

**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**

**COMPREHENSIVE USE OF SUGARCANE (*Saccharum officinarum*)
ALCOHOL STILLAGE THROUGH ANAEROBIOISIS AND THE
POSSIBLE SEPARATION OF USEFUL POLYPHENOLS USING
ACTIVATED CARBON FROM CANE BAGASSE**

Gaspar-Mendoza L.¹, Bernal González M.¹, García-Gómez R. S.¹, Solís Fuentes J. A.², Navarro Frómata A. E.³, Durán-Domínguez-de-Bazúa M. del C.*¹

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química, Laboratorios de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental Ciudad Universitaria, 04510 Ciudad de México, México

²Universidad Veracruzana, Instituto de Ciencias Básicas, 91000 Xalapa, Veracruz, México

³Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros, Puebla, México

Autor de correspondencia: mcduran@unam.mx

Recibido: 24/marzo/2021

Aceptado: 13/marzo/2022

RESUMEN

Esta contribución plantea el problema que representa la producción más limpia de una fuente renovable de energía: el bioetanol a partir de mieles finales de jugo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). Hay opciones biotecnológicas y químicas para su solución con el fin de obtener nuevos productos en beneficio de la población, la

salud y el ambiente. Las vinazas (productos de la destilación, particularmente de la primera torre, obtenidas en las plantas alcohólicas) 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

pueden separar usando carbón activado. Esto hace posible desorberlos después para comercializarlos. El resultado son vinazas con una menor demanda química de oxígeno (DQO), metano y polifenoles útiles para muchos usos de gran valor agregado. A partir de la bibliografía consultada en esta contribución teórica, es posible plantear un proyecto experimental para realizar la separación de los polifenoles adsorbiéndolos en carbón activado obtenido del bagazo de la caña y después desorbiéndolos. Esto beneficiaría a la propia planta azucarera-alcoholera para la obtención de un nuevo producto con valor agregado, disminuyendo sus costos de operación al producir el carbón activado con su bagazo en vez de comprarlo. Uno de los usos más interesantes de los polifenoles es su aplicación para eliminar bacterias, hongos y virus del tracto respiratorio.

Palabras clave: Carbón activado, bagazo de caña, polifenoles, conversión anaerobia con RALLFA, vinazas de etanol

ABSTRACT

This contribution raises the problem that represents the cleaner production of a renewable source of energy: bioethanol from final syrups of sugar cane juice (*Saccharum officinarum*). There are biotechnological and chemical options for its solution in order to obtain new products for the benefit of the population, health and the environment. The stillage (distillation products, particularly from the first tower, obtained in the sugar-alcohol plants) can be processed in an upflow anaerobic sludge bed reactor, UASB, transforming an important part of its carbonaceous compounds into biogas rich in methane, leaving dissolved polyphenols that can be separated using activated carbon. This makes it possible to desorb them later for marketing. The result is stillage with a lower chemical oxygen demand (COD), methane, and polyphenols useful for many high added value uses. From the bibliography consulted in this theoretical contribution, it is possible to propose an experimental project to carry out the separation of polyphenols by adsorbing them on activated carbon obtained from sugarcane bagasse and then desorbing them. This

would benefit the sugar-alcohol plant itself to obtain a new product with added value, reducing its operating costs by producing activated carbon with its bagasse instead of buying it. One of the most interesting uses of polyphenols is their application to eliminate bacteria, fungi, and viruses from the respiratory tract.

Keywords: Activated carbon, sugarcane bagasse, polyphenols, UASB reactors anaerobic conversion, ethanol vinasses

INTRODUCCIÓN

La producción de caña de azúcar es una actividad económica muy importante en México desde la época de la conquista, ya que aporta el 4.5% del PIB agrícola nacional. Veracruz, además de ser el lugar donde se plantó por primera vez la caña de azúcar, es el estado con mayor aportación a nivel nacional, seguido por Jalisco. Tan sólo en el año 2018 ambos estados aportaron 28.3 millones de toneladas, lo que representa el 50.6% de la producción nacional. En la actualidad, la caña de azúcar es considerada una de las fuentes energéticas más económicas para el hombre y, debido a su importancia

social, económica y ambiental, el cultivo de caña de azúcar es el único que tiene su propia norma jurídica, la Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar, que fue publicada en el Diario Oficial de la Federación el 22 de agosto de 2005. Para su procesamiento se requiere de mucha mano de obra, por lo que representa una relevante fuente de empleo, generando 500 mil empleos directos y 2.4 millones de empleos indirectos (NTX, 2018; SIAP, 2018, SADER, 2020). De la caña no solamente se produce el azúcar, fuente de energía para los seres humanos. Es una planta que ofrece diversos productos y subproductos, por lo que no se desperdicia nada. Por ejemplo: sus hojas y bagazo son utilizadas en alimento para animales como ganado vacuno y porcino. De la combustión del bagazo se genera energía eléctrica. La fibra de caña de azúcar sirve para la fabricación de papel. Esta fibra tiene la característica de ser biodegradable, ‘compostable’ y reciclable. A partir de las mieles y el azúcar se fabrican confites, dulces y bebidas gaseosas que se conservan gracias a la presión osmótica que provoca el azúcar (Procaña, 2020). El bioetanol,

presente en las bebidas alcohólicas y en diversos productos de sectores como el farmacéutico y también usado como combustible vehicular, es considerado como la gran alternativa en la absorción de CO₂, contribuyendo así con el cuidado del ambiente (Cornejo-Arteaga, 2016).

El bioetanol se produce por medio de la agroindustria azucarera cañera, pudiéndose emplear, como materia prima, tanto las mieles finales como el jugo de caña (Cordovés-Herrera y Valdés-Jiménez, 2006). Para su obtención, las melazas incristalizables se fermentan con *Saccharomyces cerevisiae*, conocida como levadura cervecera. Como la fermentación no se realiza en condiciones asépticas, para evitar la proliferación de otros microorganismos se reduce el pH a valores muy ácidos para que solamente la levadura se reproduzca, logrando así un mayor rendimiento en la conversión de glucosa a etanol. El pH ácido se alcanza por la adición de ácido sulfúrico. Se agrega también urea como fuente de nitrógeno para las levaduras, mejorando la relación de C:N:P. El mosto fermentado 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 alcohólicas. Otro de estos productos de la destilación, particularmente de la primera torre, son las denominadas vinazas, ya que en la jerga alcoholera le llaman vino al mosto fermentado (Castro-González, 2004).

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 (DBO₅=40-100 g/L) y como demanda química de oxígeno (DQO=10-200 g/L), son muy altos. Tienen un bajo pH (3-5) y una coloración café intenso (Prato-García y col., 2016). 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, glucosa y fructosa y compuestos aromáticos como fenoles y polifenoles (Contreras-Contreras, 2019). El Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar,

CONADESUCA (2016) no considera a las vinazas como un contaminante, sino como un producto valioso, ya que pueden ser aprovechadas de diversas formas siempre y cuando se les transforme adecuadamente. Uno de estos procesos de transformación que desde hace tiempo se ha ofrecido como una opción viable energéticamente para aprovecharlas es transformar 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 la DQO del efluente de los reactores anaerobios corresponde a compuestos fenólicos (los que le confieren la coloración café) que se producen al calentar los jugos de caña para concentrarlos y poder cristalizar la sacarosa (coloquialmente, cuando el azúcar se deshidrata produce el caramelo que es un polifenol). 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, hongos y

virus (Camelo-M. y col. 2010; Leyra-Tobilla, 2016; Mhatre y col., 2020), aunque si se vierten al ambiente, especialmente al agua, pueden ser dañinos para la vida acuática (Bartolomé-Camacho y col., 2017; Contreras-Contreras, 2019). Por ello, en esta revisión bibliográfica se evaluará la factibilidad de separar de las vinazas, tratadas anaerobiamente, los polifenoles mediante carbón activado de bagazo de caña, para buscar su posterior desorción con la finalidad de estudiar su desempeño en tratamientos contra el virus SARS-CoV-2, que es un virus de ARN monocatenario envuelto y, según Ledezma-González (2018), existen antecedentes que demuestran la actividad antiviral contra diferentes virus de ARN como de ADN por parte de los polifenoles. Con ello se transformaría a la industria azucarera mexicana al hacer de la caña de azúcar una fuente para solucionar cuatro problemas esenciales: Alimentación, energía, ambiente y salud.

El objetivo de esta contribución es plantear una línea de investigación experimental sobre la separación de los polifenoles presentes en las vinazas de una planta cooperante productora de

bioetanol tratadas con un RALLFA, empleando carbón activado de bagazo de caña de azúcar para utilizarse en diferentes aplicaciones biotecnológicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología consistió en la revisión de tesis y artículos recientes para la obtención de información sobre 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, otro energético renovable, a partir de mieles finales de la producción de azúcar, una fuente natural de energía para los seres humanos, además de ser un conservador natural para algunos alimentos perecederos, dando así importancia a la conversión anaerobia. Se revisaron 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

las temperaturas a las que se están operando los biorreactores. Se revisaron las tesis y artículos más recientes para la obtención de carbón activado a partir de bagazo de caña, así como el uso de este carbón activado para adsorber los polifenoles de las vinazas tratadas anaerobiamente, corroborando su eficiencia, evaluando la posibilidad del uso de carbón activado de bagazo de caña para separar esos polifenoles de las vinazas tratadas anaerobiamente (Gaspar-Mendoza, 2021).

Investigaciones sobre el tema

La agroindustria cañera, de la cual se obtienen subproductos residuales como las vinazas y el bagazo de caña que, con la tecnología adecuada, pueden ser aprovechados eficientemente (Figura 1). Esta agroindustria es de gran importancia para países que se encuentran entre los Trópicos de Cáncer y Capricornio. A su vez, las vinazas contienen polifenoles que, por sus propiedades antioxidantes y antivirales, tienen un valor agregado para el sector de salud.

A continuación, se presentan los conceptos y fundamentos teóricos en los que se apoyó esta investigación, con base

en estudios y recomendaciones hechas por diversos autores, en México y otras partes del mundo.

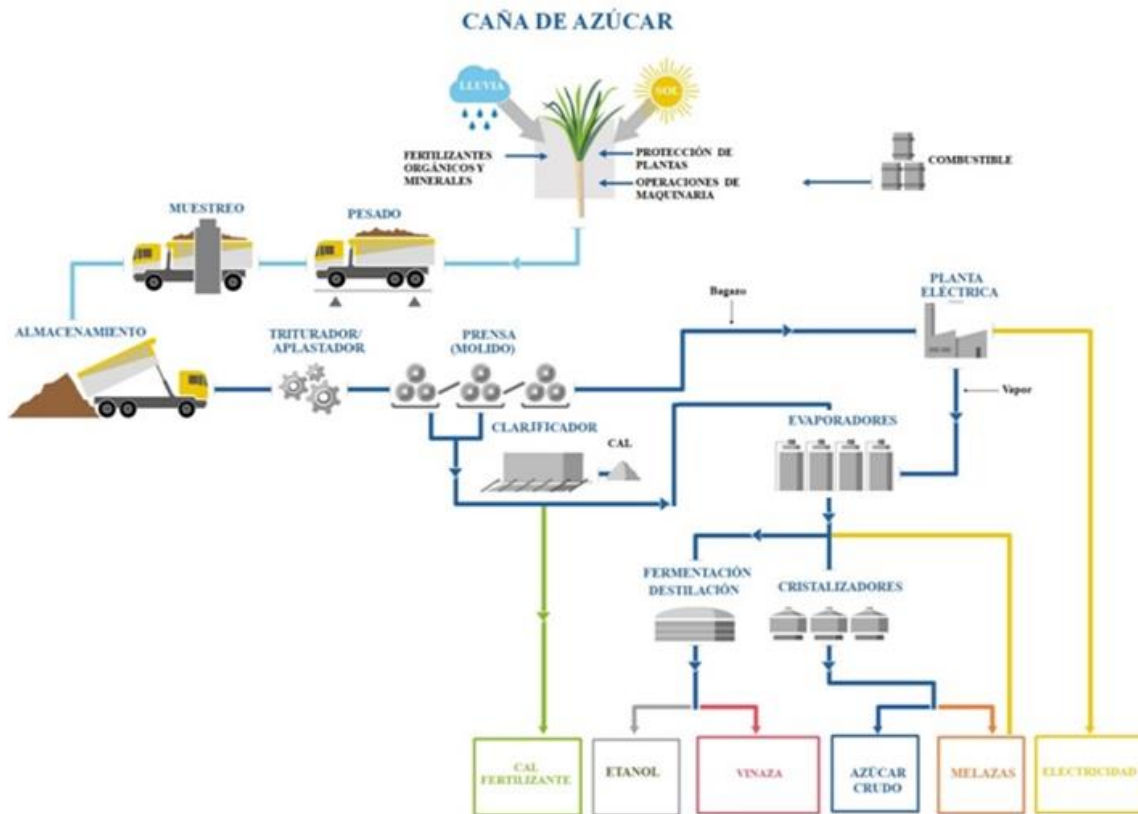


Figura 1. Diagrama de flujo del aprovechamiento integral de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) (Modificado de SUCDEN, 2021)

Bioetanol

El bioetanol tiene las mismas características y composición química que el etanol, la diferencia radica en su proceso de producción. El bioetanol se obtiene a partir de biomasa y el etanol a partir del petróleo (Vázquez-Morales, 2015). Ambos, además de estar presentes durante la preparación de bebidas alcohólicas, se utilizan ampliamente en

muchos sectores industriales y en el sector farmacéutico, como excipiente de algunos medicamentos y cosméticos, ya que es un buen disolvente y tiene poder desinfectante. La industria química lo utiliza como compuesto de partida en la síntesis de diversos productos, como el acetato de etilo, éter dietílico, entre otros. También puede utilizarse como anticongelante (Cornejo-Arteaga, 2016).

El incremento del uso del bioetanol a nivel mundial en las últimas décadas se debe, principalmente, a su utilización extensiva como combustible automotor, por ser un compuesto renovable que, a diferencia de los combustibles fósiles, no incrementa el CO₂ en la atmósfera a los niveles que lo hacen la gasolina y el diésel. Por ello, su uso continuado coadyuva a mitigar el efecto invernadero o también llamado calentamiento global. Adicionalmente, se utiliza como aditivo antidetonante en lugar del tetraetilo de plomo y como compuesto oxigenante lo que permite que, cuando se mezcla con la gasolina o el diésel, exista una mejor combustión en el motor resultando en menores emisiones contaminantes a la atmósfera (Cordovés-Herrera y Valdés-Jiménez, 2006).

Aproximadamente 80% del etanol que se consume en el mundo es utilizado como biocombustible en el sector autotransporte, mientras que el 20% restante es destinado para la producción de bebidas alcohólicas, medicamentos y cosméticos, entre otros usos industriales. México produce cantidades incipientes de etanol. En 2019 el país produjo apenas 144 millones de litros, de los cuales 54

millones fueron para su uso como biocombustible (CEDRSSA, 2020).

Actualmente, se utilizan tres tipos de materias primas para la producción de etanol en gran escala: (1) Materiales con alto contenido de celulosa, como los residuos agrícolas y la madera. (2) Materiales con alto contenido de almidón, como el maíz y la papa. (3) Materiales con alto contenido de sacarosa, como la caña de azúcar, remolacha o sorgo dulce. En este último caso, la fermentación de la materia prima, melaza o jugo de caña, se lleva a cabo por levaduras (*S. cerevisiae*) en condiciones ácidas. El mosto fermentado es después destilado para obtener el etanol y otros productos. De este proceso de destilación, se obtienen las **vinazas** ya mencionadas (Álvarez y col., 2008).

Vinazas

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). Por cada litro de alcohol etílico producido se generan alrededor de 12 litros de vinazas, por lo que se estima que, de la producción de 54,000 m³/año de etanol en México, se generan anualmente 648,000 m³ de estos efluentes líquidos (Castro-González, 2004; CEDRSSA, 2020; Rodríguez-Arreola, 2019). Algunas de las características físicas y químicas de la vinaza dependen de su fuente de procedencia. Por ejemplo, las vinazas de la caña de azúcar se caracterizan por un alto contenido en sólidos (100-150 g/L), altos valores de DBO₅ (40-100 g/L) y de DQO (10-200 g/L); en comparación con las vinazas del café o del vino. Por lo anterior y por su elevada temperatura, color café intenso y por 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, 2019; Prato-García y col., 2016), ya que provocan el incremento de la temperatura del cuerpo receptor (agua o suelo) y disminuye la cantidad de oxígeno disuelto disponible. También, su acidez disminuye el pH, lo

cual puede llegar a disolver algunos metales. La turbidez provocada por los sólidos suspendidos restringe la penetración de la luz. Los sólidos suspendidos presentes en las vinazas disminuyen la permeabilidad del suelo o el lecho del río, obstruyendo su infiltración y provocando un proceso de degradación anaerobia dando como resultado olores desagradables (Castro-González, 2004).

Caracterización química de las vinazas

Es importante en el análisis de todo proceso caracterizar el sistema. Por lo general se conocen los valores finales y, en el caso de efluentes líquidos que no se reaprovechan y se vuelven residuales, estos valores están determinados por normas nacionales o internacionales. Por esta razón es importante caracterizarlas al principio, para conocer qué valores se incumplen y determinar procedimientos para estabilizarlas. Esto sirve como comparativo para identificar cómo afecta un proceso a los parámetros de seguimiento, lo que sugiere la caracterización después de cualquier tratamiento. Contreras-Contreras (2019) hizo una compilación de la

caracterización de vinazas de caña muestra en la Tabla 1.
realizadas por diversos autores como se

Tabla 1. Caracterización de vinazas de caña de azúcar (Contreras-Contreras, 2019)

Parámetro	Rincón-Acelas (2008)	Castro-González (2004)	Detor-Méndez y Hernández-Segoviano (2012)	García y col. (1997)	Jiménez y col. (2006)	Robles-González y col. (2012)	Bautista-Zúñiga y col. (2000)
Alcalinidad (mgCaCO ₃ /L)	ND	ND	ND	ND	6000	ND	ND
Azufre (mg/L)	9.85*10 ⁻³ %	ND	2.628	ND	ND	ND	ND
Carbono (mg/L)	4.47%	38.18	2.638	ND	ND	ND	ND
Cloruros (mg/L)	5 230	ND	5.5*10 ⁻⁴	ND	ND	ND	ND
Conductividad eléctrica (µS/cm)	26 500	ND	ND	ND	ND	ND	ND
DBO ₅ (mgO ₂ /L)	98 250	91 771	61 440	ND	ND	26 500	31 500
DQO (mgO ₂ /L)	116 250	100 428	72 448.85	75 000	80 500	56 230	58 500
Fenoles (mg/L)	ND	ND	ND	469 total	540 (AG)	478 (AG)	ND
Fosfatos (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	290	ND
Fructosa (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	14.8	ND
Hidrógeno (mg/L)	6.77%	44.96	ND	ND	ND	ND	ND
Nitrógeno (mg/L)	6.1%	1.24	1.0037	975 total	1 800 (K)	660 (K)	1 400 (K)
Nitrógeno amoniacal (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	5 000	ND
pH	4.28	4.34	4.986	4.4	5.2	3.7	4.2
SDT (mg/L)	83 683	54 150	ND	ND	ND	ND	ND
SST (mg/L)	7 591	4 300	ND	11 000	3 600	3 130	7 950
SSV (mg/L)	ND	4 100	ND	9 000	2 500	1 130	ND
ST (mg/L)	91 227	58 450	65 591	ND	109 000	26 830	ND
STV (mg/L)	ND	47 250	36 099.33	ND	79 000	ND	ND
Sulfatos (mg/L)	8 150	ND	ND	ND	ND	308	4 450
Sulfuros (mg/L)	69	ND	0.5366	ND	ND	ND	ND

Por otro lado, Rincón-Acelas (2008) amplió la caracterización para vinazas de melaza de caña, incluyendo metales (Tabla 2).

Tabla 2. Caracterización de vinazas de caña de azúcar incluyendo metales (Rincón-Acelas, 2008)

Parámetros	Colombia (Cobos, 2007)	México (Rosas-Calderón, 1998)	México (Rosas-Calderón, 1998)	México (Castro-González, 2004)
pH	4.65	4.15	4.5	4.34
DQO (g/L)	97 – 130	76	117	90 – 120
DBO (g/L)	42 – 480	NA	NA	87 – 90
ST (g/L)	NA	76	120	72.16
STV (g/L)	NA	54	98	47.25
SST (g/L)	5 – 11	21	15	9.5

Parámetros	Colombia (Cobos, 2007)	México (Rosas- Calderón, 1998)	México (Rosas- Calderón, 1998)	México (Castro- González, 2004)
SSV (g/L)	NA	17	12	6.11
Nitrógeno total (mg/L)	NA	NA	NA	1 880
Fosfatos (mg/L)	NA	NA	NA	1 250
Sulfatos (mg/L)	1 124	4 430	2 200	15 000
Cloruros (mg/L)	ND	NA	NA	NA
Potasio (mg/L)	682	8 808	6 320	2 550
Calcio (mg/L)	104	NA	3 294	2 960
Conductividad eléctrica	122 mV	NA	14 600 µmho/cm	NA
Hierro (mg/L)	4.8	88	66	NA
Cobre (mg/L)	0.19	NA	NA	NA
Manganeso (mg/L)	0.44	NA	NA	NA
Aluminio (mg/L)	2.25	NA	NA	NA
Zinc (mg/L)	1.36	NA	NA	NA
Magnesio (mg/L)	98.04	536	728	1 370
Sodio (mg/L)	56.2	322	436	310
Cobalto (mg/L)	NA	ND	ND	NA
Níquel (mg/L)	NA	ND	ND	NA
Molibdeno (mg/L)	NA	ND	ND	NA

NA: no analizado, ND: no detectado

Procesos anaerobios, productos generados y selección del proceso

Ante la agresividad potencial al ambiente de las vinazas y la posibilidad de utilizarlas existen diferentes opciones instrumentadas en varios países. La aplicación de una u otra depende de las particularidades del mercado de cada región, su economía de escala y otros factores de carácter social o político (CONADESUCA, 2016). Una de las opciones de interés para la presente investigación es la producción de gas metano a través de la biotransformación

anaerobia. En este proceso intervienen una serie de reacciones de degradación, que son realizadas por varios microorganismos procariontes y arqueas en ausencia de oxígeno (Bender y col., 2015).

Los estudios realizados hasta ahora, dividen al proceso en cuatro grandes etapas mostradas en la Figura 2.a): (1) la hidrólisis; (2) la acidogénesis, cuya importancia radica en que se produce el alimento para los microorganismos acetogénicos y arqueas metanogénicas; (3) la acetogénesis, en donde aquellas

sustancias generadas en la etapa 2, que no pueden ser metabolizadas directamente por las arqueas metanogénicas, tienen que ser transformadas a productos como el ácido acético; y (4) la metanogénesis, que es la etapa donde se lleva a cabo la formación de metano (Hernández-Ramírez, 2019), el cual es obtenido por dos vías, siendo el acetato responsable del 70% de metano formado y el CO_2 e H_2 , los responsables del otro 30% restante (Contreras-Contreras, 2019). En la Tabla 3 se presentan las ventajas y desventajas más relevantes de esta biotecnología. Los procesos anaerobios han ganado popularidad aún con las desventajas que presentan, algunas de las cuales se compilan en la Tabla 3. El proceso se lleva a cabo en grandes tanques cerrados llamados digestores o biorreactores y es utilizado habitualmente para tratar aguas

residuales que contienen grandes cantidades de materia orgánica insoluble (y, por consiguiente, con una DBO muy alta), tal como sucede con las vinazas y los residuos de fibras y celulosa procedentes de las industrias láctea y alimentaria (Bender y col., 2015). El tratamiento de dichos residuos en los biorreactores da como resultado la producción de biogás y un efluente con menor contenido de materia orgánica (Cubero-Madriz, 2011). Una problemática adicional surge cuando el agua residual contiene sulfatos o compuestos recalcitrantes, ya que, para el primer caso, hay generación de H_2S y competencia entre los microorganismos sulfato-reductores y las arqueas metanogénicas por el carbono usado como fuente de energía.

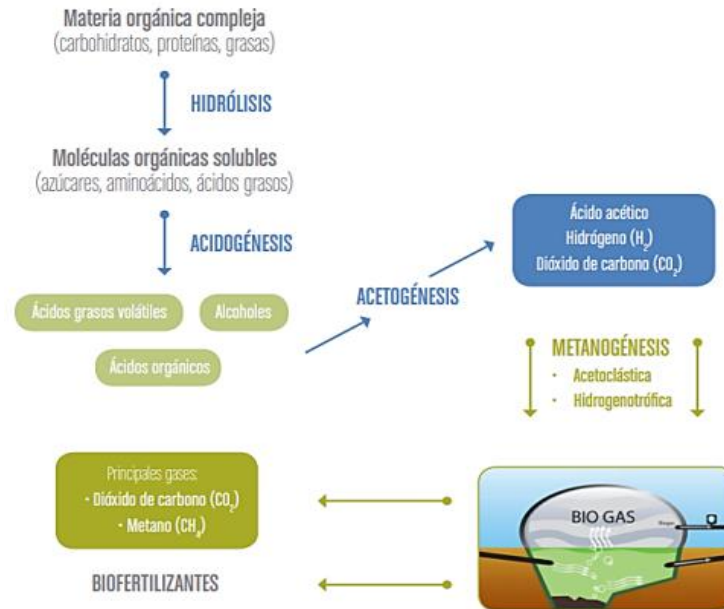


Figura 2.a) Etapas de la digestión en un biorreactor con producción de biogás y biofertilizante (FAO, 2019)

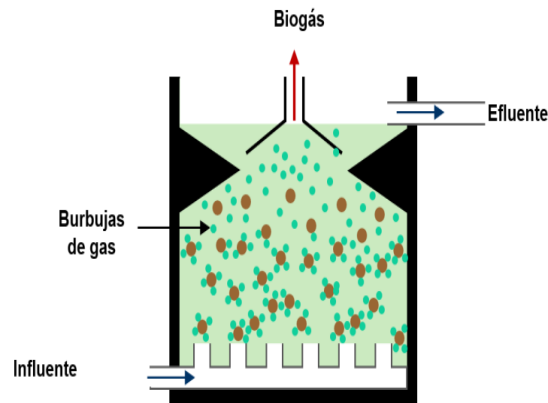


Figura 2. b) Reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente, RALLFA, y su funcionamiento (Modificado de Contreras-Contreras, 2019)

Tabla 3. Ventajas y desventajas del tratamiento anaerobio (Abalos-Rodríguez y col., 2016)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Produce menor cantidad final de lodos, pues el desarrollo de estos microorganismos es más lento • Se pueden cargar los digestores con grandes cantidades de materia • Menor costo de instalaciones, ya que no es necesario suministrar oxígeno por lo que el proceso es 	<ul style="list-style-type: none"> • Es más sensible a compuestos tóxicos inhibidores • En muchos casos, se requiere mayor cantidad de producto a degradar para su buen funcionamiento • Requieren de un mayor tiempo de contacto o de residencia hidráulica, así como más tiempo de aclimatación, lo que impide el tratamiento de grandes volúmenes de aguas residuales y dificultades para biotransformar los compuestos disueltos en aguas

Ventajas	Desventajas
<p>más económico y tiene menor requerimiento energético, además de producir bajas cantidades de lodos si se compara con las tecnologías aerobias</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se puede implementar en sistemas compactos que requieren menor área de terreno, que los sistemas aerobios 	<p>residuales con bajas concentraciones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Por lo general, se requiere de un pos-tratamiento ya sea para descargar en los cuerpos receptores o para su reutilización • En Cuba los sistemas anaerobios han sido aplicados al tratamiento de residuos sólidos y líquidos; sin embargo, se describen muy pocos estudios de tratamiento de aguas residuales domésticas, concentrándose estos en los líquidos residuales de instalaciones turísticas

Para el segundo caso, al haber compuestos tóxicos, hay afectación en la granulación de la biomasa y una pérdida de actividad biológica anaerobia (Castro-González, 2004; Contreras-Contreras, 2019).

Productos finales de la digestión¹ o degradación anaerobia

En la Figura 2.b) se mostró el funcionamiento de los sistemas anaerobios, con los dos productos finales: el efluente líquido y el biogás. El efluente corresponde al agua residual tratada y a la biomasa bacteriana producida. El biogás, por otro lado, es una mezcla formada principalmente por CH₄ y CO₂, con pequeñas cantidades de H₂S, H₂ y NH₃. La composición final del gas depende tanto del sustrato utilizado como el

funcionamiento del sistema de digestión (Cubero-Madriz, 2011).

El biogás es considerado una fuente de energía renovable que no contribuye grandemente al efecto invernadero. Tiene un poder calorífico de aproximadamente 6.5 a 7 kW/m³, por lo que puede ser utilizado en calderas para generar calor, en motores o turbinas para generar electricidad, en motores de cogeneración, en una red de gas natural previa purificación e incorporación de aditivos necesarios, como combustible de automóviles. Otros beneficios que representa el uso de esta bioenergía es que (1) soluciona la disposición final de residuos, reduciendo la contaminación de suelos y agua; (2) reemplaza el consumo de leña, disminuyendo la deforestación; (3) reemplaza total o parcialmente la aplicación de fertilizantes sintéticos, mejorando los costos de producción, ya

¹ La digestión es un proceso inherentemente anaerobio y no debe adicionársele el adjetivo anaerobio (pleonismo)

que los lodos o biomasa que se producen pueden ser usados como biofertilizantes de suelos (PROBIOMASA, 2020).

Manejo y características de los reactores tipo RALLFA

Los reactores biológicos utilizados para el tratamiento de aguas residuales pueden dividirse en dos grupos en base al tipo de desarrollo microbiano: (1) de lecho fijo, formando biopelículas y (2) de desarrollo libre o suspendido. En los primeros, la biomasa está constituida por microorganismos formando una película sobre un soporte inerte, mientras que en el otro grupo los microorganismos forman gránulos o flóculos dentro del reactor (Márquez-Vázquez y Martínez-González, 2011).

Los reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA o UASB, por sus siglas en inglés) que son utilizados comúnmente para el tratamiento de vinazas, no cuentan con ningún soporte para la proliferación biológica, pero han demostrado tener una eficiencia del 75%, que es buena, pero menor si se compara con la de lecho fluidificado con soporte SIRAN cuya eficiencia es de alrededor del 97%.

Dentro de él se separan las fases biológicas (lecho o cama de lodos), líquida (lecho o manto de lodos) y gaseosa (parte superior). En este proceso, mostrado en la Figura 2.b), el agua residual entra al digestor por el fondo y fluye hacia arriba a través de un lecho de lodos granulares relativamente denso y de un manto de partículas de lodo floculado. Dentro de estas zonas se efectúa la conversión de materia orgánica a CH_4 y CO_2 (Castro-González, 2004; Contreras-Contreras, 2019; Merino-Núñez y Valderrama-Lara, 2017).

Variables de operación y parámetros de seguimiento

La operación del reactor está basada en el seguimiento (monitoreo) y control de distintos parámetros y variables. Estos están relacionados ya sea con el agua residual, el lodo, el reactor, el contacto del agua residual con el lodo y la forma como esté distribuido en el interior del reactor (Caicedo-Messa, 2006). Por ello, deben ser controlados de manera adecuada, ya que en caso contrario pueden causar la desestabilización del proceso de tratamiento anaerobio.

Variables de operación:

La **temperatura** afecta de manera importante la proliferación microbiana y, por ende, la eficiencia del proceso hasta que se logra de nuevo la aclimatación. En los últimos años, ha habido una tendencia a pasar al rango termofílico para conseguir una mayor velocidad del proceso (Cubero-Madriz, 2011; Rincón-Acelas, 2008), además de aprovechar el

hecho de que las vinazas vienen a alta temperatura al provenir de la torre de destilación. En la Tabla 4 se puede observar que las ventajas del rango termofílico son mayores que las desventajas, especialmente si se tiene cuidado en el control de variables y parámetros.

Tabla 4. Ventajas y desventajas de trabajar con reactores termofílicos (Cubero-Madriz, 2011; Rincón-Acelas, 2008)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Aumento en la tasa de digestión, lo que hace que se requieran menores tiempos de residencia hidráulica • El volumen requerido de los reactores es menor para la misma cantidad de residuos • La destrucción de los agentes patógenos es más eficiente • La solubilidad de los gases generados desciende al aumentar la temperatura favoreciéndose la transferencia líquido-gas, de gases tales como el NH₃, H₂ y H₂S, dada su toxicidad sobre los procesos metabólicos de los microorganismos anaerobios • Aumento en la solubilidad de sales orgánicas, por lo que la materia orgánica es más accesible para los microorganismos y aumenta la velocidad del proceso • Aumento de la tasa de hidrólisis, lo cual es importante en procesos donde esta es la etapa limitante 	<ul style="list-style-type: none"> • Requerimientos energéticos mayores • Disminución de la solubilidad del CO₂, lo que provoca un aumento del pH y en condiciones de alta concentración de amonio puede ser un inhibidor • Para mucho de los autores son los procesos con mayores problemas de estabilidad. Sin embargo, para otros, las plantas termofílicas son tan estables y operables como las mesofílicas • La solubilidad de los compuestos tóxicos aumenta con la temperatura. Esto explica la mayor inhibición hacia determinados compuestos orgánicos en el intervalo termofílico, como los ácidos grasos de cadena larga • Mayor tasa de hidrólisis de proteínas en el intervalo termofílico frente al mesofílico

La **agitación** de los reactores anaerobios es fundamental para lograr el mayor contacto del influente con la población microbiana y favorecer la salida de los

gases que se producen por dicho fenómeno. Esto también logra prevenir la formación de espacios muertos que reduzcan el volumen efectivo del reactor

y la formación de caminos preferenciales en función del comportamiento hidráulico del sistema. Una buena agitación ayuda a mantener la temperatura constante en todo el reactor (Rincón-Acelas, 2008).

El tiempo de residencia hidráulica

TRH, es uno de los factores más importantes para el control de la degradación anaerobia, ya que la disminución del porcentaje de remoción de materia orgánica y la acumulación de ácidos grasos volátiles, AGV, que provoca acidificación, se debe a TRH cortos (Villalobos-Juvenal, 2015).

La velocidad volumétrica de flujo de carga orgánica máxima está limitada por el tiempo de residencia en el reactor y por la actividad de los microorganismos implicados en la degradación de la materia orgánica. Se ha comprobado que, a una velocidad de flujo elevada no habría suficiente contacto entre las bacterias y materia orgánica provocando zonas muertas (Villalobos-Juvenal, 2015).

La carga orgánica debe permitir el desarrollo y la actividad microbiana del sistema anaerobio. Las cargas orgánicas elevadas pueden provocar el

favorecimiento de la acidogénesis sobre la metanogénesis, dando como resultado la acidificación del sistema (Villalobos-Juvenal, 2015). Castro-González (2004) propone iniciar con cargas orgánicas bajas, las cuales deben de irse incrementando cuando el buen funcionamiento del sistema lo permita.

Parámetros de seguimiento

El potencial hidrógeno (pH) tiene un efecto sobre la actividad enzimática en los microorganismos, ya que cada enzima es activa en un rango específico de pH y tiene su actividad máxima con un pH óptimo. Para que el proceso de degradación en los reactores RALLFA se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6 ni subir de 8. El valor del pH en el proceso determina, no solamente la producción de biogás sino también su composición. Un pH constante da equilibrio y estabilidad al sistema digestor y una disminución puede apuntar hacia la acumulación de ácido e inestabilidad al digestor. En este caso, el biogás generado será muy pobre en metano y, por lo tanto, con menores cualidades energéticas (Contreras-Contreras, 2019; Derley-Valencia y col., 2015).

La alcalinidad es una propiedad que indica la capacidad de amortiguamiento de un cuerpo de agua (Contreras-Contreras, 2019, Pérez y Torres, 2008) y es fundamental debido a que los microorganismos acidogénicos tienen una mayor actividad que los microorganismos metanogénicos. Ante sobrecargas orgánicas son capaces de provocar la acidificación del digestor, lo que puede evitarse manteniendo en el digestor una óptima capacidad amortiguadora (Hernández-Martínez, 2010).

La concentración de ácidos grasos volátiles (AGV) es un parámetro muy utilizado en los sistemas de control gracias a su rápida respuesta ante variaciones del sistema. En un proceso de degradación anaerobia el óptimo generalmente se encuentra en un rango de 50 a 250 mg/L medidos en función del ácido acético. Un aumento en la concentración de AGV en el sistema implica la desestabilización del proceso y, como consecuencia, una disminución de la producción de biogás rico en metano. La caída del pH es causada frecuentemente por la acumulación de AGV y/o por la acumulación de CO₂. Para solucionar este problema es

necesario reducir la carga orgánica en la alimentación hasta el punto en el cual los AGV se consuman más rápido de lo que se producen (Contreras-Contreras, 2019).

El factor de alcalinidad (α) representa la relación entre los ácidos grasos volátiles, AGV, presentes y la alcalinidad total (AGV+HCO₃⁻). Cuando tiene valores entre 0.2 a 0.4 se puede decir que el sistema es estable. Durante un arranque puede emplearse para indicar el ritmo de aumento de carga, así como una alarma si el digestor está siendo sobrecargado o si existe una inhibición, en particular de los microorganismos hidrogenófilos (Contreras-Contreras, 2019; Hernández-Martínez, 2010).

El biogás es un parámetro que funciona como indicador de estabilidad o de alguna alteración en el sistema de tratamiento. La producción de biogás es el único parámetro que muestra inestabilidad en el digestor más rápido que el pH (Derley-Valencia y col., 2015).

A continuación, se presentan los principios en los que se basa el arranque de estos reactores.

Arranque de reactores tipo RALLFA

El arranque de los RALLFA está influenciado por la concentración y composición del influente, de su volumen, de la actividad y adaptación del inóculo, de los parámetros ambientales (pH, temperatura, nutrientes y elementos traza), de los parámetros de operación (carga orgánica, TRH y mezclado) y, por último, de la configuración del reactor (geometría y tamaño). Todos estos presentan una interacción muy estrecha y deben ser considerados para el arranque del reactor, que es sumamente importante para tener éxito durante la biotransformación (Castro-González, 2004; Magaña y Pacheco, 2003).

Etapa 1: Adaptación de la biomasa mesofílica al agua residual en condiciones mesófilas

El inóculo termofílico no está comúnmente disponible para la inoculación de nuevos reactores. Sin embargo, los RALLFA termofílicos pueden ponerse en operación utilizando lodos de procesos mesofílicos. Para pasar un reactor del rango mesofílico al termofílico sin que se produzca una

reducción en la producción de gas, 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). El arranque de los sistemas anaerobios consiste en introducir el influente al sistema y procurar mantener las condiciones idóneas para el desarrollo de la biomasa anaerobia. El arranque de cualquier reactor anaerobio es lento, debido a la baja producción de biomasa en relación con el sustrato consumido, por lo que es conveniente la inoculación (Madigan y col., 2015; Magaña y Pacheco, 2003). Para ello se requiere de un inóculo adecuado, con suficiente actividad metanogénica, conteniendo una mezcla de diferentes géneros de arqueas metanogénicas que tengan la capacidad de asimilar el sustrato a tratar, así como estar adaptado a las propiedades específicas del agua residual y con un volumen en el reactor que sea lo más grande posible en relación con las dimensiones del propio reactor (30%). Es factible contar con reactores tipo

RALLFA en funcionamiento y donde haya suficiente lodo granular que pueda ser utilizado como inóculo. Sin embargo, al no ser siempre posible, se necesita como requerimiento mínimo que el lodo tenga buena ‘sedimentabilidad’ y actividad, sin dejar de considerar que puede haber problemas de retención de biomasa inoculada, que limiten el incremento de la carga orgánica, es decir, el agua residual debe alimentarse con el lodo, pero diluida e irse aumentando conforme el lodo vaya mostrando señales de actividad. Paulatinamente, debe incrementarse el TRH manteniendo la denominada carga orgánica volumétrica y másica relativamente constantes. Una de las estrategias que se ha seguido indica que, además, de los puntos mencionados anteriormente, la carga volumétrica se aumente escalonadamente una vez que la reducción de DQO sea mayor que el 80 a 90% de diseño, sin permitir que la reducción de DQO sea inferior al 50% (Castro-González, 2004). Se debe tener en cuenta que la granulación de la biomasa es la clave para el arranque de un RALLFA y puede también inhibirse por el H₂S que disgrega los gránulos o por los polifenoles que provocan una pérdida de

actividad biológica anaerobia (Castro-González, 2004). En la fase de arranque, la biomasa microbiana se reproduce y adapta al influente, lo que conlleva a un periodo inestable y de transición muy largo. Castro-González (2004) requirió de 600 días usando como inóculo lodos a 30°C para degradar 2,000 mg/L de DQO inicialmente, para después adaptarlos a vinazas de 120,000 mg/L de DQO. Por ello, mientras se alcanza la estabilidad, se deben medir parámetros y controlar las variables más importantes, como se verá a continuación.

Etapa 2: Adaptación del inóculo mesófilo a condiciones mesofílica intermedia y termofílicas

Una vez que los lodos se hayan adaptado al influente, se deben adaptar a condiciones mesofílicas intermedias para después pasar a condiciones termofílicas. Esta segunda etapa consta de cuatro pasos. El primero de ellos consiste en inocular la biomasa adaptada a vinazas bajo condiciones mesofílicas en el reactor de la etapa 1, al número de reactores según las temperaturas en las que se trabajará. Cada reactor debe inocularse con un 50% de su volumen y el otro 50%

debe ser para las vinazas preparadas con solución amortiguadora si es necesario. Cuando la temperatura de los reactores es diferente a la que se adaptó el inóculo, se recomienda utilizar un medio de cultivo, por lo que el 50% para vinazas preparadas, disminuirá al 25%. Posteriormente, ya que la biomasa esté adaptada a las condiciones de trabajo, la segunda parte consiste en alimentar los reactores por cargas (o lotes), para después en un tercer y cuarto pasos alimentar los reactores de manera semicontinua y continua, en orden respectivo (Castro-González, 2004). Algunas características que se presentan al adaptar una biomasa mesofílica a condiciones termofílicas son las siguientes: (1) cargas arriba de 20 kg_{DQO}/m³día después de 60 días de inoculación; (2) lisis de los microorganismos mesofílicos; (3) presencia de microorganismos termofílicos a condiciones mesofílicas; (4) la estrategia de arranque de mesofilia a termofilia se logra mediante un aumento gradual de temperatura y se logra estabilidad en uno a 24 meses o si es un cambio súbito se logra en 28 días; (5) los tiempos de residencia hidráulica son

menores y (6) el tratamiento termofílico puede soportar alimentaciones discontinuas y algunas fluctuaciones de temperatura (Castro-González, 2004). Es importante considerar que los procedimientos de arranque de reactores termofílicos son cruciales para determinar el periodo necesario antes de la operación y que la operación por arriba de 60°C a veces causa caídas drásticas de eficiencia en los reactores. Sin embargo, otros procesos en laboratorio han operado por varios años con excelente estabilidad.

Polifenoles

La caña de azúcar tiene una serie de compuestos que le confieren color al jugo, tales como la clorofila y los compuestos fenólicos, cuya presencia puede determinar, por diferentes vías, el desarrollo de otros compuestos de color, como las melanoidinas que se forman por la reacción de Maillard (González y col., 2014), la cual es una reacción de oscurecimiento que ocurre cuando el azúcar se calienta por encima de su punto de fusión a pH ácidos o alcalinos (Arias-Giraldo y López-Velasco, 2019). Los compuestos fenólicos aumentan la intensidad de su color a valores elevados

de pH. Pueden auto-oxidarse para formar polímeros amarillos o marrones o bien reaccionar con enzimas polifenoloxidasas para dar lugar a colorantes de estructura más compleja (Ahmed, 2016). En el jugo de caña se ha reportado la presencia de compuestos fenólicos como los flavonoides y los ácidos fenólicos. Ejemplo de ellos son la apigenina, la luteolina, los derivados de tricina, los ácidos hidroxicinámicos, cafeico y sinápico e isómeros del ácido clorogénico; cuya concentración puede variar desde 477 mg/L hasta 1083 mg/L (Contreras-Contreras, 2019; González y col., 2014). El tratamiento anaerobio ya ha sido muy estudiado y, aunque la remoción de material orgánico en la etapa de digestión es elevada, el efluente a la salida del reactor aún no cubre los requerimientos normativos de DBO_5 (150-200 mg/L) para descarga en ríos que derivan a riego agrícola, por lo que es necesario implementar una etapa posterior, previa a la disposición final (Guzmán-Carrillo y Linero-Gil, 2012). Cerca del 33% de la DQO del efluente de los reactores anaerobios corresponde a compuestos fenólicos recalcitrantes

incluyendo el ácido gálico, ácido tánico y melanoidinas (Paz-Pino, 2013).

A continuación, se presentan algunas normativas vigentes.

Normativa vigente en México y a nivel internacional

Existen muchas normas y leyes, tanto nacionales como internacionales, donde se regula la cantidad requerida que debe tener un agua residual para que pueda ser descargada, o reutilizada en las actividades recreativas y agrícolas, entre otras. Por ejemplo: La Ley de Calidad Ambiental de 1979, donde se describe los límites permisibles para que los efluentes industriales puedan ser vertidos al alcantarillado (FAO, 1979); La EPA/600/R-12/618/2012: Regulación para la reutilización de aguas, en su Capítulo 3, en los apartados 3.2.1 y 3.2.2, se mencionan los límites que se deben de cumplir para que el agua pueda ser utilizada en la agricultura (U.S. EPA, 2012); la NOM-001-SEMARNAT-1996, la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (SEMARNAT, 1996); la NOM-002-ECOL-1996, que establece

los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal (DOF, 1998); la NOM-003-ECOL-1997 establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reutilicen ('reúsen') en servicios al público (ELAW, 1998); la NOM-004-SEMARNAT-2002.

Protección ambiental: Lodos y biosólidos, que especifica los límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final (UNINET, 2003).

Posibles usos e importancia

Los polifenoles son sustancias que, desde el punto de vista de su no aprovechamiento, son considerados recalcitrantes y que pueden inhibir o reducir la actividad de los microorganismos de las plantas depuradoras y que deben de ser removidos de las aguas residuales debido

al impacto ambiental que representan. Las descargas con alto contenido de polifenoles promueven la putrefacción de la materia orgánica, emitiendo olores desagradables (Contreras-Contreras, 2019). Debido a que se les han atribuido diversos beneficios para la salud como antioxidantes, antiinflamatorios, vasodilatadores y por sus propiedades antivirales, antiparasitarias y antibacterianas, se buscó separarlos del efluente (Contreras-Contreras, 2019; Delgado-Bautista, 2016). En la Figura 3.a) se muestran las principales causas de muerte en el mundo, en el año 2019 (OMS, 2020). Muchas de ellas también aparecen en la Figura 3.b), es decir, los polifenoles, tienen beneficios importantes en el tratamiento o cura de enfermedades importantes, que reducirían un importante número de muertes en el mundo, como el COVID-19 (Mhatre y col., 2020), por lo que deben ser separados de las vinazas y estudiados.

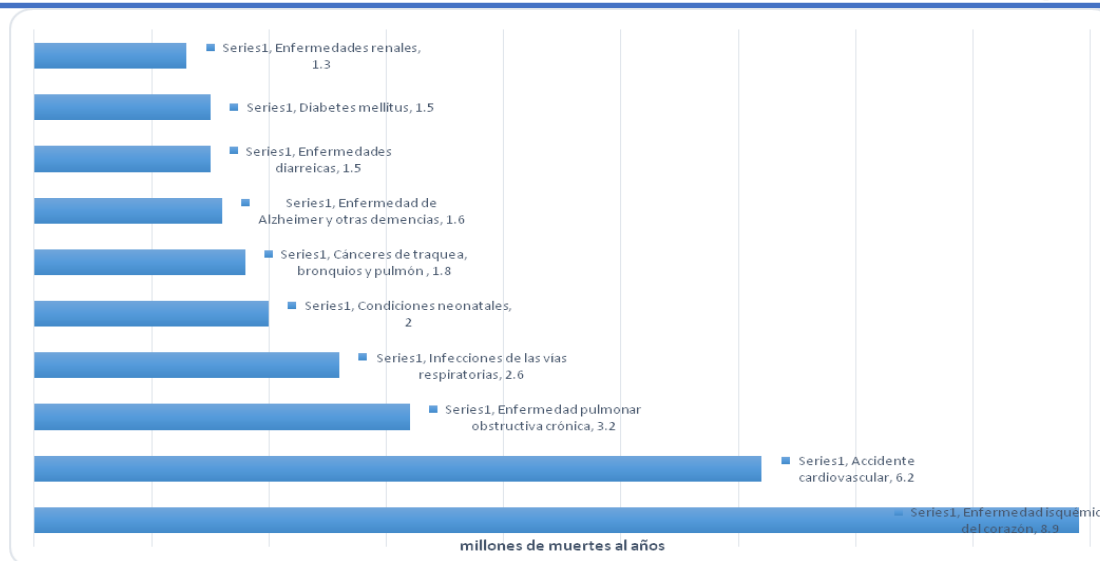


Figura 3. a) Las principales causas de muerte en el mundo, en el año 2019 (Adaptada de OMS, 2020)

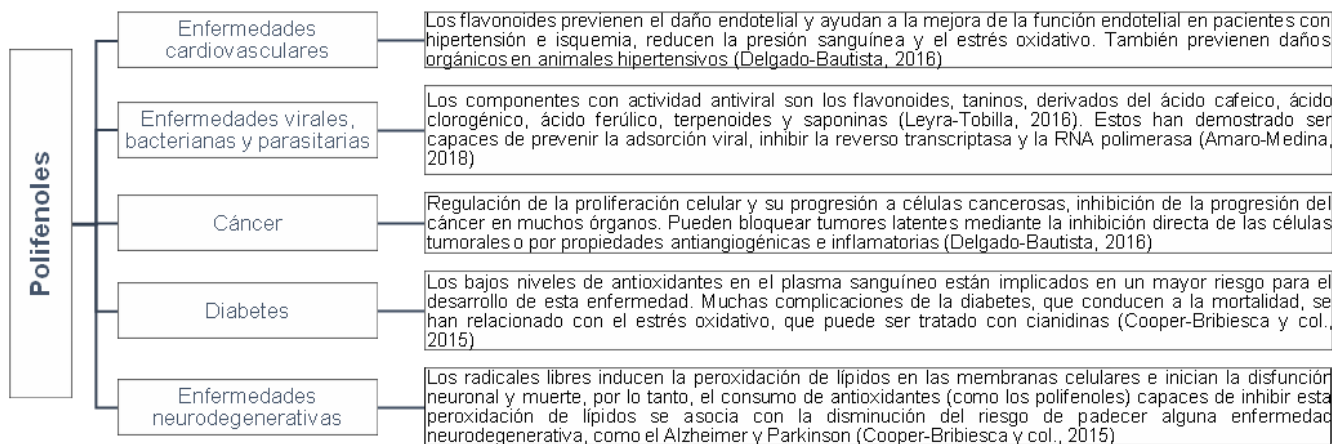


Figura 3. b) Principales enfermedades en las que la presencia de polifenoles aporta beneficios a la salud (OMS, 2020)

Materias primas para su obtención

La elección del precursor para la elaboración de carbón es fundamentalmente una función de su disponibilidad, precio y pureza. El proceso de fabricación del CA y su posible aplicación, así como los materiales lignocelulósicos disponibles

son otros factores. Entre los materiales se pueden mencionar las cáscaras de diversas frutas, la fibra de coco, la corteza de plátano, la cáscara de arroz, así como también el bambú y aserrín de maderas, el bagazo de la caña de azúcar, entre otros muchos materiales biológicos (Solís-Fuentes y col., 2012).

Activación física y química del carbón activado

Activación física. Esta forma de activación es la más utilizada. Como materia prima emplea el carbón vegetal granulado, obtenido previamente en métodos de carbonización a temperaturas entre 400 a 600°C. Se somete a una molienda y clasificación mediante tamices de diferentes tipos de abertura, con el propósito de uniformizar el tamaño de partículas antes de la activación. El carbón vegetal molido se coloca dentro de un lecho de activación (construido con material resistente a altas temperaturas) por donde se hace pasar corrientes de gas a temperaturas entre 800 a 1000°C. Como gases para la activación se emplean el vapor de agua, dióxido de carbono, cloro, gases provenientes de una combustión u otros gases que actúan sobre los materiales volátiles, provocando su arrastre y separación de la estructura del carbón. Por lo general, los gases activadores son gases inertes, lo que permite obtener carbones activados de buena calidad. El dióxido de carbono se aplica a 900°C y el vapor de agua, de bajo costo, alrededor de 1000°C. Se recomienda el empleo de gases con

oxígeno en su composición, para aumentar la reactividad del carbón. La activación consiste en hacer reaccionar al agente activante con los átomos de carbono del material carbonizado que está siendo activado; de forma que se produce un “quemado selectivo” que va horadando progresivamente al material carbonizado, generando poros y aumentando la porosidad hasta transformarlo en un carbón activado (Grisales-Motato y Rojas-Arrieta, 2016).

Activación química. El proceso de activación química es aplicado directamente 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, principalmente aserrín de madera, seco, con un agente químico activante, principalmente $ZnCl_2$ o H_3PO_4 . La activación 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 se filtra y se seca (Grisales-Motato y Rojas-Arrieta, 2016). Los procedimientos químicos de activación son obtenidos por impregnación empleándose sustancias deshidratantes como el $ZnCl_2$, H_3PO_4 , H_2SO_4 , H_3BO_3 , HNO_3 , K_2S , $MgSO_4$ y Na_2SO_4 , etc. La activación química con H_3PO_4 prácticamente ha desplazado al $ZnCl_2$, el cual tiene un fuerte impacto ambiental (Grisales-Motato y Rojas-Arrieta, 2016).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

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.

Caracterización de las vinazas (influyente y efluente)

En la Tabla 5 se presenta la caracterización de las vinazas que fueron dosificadas a un sistema de tres reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente termofílicos a escala de laboratorio y que permitieron estudiar el efecto de esta biotransformación sobre los polifenoles que las vinazas traían desde la planta productora de etanol.

Tabla 5. Caracterización de las vinazas antes y después del tratamiento anaerobio (Contreras-Contreras, 2019)

Parámetro	Vinaza cruda	Vinaza diluida de los reactores a 45 y 55°C	Vinaza diluida del reactor a 65°C	Efluente a del reactor de 45°C	Efluente a del reactor de 55°C	Efluente a del reactor de 65°C
Temperatura (°C)	17.02	18.47	19.437	45.23	53.77	64.03
pH	4.728	4.79	4.837	7.721	7.802	7.529
Conductividad eléctrica	20.211	11.24	6.689	1.537	11.457	7.451
Alcalinidad	1830.7	1012.9	747.4	5189.8	4918.9	2848.8
Factor de alcalinidad				0.3103	0.306	0.516
DQO	66.791	33.363	17.579	13895	15.177	8.846
DBO ₅	6.870	6.180	4.818	4.908	3.664	4.238
Sulfatos	10.876.5	4.881	2.576.6	3738.4	3689.4	2.495.8
Sulfuros	209.9	171	91.92	248.8	254.7	145.4
Fósforo total	191.43	120.52	80.68	114.46	108.16	74.38
Ortofosfatos	53.94	24.36	19.74	21.454	19.74	15.97
Biogás	0	0	0	214.23	192.86	79.75
ST	32.069	29.398	21.361	20.419	20.958	13.458
STV	26.438	10.508	5.202	10.252	10.286	6.100
SST	5.642	2083	1.267	4.813	4.438	2.100
SSV	1.517	705.6	583	1.875	1.388	887.5
Polifenoles	8.600	3.622	3.689	3222.2	2.400	2.266.7

Operación y arranque de reactores tipo RALLFA termofílicos

La Figura 4 muestra el arranque de un reactor a escala de laboratorio, desde la colocación de los lodos anaerobios de otro biorreactor (inóculo), hasta la del material de empaque para evitar la pérdida de calor al entorno (Rincón-Acelas, 2008). Cuentan con un volumen total de 2.7 L, una altura de 65 cm y un diámetro exterior de 7.27 cm. Para

mantener la temperatura constante, se hace circular agua caliente a través del tubo concéntrico, y para evitar pérdidas por transferencia de calor los reactores se encuentran cubiertos por fibra de vidrio, como aislante térmico (Rincón-Acelas, 2008). En las Tablas 6 y 7 se ejemplifican los parámetros de seguimiento de la operación de un RALLFA y los métodos empleados medidos en un laboratorio.

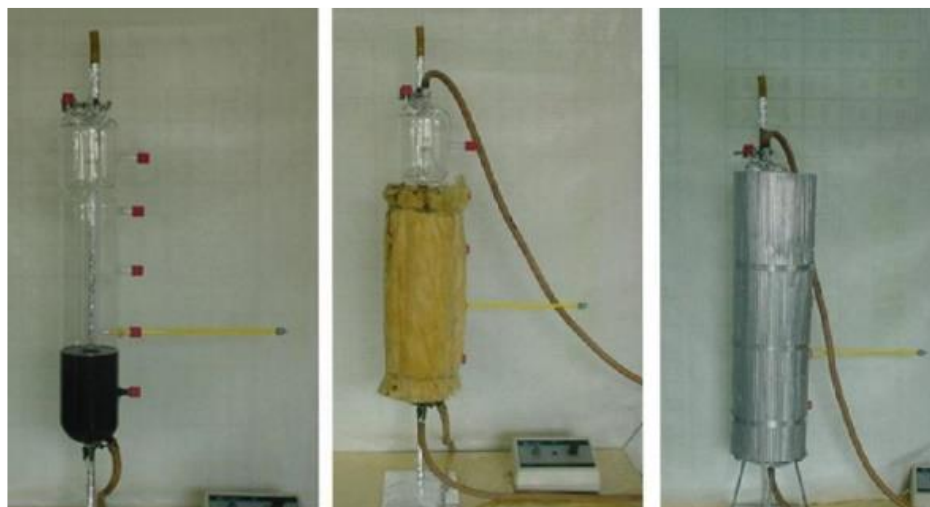


Figura 4. Reactores similares a los utilizados por Contreras-Contreras (2019)

Tabla 6. Parámetros de seguimiento de los reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente, RALLFA (Contreras-Contreras¹, 2019; Tuesta-Popolizio², 2017)

Parámetro	Métodos analíticos utilizados	Parámetro	Normas utilizadas
AGV ¹	CG-DIF	DBO ₅	NMX-AA-028-SCFI-2001
Alcalinidad ¹	Valoración ácido base, NMX-AA-036-SCFI, 2001	DQO	NMX-AA-030/2-SCFI-2011
		Fósforos y ortofosfatos	NMX-AA-029-SCFI-2001
Biogás ¹	Desplazamiento de líquidos	Nitratos	NMX-AA-079-SCFI-2001
Cationes ²	ICP-AES	Nitritos	NMX-AA-099-SCFI-2006

Parámetro	Métodos analíticos utilizados	Parámetro	Normas utilizadas
Conductividad eléctrica ¹	Equipo de campo multiparamétrico	pH	NMX-AA-008-SCFI-2016
Factor de alcalinidad ¹	Valoración ácido base	SSV	NMX-AA-034-SCFI-2015
Metales pesados ²	Digestión con HNO ₃ y H ₂ O ₂ - Dilución con HCl	SST	NMX-AA-034-SCFI-2015
Nitrógeno amoniacal ²	Reacción amoniaco y reactivo de Nessler	ST	NMX-AA-034-SCFI-2015
Nitrógeno total ²	Reacción con H ₂ SO ₄ cc y K ₂ SO ₄ - Titulación con un álcali (NaOH- Na ₂ SO ₄ 0.05 N)	STV	NMX-AA-034-SCFI-2015
Polifenoles ¹	Folin-Ciocalteu	Sulfatos	NMX-AA-074-SCFI-2014
Temperatura ¹	Equipo de campo multiparamétrico	Sulfuros	PROY-NMX-AA-084-SCFI-2005

Tabla 7. Parámetros operacionales para el arranque y operación de un RALLFA a 35°C (Castro-González, 2004)

Parámetro	Recomendado					
	Inicio (arranque)	Operación				
Concentración del inóculo (kgSSV/m ³ reactor)	15.6	19.2	21.3	21	23	23.3
Temperatura (°C)	35	35	35	35	35	35
Velocidad ascendente (m/h)	0.09	0.04	0.02	0.018	0.01	0.009
TRH (día)	1	2.1	4.5	5.4	7.1	10
Carga orgánica másica (kgDQO/kgSSVdía)	0.65	0.65	0.65	0.67	0.69	0.75
Carga orgánica volumétrica (kgDQO/m ³ día)	10.2	10.2	7.22	10.45	10.86	11.72
Carga de materia orgánica	10,000	20,000	35,000	55,000	75,000	115,000

Separación de los polifenoles con carbón activado

En la Figura 5 se muestra el diagrama de bloques de la preparación en el laboratorio de carbón activado a partir de

bagazo de caña de azúcar por los dos métodos señalados.

Y, en la Figura 6 se presentan datos experimentales de la adsorción de polifenoles de vinazas tratadas anaerobiamente en carbón activado.

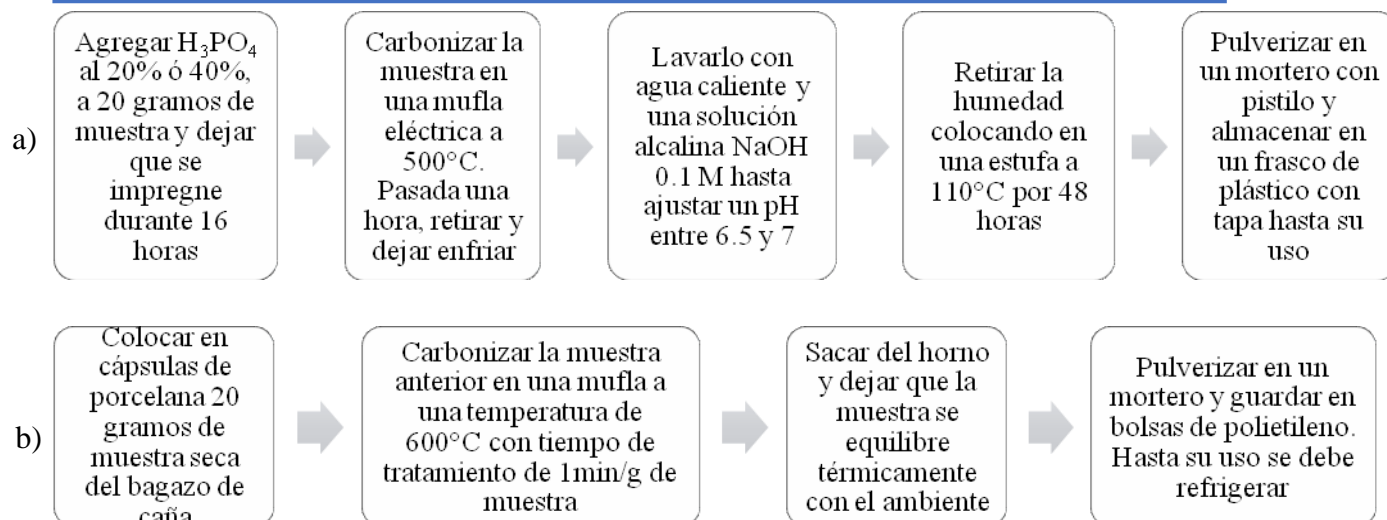


Figura 5. Obtención de carbón activado a partir de a) activación química y b) activación física (Solís-Fuentes y col., 2012)

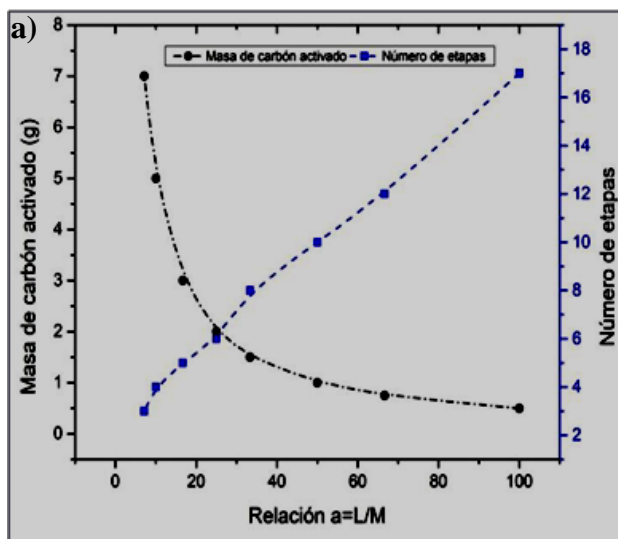


Figura 6.a. Adsorción de polifenoles con carbón activado (CA): a) Masa teórica de CA utilizado y número de etapas en función de la relación L/M, donde L es la masa de la solución inicial y M la masa de carbón activado (Contreras-Contreras, 2019)

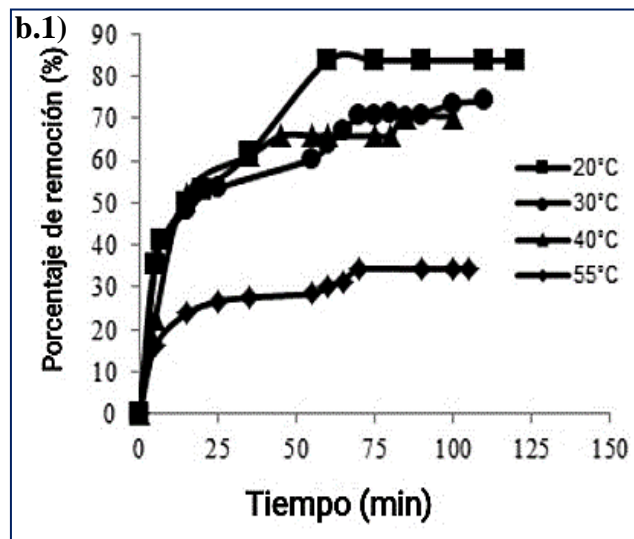


Figura 6.b.1. Adsorción de polifenoles con carbón activado (CA). Variables que afectan el proceso de adsorción: b.1. Temperatura (Modificada de Ziati y col., 2017)

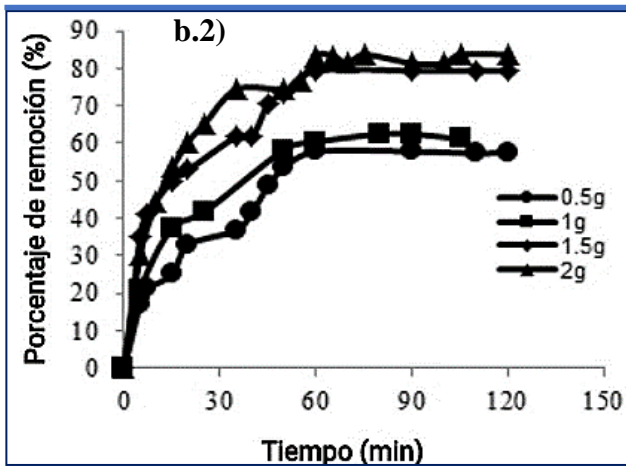


Figura 6.b.2. Adsorción de polifenoles con carbón activado (CA). Variables que afectan el proceso de adsorción: b.2. Masa de material adsorbente (Modificada de *Ziati y col.*, 2017)

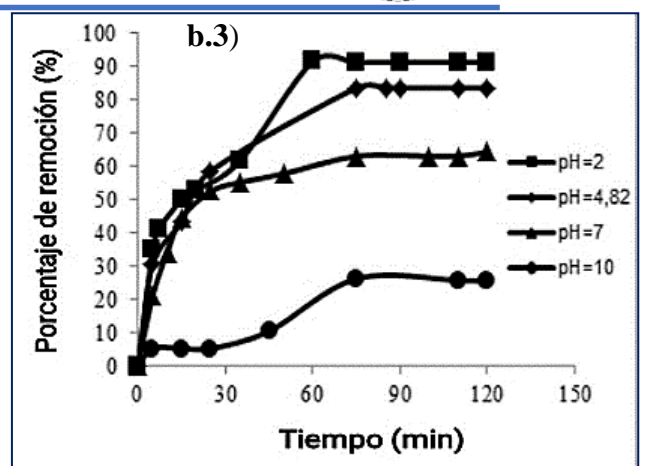


Figura 6.b.3. Adsorción de polifenoles con carbón activado (CA). Variables que afectan el proceso de adsorción: b.3. Valor de pH (Modificada de *Ziati y col.*, 2017)

Estos resultados son de autores que han estado trabajando con los reactores tipo RALLFA (ver Figura 4) a diferentes condiciones de temperatura y de carga orgánica y volumétrica. En la Tabla 6 se muestran las variables y parámetros que la mayoría de los autores que han trabajado con vinazas utilizan, para caracterizarlas o para arrancar y operar un reactor tipo RALLFA. Elegir lo que se medirá o controlará depende del agua residual a tratar, así como de los objetivos de la investigación. Es necesario llevar a cabo un procedimiento específico para arrancar los RALLFA ya que su arranque no es trivial. Castro-González (2004) lo hizo y, como resultado de eso, obtuvo la información de la Tabla 7. Los datos

mostrados en ella permiten interpolar los valores de arranque hasta una determinada concentración de DQO y, probablemente, también sirva para el intervalo termofílico. Pero este no sería un problema para la presente investigación, ya que los reactores por ahora se encuentran trabajando de forma estable y solamente se les miden algunos parámetros para evitar una posible desestabilización del sistema por los frecuentes cortes de luz en la Subestación 2 de la Ciudad Universitaria. Aunque es muy interesante e importante el tratamiento anaerobio usando los RALLFA, confirmado por Contreras-Contreras et al. (2020), eliminando efectivamente una cantidad importante de

la materia orgánica que contiene a excepción de los polifenoles que no presentan cambios significativos en su composición (ver Tabla 5), la intención de esta fase de la investigación no debería ser realizar lo mismo que otros autores, sino ampliar el trabajo hecho por Contreras-Contreras (2019), quien también llevó a cabo la separación de los compuestos polifenólicos de las vinazas mediante su adsorción en carbón activado comercial. Lo pretendido en esta investigación era evaluar la viabilidad y factibilidad de utilizar carbón activado de bagazo de caña y compararlos con los resultados obtenidos por Contreras-Contreras y colaboradores (2020). Pero, por el momento, no pueden realizarse experimentos en la Facultad de Química de la UNAM.

Los polifenoles, a pesar de su importancia en varios temas de salud y por la inhibición que provocan, no son reportados por muchos autores, como se ve en la Tabla 1. Esto se debe a que las vinazas son un fluido muy complejo ya que provienen de una fuente natural, el jugo de caña, que al estar sujetas a una serie de operaciones unitarias tiene

cambios químicos que hace difícil caracterizarlas.

La razón por la que se eligió el bagazo de caña fue porque se está colaborando con una planta productora de bioetanol de la agroindustria cañera, con lo cual se estaría contribuyendo en su aprovechamiento. Por otra parte, Ayala-Tirado y col. (2012) hicieron una comparación de tres precursores para la obtención de carbón activado, CA, siendo la cascarilla de café y el bagazo de caña los que obtuvieron una mayor eficacia en la remoción de color del jugo de caña. En la Figura 5 se tomó ese mismo trabajo para describir de forma más detallada y entendible el procedimiento de obtención de CA, descrito previamente. La adsorción empleando CA, como se puede apreciar en la Figura 6, depende de factores como el pH, la cantidad de adsorbente y la temperatura. Las gráficas mostradas en el inciso b, de la misma, fueron obtenidas de la adsorción de polifenoles de aguas residuales de un molino de aceitunas (para producir aceite de oliva), con un precursor diferente al utilizado en la investigación de Contreras-Contreras (2019). Sin embargo, esta información será de utilidad para llevar a

cabo un eficiente proceso de adsorción y desorción, a falta de estudios en polifenoles de vinazas. Por tanto, si se quiere mejorar la adsorción en un proceso, se deberá de optar por una mayor cantidad de adsorbente (CA), un pH ácido, y trabajar con temperaturas bajas (como la ambiente). Por el contrario, si lo que se desea es favorecer el proceso de desorción, el pH deberá ser alcalino y una temperatura de aproximadamente 50°C. Contreras-Contreras (2019) obtuvo una gráfica [Figura 6(a)] en donde se calculó el número de etapas teóricas necesarias para adsorber el 99.9% de los polifenoles presentes en las vinazas efluentes de los reactores tipo RALLFA, en función de la cantidad de carbón activado añadido. Por ello, si la cantidad de adsorbente es alta, será necesario un menor número de etapas para recuperar dichos polifenoles de las vinazas. Debido a esto, para que el proceso sea factible y pueda ser escalado a nivel industrial será necesario emplear etapas sucesivas empleando columnas de adsorción-desorción.

CONCLUSIONES

De acuerdo con el objetivo general de esta investigación bibliográfica es posible concluir lo siguiente:

1. La agroindustria azucarera es muy importante para México, 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, por ejemplo, las vinazas.
2. El tratamiento anaerobio es uno de tantos que se les da a las vinazas, cuyo fin principal es la obtención de biogás rico en metano y bio-abonos. En este trabajo se identificaron las variables cruciales y los parámetros que se deben seguir para el buen funcionamiento de los RALLFA. También, se obtuvo información de lo que debe y no debe hacerse en caso de que ocurra una desestabilización del proceso, pudiendo así obtener agua con la menor cantidad posible de materia

- orgánica ya que ésta se transforma en biogás rico en metano.
3. 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 y que se espera cumpla con las normas correspondientes para hacer uso de ella. Ya que las normas mencionadas, y consultadas, así como las fuentes externas, indican que el problema persistente de estos tratamientos anaerobios para vinazas es que el efluente, luego de la biotransformación, no cumple todavía con los parámetros establecidos, requiriendo un tratamiento posterior
 4. El uso de carbón activado de bagazo de caña para adsorber los polifenoles ayudará a reaprovechar este residuo celulósico para obtener un producto de valor agregado haciendo que la planta disminuya los costos de operación, produciendo este carbón activado en vez de comprarlo. Además, el carbón activado cuenta

con muy buena área superficial, es fácil de obtener y puede ser reutilizado, desorbiendo los compuestos que se adsorbieron y reactivándolo. Por ello, se recomienda hacer la separación de compuestos fenólicos contenidos en los efluentes del tratamiento anaerobio de las vinazas, mediante la adsorción en carbón activado de bagazo de caña.

5. Otra posible línea de investigación es la de separar los polifenoles antes del paso de las vinazas por el RALLFA, evitando la posible inhibición de la actividad metanogénica de las arqueas. Algunos autores señalan que estos compuestos inciden en la eficiencia de la transformación de la materia orgánica, produciendo biogás con menores cualidades energéticas.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen a los evaluadores por sus recomendaciones para mejorar la redacción. La primera autora tuvo el apoyo de la BIDI-UNAM (Biblioteca Digital de la UNAM) para acceder a estas referencias bibliográficas desde su

domicilio debido a la pandemia de Covid-19 provocada por el virus SARS-CoV-2.

REFERENCIAS

Abalos-Rodríguez, A., Crombet-Grillet, S., Pérez-Pompa, N., Rodríguez-Pérez, S. 2016. Evaluación del tratamiento anaerobio de las aguas residuales de una comunidad universitaria. *Rev. Colomb. Biotecnol.* [online]. 18(1): 49-56. DOI: 10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.57715

Ahmed, P.M. 2016. Biorremediación de vinazas de destilerías de alcohol, por microorganismos autóctonos aislados de ambientes contaminados. Trabajo de posgrado. Facultad de Bioquímica, Química y Farmacia, Universidad Nacional de Tucumán. Argentina.

Álvarez, S., Boveris, A., Evelson, P. 2008. Etanol: El combustible del futuro. Universidad de Buenos Aires. http://repositorioubi.sisbi.uba.ar/gsd/collect/encruci/index/assoc/HWA_280.dir/280.PDF

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

Arias-Giraldo, S., López-Velasco, D. M. 2019. Reacciones químicas de los 'azúcares' simples empleados en la industria alimentaria. *Lámpsakos.* 22: 123-136. DOI: 10.21501/21454086.3252

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.* 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.; Reyna-Trujillo, T. J.; Villers-Ruiz, L.; Durán-de Bazúa, M. del C.; Rivas-Solórzano, H.;

- Villatoro-Reséndiz, J.; Krishnan-Padma, R. 2000. Mejoramiento de suelos agrícolas usando aguas residuales agroindustriales. Caso vinazas crudas y tratadas. Pub. UNAM-UAdY. 188 págs. Apéndice 5, 9 pp.
https://www.researchgate.net/publication/236954593_Mejoramiento_de_suelos_agricolas_usando_aguas_residuales_agroindustriales_Caso_vinazas_crudas_y_tratadas/link/565c476408aeafc2aac702ca/download
- Bender, K.S., Buckley, D.H., Madigan, M.T., Martinko, J.M., Stahl, D.A. 2015. Brock: Biología de los microorganismos (14.^a edición). Pearson Educación. México D.F. México.
- 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 (*Borojopa patinoi*): Fuente de polifenoles con actividad antimicrobiana. *Vitae*. 17(3): 329-336. ISSN: 0121-4004.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=1698/169815641011>
- 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. México, D.F., México.
<http://www.132.248.9.195/ppt2004/0327304/Index.html>
- CEDRSSA. 2020. Reporte: La producción y el comercio de los biocombustibles en México y en el mundo. Cámara de Diputados. Palacio Legislativo de San Lázaro, Ciudad de México, México.
<http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/56Producci%C3%B3n%20y%20comercio%20de%20biocombustibles.pdf>
- Cobos, B. 2007. Evaluación del potencial de la producción de biogás a partir de vinazas en un biodigestor anaerobio. Tesis de licenciatura. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Colpas-Castillo, F., Fernández-Maestre, R., Meza-Fuentes, E., Primera-Pedrozo, O. 2011. Carbones

activados a partir de bagazo de caña de azúcar y zuro de maíz para la adsorción de cadmio y plomo. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 35 (136): 387-396, 2011. ISSN 0370-3908. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v35n136/v35n136a12.pdf>

Cooper-Bribiesca, B.L., González-Jiménez, F.E., Hernández-Espinosa, N., Núñez-Bretón, L.C., Reyes-Reyes, M. 2015. Empleo de antioxidantes en el tratamiento de diversas enfermedades crónico-degenerativas. *VERTIENTES. Revista Especializada en Ciencias de la Salud.* 18(1): 16-21. <https://www.medigraphic.com/pdfs/vertientes/vre-2015/vre151c.pdf>

CONADESUCA. 2016. 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. Facultad de Química, UNAM. México, DF, México.

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 (2020).

<https://doi.org/10.1007/s11270-020-04733-5>. Erratum. *Water Air and Soil Pollution.* 231(12):Corrections. DOI: 10.1007/s11270-020-04827-0

Cordovés-Herrera, M., Valdés-Jiménez, M.E. 2006. Aprovechamiento integral de los efluentes residuales de la producción de alcohol etílico. Cuarto Minisimposium Internacional sobre remoción de contaminantes de aguas, atmósfera y suelos. Facultad de Química, UNAM. México, D.F., México.

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>

Cubero-Madriz, G.A. 2011. Evaluación de un sistema de ‘digestión anaerobia’ para la estabilización de los lodos provenientes de las aguas residuales, Corporación PIPASA, San Rafael de Alajuela. Trabajo final de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

Delgado-Bautista, M.K. 2016. Perspectiva actual de los polifenoles en México. **Entre textos.** Año 7, Núm.21. ISSN: 2007-5316. <https://entretextos.leon.uia.mx/num/21/PDF/ENT21-1.pdf>

Derley-Valencia, J., Ramón-Valencia, J.A., Rozo-Ibáñez, D.A. 2015. Sistema de monitoreo y control basado en el software RTMC aplicado al proceso de ‘biodigestión anaeróbica’² **Revista**

² La digestión y más la de origen bioquímico es inherentemente anaerobia por lo que no requiere de un adjetivo que lo señale. Por otro lado, el uso del anglicismo ‘anaeróbico’ es incorrecto aunque la RAE lo haya introducido en su diccionario. Ver

Colombiana de Tecnologías de Avanzada. 2(26). Universidad de Pamplona. Norte de Santander, Colombia.

Detor-Méndez, V.I., Hernández-Segoviano, E. 2012. Comportamiento de cuatro reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA), bajo diferentes temperaturas de operación, 35, 45, 55 y 65°C. Tesis profesional (Química). Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM. Defensa: Diciembre 4. México D.F. México.

DOF. 1998. Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. PROFEPA.

<https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3295/1/nom-002-semarnat-1996.pdf>

ELAW. 1998. Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las

nota 1 de pie de página donde se señala que el sufijo es ‘bios’=vida y no ‘bicos’

aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

<https://elaw.org/es/content/mexico-norma-oficial-mexicana-nom-003-ecol-1997-que-establece-los-l%C3%ADmites-m%C3%A1ximos-permisible>

FAO. 1979. Environmental Quality (sewage and industrial effluents) regulations, 1979.

<http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/mal2509.pdf>

FAO. 2019. Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores. Colección de Documentos Técnicos N° 12. Buenos Aires, Argentina. <http://www.probiomasa.gob.ar/pdf/GuiadeBiogasyBiodigestores-19-08-29.pdf>

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>

García, I.G., Venceslada, J.B., Peña, P.J., Gómez, E.R. 1997. Biodegradation of phenol compounds in vinasse using *Aspergillus terreus* and *Geotrichum candidum*. *Water Research*. 31(8):2005-2011.

Gaspar-Mendoza, L. 2021. Polifenoles: Importancia y obtención a partir de vinazas tratadas anaerobiamente, mediante adsorción con carbón activado de bagazo de caña. En Cuarto Encuentro Estudiantil de Ingeniería Química UNAM 2020. Estudio de caso para la asignatura Estancia Académica de la carrera de Ingeniería Química. CEE18, apoyado por Marisela Bernal González, María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa. UNAM, Facultad de Química, Facultades de Estudios Superiores Cuautitlán y Zaragoza Coordinación de la Carrera de Ingeniería Química. Enero 15. Ciudad de México, México. Evento virtual. (Carteles <http://bit.ly/3qgF8VM>)

González, N.; Hernández, M.; Jiménez, R.; Ojeda, N. 2014. La caña de azúcar como alimento funcional. *Revista Iberoamericana de Ciencias*. 1(3). ISSN: 2334-2501.

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 Universidad Tecnológica de Pereira. Programa de Tecnología Química, Facultad de Tecnología. Pereira, Colombia. <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/6965/628162G869.pdf?sequence=1>

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

Hernández-Martínez, B. 2010. Aprovechamiento de levaduras para la producción de metano: Sustrato único y en codigestión con lodos activados. Tesis de Maestría. Instituto de Ingeniería, UNAM. CDMX, México.

Hernández-Ramírez, O. 2019. Biogás, un combustible limpio y rentable. Periodista: Pedro Mentado. Recuperado 8 de noviembre de 2020, de <https://energiaahoy.com/2019/08/21/bio>

[gas-un-combustible-limpio-y-rentable-i-parte/](https://energiaahoy.com/2019/08/28/biogas-generacion-de-electricidad-y-otros-usos-ii-parte/). Biogás: generación de electricidad y otros usos / II Parte <https://energiaahoy.com/2019/08/28/biogas-generacion-de-electricidad-y-otros-usos-ii-parte/>.

Jáuregui, 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.

Jiménez, A.M., Borja, R., Martín, A., Raposo, F. 2006. Kinetic analysis of the anaerobic digestion of untreated vinasses and vinasses previously treated with *Penicillium decumbens*. *Journal of Environmental Management*. 80(4):303-310.

Lapo-Alverca, J.A. 2014. Reactivación química del carbón activado del tipo 'calgon americano 6*12' utilizado en la sociedad minera "promine" para el proceso de adsorción de metales preciosos. Tesis de licenciatura. Universidad Técnica de Machala, Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud, Escuela de Ingeniería Química. Ecuador.

<http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/2175>

Ledezma-González, K.J. 2018. Actividad antiviral de polifenoles derivados de subproductos naturales solos o en combinación con ribavirina contra el virus de sarampión cepa Edmonton. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Biológicas. Nuevo León, México.

Leyra-Tobilla, L. 2016. Obtención de extractos polifenólicos a partir de vinazas mezcaleras a partir de vinazas mezcaleras y su efecto antiviral en la infectividad del virus sincitial respiratorio. Tesis para obtener grado de Químico Farmacéutico Biólogo. Facultad de Química, UNAM. México.

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.

Magaña, A., Pacheco, J. 2003. Arranque de un reactor anaerobio. *Ingeniería*. 7(1):21-25. ISSN: 1665-529X.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=467/46770102>

Márquez-Vázquez, M., Martínez-González, S.A. 2011. Reactores anaerobios de flujo ascendente (RAFA's o UASB).
https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/M%C3%81RQUEZ%20Y%20MART%C3%8DNEZ%202011%20Reactores%20Anaerobios.pdf

Merino-Núñez, D.I., Valderrama-Lara, J.L. 2017. Influencia de la temperatura y DQO en el tratamiento 'anaeróbico' de vinazas de Cartavio RUM Company usando un biorreactor UASB. Tesis para obtener título de Ingeniero Químico, Universidad Nacional de Trujillo, Facultad de Ingeniería Química. Trujillo, Perú.

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)

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](https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=20181229-0037.html)

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

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.

Pérez, A., Torres, P. 2008. Índices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables. *Ingeniería y competitividad*. 10(2). <https://doi.org//iyc.v10i2.2473>

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.

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=939/93946928004>

PROBIOMASA. 2020. Futuro renovable: Biogás como fuente de energía. Hoja técnica. Gobierno de México.

http://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/Biogas.pdf

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>

Rincón-Acelas, I.R. 2008. Cinética de la degradación anaerobia termofílica de vinazas de caña. Tesis de maestría. Facultad de Química, UNAM. México, DF, México.

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.

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.

Rosas-Calderón, L. 1998. Efecto de los micronutrientes en la transformación de ácidos grasos volátiles a metano en un proceso anaerobio para tratar vinazas. Tesis profesional. Facultad de Química, UNAM. México.

SADER. 2020. La caña de azúcar es el cultivo agrícola más importante del planeta. Y en nuestro país es una importante fuente de ingreso desde la época Colonial. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/cana-de-azucar-una-dulce-produccion-237168>

SEMARNAT. 1996. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. PROFEPA. <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3290/1/nom-001-semarnat-1996.pdf>

SIAP. 2018. La producción de caña supera las 55 millones de toneladas en

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

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*. 27(1):36-48. ISSN: 0186-6036. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48224413006>

Solís-Fuentes, J.A., Galán-Méndez, F., Hernández-Medel, M.d.R., García-Gómez, R.S., Bernal-González, M., Mendoza-Pérez, S., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2019b. Effectiveness of bagasse activated carbon in raw cane juice clarification. *Journal of Food Bioscience*. 32:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2019.100437>

Solís-Fuentes, J.A., Hernández-Ceja, Y., Hernández-Medel, M.d.R., García-Gómez, R.S., Bernal-González, M., Mendoza-Pérez, S., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2019a. Quality improvement of *jaggery*, a

- traditional sweetener, using bagasse activated carbon. *Journal of Food Bioscience*. 32:1-10 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2019.100444>.
- SUCDEN. 2021. Diagrama de flujo de la industria del azúcar. Comercializadora SUCDEN. (En línea: <https://www.sucden.com/es/products-and-services/sugar/process-flowcharts/>)
- 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.
- UNINET. 2003. NOM-004-SEMARNAT-2002 Norma Oficial Mexicana, Protección Ambiental: lodos y biosólidos (especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final). <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/col/semarnat004.pdf>
<http://legismex.mty.itesm.mx/normas/col/semarnat004.pdf>
- U.S. EPA. 2012. Guidelines for water reuse EPA/600/R-12/618 International Development. Washington, D.C.
- Vázquez-Morales, O. 2015. Etanol lignocelulósico, a partir de cascarilla de café, por medio de hidrólisis química-enzimática y fermentación. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad Veracruzana. Xalapa de Enríquez, Veracruz, México.
- Villalobos-Juvenal, G. E. 2015. Implementación de un medidor volumétrico de biogás rico en metano a nivel de laboratorio en tres reactores de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) operando a 45, 55 y 65°C. Tesis de licenciatura. Facultad de Química, UNAM. CDMX, México.
- Ziati, M., Khemmari, 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/u>