

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/171932/Nota_Informativa_Septiembre_Vinazas.pdf

Contreras-Contreras, J.A. 2019. Caracterización química de vinazas de torres de destilación y posible remoción de polifenoles de ellas empleando sistemas bioquímicos anaerobios. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Enero 25, 2019. Ciudad de México, México.

<http://132.248.9.195/ptd2019/enero/0784401/Index.html>

Contreras-Contreras, J.A., Bernal-González, M., Solís-Fuentes, J.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2020. Polyphenols from sugarcane vinasses, quantification and removal using activated carbon after biochemical treatment in laboratory-scale thermophilic upflow anaerobic sludge blanket reactors. Water Air and Soil Pollution. 231(12):401,1-8.
<https://doi.org/10.1007/s11270-020-04733-5>

Cordovés-Herrera, M., Valdés-Jiménez, M.E. 2006. Aprovechamiento integral de los efluentes residuales de la producción de alcohol etílico. En Memorias del Cuarto Minisimposium Internacional sobre Remoción de Contaminantes de Aguas, Atmósfera y Suelos. Facultad de Química, UNAM. Ciudad de México, México, pp. 156-161.

<https://ambiental.unam.mx/albunimagenes/IV%20Mini-SProcs-Mems8-11Nov2006.pdf>

Cornejo-Arteaga, P.M.d.L. 2016. Aplicaciones de alcohol etílico: Material para la Universidad Nacional Autónoma del Estado de Hidalgo. Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No. 3, Con-Ciencia. 3(5). ISSN: 2007-7653.

<https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa3/n5/m7.html>

Correa-López, R.E. 2022. Métodos de tratamiento alternos tanto biológicos como fisicoquímicos, para el reaprovechamiento de vinazas provenientes de una planta cooperante productora de bioetanol. Tesis de licenciatura en ingeniería química. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Junio 30, 2022. Ciudad de México, México.

<http://132.248.9.195/ptd2022/marzo/0823752/Index.html>

Crombet-Grillet, S., Abalos-Rodríguez, A., Rodríguez-Pérez, S., Pérez-Pompa, N. 2016. Evaluación del tratamiento anaerobio de las aguas residuales de una comunidad universitaria. Revista Colombiana de Biotecnología. XVIII(1):49-56.

DOI: 10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.57715

Cruz-Rodríguez, D.J. 2023. Evaluación de la calidad del biogás producido en reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) a nivel laboratorio transformando el contenido carbonoso de vinazas azucareras a 45 y 55°C. Tesis de licenciatura en Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Marzo 03, 2023, Ciudad de México, México.

132.248.9.195/ptd2023/enero/0834946/Index.html

Dávila-Rincón, J.A., Machuca, F., Marrianga, N. 2011. Treatment of vinasses by electrocoagulation-electroflotation using the Taguchi method. Electrochimica Acta. 56(22):7433-7436.

Delgado-Bautista, M.K. 2016. Perspectiva actual de los polifenoles en México. Entre textos. Año 7(21). ISSN: 2007-5316.

<https://entretextos.leon.uia.mx/num/21/PDF/ENT21-1.pdf>

Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2022. Aprovechamiento de los subproductos del procesamiento de la caña de azúcar: Bagazo, cachaza, vinazas, metano, polifenoles, aguas residuales tratadas, etc. / *Use of by-products from sugarcane processing: Bagasse, cachasse, stillage (vinasse), methane, polyphenols, treated wastewater, etc.* RD ICUAP. 8(23):115-130.

<http://rd.buap.mx/ojs-dm/index.php/rdicuap/article/view/812/924>

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 and Engineering*. 38(4):279-290.

Gandini-Ayerbe, V., Zúñiga-Cerón, M.A. 2013. Caracterización ambiental de las vinazas de residuos de caña de azúcar resultantes de la producción de etanol / *Environmental characterization of stillage from sugarcane waste from the production of ethanol*. *Dyna*. 80(177):124-131. ISSN 0012-7353.

<http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v80n177/v80n177a15.pdf>

Garcés-Giraldo, L.F., Mejía-Franco, E.A., Santamaría Arango, J.J. 2004. La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*. 1(1):83-89.

García-Jaimes, L.E., Rodríguez-Acevedo, J.D. 2016. Optimización de los lazos de control de una torre de destilación mediante las librerías del controlador AC800M (*Control loops optimization of a distillation tower by using the libraries of AC800M controller*). *Revista Politécnica*. 12(22):21-32.

<https://www.redalyc.org/journal/6078/607863422003/html/>

Gaspar-Mendoza, L. 2022. Adsorción y desorción de polifenoles para su uso medicinal a partir de vinazas de bioetanol de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) usando carbón activado del propio bagazo de la caña. Tesis de licenciatura en Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Noviembre 18, 2022, Ciudad de México, México.

<http://132.248.9.195/ptd2022/septiembre/0830323/Index.html>

Gaspar-Mendoza, L., Bernal-González, M., García-Gómez, R.S., Solís-Fuentes, J.A., Navarro-Frómeta, A.E., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2022. Aprovechamiento integral de las vinazas de alcohol de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) mediante anaerobiosis y la posible separación de polifenoles útiles usando carbón activado de bagazo de caña / *Comprehensive use of sugarcane (Saccharum officinarum) alcohol stillage through anaerobiosis and the possible separation of useful polyphenols using activated carbon from cane bagasse*. *Mix Tec*. 2(3):12-54. <http://mixtec.utim.edu.mx/articulosv3/articulo02.pdf>

Gilces-Farías, P.E., Veloz-Pinto, P.S. 2006. Estudio del uso de los nutrientes para la levadura en fermentación con el propósito de mejorar la producción del alcohol etílico. Tesis Profesional. Universidad de Guayaquil, pp. 31-77, Guayaquil, Ecuador.

<http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/737>

Girgis, B.S., Khalil, L.B., Tawfik, T.A.M. 1994. Activated carbon from sugar cane bagasse by carbonization in the presence of inorganic acids. *J. Chem. Technol. Biotechnol*. 61(1):87-92.

Grisales-Motato, A.L., Rojas-Arrieta, W. 2016. Obtención de carbón activado a partir de activación química de pulpa de café y su aplicación en la remoción de colorantes en aguas residuales industriales. Trabajo de grado para obtener el título de Tecnólogo Químico. Facultad de Tecnología, Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia.

<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/6965/628162G869.pdf?sequence=1>

Guardia-Puebla, Y. 2012. Estudio de la digestión ‘anaerobia’² en dos fases para el tratamiento de las aguas residuales del despulpe del beneficiado húmedo del café. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

<https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1023/358/1/MX%20332661%20B.pdf>

Guo, Y., Tan, C., Sun, J., Li, W., Zhang, L, Zhao, C. 2020. Porous activated carbons derived from waste sugarcane bagasse for CO₂ adsorption. Chemical Engineering Journal. 381:122736.

Hincapié-Mejía, G.M., Ocampo, D., Restrepo, G.M., Marín, J.M. 2011. Fotocatálisis heterogénea y foto-Fenton aplicadas al tratamiento de aguas de lavado de la producción de biodiesel. Información Tecnológica. 22(2):33-42.

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>

ICIDCA. 2020. Resultados de los Institutos Cubanos de Investigación, Desarrollo e Innovación en las Tecnologías sobre Azúcar y Derivados. Editorial ICIDCA (Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar). Caps. 2, 9, 12, 21, 27. Pp. 24-36, 220-253, 305-330, 477-485, 539-569. ISBN 978-959-7165-60-6. La Habana, Cuba. Disco compacto.

Íñiguez, G., Hernández, R. 2010. Estudio para la rehabilitación de una planta de tratamiento de vinazas tequileras mediante un floculante polimérico de poliacrilamida (PAM). Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 26(4):299-311.

² La digestión, sea bioquímica (en el aparato digestivo, por ejemplo) o química (cuando se analizan muestras acuosas para determinar su demanda química de oxígeno, por ejemplo, al realizarla con reactivos químicos en una estufa), es inherentemente anaerobia. Por ello no requiere de este adjetivo

Járegui, S., Robles, H. 2017. Efecto de la concentración de inóculo de un consorcio bacteriano nativo en la degradación de los nitratos de vinaza de una destilería de alcohol. Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú.

<https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/agroindscience/article/view/1661>

Kaushik, A., Basu, S., Singh, K., Batra, V.S., Balakrishnan, M. 2017. Activated carbon from sugarcane bagasse ash for melanoidins recovery. *Journal of Environmental Management*. 200:29-34.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.060>

Kow, S.-H., Fahmi, M.R., Abidin, C.Z.A., Ong, S.-A., Ibrahim, N. 2016. Regeneration of spent activated carbon from industrial application by NaOH solution and hot water. *Desalination and Water Treatment*.

DOI: 10.1080/19443994.2016.1168133

Lettinga, G., van Velsen, A.F.M., Hobma, S.W. de Zeeuw W. and Klapwijk, A. 1980. Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. *Biotechnol. Bioeng.* 22:699-734.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bit.260220402>

Leyra-Tobilla, L. 2016. Obtención de extractos polifenólicos a partir de vinazas mezcaleras y su efecto antiviral en la infectividad del virus sincitial respiratorio. Tesis de licenciatura en Química Farmacéutico-Biológica. Facultad de Química, UNAM. Ciudad de México, México,
<http://132.248.9.195/ptd2015/diciembre/0739295/Index.html>

Linero-Gil, J.E., Guzmán-Carrillo, A. Proceso de tratamiento de vinazas. 2012. Patente 332661.
<https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1023/358/1/MX%20332661%20B.pdf>

López, I., Borzacconi, L., Passeggi, M. Anaerobic treatment of sugar cane vinasse: Treatability and real-scale operation. 2018J. *Chem. Technol. Biot.* 93(5):1320-1327.

<https://doi.org/10.1002/jctb.5493>

López-López, A. Dávila-Vázquez, G., León-Becerril, E., Villegas-García, E., Gallardo-Valdez, J. 2010. Tequila vinasses: Generation and full scale treatment processes. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology.* 9:109-116.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11157-010-9204-9>

Madigan, M.T., Martinko, J.M., Bender, K.S., Buckley, D.H., Stahl, C.A. 2015. *Brock: Biología de los microorganismos*. 14^a ed. Pearson Educación. Ciudad de México, México.

Magalhães, N.C., Silva, A.F., Cunha, P.V., Drewes, J.E., Amaral, M.C. 2020. Role of nanofiltration or reverse osmosis integrated to ultrafiltration-anaerobic membrane bioreactor treating vinasse for the conservation of water and nutrients in the ethanol industry. *Journal of Water Process Engineering*. 36:101338.

<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101338>

Mhatre, S., Srivastava, T., Naik, S., Patravale, V. 2020. Antiviral activity of green tea and black tea polyphenols in prophylaxis and treatment of COVID-19: A review. *Phytomedicine*. 153286. doi: [10.1016/j.phymed.2020.153286](https://doi.org/10.1016/j.phymed.2020.153286)

Murthy, Z.V.P., Chaudhari, L.B. 2009. Treatment of distillery spent wash by combined UF and RO processes. *Global NEST Journal*. 11(2):235-240.

Nava-Castro, K.M.J. 2023. Comportamiento de un reactor termofílico anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente para convertir los compuestos carbonosos de vinazas medidos como demanda química de oxígeno en biogás. Tesis de licenciatura en Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Marzo 13, 2023. Ciudad de México, México.

132.248.9.195/ptd2023/febrero/0835924/Index.html

Navarrete-Prida, J.A., Avante-Juárez, R.A., Rubí-Salazar, A.I. Villanueva-Lagar, J.I. Tornero-Applebaum, F.M., Miranda-Cid, L.A. 2016. Producción de azúcar. *Prácticas seguras en el sector agroindustrial*. Secretaría del Trabajo y Previsión Social. Pp. 15-71. Ciudad de México, México.

NTX. 2018. México produce casi 57 millones de toneladas de caña de azúcar al año. *INFORMADOR.MX*. <https://www.informador.mx/economia/Mexico-produce-casi-57-millones-de-toneladas-de-cana-de-azucar-al-ano-20181229-0037.html>

Ojeda, G., Orozco, A., Espinoza, T. 2019. Propuesta del diseño de una línea de producción de carbón activado a partir de caña de azúcar y coco / *Proposal for the design of an activated carbon production line from sugarcane and coconut*. *Revista Ingeniería UC*. 26(3):306-318. ISSN: 2610-8240.

<http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/v26n3/art06.pdf>

OMS.2020. Las 10 principales causas de defunción. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>

Pacheco, J., Magaña, A. 2003. Arranque de un reactor anaerobio. *Ingeniería*. 7(1):21-25. ISSN: 1665-529X. <https://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen7/arranque.pdf>

Pasteur, L. 1879. Physiological Theory of Fermentation. Traducción al inglés: F. Faulkner, D.C. Robb. Pub. Internet Modern History Sourcebook. History Department, Fordham University, Nueva York, Estados Unidos.

<https://sourcebooks.fordham.edu/mod/1879pasteur-ferment.asp>

Paz-Pino, O.L. 2013. Efectividad de un sistema acoplado electrocoagulación/floculación-biológico para tratamiento de fenoles presentes en vinazas. Trabajo de grado para el título de Química. Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Valle. Santiago de Cali, Colombia. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/entities/publication/f1346fc7-60fb-45c7-be86-3c56186a274a>

Poblete, R., Cortes, E., Salihoglu, G., Salihoglu, N.K. 2020. Ultrasound and heterogeneous photocatalysis for the treatment of vinasse from pisco production. Ultrasonics Sonochemistry. 61:104825. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104825>

Pérez-Barrera, S. 2023. Reaprovechamiento termofílico de las vinazas de una planta cooperante productora de bioetanol. Tesis de licenciatura en Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Octubre 5, 2023. Ciudad de México, México.

Prato-García, D., Sánchez-Guerrero, H., Tapie, W.A. 2016. Biodegradación de vinazas de caña de azúcar mediante el hongo de pudrición blanca *Pleurotus ostreatus* en un reactor de lecho empacado. Tropical and Subtropical Agroecosystems. 19(2):145-150. E-ISSN 1870-0462.

Procaña. 2020. Sub-productos y derivados de la caña de azúcar. Asociación Colombiana de Productores y Proveedores de Caña de Azúcar. <https://www.procana.org/new/quienes-somos/subproductos-y-derivados-de-la-ca%C3%B1a.html>

Queiroga, J., Souza, D.F., Nunes, E.H., Rezende-Silva, A.F., Amaral, M.C., Ciminelli, V.S., Vasconcelos, W.L. 2018. Preparation of alumina tubular membranes for treating sugarcane vinasse obtained in ethanol production. Separation and Purification Technology. 190:195-201. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.08.059>

Quiñones, M., Miguel, M., Alexandre, A. 2012. Los polifenoles, compuestos de origen natural con efectos saludables sobre el sistema cardiovascular. Nutrición Hospitalaria. 27(1):76-89. DOI:10.3305/nh.2012.27.1.5418

Rabassa-Olazábal, G., González-Suárez, E., Pérez-Sánchez, A., Miño-Valdés, J.E., Pérez-Martínez, A. 2016 Procedimiento para la evaluación de oportunidades de negocio en la industria azucarera. Visión de Futuro. 20(2):153-174.

Rincón-Acelas, I.R. 2008. Cinética de la degradación anaerobia termofílica de vinazas de caña. Tesis de maestría. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Junio 30, 2008. Ciudad de México, México.

132.248.9.195/ptd2008/septiembre/0632214/Index.html

Rodríguez-Arreola, A. 2019. Tratamiento de vinaza de tequila por medio de coagulación-floculación y fotocatalisis heterogénea empleando nanopartículas de TiO₂. Tesis de maestría. Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de los Valles. Departamento de Ciencias Naturales y Exactas. Guadalajara, Jalisco. México.

http://www.docfm.cuvalles.udg.mx/sites/default/files/m._en_c._alicia_rodriguez_arreola.pdf

SADER. 2020. Todo se arregla con un terrón de azúcar. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Poder Ejecutivo Federal. Ciudad de México, México, Blog.

<https://www.gob.mx/agricultura/articulos/todo-se-arregla-con-un-terron-de-azucar?idiom=es#:~:text=Ahora%20bien%2C%20en%20la%20actualidad,Ca%C3%B1a%20de%20Az%C3%BAcar%2C%20la%20cual>

Serrano-Meza, A., Garzón-Zúñiga, M.A., Barragán-Huerta, B.E., Estrada-Arriaga, E., Viguera-Cortés, J.M. 2017. Estrategias para mejorar la calidad del efluente de un sistema de tratamiento por digestión ‘anaerobia’³ de vinazas de tequila. En Congreso Nacional AMICA. Villahermosa, Tabasco, México,

http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/2109/OT_247.pdf?sequence=1&isAllowed=y

SIAP. 2018. La producción de caña de azúcar supera las 55 millones de toneladas en 2018. Blog. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Ciudad de México, México.

<https://www.gob.mx/siap/articulos/la-produccion-de-cana-de-azucar-supera-las-55-millones-de-toneladas-en-2018>

Simaratanamongkol, A., Thiravetyan, P. 2010. Decolorization of melanoidin by activated carbon obtained from bagasse bottom ash. Journal of Food Engineering. 96(1):14-17.

<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.06.033>

Solís-Fuentes, J.A., Morales-Téllez, M., Ayala-Tirado, R.C., Durán-de-Bazúa, M.d.C. 2012. Obtención de carbón activado a partir de residuos agroindustriales y su evaluación en la remoción de color del jugo de caña. Tecnología, Ciencia, Educación (IMIQ, México). 27(1):36-48. ISSN: 0186-6036.

³ Ídem (ver pie de una página anterior)

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48224413006>

Terán-Solíz, M.C. 2016. Estudio de la aplicación de procesos de oxidación avanzada a aguas contaminadas. Tesis de Licenciatura. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España
https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/88273/01_TFG.pdf

Tuesta-Popolizio, D.A. 2017. Efecto de la aplicación de vinazas de la industria del tequila en el cultivo de maíz y en la asociación planta-hongos micorrízicos arbusculares (HMA). Tesis de maestría. CIATEJ. Guadalajara, Jalisco, México.
<https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1023/382/1/Diego%20Tuesta%20Popolizio.pdf>

Velásquez-Ramírez, D. 2008. Análisis de la capacidad tecnológica de Colombia en la producción de bioetanol a partir de la caña de azúcar utilizando la metodología del *Benchmarking*. Tesis de Licenciatura. Universidad del Valle. Pp. 22-32. Cali, Colombia.
<https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/15272d87-d4ac-4f5b-ad5e-1c3685a5943a/content>

Vilar, D.S., Carvalho, G.O., Pupo, M.M., Aguiar, M.M., Torres, N.H., Américo, J.H., Cavalcanti, E.B., Eguiluz, K.I.B., Salazar-Banda, G.R., Leite, M.S, Ferreira, L.F. 2018. Vinasse degradation using *Pleurotus sajor-caju* in a combined biological–electrochemical oxidation treatment. *Separation and Purification Technology*. 192:287-296.

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.10.017>

Villalobos-Castillejos, F. 2009. Disminución de la materia orgánica biodegradable presente en vinazas mezcaleras mediante digestión ‘anaerobia’⁴. Tesis Profesional. Universidad Tecnológica de la Mixteca. Pp. 5-15. Huajuapán de León, Oaxaca, México.

http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/10960.pdf

Ziati, M., Khemari, F., Cherifi, O., Didouche, F.Y. 2017. Removal of polyphenols from olive mill wastewater by adsorption on activated carbon prepared from peach stones. *Revue Roumaine de Chimie*. 62(11):865-874.

<http://revroum.lew.ro/wp-content/uploads/2017/11/Art%2009.pdf>