



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

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

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA

LUCERO GASPAR MENDOZA



CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Universidad Nacional Autónoma de México



Facultad de Química



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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Durán Domínguez de Bazúa María del Carmen
VOCAL: Ramírez Burgos Landy Irene
SECRETARIO: García Gómez Rolando Salvador
1ER. SUPLENTE: García Reynoso José Agustín
2DO. SUPLENTE: Bernal González Marisela

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA

Laboratorios 301, 302 y 303 de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental (LIQyQA) del Conjunto E de la Facultad de Química, UNAM.

ASESOR DEL TEMA

Dra. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa

SUPERVISOR TÉCNICO

Dra. Marisela Bernal González

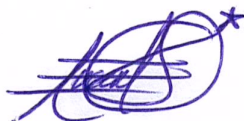
SUSTENTANTE

Lucero Gaspar Mendoza

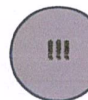


Declaratoria

Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o en referencia a, las obras de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante recursos editoriales convencionales.



Lucero Gaspar Mendoza



Dedicatoria

A Dios por permitirme llegar hasta esta etapa de mi vida, con salud y al lado de mi familia, y por permitirme encontrar en mi camino a personas que me ayudaron a crecer como persona.

Me queda pedirle que me dé la fortaleza para poder resolver cada una de las dificultades que se presenten y que siempre conserve los valores y principios que se me han forjado.

Con todo mi cariño y amor para mi madre Eufrosina y mi padre Alfonso, quienes fueron el motor para cada mañana levantarme y esforzarme a pesar de las circunstancias. Agradezco su amor, apoyo y comprensión, principalmente de mi madre, que nunca se cansó de motivarme y decirme lo orgullosa que estaba de mí. También les agradezco sus consejos, los valores y principios que me inculcaron para ser la persona que hoy soy.

Padres, muchas gracias por creer en mí y por invertir sueños, gustos y deseos en mi formación profesional.

A mis hermanos Emma y José por motivarme a seguir cuando las cosas no parecían fáciles, por desvelarse conmigo cuando no entendía algo o por apoyarme en la realización de mis trabajos. Sin su amor y apoyo incondicional estoy segura de que este sueño hubiese tardado más tiempo en cumplirse.

A mis amigos, compañeros y aquellos con quienes en algún momento compartí momentos especiales, ya que, sin sus conocimientos, apoyo, consejos y motivación, no podría haber llegado hasta aquí.

A mis queridos sobrinos Alexander y Gael que me impulsan a seguir adelante y a querer hacer un mundo mejor para las nuevas generaciones con ayuda de la Ingeniería Química.



Agradecimientos

A mi querida asesora y tutora, la Dra. Carmen Durán Domínguez de Bazúa, quien me acompañó de forma amable, paciente y entusiasta en la realización de este trabajo. Agradezco también los consejos y los comentarios que hizo como colega y que me hicieron apasionarme más por la Ingeniería Química.

A mi estimada asesora y supervisora técnica, la Dra. Marisela Bernal González, quien me orientó y ayudó para que pudiera concluir este trabajo tan importante.

A los docentes de la Facultad de Química y aquellos que formaron parte de mi trayectoria escolar, ya que cada uno de ellos nos brindaron tiempo, conocimiento, experiencias y muchos de ellos nos hicieron sentir su pasión por la Ingeniería Química.

A la Universidad Nacional Autónoma de México le agradezco el haberme permitido desarrollarme como Ingeniera Química, brindándome materiales electrónicos, bibliográficos y de laboratorio; necesarios para mi buen aprendizaje. Me siento orgullosa de pertenecer a tan prestigiosa universidad.

Al Programa de Becas Oportunidades, ya que, sin él estas páginas se hubiesen escrito más tarde.

Al Subprograma 127 creado en la Facultad de Química de la UNAM para promover la investigación ya que a través de él pude incursionar en esa formación científico-tecnológica que me ha fortalecido como futura profesionista.



Índice

	Página
Declaratoria	III
Glosario	XIII
Resumen	XIX
Abstract	XX
<hr/>	
Capítulo 1. Problemática	
<hr/>	
1.1. Introducción	1
1.1.1. La caña de azúcar	2
1.1.2. Bioetanol	4
1.2. Justificación	5
1.3. Objetivos	7
1.3.1. Objetivo general	7
1.3.2. Objetivos particulares	7
1.4. Metas	8
<hr/>	
Capítulo 2. Fundamentos teóricos	
<hr/>	
2.1. Vinazas	9
2.1.1. Caracterización química de las vinazas	10
2.2. Procesos anaerobios	10
2.2.1. Características y funcionamiento de los RALLFA	14
2.2.2. Manejo de los RALLFA	15
2.3. Polifenoles	17
2.3.1. Posibles usos e importancia	18
2.4. Carbón activado	19
2.4.1. Materias primas para su obtención	21
2.4.2. Activación física y química del carbón activado	22
2.4.2.1. Activación física	22
2.4.2.2. Activación química (Grisales-Motato y Rojas-Arrieta, 2016)	23



	Página
2.4.3. Adsorción en carbón activado	23
2.4.3.1. Factores que afectan la adsorción en carbón activado	24
2.4.4. Reactivación de carbón agotado (CARBOTECNIA, 2022)	25
2.5. Isotermas de adsorción	27
2.5.1. Isoterma de Langmuir (Contreras-Contreras, 2019)	27
2.5.2. Isoterma de Freundlich (Lazo, 2008)	28
Capítulo 3. Metodología	
3.1. Materiales	29
3.2. Métodos	29
3.2.1. Obtención de material bibliográfico de los temas de interés	29
3.2.2. Revisión del material bibliográfico recabado en el punto anterior	30
3.2.3. Compilación de la información relevante para la presente investigación	30
3.2.4. Elaboración del diagrama de flujo de proceso, DFP, con el cálculo de la cantidad de polifenoles recuperada	32
Capítulo 4. Resultados y discusión	
4.1. Obtención de carbón activado a partir de bagazo de caña	33
4.2. Caracterización de la vinaza antes y después del tratamiento anaerobio	36
4.3. Adsorción de polifenoles utilizando carbón activado	38
4.4. Método para la desorción de polifenoles	41
4.5. Diagrama de flujo de proceso, DFP	45
4.6. Balances de materia	47
Capítulo 5. Conclusiones y perspectivas	
5.1. Conclusiones	55
5.2. Perspectivas	56
Anexos	
Anexo A. OPERACIÓN Y ARRANQUE DE LOS RALLFA	58



	Página
Anexo B. MEDICIÓN DE PARÁMETROS	63
Anexo C. ACERVO FOTOGRÁFICO	64
Anexo D. DISPOSICIÓN CONTROLADA DE LOS RESIDUOS PRODUCIDOS EN ESTA INVESTIGACIÓN (texto modificado de Correa-López, 2022)	67
Bibliografía	69



Índice de tablas y figuras

	Página
Tablas	
Tabla 2.1. Caracterización de vinazas de caña de azúcar (Modificado de Contreras-Contreras, 2019)	11
Tabla 2.2. Ventajas y desventajas del tratamiento anaerobio (Crombet-Grillet y col., 2016)	14
Tabla 2.3. Propiedades del CA, del componente adsorbido y del medio de adsorción, que afectan el proceso de adsorción (Modificado de Sevillano y Torres, 2013)	24
Tabla 2.4. Métodos de reactivación del carbón agotado (CARBOTECNIA, 2022)	26
Tabla 4.1. Rendimientos de carbón activado según precursor y agente de activación (Solís-Fuentes y col., 2012)	34
Tabla 4.2. Remoción de color del jugo de caña con los carbones activados preparados (Solís-Fuentes y col., 2012)	35
Tabla 4.3. Caracterización física y química de las vinazas antes del tratamiento anaerobio (Contreras-Contreras, 2019)	37
Tabla 4.4. Caracterización física y química de las vinazas después del tratamiento anaerobio (Contreras-Contreras, 2019)	38
Tabla 4.5. Caracterización de los carbones reactivados con NaOH y agua caliente (Kow y col., 2016)	44
Tabla 4.6. Principales ácidos grasos, proteínas, carbohidratos, alcoholes, polifenoles y otras sustancias contenidas en las vinazas (Contreras-Contreras, 2019; Pallares-García, 2014; Rincón-Acelas, 2008)	49
Tabla 4.7. Características del carbón activado del bagazo de caña y de un carbón activado comercial (Solís-Fuentes y col., 2012)	50



	Página
Tabla 4.8. Producción del ingenio azucarero-alcoholero seleccionado	51
Tabla 4.9. Caracterización de las vinazas crudas según la producción del ingenio azucarero-alcoholero seleccionado y los datos obtenidos por Contreras-Contreras (2019)	51
Tabla 4.10. Caracterización de las vinazas diluidas al ingresar al RALLFA a 65°C según la producción del ingenio azucarero-alcoholero seleccionado y los datos obtenidos por Contreras-Contreras (2019)	51
Tabla 4.11. Porcentaje de remoción de contaminantes en el RALLFA a 65°C según lo obtenido por Contreras-Contreras (2019)	52
Tabla 4.12. Caracterización del efluente del RALLFA a 65°C	52
Tabla 4.13. Flujo másico de polifenoles (kgAG/día) al final de las etapas de adsorción	53
Tabla 4.14. Cantidad de polifenoles desorbidos (kgAG/día)	53
Tabla A.1. Variables de operación y parámetros de seguimiento de los reactores anaerobios (varios autores)	58
Tabla A.2. Ventajas y desventajas de trabajar con reactores termofílicos (Cubero-Madriz, 2011; Rincón-Acelas, 2008)	60
Tabla A.3. Compilación de consideraciones a tomar en cuenta en el arranque de los RALLFA (Castro-González, 2004)	61
Tabla B.1. Variables de operación y parámetros de seguimiento de los reactores anaerobios (Contreras-Contreras, 2019)	63
<hr/> Figuras	
Figura 1.1. Porcentaje de agua utilizada por las industrias (Modificado de CONADESUCA, 2016a)	2



	Página
Figura 2.1. Etapas de la degradación anaerobia en un biorreactor con producción de biogás y biofertilizante (FAO, 2019)	12
Figura 2.2. Reactor de lecho de lodos de flujo ascendente, RALLFA, y su funcionamiento (Guardia-Puebla, 2012)	13
Figura 2.3. Las principales causas de muerte en el mundo, en el año 2019 (Adaptada de OMS, 2020)	19
Figura 2.4. Principales enfermedades en las que la presencia de polifenoles aporta beneficios a la salud (varios autores)	20
Figura 3.1. Diagrama de flujo de las actividades realizadas	31
Figura 4.1. Proceso de obtención de carbón activado a partir de la activación química con H_3PO_4 (Solís-Fuentes y col., 2012)	33
Figura 4.2. Proceso de obtención de carbón activado a partir de la activación física (Solís-Fuentes y col., 2012)	34
Figura 4.3. 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 (Solís-Fuentes y col., 2012)	39
Figura 4.4. Influencia de la cantidad de CA en la eliminación de polifenoles (Ziati y col., 2017)	40
Figura 4.5. 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)	41
Figura 4.6. Influencia del pH en la eliminación de polifenoles (Ziati y col., 2017)	42
Figura 4.7. Influencia de la temperatura en la eliminación de polifenoles (Ziati y col., 2017)	43
Figura 4.8. Procedimiento para la reactivación del carbón agotado por lotes (Kow y col., 2016)	44



	Página
Figura 4.9. Procedimiento para la reactivación del carbón agotado en columna (Kow y col., 2016)	45
Figura 4.10. DFP para la obtención de biogás rico en metano y de polifenoles a partir de las vinazas obtenidas de la producción principal de azúcar de caña, de mieles y de etanol empleando reactores anaerobios seguidos de las operaciones de absorción y desorción con carbón activado de bagazo de caña de azúcar	46
Figura 4.11. Lista de componentes 'por <i>default</i> ' de Aspen Adsorption	48
Figura C.1. Carpeta de Google Drive donde se almacenaron todas las fuentes consultadas	64
Figura C.2. Aplicación Xodo para la lectura y síntesis de las fuentes bibliográficas consultadas	64
Figura C.3. Cuaderno digital de notas y dudas	65
Figura C.4. Hoja de Excel donde se hizo el cálculo de los polifenoles adsorbidos y desorbidos	65



Glosario

Concepto	Definición
ADN	Ácido desoxirribonucleico
‘Adsorbato’	Anglicismo para una sustancia que se adsorbe en la superficie de un adsorbente. La palabra correcta sería adsorbido (usando el participio pasado de adsorber como sustantivo o acompañado de un sustantivo para emplearlo como adjetivo, como componente adsorbido)
Adsorbente	Sustancia, generalmente sólida y de estructura porosa, con una gran capacidad de adsorción
AG	Ácido gálico (forma usual de medir los compuestos fenólicos)
AGV	Ácidos grasos volátiles
Almazara	Molino en que se extrae el aceite de las aceitunas y olivos
ARN	Ácido ribonucleico
Bagazo	Residuo de los frutos que se exprimen para sacarles el jugo
BC	Bagazo de caña
C	Concentración del componente adsorbido en el equilibrio
CA	Carbón activado
Cabezas	En la jerga alcoholera, primeras porciones de destilado que salen de los alambiques y que tiene alto grado alcohólico
CaCO₃	Carbonato de calcio
Carbón agotado	Carbón activado que ya no tiene capacidad para adsorber, por lo que es retirado del proceso en el que se utilizó, ya sea para desecharlo o para reactivarlo
CC	Cáscara de café
CG-DIF	Siglas para Cromatografía de gases-Detector de ionización de flama
CH₃-CH₂OH	Etanol o alcohol etílico
CH₄	Metano
Cl₂	Cloro
cm	Centímetro (unidad de longitud)
cm³	Centímetros cúbicos (unidad de volumen)
CN	Cáscara de naranja



Concepto	Definición
C:N:P	Relación Carbono:Nitrógeno:Fósforo
CO₂	Dióxido de carbono
Colas	En la jerga alcoholera, últimas fracciones de destilado con un nivel muy bajo de alcohol
Covid-19	<i>Corona virus disease-Year 2019</i> . Enfermedad respiratoria muy contagiosa causada por el coronavirus SARS-CoV-2
CWA	<i>Clean Water Act</i> o Ley para agua limpia, en español
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DBO₅	Demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días
Default	Término en inglés para señalar una opción preseleccionada adoptada por un programa de cómputo u otro mecanismo. Los paquetes de traducción electrónicos señalan su significado como “por defecto” pero es incorrecta esta traducción. En esta tesis se pondrá el término en inglés con cursivas (nota de la asesora)
DFP	Diagrama de flujo de proceso
DGB	Dirección General de Bibliotecas de la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM
DQO	Demanda química de oxígeno
Efluente	Líquido residual que fluye de una instalación
g	Gramo (unidad de masa)
mg	Miligramo (unidad de masa)
µS	Microsiemens (unidad de conductancia o conductividad eléctrica)
h	Hora
H₂	Hidrógeno
HCl	Ácido clorhídrico
HNO₃	Ácido nítrico
H₂O₂	Peróxido de hidrógeno
H₂S	Ácido sulfhídrico
H₂SO₄	Ácido sulfúrico
H₂SO₄cc	Ácido sulfúrico concentrado
H₃PO₄	Ácido fosfórico



Concepto	Definición
ICP-AES	<i>Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy</i> (espectroscopía de emisión atómica de plasma acoplado por inducción)
Ingenio	Obra de ingeniería en general, nombre dado en México a las instalaciones industriales donde se procesa la caña de azúcar (<i>Saccharum officinarum</i>)
K	Constante de adsorción de Langmuir
k_f	Constante de capacidad de adsorción
kg	Kilogramo (unidad de masa)
K₂S	Sulfuro de potasio
K₂SO₄	Sulfato de potasio
kW	Kilowatts (unidad de potencia)
L	Litro (unidad de volumen)
M	Mol (unidad molar)
Masa	La masa es la cantidad de materia que posee un cuerpo y se mide en kilogramos (kg). NO debe confundirse con el peso, que es la fuerza de atracción que la Tierra ejerce sobre cualquier objeto y se mide en newtons (N). ¹
MB	<i>Methylene blue</i> o azul de metileno, en español
mm	Milímetros (unidad de longitud)
m²	Metros cuadrados (unidad de área)
m³	Metros cúbicos (unidad de volumen)
Melanoidinas	Compuestos de pigmentos pardos de alta masa molecular, no volátiles y sin aroma; que se forman a partir de un carbohidrato y un grupo amino a altas temperaturas (el dulce de leche de cabra con azúcar es un ejemplo)
MgSO₄	Sulfato de magnesio
min	Minuto (unidad de tiempo)
mL	Mililitros (unidad de volumen)

¹ La masa es independiente del lugar donde se mida; sin embargo, el peso no. Cuanto más alejados del centro de la Tierra se encuentren el o los cuerpos a medir menor será su peso, ya que la gravedad disminuye a medida que el cuerpo se aleja de dicho centro.



Concepto	Definición
N	Constante de intensidad de adsorción
N	Normal (unidad de concentración)
NaOH	Hidróxido de sodio
Na₂SO₄	Sulfato de sodio
NH₃	Amoníaco
No.	Número
NTK	Nitrógeno Total Kjeldahl
O₂	Oxígeno
pdf	Siglas en inglés, <i>portable document format</i> o formato de documento portátil, en su traducción al español. Es un formato de almacenamiento para documentos digitales
pH	Potencial de hidrógeno: Medida que sirve para establecer el nivel de acidez o basicidad de una disolución
PIB	Producto Interno Bruto: Es un indicador económico que refleja el valor monetario de todos los bienes y servicios finales producidos por un país o región en un determinado periodo de tiempo, normalmente un año. Se utiliza para medir la riqueza que genera un país
Pirólisis	Proceso en el que se produce la degradación de la biomasa por efecto del calor sin la presencia de oxígeno, es decir, en una atmósfera completamente inerte
Polifenoles	Grupo de sustancias químicas que se caracterizan por tener más de un grupo fenol en su molécula
Precursor	Sustancia indispensable o necesaria para producir otra
q	Cantidad de componente adsorbido adsorbida en el equilibrio
q₀	Constante empírica de la ecuación de Langmuir
RALLFA	Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (nombre dado por su desarrollador, el Prof. Lettinga de la Universidad Wageningen de los Países Bajos, <i>UASB reactor</i> por su nombre en inglés)



Concepto	Definición
Recalcitrantes	Contaminantes que por tener una estructura muy estable químicamente se resisten al ataque de los microorganismos o de cualquier mecanismo de degradación, sea bioquímico o químico
rpm	Revoluciones por minuto
S²⁻	Sulfuros
SARS-CoV-2	<i>Severe acute respiratory syndrome-Corona Virus-2</i> (Síndrome respiratorio agudo severo-Coronavirus-2 en español)
SDT	Sólidos disueltos totales
SIRAN	Soporte inerte utilizado en los procesos anaerobios
SO₄²⁻	Sulfatos
SST	Sólidos suspendidos totales
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
ST	Sólidos totales
STV	Sólidos totales volátiles
TESIUNAM	Colección de archivos electrónicos en formato pdf de muchas de las tesis de la Universidad Nacional Autónoma de México
TRC	Tiempo de retención celular
TRH	Tiempo de residencia hidráulica
UASB	<i>Upflow anaerobic sludge blanket</i>
UI	<i>User Interphase</i> . Siglas en inglés para definir colores, tipografías, íconos, formularios, animaciones, sonidos, etc.
VC	Vinaza cruda (vinazas provenientes de la primera torres de destilación)
VD	Vinaza diluida (vinazas crudas 50% y vinazas postratadas 50%, aunque debe mencionarse que esto todavía no se hace a escala de laboratorio sino que se usa agua de la llave para la dilución)
VP	Vinazas postratadas (vinazas que ya fueron digeridas en el RALLFA y que ya fueron adsorbidas por el carbón activado)
ZnCl₂	Cloruro de zinc
Otros	



Concepto	Definición
Å	Ángstrom
α	Factor de alcalinidad
°C	Grados Celsius
%	Porcentaje

Notas:

Esta tesis usa el punto decimal (DOF, 2009)². Los guarismos van junto a °C y %. Las locuciones latinas de uso común como etcétera (etc.) no van en cursivas. La abreviatura 'y col.' significa y colaboradores

² 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



Resumen

Las vinazas han representado durante mucho tiempo un problema ambiental debido a su alto contenido de sólidos (100-150 g/L), valores elevados de materia orgánica medida como demanda bioquímica de oxígeno en cinco días, DBO₅ (40-100 g/L) y de materia inorgánica y orgánica medida como demanda química de oxígeno, DQO (10-200 g/L). A esto se le suma la gran cantidad que se produce por día de vinazas. Tan solo en un ingenio azucarero-alcoholero del estado de Veracruz, estado con mayor producción de azúcar en México, se producen aproximadamente 1,150,000,000 L/día. Se considera que las vinazas son sustancias muy contaminantes porque no se aprovechan como un producto secundario de la producción de etanol, ya que si se les da un uso adecuado pueden ser reutilizadas de diversas formas. Una de las formas de utilización que desde hace más de 50 años se ha ofrecido como una opción viable energéticamente, es la transformación bioquímica de sus compuestos carbonosos biodegradables en condiciones anaerobias, obteniendo biogás rico en metano. Para sistemas que operan a 45 y 55°C, el porcentaje de remoción calculado a partir de algunos resultados experimentales va de 55 a 60% de la DQO, porcentaje que se ve reducido al disminuir o aumentar la temperatura según varios autores. Por lo que, se considera este como el rango óptimo para llevar a cabo el proceso. El 25% de lo que no se transformó en biogás corresponde a compuestos fenólicos (sustancias que le confieren la coloración café a las vinazas), los cuales se consideran compuestos valiosos, especialmente para ayudar a recuperar la salud ya que tienen propiedades antioxidantes, antiparasitarias, antibacterianas y antivirales, que ayudan a combatir diversas enfermedades, entre ellas, las del tracto respiratorio. Los polifenoles pueden ser separados del efluente de los sistemas anaerobios empleados, como los reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente, RALLFA, mediante su adsorción con carbón activado. Usando como ejemplo las cifras de un ingenio azucarero-alcoholero se evaluó teóricamente, con ayuda de distintas fuentes, el uso de carbón activado de bagazo de caña. De acuerdo con investigaciones previas tiene un porcentaje de cenizas mayor que el carbón activado comercial, por lo que, se espera que, a las mismas condiciones, el porcentaje de remoción para el carbón activado comercial —que fue del 70% a escala de laboratorio— sea mayor que en el caso del carbón activado de bagazo de caña. Se puede lograr una mayor eficiencia si se trabaja en condiciones óptimas de temperatura y pH. Esta es un área de oportunidad para realizar trabajo experimental ahora que se permita el acceso a los laboratorios de investigación. Para la desorción de los compuestos fenólicos adsorbidos en el carbón activado, la opción que más ha sido estudiada por distintos autores y la más recomendada es el uso de NaOH a altas temperaturas. De estos, el método más detallado y con excelentes resultados es el de utilizar a escala de laboratorio 15 mL de solución 6N de NaOH por gramo de carbón agotado con un tiempo de contacto de 30 minutos y después lavar el carbón agotado con agua caliente para acelerar el proceso de desorción. Con esto, los autores lograron la regeneración del carbón agotado con una capacidad de adsorción del 90 al 98%, lo que se traduce en que, en ese mismo porcentaje, la mayoría de los compuestos fenólicos son recuperados del carbón. El número de etapas de adsorción requeridas calculadas a partir de los resultados previos fue de 18. Con ese mismo criterio, la cantidad obtenida de polifenoles puede ser de 9,000,000 kg de polifenoles medidos como ácido gálico, AG/día, luego de desorber los polifenoles de cada una de las etapas.

Palabras clave: Adsorción y desorción de polifenoles, uso medicinal, vinazas de bioetanol, caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), carbón activado de bagazo de caña.



Abstract

Vinasse has long represented an environmental problem due to its high solids content (100-150 g/L), high values of organic matter measured as biochemical oxygen demand in five days, BOD₅ (40-100 g/L), and of inorganic and organic matter measured as chemical oxygen demand, COD (10-200 g/L). Added to this there is a large quantity of stillage produced per day. Only in a sugar-alcohol mill in the state of Veracruz, the state with the highest cane sugar production in Mexico, approximately 1,150,000,000 L vinasse/day are produced. Vinasses are considered highly polluting substances because they are not used as a secondary product of ethanol production, since if they are used properly they can be reused in various ways. One of the forms of use that has been offered as an energetically viable option for more than 50 years is the biochemical transformation of its biodegradable carbonaceous compounds under anaerobic conditions, obtaining biogas rich in methane. For systems that operate at 45 and 55°C, the removal percentage calculated from some experimental results ranges from 55 to 60% of the COD, a percentage that is reduced when the temperature decreases or increases according to several authors. Therefore, this is considered the optimal range to carry out the process. Around 25% of what was not transformed into biogas corresponds to phenolic compounds (substances that give the vinasse its brown color), which are considered valuable compounds, especially to help restore health since they have antioxidant, antiparasitic, antibacterial, and antiviral properties, which help fight various diseases, including those of the respiratory tract. Polyphenols can be separated from the effluent of the anaerobic systems used, such as the upflow anaerobic sludge bed, UASB, reactors by adsorption with activated carbon. Using the figures of a sugar-alcohol mill as an example, the use of activated carbon from cane bagasse was theoretically evaluated with the help of different sources. According to previous research, it has a higher ash percentage than commercial activated carbon, so it is expected that, under the same conditions, the removal percentage for commercial activated carbon—which was 70% on a laboratory scale—is higher than in the case of activated carbon from cane bagasse. Greater efficiency can be achieved if optimal conditions of temperature and pH are employed. This is an area of opportunity to do experimental work now that access to research laboratories is allowed. For the desorption of phenolic compounds adsorbed on activated carbon, the option that has been most studied by different authors and the most recommended is the use of NaOH at high temperatures. Of these, the most detailed method and with excellent results is to use, on a laboratory scale, 15 mL of 6N NaOH solution per gram of exhausted carbon with a contact time of 30 minutes and then wash the exhausted carbon with hot water to accelerate the desorption process. With this, the authors achieved the regeneration of exhausted carbon with an adsorption capacity of 90 to 98%, which means that, in the same percentage, most of the phenolic compounds are recovered from the carbon. The number of required adsorption steps calculated from the previous results was 18. Using the same criteria, the amount of polyphenols obtained would be 9,000,000 kg of polyphenols measured as gallic acid, GA/day, after desorbing the polyphenols from each one of the stages.

Keywords: Adsorption and desorption of polyphenols, medicinal use, bioethanol vinasses, sugarcane (*Saccharum officinarum*), activated carbon from sugarcane bagasse.



Capítulo 1

PROBLEMÁTICA

1.1. Introducción

La problemática que enfrentan los países con economías emergentes, antes conocidos como ‘en vías de desarrollo’, para alcanzar un crecimiento industrial sostenible es sumamente compleja, especialmente por el impacto que este sector ejerce sobre el ambiente. La industria azucarera, como se leerá en los apartados 1.1.1 y 1.1.2, tiene una importancia económica, social y ambiental, ya que, a partir de ella, entre muchas otras cosas, se obtienen fuentes renovables como combustibles, pero irónicamente, debido a la irresponsabilidad humana se ha convertido en un problema ambiental. Dentro de los problemas ambientales comúnmente asociados a la agroindustria de la caña de azúcar se pueden mencionar: Alto consumo de agua en forma de riego para la obtención de caña de azúcar y en los procesos industriales para la producción de azúcar y alcohol, generación de efluentes líquidos con alta carga orgánica, grandes cantidades de residuos sólidos, entre otros. Aproximadamente el 80% del consumo de agua en la industria corresponde a solamente seis ramas industriales, tal como se muestra en la Figura 1.1, donde se puede ver que la industria azucarera es la que consume más agua. En la producción de azúcar se desechan las aguas que provienen del lavado de la caña, de la limpieza de los evaporadores, calentadores y purgas de calderas, de los sistemas de enfriamiento y de los servicios sanitarios. Para el caso de los ingenios que tienen producción del alcohol etílico se tienen como desechos las aguas de enfriamiento de condensadores y tinajas de fermentación, los fondos de éstos y las vinazas o residuos de las torres de destilación. De todas las aguas residuales provenientes de los complejos azucareros/alcoholeros, las que son “más contaminantes” por su concentración de material orgánico biodegradable y no biodegradable son las vinazas, que se producen en una proporción de 12 a 15 litros por cada litro de alcohol destilado (CONADESUCA, 2016a), ya que se mete vapor



“vivo” a la primera torre de destilación y por eso no se concentra el etanol sino solamente “se limpia” de los subproductos de la producción de azúcar y de la producción de etanol.

Actualmente, el uso de procesos biológicos en el tratamiento de aguas residuales provenientes de plantas agroindustriales, incluyendo los de las destilerías, son reconocidos como métodos efectivos en la remoción de contaminantes, ya sea empleando sistemas aerobios o anaerobios. Sin embargo, como se explicará en el apartado 1.2 requiere de un postratamiento o algunas modificaciones que lo hagan útil para los ingenios azucareros (Durán-de-Bazúa, 2005).

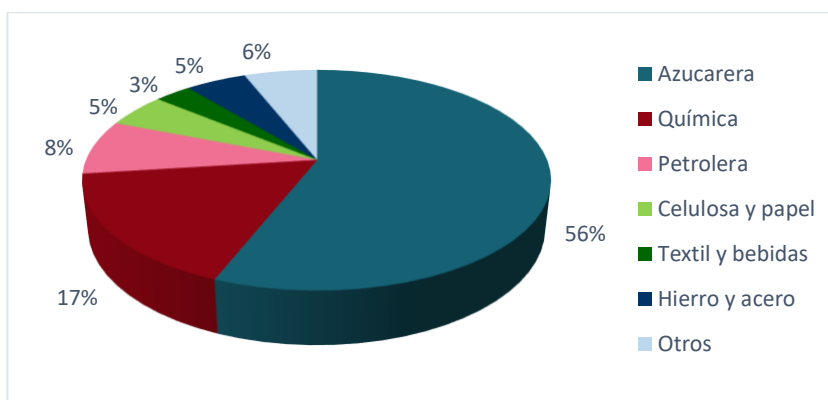


Figura 1.1. Porcentaje de agua utilizada por las industrias (Modificado de CONADESUCA, 2016a)

1.1.1. La caña de azúcar

La producción de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) es una actividad económica muy importante para el mundo y, para México, ha sido una fuente de ingreso desde la época colonial (Delegación SADER SLP, 2018).

La agroindustria de la caña, según las agrupaciones de cañeros a nivel nacional, se ubica en 267 municipios rurales en donde habitan más de 13 millones de personas en 15 estados del país, lo que genera un motor económico y de desarrollo que representa el 2.6% del Producto Interno Bruto (PIB) manufacturero, el 13.8% del



PIB agropecuario y el 11.6% del PIB en la industria alimentaria (CONADESUCA, 2020).

Actualmente, en México operan 51 ingenios distribuidos en 15 estados del país: Campeche, Chiapas, Colima, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, San Luis Potosí, Sinaloa, Tabasco, Tamaulipas y Veracruz. Este último, 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 solo en el año 2018 ambos estados aportaron 28.3 millones de toneladas, lo que representa el 50.6% de la producción nacional (SIAP, 2018).

Para su procesamiento se requiere de mucha mano de obra, por lo que representa una relevante fuente de empleo. La operación de los ingenios azucareros que se abastecen por más de 170 mil productores agrícolas genera 500 mil empleos directos y 2.4 millones de empleos indirectos (NTX, 2018; SADER, 2020).

Aunado a lo anterior, 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 (DOF, 2005).

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 y vapor de agua. La fibra de caña de azúcar sirve para la fabricación de papel y tiene la característica de ser biodegradable, 'compostable' y reciclable. A partir de las mieles y el azúcar se fabrican confites, dulces y bebidas gaseosas (Durán-de-Bazúa, 2005; Durán-de-Bazúa y col., 1991; Procaña, 2020). El bioetanol obtenido a partir de plantas, como la caña de azúcar, que fotosintetizan el



bióxido de carbono transformándolo en biomasa es empleado en la elaboración de bebidas alcohólicas como principal materia prima, en diversos sectores como el farmacéutico y también como combustible vehicular y es considerado como la gran alternativa para la absorción del CO₂, contribuyendo así con el cuidado del ambiente (Cornejo-Arteaga, 2016). En la actualidad, se produce por medio de la agroindustria azucarera-alcoholera cañera, pudiéndose emplear como materia prima para su producción, tanto a las mieles finales como al jugo de caña (Cordovés-Herrera y Valdés-Jiménez, 2006).

1.1.2. Bioetanol

El mundo afronta el hecho de que la población aumenta vertiginosamente y en la misma medida crece el nivel de industrialización y el consumo de recursos no renovables como el petróleo y sus derivados. Esto tiene un efecto negativo para el ambiente, ya que provoca su contaminación y favorece el calentamiento global. Para desligar el crecimiento económico del uso de combustibles fósiles, así como la contaminación ambiental debida a su combustión, ha aumentado el interés en el aprovechamiento de los recursos renovables para la obtención de energía, las que se conocen como energías alternativas. Por ello, la humanidad se encuentra frente a una enorme campaña global cuyo objetivo es incorporar lo más rápido posible diferentes materias primas tales como: Caña de azúcar, soya, maíz, colza, remolacha, etc., en la producción de biocombustibles como sustitutos perfectos de los derivados de petróleo (Alonso-Gómez y Bello-Pérez, 2018; Serna y col. 2011).

Los dos biocombustibles más usados en el mundo son el bioetanol y el biodiesel. El etanol o alcohol etílico (CH₃-CH₂OH) es un líquido incoloro que puede producirse de dos formas: (1) Mediante la hidratación directa del etileno —que suele provenir del etano (componente del gas natural) o de la nafta (derivado del petróleo)—; o (2) Por medio del procesamiento de materia de origen renovable o de ciertas plantas ricas en glúcidos—como la caña de azúcar, el sorgo dulce y el betabel, también llamado remolacha de azúcar— y almidón — como el maíz, la yuca y la papa—. El



etanol así producido se conoce como **bioetanol** (Siliceo-Rodríguez, 2014; Vázquez-Morales, 2015).

Para la obtención de bioetanol a base de caña de azúcar, las melazas incristalizables se fermentan con *Saccharomyces cerevisiae* (o 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 glucosa-etanol. El pH ácido se alcanza por la adición de ácido sulfúrico. Se agrega también urea como fuente de nitrógeno para las levaduras, debido a que los microorganismos siempre requieren relaciones adecuadas 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 se introducen 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, llamadas así porque provienen del mosto fermentado, conocido como vino (Castro-González, 2004).

1.2. Justificación

Las vinazas que provienen de la caña de azúcar se obtienen de la fermentación y destilación de las melazas; son el principal residuo orgánico en la obtención de alcohol. Es un líquido de color café con bajo pH, olor dulce y alto contenido de minerales y materia orgánica disuelta y en suspensión. La composición química de las vinazas es variable y depende del método de conducir la fermentación alcohólica; de las especies de levaduras utilizadas; de la relación corriente agotadora-vinaza; y de la materia prima utilizada en la destilación, la cual puede proceder de tres fuentes: Melaza concentrada, directamente del jugo de los molinos y mixta —mezcla de jugo y melaza— (CONADESUCA, 2016b).



Todos los enfoques que se han dado al problema de la vinaza buscan eliminar o atenuar los efectos de la contaminación sobre los ríos, donde tradicionalmente estos derivados han sido descargados por siglos (CONADESUCA, 2016b). Problema que se ve multiplicado debido al volumen tan elevado de vinazas producidas en la elaboración del alcohol etílico. 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. Y, aunque el tratamiento anaerobio disminuye en cierta medida el contenido de estos compuestos carbonosos, reduciendo la demanda química de oxígeno (DQO) en un 60 a 75%, cerca del 33% de la DQO del efluente de los reactores anaerobios que no se elimina, corresponde a compuestos fenólicos recalcitrantes como el ácido gálico, el ácido tánico y las melanoidinas (Paz-Pino, 2013). De forma interesante, en la actualidad ya no se les conceptualiza negativamente y se les considera compuestos valiosos, especialmente para ayudar a recuperar la salud ya que atacan de manera selectiva a bacterias, hongos y virus (Leyra-Tobilla, 2016; Sotelo y col. 2010), aunque si se vierten al ambiente pueden ser dañinos, singularmente en el agua para la vida acuática (Contreras-Contreras, 2019; Valencia-Avilés y col., 2017).

Por ello, la presente investigación teórica busca dar una solución positiva para la recuperación de estos compuestos valiosos reduciendo el contenido de materia orgánica e inorgánica medida como DQO presente en las vinazas tratadas anaerobiamente, con base en las investigaciones experimentales previamente realizadas por diversos autores mencionados en el apartado que corresponde a la bibliografía, esperando que en un futuro se lleve a cabo la fase experimental y se pueda demostrar si cumple o no con las Normas Oficiales Mexicanas. También, busca evaluar la separación de dichos polifenoles con carbón activado elaborado a partir de bagazo de caña y ofrecer una propuesta para la recuperación de los polifenoles en su forma más pura para que puedan ser reaprovechados en el tratamiento de distintas enfermedades, principalmente las respiratorias. Asimismo,



se hará un balance de materia sustentado en los productos obtenidos en la Facultad de Química, la cual colabora con varios ingenios azucareros y azucareros-alcoholeros. De uno de ellos se tomarán los datos para hacer un estimado de los polifenoles que se puedan obtener de forma pura. Con esta estrategia se transformaría a la industria azucarera mexicana al hacer de la caña de azúcar una fuente para solucionar tres problemas esenciales: Alimentación, energía-ambiente y salud.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Proponer, con base en la literatura, una forma viable para la recuperación de polifenoles de vinazas de bioetanol de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) para su uso medicinal usando carbón activado del propio bagazo de la caña.

1.3.2. Objetivos particulares

- ◆ Evaluar la propuesta del uso de carbón activado de bagazo de caña como un método de adsorción de polifenoles contenidos en vinazas de bioetanol de caña de azúcar previamente tratadas en un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA)
- ◆ Proponer un método para la desorción de polifenoles haciendo uso de la literatura encontrada
- ◆ Describir mediante un diagrama de flujo de proceso (DFP) las actividades involucradas en el proceso de obtención de polifenoles partiendo de la caña de azúcar
- ◆ Realizar un balance de materia haciendo uso del software Aspen Plus para la obtención de la cantidad estimada recuperada de polifenoles luego de la reactivación del carbón agotado con base en la cantidad de alcohol producido por uno de los ingenios más productivos en términos de etanol.



1.4. Metas

- ◆ Obtención de un método de adsorción de polifenoles contenidos en vinazas de bioetanol de caña de azúcar usando carbón activado del propio bagazo de la caña
- ◆ Obtención de un método para la desorción de polifenoles haciendo uso de la literatura encontrada
- ◆ Generación de un diagrama de flujo de proceso, DFP, donde se describa el proceso de la obtención de los polifenoles
- ◆ Obtención de la cantidad estimada de polifenoles recuperados luego de la reactivación del carbón agotado con base en la cantidad de alcohol producido por el ingenio cooperante.



Capítulo 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En el Capítulo 1 se dio una breve explicación de la importancia de la agroindustria cañera, de la cual se obtienen subproductos como las vinazas y el bagazo de caña que, con la tecnología adecuada, pueden ser aprovechados eficientemente. A su vez, las vinazas contienen polifenoles que, por sus propiedades antioxidantes y antivirales, en temas de salud tienen un valor agregado. A continuación, se presentan los conceptos y fundamentos teóricos en los que se apoyó esta tesis.

2.1. Vinazas

La vinaza se define como el efluente del fondo de la primera columna de destilación en la producción de alcohol a partir de la fermentación de una materia prima, en este caso, el jugo o las mieles finales de la producción de cristales de azúcar (Zúñiga-Cerón y Gandini-Ayerbe, 2013). 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, anualmente en México se producen 648,000 m³ de estos efluentes líquidos (Castro-González, 2004; CEDRSSA, 2020). Sus características físicas y químicas dependen, en primera instancia, de su fuente de procedencia. Por ejemplo, las vinazas de la caña de azúcar, como ya se mencionó, se caracterizan por su alto contenido de 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 el vino. La composición de estas, además, depende de la variedad y el grado de maduración de la caña, del sustrato empleado, del tipo y la eficiencia del proceso de obtención de la fuente de carbono, de la fermentación y de las características del proceso de destilación aplicado (Contreras-Contreras, 2019; Tapie y col., 2016). Por lo anterior y por su elevada temperatura, bajo pH, color café intenso —atribuido a 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 (Tapie y col., 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, lo cual puede disolver algunos metales. Los sólidos suspendidos presentes en ellas, además de restringir la penetración de la luz por la turbidez que producen, 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).

2.1.1. Caracterización química de las vinazas

Es importante en todo proceso caracterizar el sistema. Casi siempre se conocen los valores finales y, en el caso de las aguas residuales estos valores están determinados por normas nacionales e internacionales. Por esta razón es importante caracterizarlas al principio, para saber qué valores se incumplen y el proceso que hay que llevar a cabo para estabilizarlas. Además, sirve como comparativo para saber cómo afecta un proceso a los parámetros de seguimiento, lo que sugiere la caracterización después de cualquier tratamiento. En la Tabla 2.1, se muestra una compilación de la caracterización de vinazas de caña hecha por diversos autores, modificada de Contreras-Contreras (2019) con datos más recientes.

2.2. Procesos anaerobios

Ante la necesidad de utilizar las vinazas por su agresividad al ambiente, existen diferentes opciones adoptadas 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, 2016b). Una de las opciones de interés para la presente investigación es la producción de gas metano a través de la biotransformación anaerobia. En ella intervienen una serie de reacciones de degradación, que son realizadas por varios procariontes en ausencia de oxígeno (Madigan y col., 2015).



Tabla 2.1. Caracterización de vinazas de caña de azúcar (Modificado de Contreras-Contreras, 2019)

Parámetro	Rincón-Acelas, 2008	Rincón-Acelas, 2008	Detor-Méndez y Hernández-Segoviano, 2012	Jiménez y col., 2006	Robles-González y col., 2012	Robles-González y col., 2012
Alcalinidad (mgCaCO ₃ /L)	ND	ND	ND	6000	ND	ND
Azufre (mg/L)	9.85*10 ⁻³ %	7.28*10 ⁻³ %	2.628	ND	ND	ND
Carbono (mg/L)	4.47%	4.55%	2.638	ND	ND	ND
Cloruros (mg/L)	5 230	4 700	5.5*10 ⁻⁴	ND	ND	ND
Conductividad eléctrica (µS/cm)	26 500	21 867	ND	ND	3.9	2.6
DBO ₅ (mgO ₂ /L)	98 250	66 825	61 440	ND	22 000	26 500
DQO (mgO ₂ /L)	116 250	99 879	72 448.85	80 500	60 560	56 230
Fenoles (mg AG/L)	ND	ND	ND	540	521	478
Fosfatos (mg/L)	ND	ND	ND	ND	850	290
Fructosa (mg/L)	ND	ND	ND	ND	25.4	14.8
Hidrógeno (mg/L)	6.77%	5.64%	ND	ND	ND	ND
NTK (mg/L)	6.10%	5.35%	1.0027	1 800	843	660
Ph	4.28	4.34	4.986	5.2	3.6	3.7
SDT (mg/L)	83 683	76 806	ND	ND	ND	ND
SST (mg/L)	7 591	8 834	ND	3 600	3 905	3 130
SSV (mg/L)	5 884	6 625	ND	2 500	2 500	1 130
ST (mg/L)	91 227	85 340	65 591.996	109 000	43 450	26 830
STV (mg/L)	63 792	63 745	36 099.33	79 000	ND	ND
Sulfatos (mg SO ₄ ²⁻ /L)	8 150	7 057	ND	ND	947	308
Sulfuros (mg S ²⁻ /L)	69	24	0.5366	ND	ND	ND

ND: No disponible; AG: Ácido gálico; NTK: Nitrógeno Total Kjeldahl; DBO₅: Demanda bioquímica de oxígeno; DQO: Demanda química de oxígeno; SDT: Sólidos disueltos totales; SST: Sólidos suspendidos totales; SSV: Sólidos suspendidos volátiles; ST: Sólidos totales; STV: Sólidos totales volátiles

Los estudios realizados hasta ahora dividen al proceso en cuatro grandes etapas mostradas en la Figura 2.1: (1) La hidrólisis, en la cual la materia orgánica compleja se hidroliza en compuestos solubles de menor masa molecular; (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, 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).

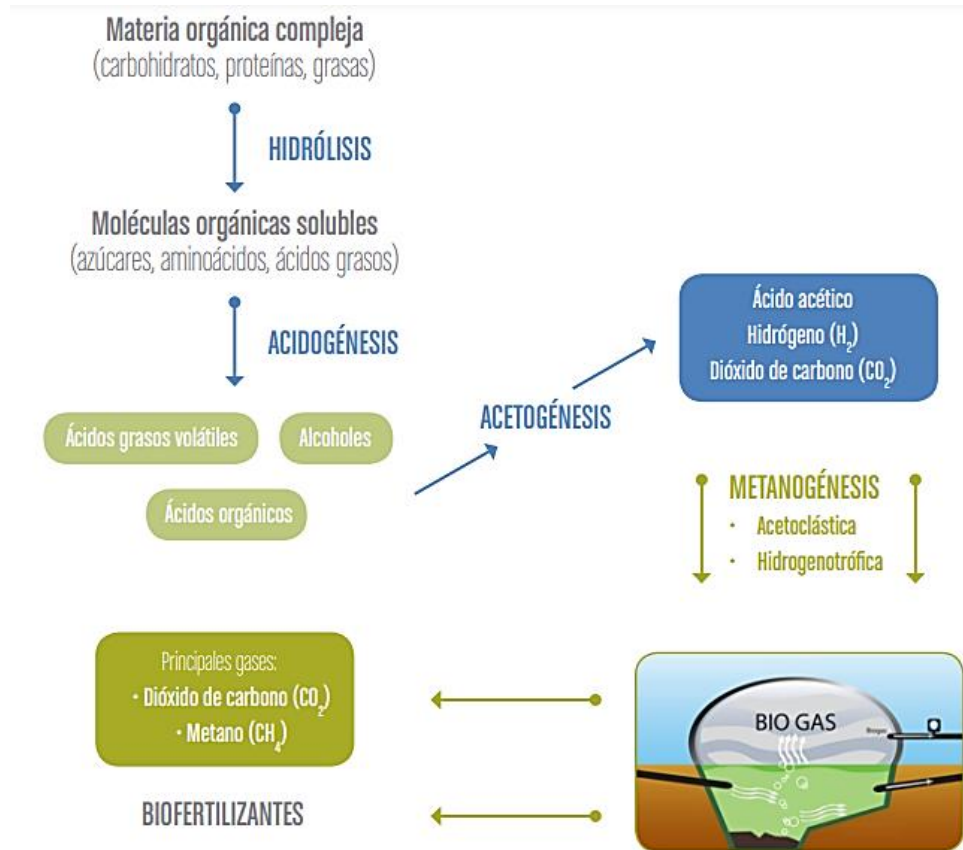


Figura 2.1. Etapas de la degradación anaerobia en un biorreactor con producción de biogás y biofertilizante (FAO, 2019)

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 demanda bioquímica de oxígeno (DBO) muy alta, tal como sucede con las vinazas y los residuos de fibras y celulosa procedentes de las industrias lácteas y alimentarias (Madigan y col., 2015). En la Figura 2.2 se puede observar el funcionamiento de los sistemas anaerobios, al igual que los dos productos finales: El efluente y el biogás. El efluente corresponde al agua residual tratada con menor contenido de materia orgánica y a la biomasa bacteriana producida. El biogás, por



otro lado, es una mezcla formada principalmente por CH_4 y CO_2 , con pequeñas cantidades de H_2S , H_2 y NH_3 . La composición final del gas depende tanto del sustrato utilizado como del funcionamiento del sistema de digestión (Cubero-Madriz, 2011). El biogás es una fuente de energía renovable que tiene menos efectos al problema del cambio climático. Se considera que tiene un poder calorífico de aproximadamente 6.5 a 7 kW/m^3 , 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 y 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 que los lodos o biomasa que se producen pueden ser usados como mejoradores de suelos (FAO y col., 2020).

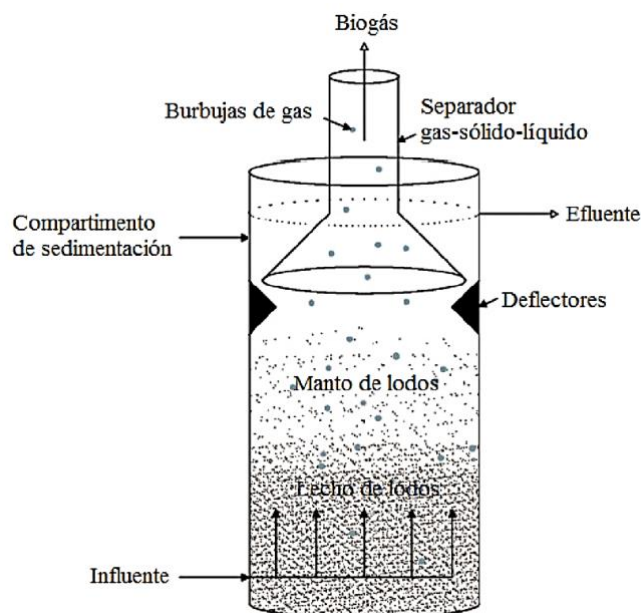


Figura 2.2. Reactor de lecho de lodos de flujo ascendente, RALLFA, y su funcionamiento (Guardía-Puebla, 2012)

Los procesos anaerobios han ganado popularidad aún con las desventajas que presentan, las cuales se muestran en la Tabla 2.2. A estas se le suman las



problemáticas que surgen 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).

Tabla 2.2. Ventajas y desventajas del tratamiento anaerobio (Crombet-Grillet 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 carbonosa y nitrogenada ◆ Menor costo de instalaciones, ya que no es necesario suministrar oxígeno por lo que el proceso es más económico y tiene menor requerimiento energético, además de producir bajas cantidades de lodos si se compara con las tecnologías aerobias ◆ Se puede implementar en sistemas compactos que requieren menor área de terreno que los sistemas aerobios 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Es más sensible a compuestos tóxicos inhibidores ◆ En muchos casos, se requiere mayor cantidad de producto carbonoso 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 dificulta el tratamiento de grandes volúmenes de aguas residuales y dificultades para biotransformar los compuestos disueltos en aguas residuales con bajas concentraciones ◆ Por lo general, se requiere de un postratamiento ya sea para descargar en los cuerpos receptores o para su reutilización

2.2.1. Características y funcionamiento de los RALLFA

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

Los reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA o *UASB*, en inglés), que son utilizados comúnmente para el tratamiento de vinazas, no cuentan con ningún soporte para la proliferación biológica (Merino-Núñez y



Valderrama-Lara, 2017), pero han demostrado tener una eficiencia del 75% que, es buena, pero, comparada con el de lecho fluidificado con soporte SIRAN cuya eficiencia es del 97%, es menor (Castro-González, 2004). Dentro de él se separan las distintas fases: (1) Biológicas—lecho o cama de lodos—, (2) líquida —lecho o manto de lodos— y (3) gaseosa —parte superior—. En este proceso, descrito en la Figura 2.2, 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 CH₄ y CO₂ (Contreras-Contreras, 2019; Merino-Núñez y Valderrama-Lara, 2017), dichos gases provocan una circulación interior que colabora en la formación y mantenimiento de los gránulos. El gas libre y el gas liberado de las partículas se capturan en una bóveda de gases, instalada en la parte superior del reactor. El líquido, que contiene algunos sólidos residuales y algunos de los gránulos biológicos, se conduce a una cámara de sedimentación donde se separan los sólidos residuales. Los sólidos separados se conducen a la superficie del manto de lodo a través del sistema de deflectores. Para mantener el manto de lodos en suspensión, es necesario que la velocidad de flujo ascendente tenga un valor entre 0.6 y 0.9 m/h (Lorenzo y Obaya, 2006). Por ello, el separador gas-sólido-líquido, es fundamental para lograr un buen funcionamiento del reactor a fin de mantener un lodo sedimentable (en su mayoría granular), un efluente clarificado (libre de gases y partículas) y unos gases adecuadamente separados (Caicedo-Messa, 2006).

2.2.2. Manejo de los RALLFA

La operación del reactor está basada en el seguimiento (*monitoreo*) y control de distintos parámetros y variables. Estos se encuentran relacionados ya sea con el agua residual, el lodo, el reactor, el contacto del agua residual con el lodo o 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. En la Tabla A.1, se hace una breve descripción de dichos parámetros y cómo intervienen en el



tratamiento anaerobio. Asimismo, en la Tabla A.2 se exponen algunas de las razones por las que, en los últimos años, ha habido una tendencia a pasar al rango termofílico para conseguir una mayor velocidad del proceso. En dicha tabla se puede ver que las ventajas del rango termofílico son mayores que las desventajas si se tiene especial cuidado en el control de variables y parámetros (Anexo A).

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, tiempo de residencia hidráulica 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, el cual consiste en introducir el influente al sistema y procurar mantener las condiciones idóneas para el desarrollo de la biomasa anaerobia y es sumamente importante para tener éxito durante la biotransformación (Castro-González, 2004; Pacheco y Magaña, 2003).

Para este trabajo que inicialmente estaba pensado para desarrollarse en los laboratorios de la Facultad de Química, se tienen reactores anaerobios trabajando a las temperaturas de 45, 55 y 65°C, por lo que, de haberse llevado a cabo de forma experimental, el arranque no hubiese representado un problema. Los detalles acerca del arranque se pueden encontrar en el Anexo A, donde se hizo una compilación de algunas consideraciones que se deben tener en cuenta si no se dispone de reactores en operación. Esto, principalmente, porque 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 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, 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). En la Tabla A.3 se pueden observar las dos etapas que conlleva el arranque de los biorreactores anaerobios—la adaptación de la biomasa mesófila al agua residual en condiciones mesófilas y la adaptación del inóculo mesófilo a condiciones mesofílicas intermedias y termofílicas—.

2.3. Polifenoles

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 DBO₅ (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 (Linero-Gil y Guzmán-Carrillo, 2012), en donde se recuperen los compuestos fenólicos recalcitrantes presentes en las vinazas tratadas anaerobiamente y que conforman una parte de dicha materia orgánica.

La caña de azúcar tiene una serie de compuestos que al reaccionar a lo largo del proceso de obtención de azúcar y etanol le confieren color al jugo, tales como la clorofila y los compuestos fenólicos formados durante la concentración de los jugos, cuya presencia puede determinar, por diferentes vías, el desarrollo de otros compuestos de color. A esto se le suma que los glúcidos tienen la capacidad de participar en reacciones químicas que promueven la aparición de tonalidades pardas o cafés, fenómeno que se conoce como “pardeamiento” u oscurecimiento. En el jugo de la caña de azúcar, dicho oscurecimiento se produce inmediatamente después de la extracción y se relaciona con la formación de melanoidinas de la reacción de Maillard entre los glúcidos reductores y las proteínas y aminoácidos presentes en la caña de azúcar. Aunque también puede deberse a la caramelización (o pirólisis) de los glúcidos, la cual ocurre cuando se alcanza y sobrepasa el punto de fusión de un carbohidrato sencillo (mono o diglúcido) o cuando se calienta un jugo para producir un jarabe de azúcar en presencia de catalizadores ácidos o



básicos, siempre en ausencia de grupos amino (Arias-Giraldo y López-Velasco, 2019; Jiménez y col., 2014).

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; Jiménez y col., 2014).

2.3.1. Posibles usos e importancia

Los polifenoles son sustancias que pueden inhibir o reducir la actividad de los microorganismos, tanto de las plantas depuradoras como de los que ataquen 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 y simultáneamente, para evitar el impacto ambiental que representarían al ser descargados al ambiente (Contreras-Contreras, 2019).

A los polifenoles se les han atribuido diversos beneficios para la salud como antioxidantes, antiinflamatorios, vasodilatadores y por sus propiedades antivirales, antiparasitarias y antibacterianas (Contreras-Contreras, 2019; Delgado-Bautista, 2016). En la Figura 2.3 se muestran las principales causas de muerte en el mundo, en el año 2019. Muchas de ellas también aparecen en la Figura 2.4, lo que quiere decir que los polifenoles tienen beneficios en el tratamiento o cura de enfermedades importantes, que reducirían un gran número de muertes en el mundo, por lo que deben ser analizados.



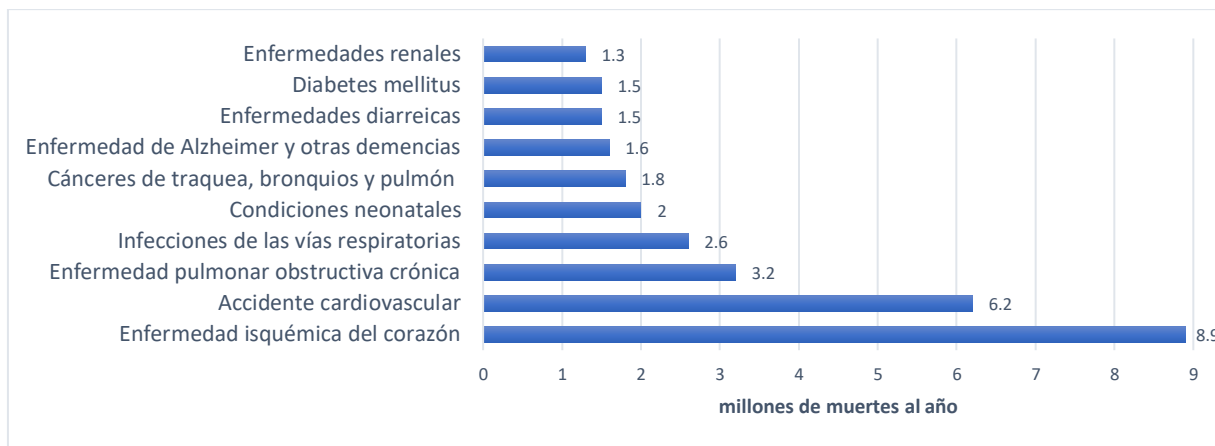


Figura 2.3. Las principales causas de muerte en el mundo, en el año 2019 (Adaptada de OMS, 2020)

Aunado a lo anterior, según Ledezma-González (2018), existen antecedentes que demuestran la actividad antiviral contra diferentes virus de ARN como de ADN por parte de diferentes polifenoles. De haber solucionado el problema de biodisponibilidad, hubieran sido parte fundamental en la investigación contra la enfermedad por coronavirus 2019 (COVID-19), causado por el virus del síndrome respiratorio agudo severo tipo-2 (SARS-CoV-2) de ARN monocatenario positivo, que fue declarada una pandemia en marzo de 2020. Las tasas de letalidad se estiman entre 1 y 3%, afectando principalmente a los adultos mayores y a aquellas personas con comorbilidades, como hipertensión, diabetes, enfermedad cardiovascular y cáncer, entre otras (Accinelli, 2020; Díaz-Castrillón y Toro-Montoya, 2020; Mhatre, 2021).

2.4. Carbón activado

El carbón activado (CA) es un material que, como su nombre lo indica, 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 y col., 2012).



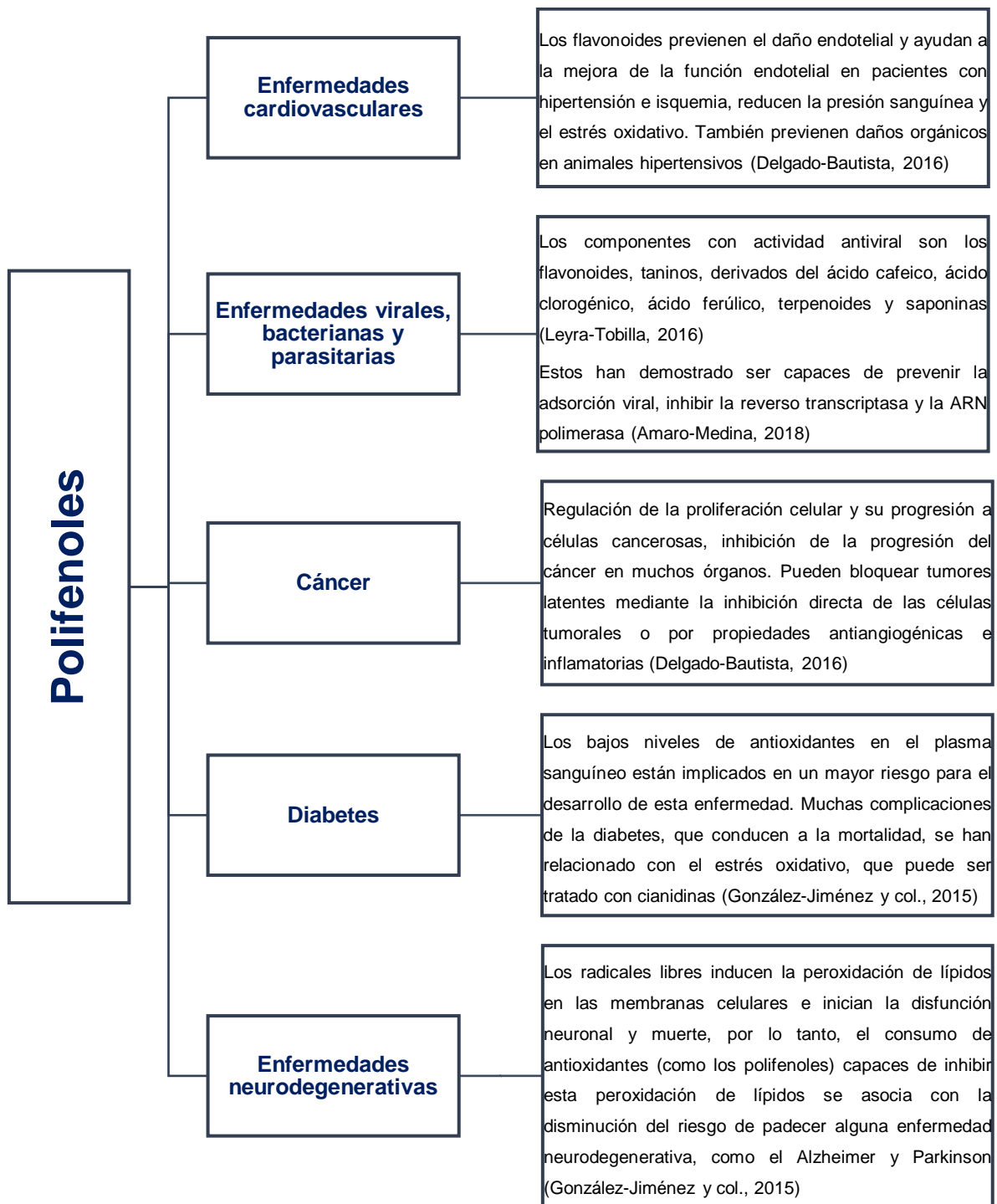


Figura 2.4. Principales enfermedades en las que la presencia de polifenoles aporta beneficios a la salud

El CA es un adsorbente muy versátil, porque el tamaño y distribución de sus poros en la estructura carbonosa pueden ser controlados para satisfacer las necesidades de tecnología actual y futura. El área superficial del CA varía dependiendo de la



materia prima y el proceso de activación (Solís-Fuentes y col., 2012). Además, puede reutilizarse mediante una reactivación.

Todos los átomos de carbón en la superficie de un cristal son capaces de atraer moléculas de compuestos que causan color, olor o sabor deseables o indeseables; la diferencia con un CA consiste en la cantidad de átomos en la superficie disponibles para realizar la adsorción. En otras palabras, la activación de cualquier carbón consiste en "multiplicar" el área superficial creando una estructura porosa. Por todo ello, cuando se desea remover una impureza orgánica que causa color, olor o sabor indeseables, normalmente la adsorción con CA puede ser la técnica más económica y sencilla (CLARIMEX, 2022). Los carbones activados son utilizados generalmente en procesos de descontaminación de aguas, recuperación de solventes, 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 de industrias refinadoras de petróleo, carboníferas, transformadoras de plástico, cuero, pintura, farmacéuticas y del acero. La adsorción de compuestos fenólicos con CA es uno de los métodos más usados, especialmente para efluentes con concentraciones bajas y moderadas (Ojeda y col., 2019).

2.4.1. Materias primas para su obtención

La producción de carbones activados, obtenidos a partir de diversos precursores carbonosos, se ha incrementado notablemente en las dos últimas décadas. Se ha generado una creciente demanda internacional por estos adsorbentes, debido a la necesidad de utilizar nuevas fuentes de materia prima, con disponibilidad segura y de bajo costo, centrándose especialmente en la biomasa renovable (Acevedo y col., 2007). Por lo tanto, la elección del precursor para la elaboración de carbón es fundamentalmente una función de su disponibilidad, precio y pureza. Sin embargo, el proceso de fabricación del CA y su posible aplicación también deben ser considerados. Los materiales lignocelulósicos han sido utilizados ampliamente para



la elaboración de CA ya que presentan una adecuada capacidad de adsorción. Entre estos 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 (Solís-Fuentes y col., 2012).

2.4.2. Activación física y química del carbón activado

La preparación de este tipo de material se lleva a cabo a través de procesos físicos o químicos, mediante la interacción con gases o la adición de productos químicos, respectivamente (Ojeda y col., 2019).

2.4.2.1. Activación física

La activación física envuelve dos pasos: (1) La pirólisis y (2) la posterior reacción del producto pirolizado con una atmósfera de gases oxidantes a una temperatura entre 800 y 1000°C para extraer átomos de carbono de la estructura y favorecer la formación de poros en el material carbonoso (Ospina-Guarín y col., 2014).

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. Este es sometido a una molienda, 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 en material resistente a altas temperaturas) por donde se hacen pasar corrientes de gas a temperaturas entre 800 a 1000°C. Como gases para la activación se emplean el vapor de agua, CO₂, Cl₂, 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 CO₂ 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 (Grisales-Motato y Rojas-Arrieta, 2016).

2.4.2.2. Activación química (Grisales-Motato y Rojas-Arrieta, 2016)

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, CA, se filtra y se seca.

Los procedimientos químicos de activación son obtenidos por impregnación empleándose sustancias deshidratantes como el $ZnCl_2^3$, H_3PO_4 , H_2SO_4 , H_3BO_3 , HNO_3 , K_2S , $MgSO_4$ y Na_2SO_4 , etc.

2.4.3. 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. Estas fuerzas de atracción son conocidas como "fuerzas de van der Waals". Por lo tanto, al ser un fenómeno que ocurre en la superficie mientras mayor área superficial disponible tenga un sólido, mejor adsorbente podrá ser (CLARIMEX, 2022).

Existen dos tipos de fenómenos de adsorción. Uno de ellos es la adsorción física (o fisisorción) —mecanismo principal por medio del cual se retienen contaminantes

³ La activación química con H_3PO_4 ha desplazado prácticamente al $ZnCl_2$, debido a que este último reactivo tiene un fuerte impacto ambiental



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. No obstante, la desorción puede llegar a ser muy lenta haciendo que la capacidad original del CA en estos casos no se restablezca en su totalidad—. El otro fenómeno es la adsorción química, que a diferencia de la adsorción física, que no provoca una modificación en la estructura química de los átomos y de las moléculas que intervienen en ella, implica una reacción química entre la superficie del adsorbente y el componente adsorbido (llamado por algunos(as) autores(as) *adsorbato* por copiar el término en inglés), por lo que las moléculas retenidas por este otro mecanismo se desprenden con estructuras moleculares completamente distintas a las que tenía el componente adsorbido originalmente (CARBOTECNIA, 2022).

También existen moléculas inorgánicas que no son adsorbidas pero que sí precipitan y se depositan en la superficie del CA y cuya eliminación no responde a los métodos de desorción de moléculas adsorbidas físicamente (CARBOTECNIA, 2022).

2.4.3.1. Factores que afectan la adsorción en carbón activado

Existen diversos factores que afectan el proceso de adsorción, estos dependen del tipo de carbón activado utilizado, así como la forma y los precursores de obtención; del componente adsorbido y de las condiciones del medio, tales como el pH y la temperatura. En la Tabla 2.3 se mencionan los más importantes.

Tabla 2.3. Propiedades del CA, del componente adsorbido y del medio de adsorción, que afectan el proceso de adsorción (Modificado de Sevillano y Torres, 2013)

Propiedades	Afectación en el proceso de adsorción
Relacionadas con el tipo de CA	<ul style="list-style-type: none"> ◆ La adsorción es función de la superficie total del adsorbente, ya que cuanto mayor sea esta superficie, se dispone de un mayor número de fuerzas residuales no equilibradas para la adsorción ◆ Las diferencias en la química superficial y en los constituyentes de las cenizas pueden afectar la adsorción, especialmente en fase líquida



Propiedades	Afectación en el proceso de adsorción
Relacionadas con el componente adsorbido	<p>Todo tipo de moléculas orgánicas se adsorbe bien en el CA. No así las inorgánicas⁴</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ La adsorción de compuestos orgánicos es más fuerte al aumentar su masa molecular, mientras el tamaño de la molécula no rebasa el del poro ◆ Las moléculas orgánicas no polares se adsorben con mayor fuerza que las polares ◆ Las moléculas orgánicas ramificadas se adsorben con mayor fuerza que las lineales ◆ La mayoría de las moléculas orgánicas que tienen ligados átomos de cloro, bromo o yodo se adsorben con mayor fuerza ◆ La adsorción en fase líquida aumenta al disminuir la solubilidad del componente adsorbido
Relacionadas con el líquido que rodea al CA	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Generalmente aumenta la adsorción al disminuir el pH ◆ En la mayoría de los casos a mayor temperatura, por el aumento de la solubilidad del componente adsorbido, la adsorción disminuye

2.4.4. Reactivación de carbón agotado (CARBOTECNIA, 2022)

Afortunadamente, gracias a que el mecanismo principal de adsorción en el CA es la fisisorción y a que la estructura grafitica 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, como los mencionados en la Tabla 2.4, con los que pueden eliminarse compuestos adsorbidos de diversa naturaleza y sustancias orgánicas e inorgánicas depositadas sobre la superficie del CA⁵.

⁴Existen excepciones tales como los molibdatos, los cianuros de oro, el dicianuro de cobre, el cloruro de mercurio, el yodo y las sales de plata, entre otros (Sevillano y Torres, 2013)

⁵Cuando un carbón activado se retira del proceso en el que se utilizó, independientemente de que se deseche o de que se vaya a reactivar, recibe el nombre de carbón agotado



Tabla 2.4. Métodos de reactivación del carbón agotado (CARBOTECNIA, 2022)

Método	Descripción del proceso
Reactivación térmica	Es el método de reactivación más utilizado. Se lleva a cabo en hornos, los más comunes son los rotatorios y los de múltiples etapas de calentamiento directo (mediante la introducción de gases de combustión). La reactivación se lleva a cabo a temperaturas de entre 500 y 800°C. Los compuestos volátiles se desprenden del carbón agotado y los no volátiles se pirolizan y gasifican
Reactivación con vapor de agua	Este proceso consiste en hacer circular vapor de agua a través de la cama de carbón, normalmente en dirección descendente, para que los condensados no se acumulen. El vapor ocasiona que las moléculas orgánicas volátiles se desprendan del carbón. Este método de reactivación se aplica en la recuperación de solventes contenidos en corrientes de aire. Luego de que se desorbe el solvente, la mezcla de este y del vapor de agua se separa por decantación o por destilación, dependiendo de si son miscibles o no. Mientras mayor sea la presión del vapor utilizado para reactivar al carbón agotado, mayor será su temperatura y, por lo tanto, podrá desorber compuestos menos volátiles
Reactivación con gases calientes	Es igual que el proceso anterior, pero no se utiliza vapor de agua sino algún otro gas. En el caso de que se requiera reactivar sin la interferencia de algún gas oxidante, la desorción se lleva a cabo mediante un gas inerte que se calienta de manera indirecta. Este gas puede ser nitrógeno. Cuando se busca reactivar a una menor temperatura para evitar afectar al compuesto adsorbido, la reactivación puede llevarse a cabo al vacío
Reactivación biológica	La reactivación biológica del carbón agotado granular sucede de manera natural en el tratamiento de aguas con un contenido relativamente alto de compuestos orgánicos biodegradables. Tal es el caso, por ejemplo, del tratamiento terciario de aguas residuales. Las bacterias que se desarrollan en la superficie del carbón se alimentan de la materia biodegradable adsorbida y la convierten en dióxido de carbono y en nuevas bacterias. Estas últimas se eliminan al retrolavar el carbón agotado. Un carbón agotado también puede reactivarse biológicamente cuando se ha retirado del proceso de adsorción en el que se aplicó, aunque este proceso es poco frecuente
Reactivación con ácido	Las sales inorgánicas que precipitan en el CA no se eliminan mediante una reactivación térmica. No obstante, pueden eliminarse por disolución en una solución ácida. Cuando la precipitación de sales es alta, el carbón toma un color grisáceo o blanquecino al secarse. Esta reactivación se lleva a cabo con HCl, ya que es el ácido fuerte con mayor capacidad para disolver compuestos inorgánicos. Se prepara la solución de alrededor de 5% en masa, y el carbón se inunda en esta. El tiempo varía dependiendo de qué tan incrustado se encuentra el carbón. Para lograr mayor rapidez en el proceso, se calienta la solución a 60 – 70°C. Una reactivación adecuada devuelve al carbón su color negro original



Tabla 2.4. Métodos de reactivación del carbón agotado (CARBOTECNIA, 2022)

Método	Descripción del proceso
Reactivación mediante la modificación del pH en solución acuosa	Cuando la capacidad de retención de un compuesto adsorbido específico depende del valor del pH, puede aprovecharse esta condición para desorberlo. Por ejemplo, la adsorción de fenol 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%. 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 tiene muy pocas aplicaciones

Es importante mencionar que, aunque pueden reactivarse, tanto carbones activados granulares como en polvo, hasta ahora, en muy pocos casos ha sido rentable la reactivación de los últimos, por la dificultad en el manejo de los polvos, que suelen ser menores a la malla 200. La rentabilidad en el proceso de reactivación de CA granular depende de la resistencia mecánica de sus gránulos. Mientras más baja es, aumenta el porcentaje de pérdida de material por rompimiento debido a los esfuerzos mecánicos a los que se somete, empezando por su manejo y transporte.

2.5. Isotermas de adsorción

Las isotermas de adsorción son una relación de dependencia, a una temperatura constante, de la cantidad de componente adsorbido por masa unitaria de adsorbente, con respecto a la concentración del componente adsorbido en equilibrio.

2.5.1. Isotherma de Langmuir (Contreras-Contreras, 2019)

La ecuación de Langmuir (Ecuación 2-1) describe la adsorción en monocapa, en la cual el componente adsorbido cubre al adsorbente, que tiene una superficie uniforme, hasta que se forma una monocapa —momento en el que el proceso se detiene—. Para esto, se realizan tres suposiciones: (1) Existen un número fijo de sitios activos para la adsorción, (2) la adsorción es reversible y (3) alcanza una condición de equilibrio.



$$q = \frac{q_0 * C}{K + C}$$

Ecuación 2-1

La variable 'q' representa la cantidad de componente adsorbido en el equilibrio, 'C' es la concentración en el equilibrio, 'q₀' es una constante empírica y 'K' es la constante de adsorción de Langmuir. Si al graficar 1/q contra 1/C se obtiene una línea recta, la relación K/q₀ representa la pendiente y 1/q₀ representa la ordenada al origen.

2.5.2. Isoterma de Freundlich (Lazo, 2008)

Para que un proceso se ajuste a la ecuación de Freundlich (Ecuación 2-2), se debe suponer que la superficie del adsorbente es energéticamente heterogénea, conformada por grupos de sitios de adsorción de energías características; que no existen interacciones laterales entre las moléculas adsorbidas y que solamente se adsorbe una monocapa.

$$q = k_F C^{1/n}$$

Ecuación 2-2

donde 'k_F' es la constante de capacidad de adsorción y 'n' la constante de intensidad de adsorción. Si al graficar ln(q) contra ln(C) se obtiene una línea recta, con un valor de la pendiente igual a '1/n', y el exponente natural de la ordenada al origen proporciona el valor de 'k_F'.



Capítulo 3

METODOLOGÍA

Con el fin de alcanzar el objetivo propuesto para la presente investigación teórica se llevó a cabo una estrategia de trabajo que se explicará a detalle en este capítulo. Debido a la contingencia de salud pública por el SARS CoV-2 y al planteamiento de la Dirección de la Facultad de Química de no realizar actividades presenciales en los laboratorios, todas las actividades presentadas a continuación se realizaron desde casa y consistieron en una investigación teórica de las redes internacionales y del banco de tesis de la UNAM (TESIUNAM, DGB).

3.1. Materiales

- ◆ Dispositivo electrónico con acceso a internet (*laptop* y *smartphone*)
- ◆ Paquetería office (Word y Excel)
- ◆ Software Aspen Plus (Aspen Adsorption)
- ◆ Aplicación android Xodo
- ◆ Cuaderno de notas digital

3.2. Métodos

En la Figura 3.1 se muestra el diagrama de bloques de las actividades que se realizaron para sustituir el trabajo experimental por una investigación bibliográfica. A continuación, en los puntos 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3 y 3.2.4 se menciona en qué consistieron las cuatro actividades fundamentales.

3.2.1. Obtención de material bibliográfico de los temas de interés

Esta parte se apoyó de un dispositivo electrónico con acceso a internet (*laptop*) y consistió en una investigación teórica en el banco de tesis de la UNAM (TESIUNAM, DGB), las redes internacionales y nacionales, para obtener información sobre:



- ◆ Las condiciones para obtener la mayor cantidad de metano en el biogás a las temperaturas a las que se están operando los biorreactores, es decir, lograr que el proceso de biodegradación anaerobia sea eficiente
- ◆ Los requerimientos para producir carbón activado a partir del bagazo de caña y la eficiencia del mismo
- ◆ Las condiciones óptimas para lograr una adsorción eficiente de los polifenoles haciendo uso de carbón activado de bagazo de caña
- ◆ Los métodos de desorción de polifenoles adsorbidos en el carbón activado
- ◆ Simulación en Aspen Plus (Aspen Adsorption) del proceso de obtención de polifenoles, así como de las variables, constantes y componentes a utilizar.

Estas fuentes se guardaron en una carpeta “FUENTES BIBLIOGRÁFICAS TESIS PROFESIONAL” para después poder consultarlas con mayor facilidad. Si la fuente era distinta a un documento *pdf*, en un documento *Word* se copiaba para después consultarla.

3.2.2. Revisión del material bibliográfico recabado en el punto anterior

Después de un día de investigación, los documentos guardados en la carpeta “FUENTES BIBLIOGRÁFICAS TESIS PROFESIONAL” se abrieron para leerlos con ayuda de la aplicación Xodo, desde un *smartphone*, ya que esta misma permite subrayar ideas importantes con distintos colores, lo que ayudó a jerarquizar o agrupar las ideas. Asimismo, si se notaba alguna carencia de información durante la lectura, en el cuaderno de notas se escribía para después consultarlo.

3.2.3. Compilación de la información relevante para la presente investigación

Las ideas más relevantes subrayadas con ayuda de la aplicación Xodo se copiaron en un documento con el título “Resumen Tesis Profesional”. Otros que también se consultaron fueron los que se elaboraron en la Estancia Académica y que se nombraron con el distintivo 043 al inicio, para que pudieran ser consultados



posteriormente. A todos estos, se les agrupó en una carpeta con el nombre “Documentos Tesis profesional”.

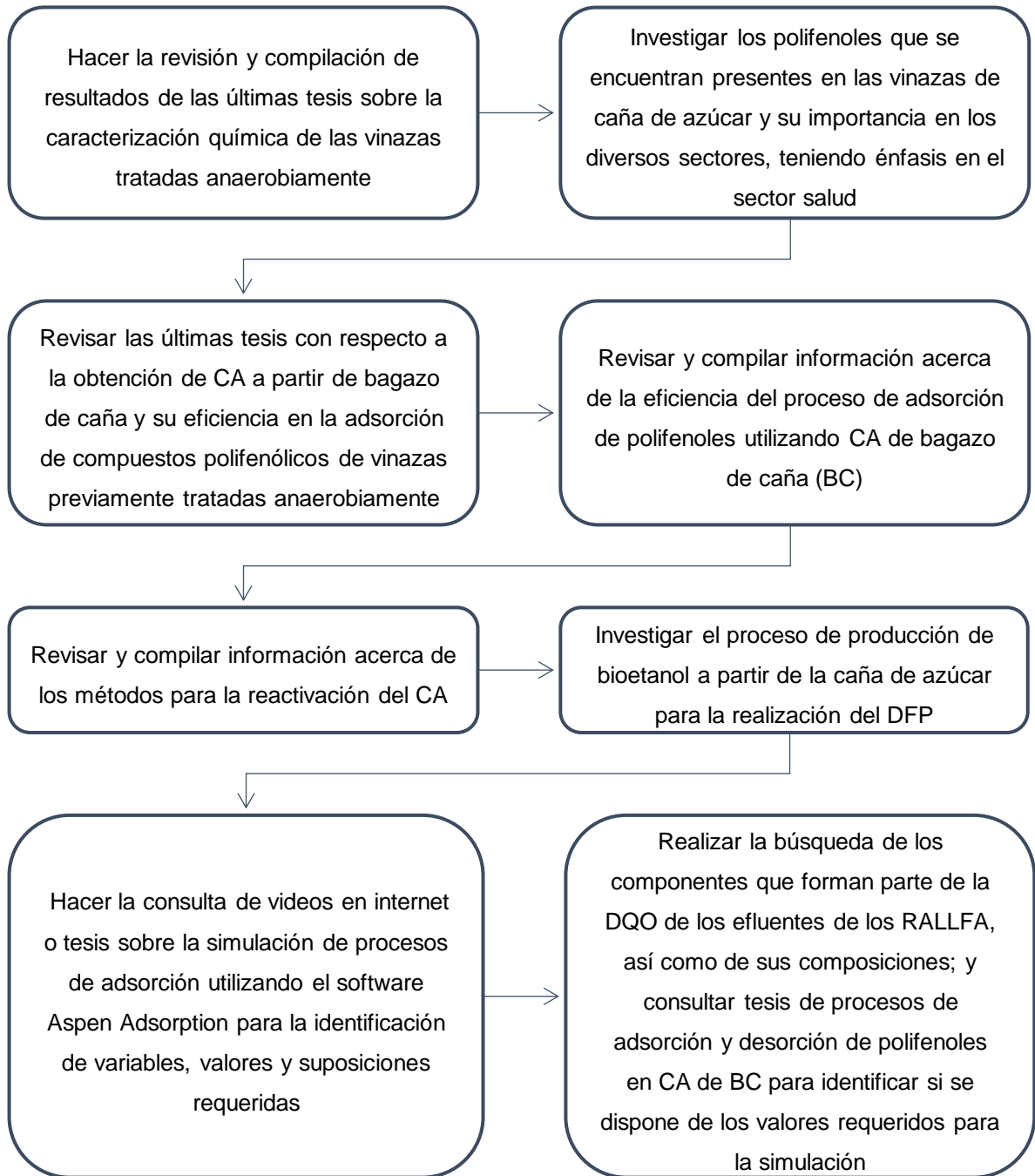


Figura 3.1. Diagrama de flujo de las actividades realizadas



3.2.4. Elaboración del diagrama de flujo de proceso, DFP, con el cálculo de la cantidad de polifenoles recuperada

Para realizar el DFP fueron necesarias 12 horas de trabajo, en las que se hizo una investigación del proceso de bioetanol a partir de la caña de azúcar. En un documento *Word* se fue plasmando el diagrama, el cual describe el proceso desde la preparación de la materia prima, la caña de azúcar, hasta la obtención de polifenoles puros. Tal diagrama después se pasó a un formato de imagen, tal como se puede apreciar en la Figura 4.10.

Posteriormente, con ayuda de la literatura consultada, se hizo un balance de materia a partir de la cantidad de alcohol producido por día en un ingenio azucarero-alcoholero particular, en el que se estimó la cantidad de polifenoles adsorbidos y desorbidos, ya que con los datos recabados no fue posible hacer el balance de materia utilizando el software Aspen Plus.



Capítulo 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este Capítulo, después de una ardua investigación y de comprender la importancia que tiene para la sociedad, la economía y el ambiente, la separación de los polifenoles presentes en las vinazas, se muestran los resultados como una propuesta a la solución del problema que actualmente representan en México los polifenoles en el agua residual, especialmente tomando en cuenta que, para cuestiones de salud, son sumamente importantes.

4.1. Obtención de carbón activado a partir de bagazo de caña

El carbón activado, como se mencionó en el Capítulo 2, es un excelente adsorbente y puede obtenerse mediante activación química o activación física, a partir de biomasa vegetal, como el bagazo de caña. En las Figuras 4.1 y 4.2 se describen los métodos físicos y químicos por los cuales Solís-Fuentes y col. (2012) activaron la materia carbonosa, misma que utilizaron para la eliminación de color del jugo de la caña, el cual es consecuencia de la presencia de polifenoles y melanoidinas. Para ello, evaluaron la eficiencia del CA de cascarilla de café, cáscara de naranja y bagazo de caña.

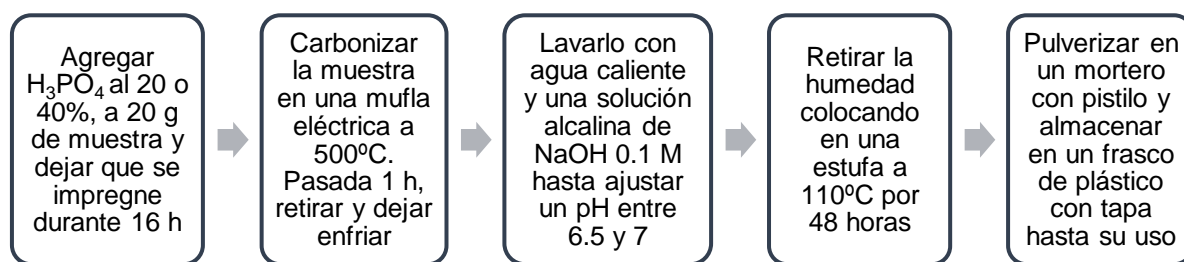


Figura 4.1. Proceso de obtención de carbón activado a partir de la activación química con H_3PO_4 (Solís-Fuentes y col., 2012)

También, cuantificaron la cantidad de CA obtenida según el tipo de activación, el tipo de precursor y, para el caso de activación química, del tipo de agente de



activación y sus diferentes concentraciones. En las Tablas 4.1 y 4.2 se muestran los resultados que obtuvieron.

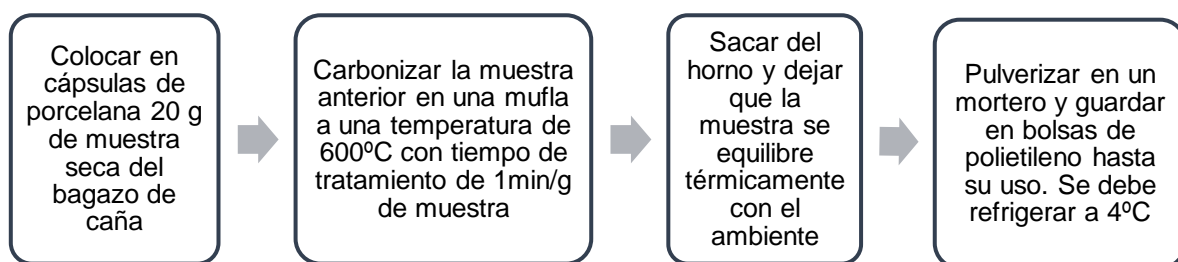


Figura 4.2. Proceso de obtención de carbón activado a partir de la activación física (Solís-Fuentes y col., 2012)

Tabla 4.1. Rendimientos de carbón activado según precursor y agente de activación (Solís-Fuentes y col., 2012)

Modo de activación	Precursor	CA (gramos*)	Rendimiento%
Física	Cáscara de naranja (CN)	3.668	18.34
	Cascarilla de café (CC)	3.401	17.01
	Bagazo de caña (BC)	5.262	26.31
Química	CN con H ₃ PO ₄ al 85%	11.316	56.58
	CN con H ₃ PO ₄ al 40%	8.350	41.75
	CC con H ₃ PO ₄ al 85%	8.257	41.29
	CC con H ₃ PO ₄ al 40%	6.700	33.50
	BC con H ₃ PO ₄ al 40%	9.716	48.58
	BC con H ₃ PO ₄ al 20%	7.020	35.10
	BC con ZnCl ₂ al 20%	4.006	20.03

*Cantidad de CA en gramos a partir de 20 g de precursor seco

De acuerdo con estos resultados se puede decir que, en general, la activación química produce cantidades mayores de carbón activado. Los rendimientos más altos utilizando 20 gramos de precursor se lograron con la cáscara de naranja tratada con ácido fosfórico al 85% (56.58% de CA) seguido por el bagazo de caña activado con ácido fosfórico al 40% (48.58% de CA), de donde se obtuvieron 11.316 y 9.716 gramos de CA, respectivamente.

En lo que se refiere a la remoción de color, la cual depende de varios factores como: El tipo de jugo, el tipo de precursor considerado, el método de activación y la



concentración de la sustancia empleada como activador; los mayores porcentajes de remoción fueron obtenidos utilizando CA de BC con H₃PO₄ al 40%. Según se muestra en la Tabla 4.2, se logró remover hasta el 98.2 y el 77% del color presente en el jugo de primera extracción y del existente en el jugo clarificado, respectivamente. Una efectividad notable también fue la del CA de CC impregnado con ácido fosfórico al 40%; este material logró adsorber hasta el 86.1% del color del guarapo y hasta el 82.1% de los cromóforos del jugo clarificado de caña. Con esto, se puede decir que la activación química de los carbones elaborados tuvo globalmente el efecto de dotarlos de mayor efectividad para adsorber los compuestos de color del jugo comparado con la activación física; sobre todo durante el tratamiento del jugo de primera extracción o guarapo.

Tabla 4.2. Remoción de color del jugo de caña con los carbones activados preparados (Solís-Fuentes y col., 2012)

	Color removido (UI)		% Remoción de color	
	Guarapo	Jugo clarificado	Guarapo	Jugo clarificado
Cáscara de naranja (CN)	-39 100	-33 718	-84.27	-376.82
CA de CN activado físicamente	30 790	1 415	71.94	15.37
CA de CN con H ₃ PO ₄ al 85%	31 029	4 512	71.83	48.44
CA de CN con H ₃ PO ₄ al 40%	19 277	6 523	45.90	68.52
Cascarilla de café (CC)	1 200	994	2.73	9.74
CA de CC activado físicamente	31 060	1 529	72.57	15.80
CA de CC con H ₃ PO ₄ al 85%	39 098	6 790	83.78	67.94
CA de CC con H ₃ PO ₄ al 40%	39 274	7 432	86.13	82.17
Bagazo de caña de azúcar (BC)	26 994	-1 883	39.20	-16.36
CA de BC activado físicamente	16 600	2 942	36.09	29.13
CA de BC con H ₃ PO ₄ al 40% ¹	38 463	7 444	98.20	75.66
CA de BC con H ₃ PO ₄ al 40% ²	35 289	7 432	98.03	76.39
CA de BC con H ₃ PO ₄ al 40% ³	36 477	7 545	97.27	77.55
CA de BC con H ₃ PO ₄ al 20%	33 419	7 713	90.81	76.38
CA de BC con ZnCl ₂ al 20%	1 700	-18	4.57	-0.20

¹: t = 16 h, V_{H₃PO₄} = 150 mL; ²: t = 12 h, V_{H₃PO₄} = 150 mL; ³: t = 14 h, V_{H₃PO₄} = 100 mL

Para el caso del CA de BC activado químicamente, la capacidad de remoción no dependió significativamente de las cantidades añadidas de ácido fosfórico ni del tiempo de reposo durante la impregnación del bagazo previa a la carbonización.



Los autores también estudiaron la capacidad de remoción de compuestos de color utilizando como adsorbentes solamente a los materiales precursores, los cuales tuvieron un efecto pequeño o contrario en la remoción de color de los jugos de acuerdo con la Tabla 4.2.

4.2. Caracterización de la vinaza antes y después del tratamiento anaerobio

El tratamiento anaerobio tiene la finalidad de reducir la cantidad de materia orgánica e inorgánica que se encuentra contenida en las vinazas de la caña de azúcar, de manera que puedan ser reutilizadas sin causar un impacto negativo en el ambiente. Según lo que se quiera estudiar o analizar y para el mismo control y estabilización del sistema se debe llevar a cabo el seguimiento de diferentes parámetros para su caracterización. En el Anexo B, Tabla B.1, se encuentran los parámetros que midió Contreras-Contreras (2019), de los cuales se destaca la cantidad de polifenoles, y las técnicas analíticas utilizadas para dar seguimiento a cada uno de ellos. Dicha caracterización debe hacerse antes y después del tratamiento anaerobio para evaluar la eficiencia del tratamiento y también durante el proceso para su control.

Es importante mencionar algunos datos característicos sobre la vinaza cruda, que es la obtenida por el Ingeniero azucarero. El primero de ellos es que la composición es variable. A pesar de pertenecer a un mismo ingenio, las condiciones de operación son dinámicas haciendo que la formación de polifenoles pueda llegar a ser distinta, cambiando además sus componentes. Esto se puede visualizar en la Tabla 2.1, en la cual se hizo un compendio de las caracterizaciones realizadas por diversos autores, en donde Rincón-Acelas (2008) caracteriza a las vinazas en dos fechas diferentes y obtiene resultados distintos. Es por esta razón que no existen datos de estudios o investigaciones donde haya una caracterización por componente. Otro dato para tomar en cuenta es que tiene que ser diluida antes de ser tratada debido a la alta concentración de materia orgánica que contiene, ya que de no hacerlo se provoca inestabilidad en el sistema —cuando se incrementa la cantidad de vinaza



cruda en la alimentación, los microorganismos, causan su acidificación por la acumulación de ácidos grasos volátiles impidiendo que las arqueas metanogénicas proliferen y, consecuentemente, las cualidades energéticas del biogás disminuyan— (Castro-González, 2004). Una vez diluidas las vinazas, en la Facultad de Química de la UNAM se lleva a cabo la alimentación de los tres reactores que se encuentran a distintas temperaturas (45, 55 y 65°C). Como el tercero todavía está en su etapa de estabilización, los dos primeros son alimentados con una dilución cercana al 50% de la vinaza cruda, mientras que el de 65°C recibe un influente con una dilución del 25% de la vinaza cruda (de acuerdo con las recomendaciones de la Tabla A.3, para los casos en que la temperatura de los reactores es diferente a la que se adaptó el inóculo). En las Tablas 4.3 y 4.4 se muestra la caracterización física y química realizada por Contreras-Contreras (2019).

Tabla 4.3. Caracterización física y química de las vinazas antes del tratamiento anaerobio (Contreras-Contreras, 2019)

Parámetro		Vinaza cruda (VC)	Vinaza diluida (VD) de los reactores de 45 y 55°C	VD del reactor de 65°C
Temperatura	°C	17.02	18.47	19.473
pH		4.728	4.79	4.837
Conductividad eléctrica	mS/cm	20.211	11.24	6.689
Alcalinidad	mg CaCO ₃	1830.7	1 012.9	747.4
DQO	mg/L	66 791	33 363	17 579
DBO₅	mg/L	6 870	6 180	4 818
Sulfatos	mg/L	10 876.5	4 881	2 576.6
Sulfuros	mg/L	209.9	171	91.92
Fósforo total	mg/L	191.43	120.52	80.68
Ortofosfatos	mg/L	53.94	24.36	19.74
ST	mg/L	32 069	29 398	21 361
STV	mg/L	26 438	10 508	6 202
SST	mg/L	5 642	2 083	1 267
SSV	mg/L	1 517	705.6	583
Polifenoles	mg AG/L	8 600	3 622	2 400

Uno de los datos más relevantes es que, tal como se mencionó en el Capítulo 2, los polifenoles son sustancias recalcitrantes al tratamiento anaerobio y eso es lo que se



está aprovechando para su utilidad contra virus, bacterias y mohos que causan enfermedades. Por esta razón, aunque hubo una disminución del 58.35, 54.51 y 49.68% de la concentración medida como DQO inicial para los reactores de 45, 55 y 65°C, respectivamente, un 11% en promedio, correspondiente a los polifenoles y que forma parte de la DQO inicial, no se eliminó. Estos polifenoles son el 24.5% de la DQO de los efluentes, valor que se asemeja a lo encontrado en la literatura por Paz-Pino (2013), que es del 33%.

Tabla 4.4. Caracterización física y química de las vinazas después del tratamiento anaerobio (Contreras-Contreras, 2019)

Parámetro		Efluente del reactor de 45°C	Efluente del reactor de 55°C	Efluente del reactor de 65°C
Temperatura	°C	45.23	53.77	64.03
pH		7.721	7.802	7.529
Conductividad eléctrica	mS/cm	1.537	11.457	7.451
Alcalinidad	mg CaCO ₃	5189.8	4918.9	2848.8
Factor de alcalinidad		0.3103	0.306	0.516
DQO	mg/L	13.895	15.177	8.846
DBO ₅	mg/L	4.908	3.664	4.238
Sulfatos	mg/L	3.738.4	3.689.4	2.495.8
Sulfuros	mg/L	248.8	254.7	145.4
Fósforo total	mg/L	114.46	108.16	74.38
Ortofosfatos	mg/L	21.454	19.74	15.97
Biogás		214.23	192.86	79.75
ST	mg/L	20.419	20.958	13.458
STV	mg/L	10.252	10.286	6.100
SST	mg/L	4.813	4.438	2.100
SSV	mg/L	1.875	1.388	887.5
Polifenoles*	mg AG/L	3.689	3.222.2	2.266.7

*Los polifenoles se miden normalmente como equivalentes de ácido gálico, AG

4.3. Adsorción de polifenoles utilizando carbón activado

El tratamiento con CA es necesario y adecuado para eliminar el porcentaje de DQO que aportan los polifenoles a los efluentes de los RALLFA ya que, en varias investigaciones, como la que hicieron Solís-Fuentes y col. (2012), se ha observado que es un adsorbente con capacidad de adsorber hasta el 99% de los compuestos



de color (ver Figura 4.3). 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 puedan ser reutilizadas o depositadas adecuadamente en el ambiente.

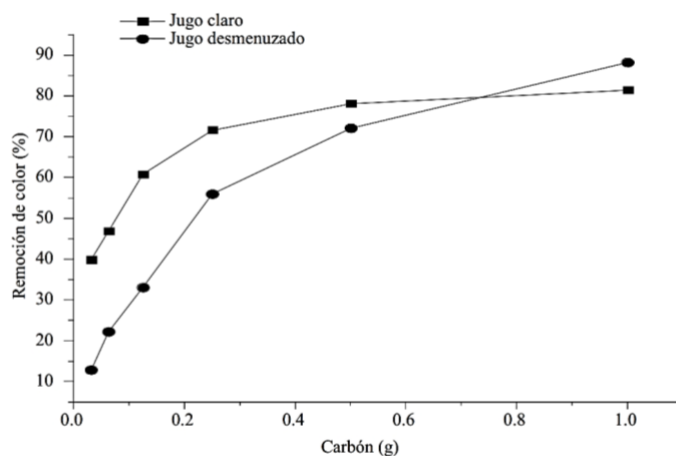


Figura 4.3. Efecto de la cantidad de CA en la remoción de color de jugo de caña de primera extracción o desmenuzado o guarapo y jugo clarificado (Solís-Fuentes y col., 2012)

Contreras-Contreras (2019) llevó a cabo la adsorción de los polifenoles utilizando carbón activado en polvo de origen vegetal marca Hycel —el cual poseía un diámetro de partícula menor a 1 mm, con poros con diámetros entre 15 a 25Å y con área superficial de 452 m²/g— y matraces Erlenmeyer, donde colocó muestras con diferentes concentraciones de ácido gálico (AG) a los que se añadieron cantidades diferentes de carbón activado. Todo el proceso se realizó a 20°C alcanzando el equilibrio en un máximo de 3.5 horas. Luego de esto, las muestras se filtraron utilizando un filtro Whatman No. 1 y, posteriormente, se centrifugaron a 3600 rpm para separar la fase sólida de la fase líquida. Finalmente, se utilizó el método Folin-Ciocalteu para cuantificar los polifenoles. Las mediciones espectrofotométricas se realizaron en un espectrofotómetro Rayleigh UV-1800.

Contreras-Contreras (2019) corroboró el hecho de que entre mayor fuese la cantidad de CA agregado a la muestra, mayor sería el % de remoción de polifenoles



de la muestra, tal como indicaron los estudios realizados por Solís-Fuentes y col. (2012) (ver Figuras 4.3 y 4.4).

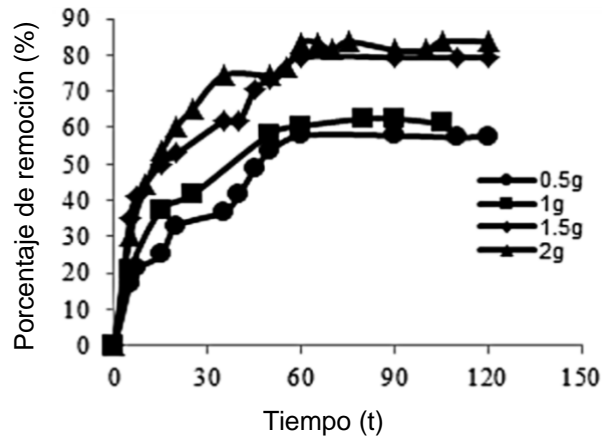


Figura 4.4. Influencia de la cantidad de CA en la eliminación de polifenoles (Ziati y col., 2017)

Asimismo, logró remover de las vinazas tratadas anaerobiamente el 45.5 y 70.2% 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 R^2 igual 0.991, de acuerdo con la Ecuación 4-1, de donde también pueden obtenerse las constantes 'q₀' y 'K'; seguido del modelo de Freundlich con una R^2 de 0.973.

$$\frac{1}{q} = 20.472 \cdot \frac{1}{C} + 0.0007 = \frac{K}{q_0} * \frac{1}{C} + \frac{1}{q_0} \quad \text{Ecuación 4-1}$$

Contreras-Contreras (2019), a partir de los resultados obtenidos, construyó una gráfica (ver Figura 4.5) con la que teóricamente se adsorben los polifenoles en un 99%. Para esto, es importante conocer la masa de la solución inicial para posteriormente elegir el número de etapas necesarias según la cantidad de carbón activado que se quiera o se pueda usar. Siempre debe tenerse en consideración que entre menos CA se utilice mayor será el número de etapas necesarias. Y, para recuperar eficazmente los polifenoles, en cada una de ellas se requerirá de su



desorción y la reactivación del CA, por lo que deben tomarse en cuenta estas operaciones para la determinación de los costos de producción de los polifenoles.

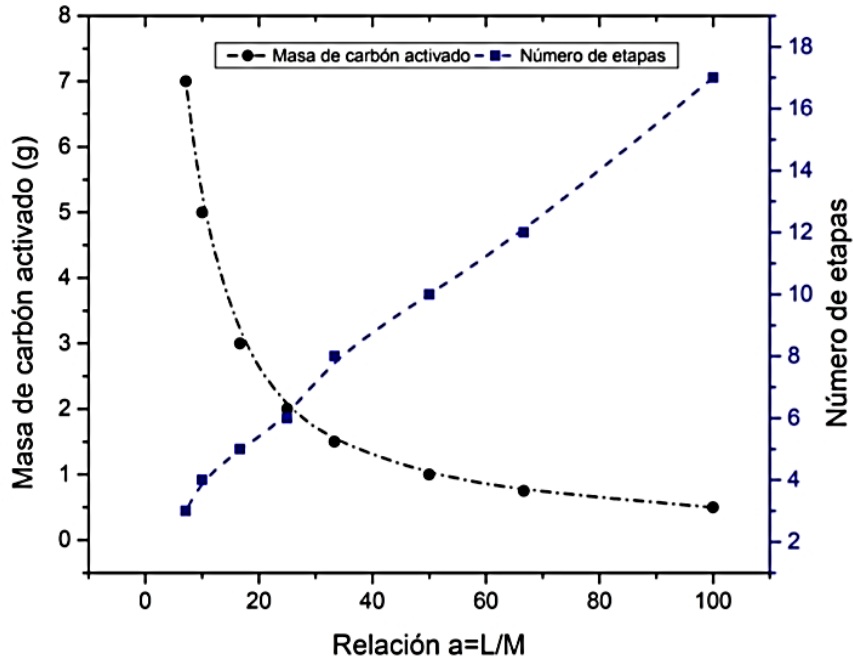


Figura 4.5. Masa teórica de CA utilizado y número de etapas en función de la relación L/M, donde L es la masa de la solución inicial y M la masa de carbón activado (Contreras-Contreras, 2019)

4.4. Método para la desorción de polifenoles

Los métodos de reactivación de carbón agotado se pueden clasificar en cuatro grupos principales según los mecanismos y agentes implicados: Reactivación térmica, reactivación química, reactivación microbiológica y reactivación mediante vacío. Los métodos microbiológicos y al vacío no son viables para la aplicación industrial, el primero porque requiere un largo tiempo y el último porque no está bien investigado en cuanto a rendimiento. En las industrias que hacen uso del carbón activado, prefieren realizar la reactivación térmica pese a que es muy costosa, debido a que la sustitución es casi el doble de cualquier otro tipo de reactivación (Kow y col., 2016).

Ziati y col. (2017) estudiaron la remoción de compuestos fenólicos de aguas residuales de almazara por adsorción sobre carbón activado preparado a partir de



residuos lignocelulósicos "semillas o 'huesos' o 'piedras' de melocotón" tratados térmicamente. Gracias al estudio que hicieron sobre la influencia del pH y la temperatura en el proceso de adsorción y a la investigación que realizaron Kow y col. (2016) sobre la desorción de compuestos fenólicos contenidos en la superficie del CA, que se describirá en los párrafos siguientes del presente apartado, fue posible elegir el método de reactivación del carbón activado. En las Figuras 4.6 y 4.7 se aprecia que el proceso de adsorción en CA se ve perjudicado a valores de pH básicos y a altas temperaturas. Esto quiere decir que, en esas mismas condiciones, el proceso de desorción se ve beneficiado, por lo que la reactivación química con solución básica representó una opción viable y que puede tener una aplicación industrial, aunque todavía a pequeña escala. Esto, además, ayudará a reducir los costos de sustitución y eliminación.

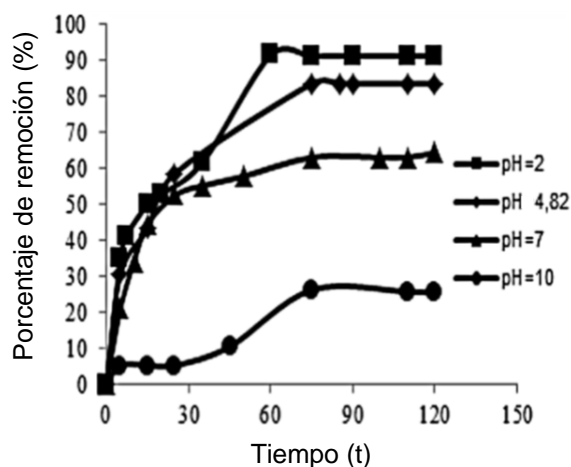


Figura 4.6. Influencia del pH en la eliminación de polifenoles (Ziati y col., 2017)

La metodología de Kow y col. (2016) consistió en utilizar una solución de hidróxido de sodio (NaOH) y agua caliente con una temperatura alrededor de 90°C. 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 es causante de 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 al 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.

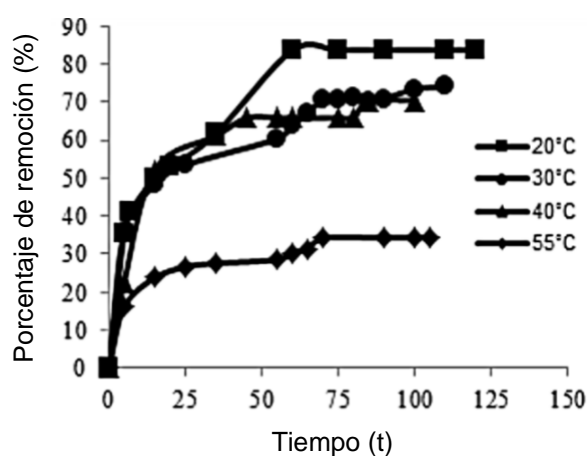


Figura 4.7. Influencia de la temperatura en la eliminación de polifenoles (Ziati y col., 2017)

Kow y col. (2016) concluyeron que la condición óptima de reactivación del carbón agotado es de 15 mL de 6N de solución de NaOH 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. Sin embargo, también trabajaron con un método de reactivación en columna. En las Figuras 4.8 y 4.9 se encuentran descritos los procedimientos que siguieron para poder reactivar el carbón agotado y con ello, desorber y recuperar los polifenoles.



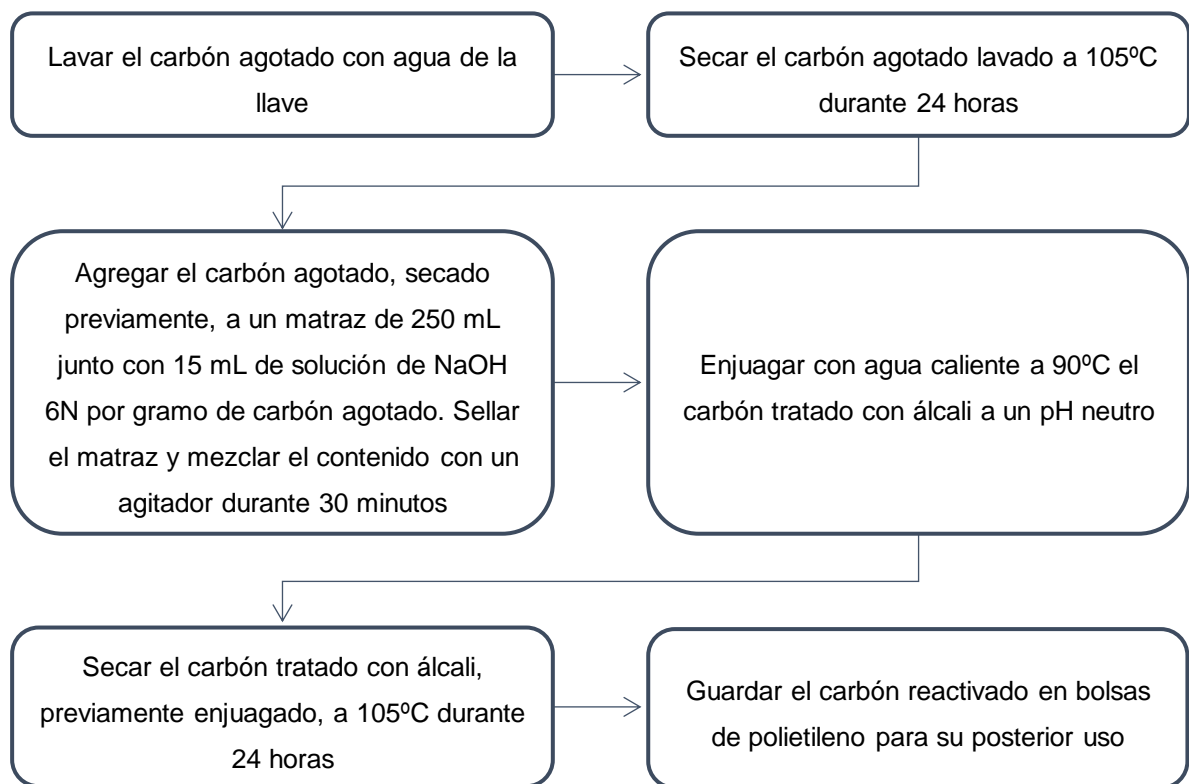


Figura 4.8. Procedimiento para la reactivación del carbón agotado por lotes (Kow y col., 2016)

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 4.5.

Tabla 4.5. Caracterización de los carbones reactivados con NaOH y agua caliente (Kow y col., 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

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 y col. (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*.

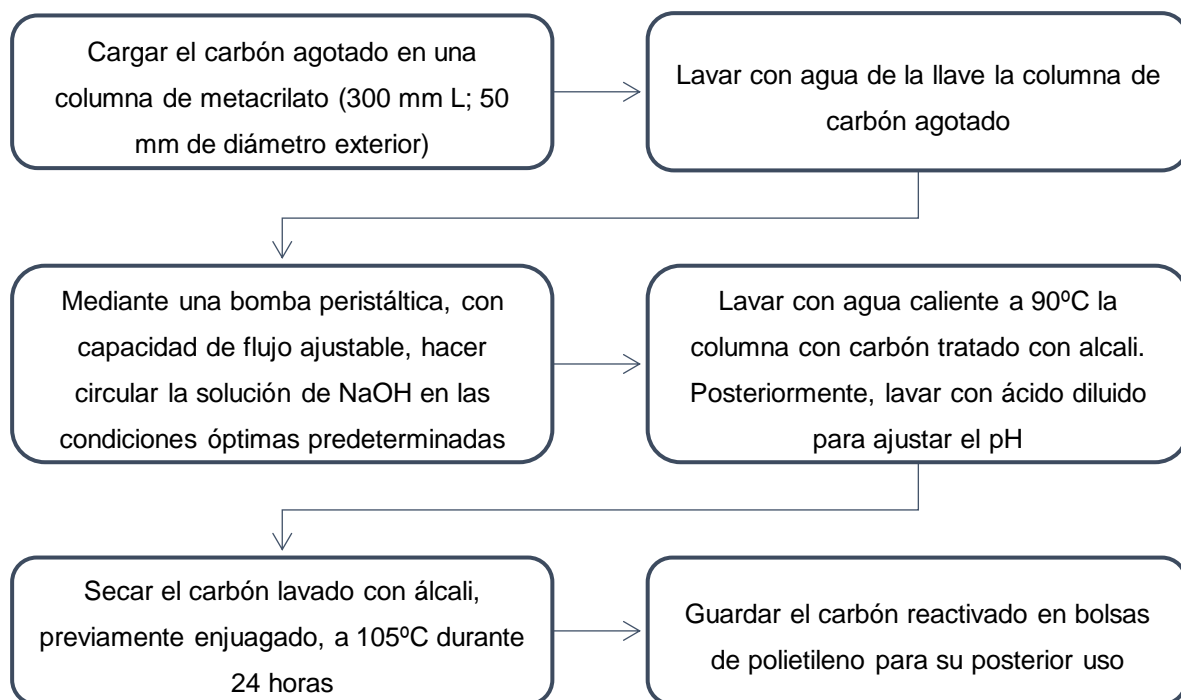


Figura 4.9. Procedimiento para la reactivación del carbón agotado en columna (Kow y col., 2016)

4.5. Diagrama de flujo de proceso, DFP

La producción convencional de etanol a base de jugo o melaza de caña de azúcar comprende tres etapas: Preparación de mostos, fermentación y destilación (ver Figura 4.10). Al llevarlas a cabo se obtienen productos finales como alcoholes potables, aguardientes, etc., cada uno con sus propias características de acuerdo con la calidad de la materia prima utilizada y la técnica usada para su destilación.

La preparación de mostos consiste en procesos que permiten que la materia prima llegue en condiciones óptimas a la fermentación (etapa 2), en la que se le agregan las levaduras, encargadas de actuar sobre los glúcidos fermentables,



específicamente para el caso del etanol, la glucosa, transformándolos en alcohol etílico y, deseablemente, pocos productos secundarios a la fermentación.

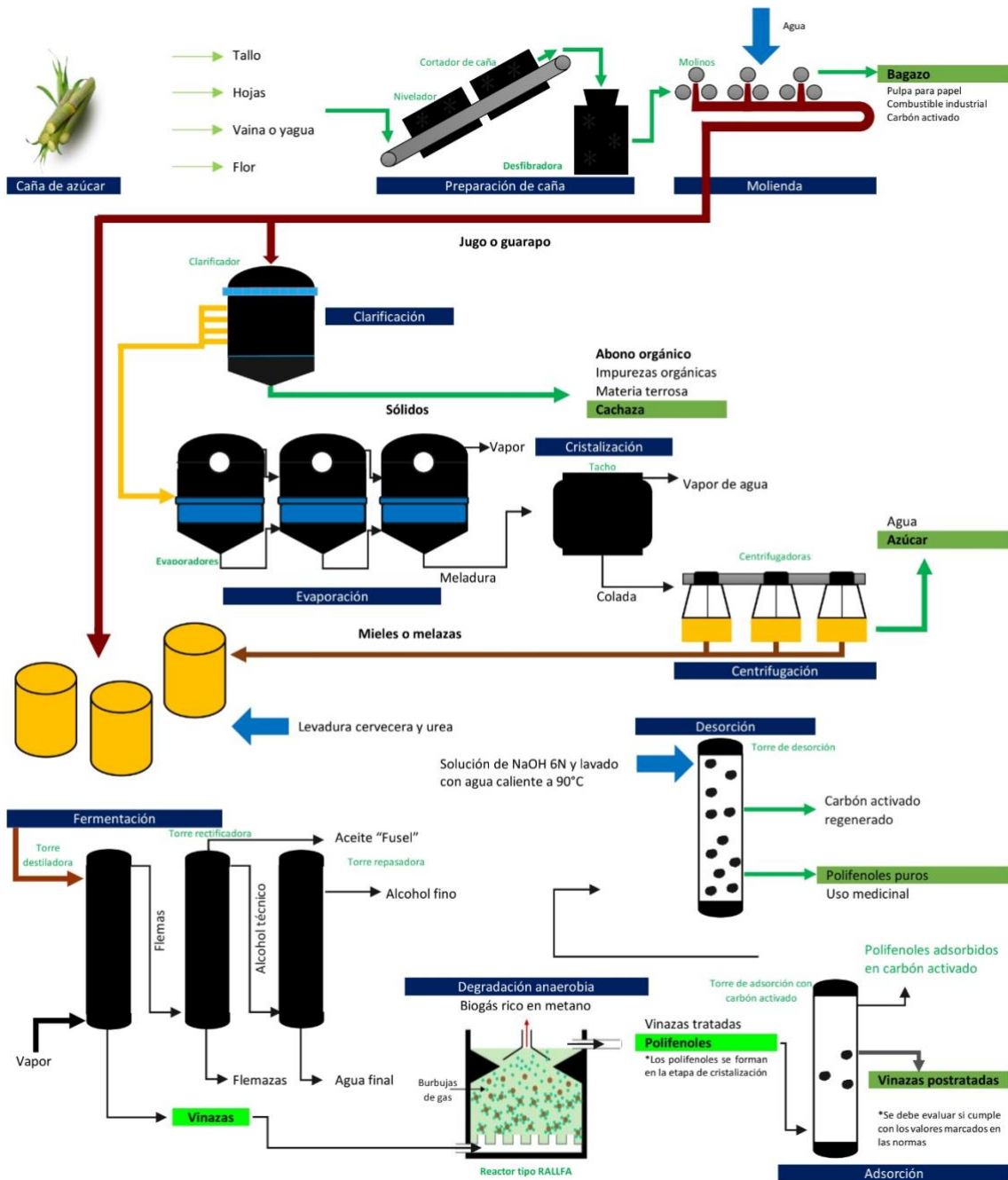


Figura 4.10. DFP para la obtención de biogás rico en metano y de polifenoles a partir de las vinazas obtenidas de la producción principal de azúcar de caña, de mieles y de etanol empleando reactores anaerobios seguidos de las operaciones de absorción y desorción con carbón activado de bagazo de caña de azúcar

El alcohol producido pasa por columnas de destilación con la finalidad de quitarle impurezas disueltas. De este proceso, del fondo de la primera torre de destilación, es de donde se obtienen las vinazas, las cuales salen en el fondo de la columna.

Las vinazas, como ya se mencionó en el apartado 2.1, son aguas que pueden llegar a ser perjudiciales para el ambiente y para los seres humanos debido a su composición; sin embargo, por la misma razón pueden ser muy bien aprovechadas si se emplean de forma adecuada. Uno de estos procesos es el tratamiento anaerobio, del que se elimina un porcentaje importante de materia orgánica carbonosa y nitrogenada biodegradable convirtiéndola en biogás rico en metano, siendo los polifenoles los únicos que no sufren ningún cambio significativo. Estos pueden ser removidos mediante adsorción con CA y pueden ser reaprovechados en su forma pura para tratamiento o cura de enfermedades respiratorias (Leyra-Tobilla, 2016), mediante la reactivación del carbón agotado.

Para verificar que los métodos de adsorción y desorción son adecuados, no solamente de forma teórica, será indispensable que primero se hagan estudios en el laboratorio. Posteriormente, con una simulación previa empleando todos los datos experimentales obtenidos, podrá hacerse una evaluación técnico-económica de prefactibilidad siguiendo los lineamientos clásicos de Peters y Timmerhaus (1980) y obteniendo la tasa interna de retorno del proceso completo para verificar su factibilidad técnico-económica (Bailey y Ollis, 1986).

4.6. Balances de materia

Para llevar a cabo un balance de materia empleando Aspen Plus (Aspen Adsorption) se pueden enfrentar diversas problemáticas para poder simular los procesos de adsorción y desorción correctamente, ya que deben conocerse varios valores y parámetros. A raíz de los problemas asociados con estos valores necesarios, se decidió no seguir haciendo la simulación, ya que solamente se podría realizar la del proceso de adsorción —con poca exactitud— y no del proceso de desorción, que



es el de interés para esta investigación. Es por ello por lo que en este apartado se explican los obstáculos encontrados y se da una breve introducción de la simulación del proceso de adsorción en Aspen Adsorption V11, ya que, aunque muchos autores han realizado la simulación, ninguno explica con detalle los pasos a seguir para realizarlo.

El primer paso es definir los componentes, para hacerlo se recomienda utilizar la carpeta 'Default' (ver Figura 4.11), ya que con esto no será necesario definir posteriormente los componentes en cada corriente. Para este punto, aunque luego de una ardua investigación se conocían los principales componentes de las vinazas que se encuentran en la Tabla 4.6, el problema surgió cuando había que definir las composiciones en las que se encontraban, no en las vinazas, sino después del tratamiento anaerobio, de lo cual no se encontraron datos de investigaciones que las haya caracterizado de esta forma. La mayoría de los investigadores prefieren trabajar con los valores de DQO y ácido gálico, lo cual es viable cuando se trabaja de forma experimental por la variable y compleja composición de este tipo de aguas residuales. Muchos de los datos con los que tampoco se contaba era la caracterización completa del carbón activado de bagazo de caña. Solís-Fuentes y col. (2012) solamente habían caracterizado el carbón activado midiendo tres parámetros (la humedad, las cenizas y la densidad), con los que no era suficiente para simular el proceso en Aspen.

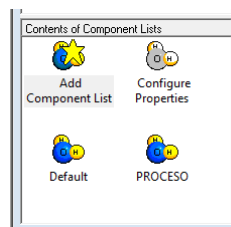


Figura 4.11. Lista de componentes 'por default' de Aspen Adsorption

Para futuros trabajos en los que se quiera realizar una simulación del proceso, para ver si es viable a nivel industrial, el paso siguiente es caracterizar cada una de las corrientes líquidas, ya sea la de alimentación —que contiene el efluente del reactor



RALLFA— o la de producto —que es un agua residual con menos DQO debido a la remoción de polifenoles. Para el caso de la corriente de alimentación es necesario especificar las composiciones de los componentes, el flujo volumétrico, la temperatura y la presión. Debido a que la adsorción se favorece a bajas temperaturas y bajos valores de pH, se recomienda hacerlo en medio ácido y a una temperatura entre 20 y 25°C. En el caso de la corriente de salida, solamente es necesario especificar la temperatura y la presión. Lo más complejo de la simulación es el llenado de datos para la columna de adsorción. Para ello, se tienen que definir cuántas capas de adsorbente tendrá la cama o lecho y configurarlas. De la configuración es necesario conocer el modelo al que se ajusta el proceso. Según Contreras-Contreras (2019) y Solís-Fuentes y col. (2012), las isothermas que se pueden utilizar para describir el proceso son las del modelo de Langmuir o las del modelo de Freundlich, ya que cualquiera de las dos tiene una R^2 mayor o igual a 0.97. En cuanto a las constantes y variables se requieren: (1) Para el carbón activado de bagazo de caña: La altura de la capa adsorbente, el diámetro interior de la capa adsorbente, el vaciado interpartículas y la densidad sólida; mientras que para cada uno de los componentes se requería de: El coeficiente de difusión constante, el coeficiente de transferencia de masa constante y el parámetro isotérmico.

Tabla 4.6. Principales ácidos grasos, aminoácidos, carbohidratos, alcoholes, polifenoles y otras sustancias contenidas en las vinazas (Contreras-Contreras, 2019; Pallares-García, 2014; Rincón-Acelas, 2008)

Ácido graso	Aminoácido			Carbohidrato	Polifenol		Alcohol	Otros
Ácido acético	Ácido glutámico	Glicina	Serina	Hemicelulosa	Apigenina	Ácido ferúlico	Glicerol	Lignina
Ácido propiónico	Treonina	Histidina	Tirosina	Celulosa	Tricina	Ácido cafeico	Etanol	
Ácido butírico	Isoleucina	Arginina	Alanina		Luteolina	Ácido sinápico		
Ácido isovalérico	Cisteína	Leucina	Valina		Ácido húmico	Ácido tánico		
	Fenilalanina	Lisina	Ácido aspártico		Ácido p-cumárico	Melanoidinas		



Con todo lo anterior es posible correr la simulación. Si bien, se pudo haber hecho una aproximación de las composiciones a partir de la DQO no removida obtenida por Contreras-Contreras (2019), así como el uso de las constantes y caracterización del carbón activado utilizado por el mismo autor; sin embargo, esto tendría un porcentaje de error muy grande, no solamente por la aproximación de composiciones suponiendo que se encontrarán en la misma proporción en el agua pretratada, sino también porque el CA comercial y el CA de BC tienen diferente porcentaje de cenizas. En la Tabla 4.7 se puede apreciar que el % de cenizas del carbón preparado usando como precursor el bagazo de caña es mayor que para el carbón activado comercial (34 vs. 4.5). Y, de acuerdo con el apartado 2.4.3.1, la cantidad de cenizas contenidas en el CA afecta el proceso de adsorción, a causa de que el alto contenido de cenizas, humedad y material volátil presentes en el CA empleado, disminuyen su capacidad efectiva como adsorbente (Castellar y col., 2017). Por ello, sería de esperarse que el porcentaje de remoción de polifenoles fuera menor utilizando carbón activado de bagazo de caña en comparación con el de CA comercial. Esta es una oportunidad de mejora experimental.

Tabla 4.7. Características del carbón activado del bagazo de caña y de un carbón activado comercial (Solís-Fuentes y col., 2012)

Carbón activado	% de humedad	% de cenizas	Densidad(g/cm³)
CA de BC	17.9	34	0.370
CA comercial	13.3	4.5	0.395

Para reducir tal error, se hizo el balance de materia de forma manual en Excel (ver Anexo C), lo que implicó no tener que suponer composiciones. Aunque cabe aclarar que se utilizaron los porcentajes de remoción obtenidos por Contreras-Contreras (2019) que implican el uso de CA comercial. Para hacer el balance, se buscó la producción de alcohol etílico del ingenio azucarero-alcoholero seleccionado, la cual consiste en poco menos de 96 millones de litros de alcohol por día, y considerando que por cada litro de alcohol se producen 12 litros de vinazas, es posible saber los litros de vinaza que produce el ingenio azucarero-alcoholero por día (ver Tabla 4.8).



Tabla 4.8. Ejemplo: Producción del ingenio azucarero-alcoholero seleccionado

Etanol producido	Vinazas producidas
L/día	L/día
95,769,573	1,149,234,876

Para la caracterización de las vinazas crudas provenientes del ingenio azucarero y con la finalidad de esta investigación, únicamente se consideraron los valores de DQO y polifenoles contenidos en ellas. Dichos valores se encuentran en la Tabla 4.9 y, junto con los datos de la Tabla 4.8, sirvieron para calcular los flujos másicos a la entrada de los RALLFA. Dado que las eficiencias de remoción de los reactores a 45 y 55°C no muestran diferencias estadísticamente significativas según Contreras-Contreras (2019) y que el reactor a 65°C solamente estaba recibiendo el 25% de vinazas, en la Tabla 4.10 se considerarán 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:

$$0.0086 \frac{\text{kgAG}}{\text{L vinaza}} \left(\frac{1,149,234,876 \text{ L vinaza}}{\text{día}} \right) = 9,883,420 \frac{\text{kgAG}}{\text{día}}$$

Tabla 4.9. Caracterización de las vinazas crudas según la producción del ingenio azucarero-alcoholero seleccionado y los datos obtenidos por Contreras-Contreras (2019)

DQO	Polifenoles
kgO ₂ /L de vinaza	kgAG/L de vinaza
0.06679	0.0086

Polifenoles medidos como equivalentes de ácido gálico, AG

Tabla 4.10. Caracterización de las vinazas diluidas al ingresar al RALLFA a 45°C según la producción del ingenio azucarero-alcoholero seleccionado y los datos obtenidos por Contreras-Contreras (2019)

DQO	Polifenoles
kgO ₂ /día	kgAG/L de vinaza
76,758,547 (76,800,000)	9,883,420 (9,900,000)

Polifenoles medidos como equivalentes de ácido gálico, AG



Para poder obtener los flujos máxicos después del tratamiento anaerobio que se muestran en la Tabla 4.12, se calculó el porcentaje de remoción con base en la caracterización inicial y final del trabajo de Contreras-Contreras (2019). En la Tabla 4.11 se puede ver que el porcentaje de remoción para la DQO fue casi del 60%, contrario al caso del % de remoción los polifenoles que dio un valor negativo, para la temperatura de 45°C (y positivo pero poco significativo para las temperaturas de 55 y 65°C). Esto se esperaba, ya que según el apartado 2, los polifenoles son sustancias que inhiben la actividad de los microorganismos anaerobios.

4.11. Porcentaje de remoción de contaminantes en el RALLFA a 45°C según lo obtenido por Contreras-Contreras (2019)⁶

DQO del influente mgO ₂ /Lsolución	DQO del efluente mgO ₂ /Lsolución	% remoción
33,363	13,895	58.35

Polifenoles del influente mg AG/Lsolución	Polifenoles del efluente mg AG/Lsolución	% remoción
3,622	3689	-1.85

Polifenoles medidos como equivalentes de ácido gálico, AG

Tabla 4.12. Caracterización del efluente del RALLFA a 45°C

DQO kgO ₂ /día	Polifenoles kgAG/Lde vinaza
31,968,348 (32,000,000)	10,066,244 (10,100,000)

Polifenoles medidos como equivalentes de ácido gálico, AG

Con respecto del proceso de adsorción, en el apartado 4.3 y en la Figura 4.5, se muestra la cantidad de etapas teóricas requeridas con base en la cantidad de carbón activado a utilizar, con la premisa de que cualquier valor dentro de la gráfica eliminará el 99.9% de los polifenoles. Contreras-Contreras (2019) logró que se adsorbieran el 70.2% de los polifenoles contenidos en sus muestras utilizando 5

⁶ Cabe mencionar que, para hacer el cálculo, se consideró que el reactor de 45°C estaba siendo alimentado con un 50% de vinazas crudas y 50% de vinazas postratadas (que ya no contienen carbono biodegradable), ya que de esta forma el volumen de la solución es igual al de las vinazas.



gramos de carbón activado, por lo que, para calcular el número de etapas requeridas se tomó en cuenta el valor experimental y no el valor teórico. Según los resultados de la Tabla 4.13 se requieren un total de 18 etapas para recuperar casi por completo los compuestos fenólicos, considerando que en la mayoría de las etapas se requeriría de una reactivación.

Tabla 4.13. 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	Etapa 7	Etapa 8	Etapa 9
2,999,740.74	893,922.74	266,388.98	79,383.92	23,656.41	7,049.61	2,100.78	626.03	186.56
Etapa 10	Etapa 11	Etapa 12	Etapa 13	Etapa 14	Etapa 15	Etapa 16	Etapa 17	Etapa 18
55.59	16.57	4.94	1.47	0.44	0.13	0.04	0.01	~0.00

Polifenoles medidos como equivalentes de ácido gálico, AG

Una vez adsorbidos, los polifenoles deben ser desorbidos con la finalidad de que sean utilizados para fines medicinales. Kow y col. (2016) hicieron el proceso de reactivación con énfasis en la capacidad de adsorción que tendría el carbón agotado luego de ser reactivado. Haciendo pruebas de yodo y azul de metileno, obtuvieron que la capacidad de adsorción es del 90 y 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 9,000,000 (9,059,619.69) kgAG/día, de acuerdo con la Tabla 4.14.

Tabla 4.14. Cantidad de polifenoles desorbidos (kgAG/día)

Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Etapa 5	Etapa 6	Etapa 7	Etapa 8	Etapa 9
6,359,853.02	1,895,236.20	564,780.39	168,304.56	50,154.76	14,946.12	4,453.94	1,327.28	395.53
Etapa 10	Etapa 11	Etapa 12	Etapa 13	Etapa 14	Etapa 15	Etapa 16	Etapa 17	Etapa 18
117.87	35.12	10.47	3.12	0.93	0.28	0.08	0.02	0.00

Polifenoles medidos como equivalentes de ácido gálico, AG. Eficiencia supuesta: 90%.

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. No todos los polifenoles contenidos en las vinazas tienen una utilidad potencial en el tratamiento de enfermedades (Leyra-Tobilla, 2016). Esta sería otra investigación en la que se caracterizaran los polifenoles extraídos de las vinazas y se estudiaran de la misma forma que lo hizo esta autora para determinar su capacidad biocida.

De cualquier manera, estos polifenoles que no fueran útiles para propósitos medicinales pueden depositarse en suelos pobres donde actuarán de manera positiva para retener nutrientes, especialmente cationes metálicos como calcio y magnesio y aniones como los carbonatos, sulfatos, etc. (Bautista-Zúñiga, 2000).

A continuación, en el último capítulo de esta investigación teórica, se presentan las conclusiones y perspectivas de ella con base en los objetivos planteados.



Capítulo 5

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

5.1. Conclusiones

Las vinazas son sustancias que, si son aprovechadas adecuadamente, pueden ser beneficiosas económicamente, especialmente para cuestiones de salud (Leyra-Tobilla, 2016). De acuerdo con el objetivo principal, que consistía en proponer con base en la literatura, una forma viable para la recuperación de los polifenoles de vinazas de bioetanol de caña de azúcar usando carbón activado del propio bagazo de la caña, así como los objetivos particulares, se llegaron a las siguientes conclusiones:

- ◆ El postratamiento con carbón activado de los efluentes del RALLFA recupera experimentalmente un 70.2% de los polifenoles contenidos en una sola etapa. Sin embargo, debido a las altas cantidades producidas de vinazas en un día, se requieren de 18 etapas para poder separar los polifenoles del agua, lo que representa que, en cada una de las etapas se tiene que llevar un proceso de reactivación
- ◆ El uso de carbón activado de bagazo de caña, por la cantidad de cenizas que contiene, podría hacer que el porcentaje de remoción de polifenoles fuera menor en comparación con el que se puede obtener con el carbón activado comercial, que tiene generalmente una menor cantidad de cenizas
- ◆ El proceso de desorción se logra mediante una reactivación química utilizando solución acusa a pH alcalino. Se recomienda, para los estudios experimentales a escala de laboratorio, que se utilicen 15 mL de 6N de solución de NaOH por gramo de carbón agotado con un tiempo de contacto de 30 minutos
- ◆ La capacidad de adsorción del carbón agotado con el que trabajaron Kow y col. (2016) es el 90-98% de la capacidad del carbón activado original. Esto



significa que los polifenoles pueden desorberse del carbón activado aproximadamente en ese mismo porcentaje. Esto sin considerar las impurezas que puedan haber junto con los polifenoles desorbidos.

- ◆ Aunque no se logró llevar a cabo el balance de materia en el software Aspen Adsorption se logró, empleando la paquetería de Excel, estimar la cantidad de polifenoles que se puede obtener a partir de la producción de alcohol etílico tomando como ejemplo la información pública del ingenio azucarero-alcoholero seleccionado, la cual es de 9,059,619.69 kgAG/día si se realizan los 18 procesos de reactivación para cada una de las etapas
- ◆ Con el proceso de degradación anaerobia se logra convertir en metano casi el 60% de la materia carbonosa de las vinazas. Del 40% del efluente de los RALLFA, casi el 30% corresponde a compuestos fenólicos y el resto corresponde a otros compuestos orgánicos, por lo que seguramente será necesario llevar a cabo otros tipos de tratamiento después de la adsorción y desorción para cumplir con los requerimientos normativos (Correa-López, 2022).

5.2. Perspectivas

Con la finalidad de que este trabajo se lleve a cabo de forma experimental y se pueda evaluar a escala industrial, a continuación, se hacen recomendaciones sobre los puntos a seguir:

- ◆ Mejorar las condiciones de la operación unitaria de adsorción con una disminución del pH y a temperatura ambiente determinando las cantidades óptimas de adsorción y, con base en esto, hacer una evaluación económica de factibilidad (Peters y Timmerhaus, 1980) sobre el uso de carbón activado de bagazo de caña en vez del CA comercial
- ◆ Llevar a cabo de manera experimental lo realizado por Kow y col. (2016), para evaluar si es factible desorber los polifenoles utilizando solución de NaOH y agua caliente



- ◆ Realizar un análisis cualitativo y cuantitativo de las sustancias contenidas en las vinazas, así como de los polifenoles que se encuentran en ella, con el objetivo de conocer la composición en las que se encuentran y poder realizar la simulación del proceso mediante Aspen
- ◆ Estudiar un tren de tratamiento que permita que las vinazas puedan ser reutilizadas o descargadas al ambiente (Correa-López, 2022)
- ◆ Finalmente, se recomienda realizar los experimentos de adsorción-desorción, ya que las últimas 5 etapas procesan cantidades muy pequeñas, por lo que si experimentalmente no fueran necesarias se podrían omitir reduciendo los costos de operación.



Anexo A

OPERACIÓN Y ARRANQUE DE LOS RALLFA

Tabla A.1. Variables de operación y parámetros de seguimiento de los reactores anaerobios

Variables de operación		
Variable	Descripción	Fuente
Temperatura	<ul style="list-style-type: none">◆ La temperatura afecta la proliferación microbiana y, por ende, la eficiencia del proceso hasta que se logra de nuevo la aclimatación◆ En el rango termofílico se logra una mayor velocidad del proceso	(Cubero-Madriz, 2011; Rincón-Acelas, 2008)
Agitación	Es fundamental para: <ul style="list-style-type: none">◆ Lograr el mayor contacto del influente con la población microbiana y favorecer la salida de los gases que se producen por dicho fenómeno◆ Prevenir la formación de espacios muertos que reduzcan el volumen efectivo del reactor y la formación de caminos preferenciales en función de la hidráulica del sistema◆ Mantener la temperatura constante	(Rincón-Acelas, 2008)
Tiempo de residencia hidráulica (TRH)	<ul style="list-style-type: none">◆ 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)
Carga orgánica	La carga orgánica debe permitir el desarrollo y la actividad microbiana del sistema anaerobio: <ul style="list-style-type: none">◆ Las cargas orgánicas elevadas pueden provocar el favorecimiento de la acidogénesis sobre la metanogénesis, dando como resultado la acidificación del sistema◆ Castro-González (2004) propone iniciar con cargas orgánicas bajas, las cuales deben irse incrementando cuando el buen funcionamiento del sistema lo permita	(Villalobos-Juvenal, 2015)
Flujo de carga orgánica máxima	La velocidad volumétrica de flujo de carga orgánica máxima está limitada por el TRH en el reactor y por la actividad de los microorganismos implicados en la degradación de la materia orgánica:	(Villalobos-Juvenal, 2015)



- ◆ A una velocidad de flujo rápida no habría suficiente contacto entre las bacterias y la materia orgánica provocando zonas muertas

Parámetros de seguimiento

Parámetro	Características	Fuente
Potencial de hidrógeno (pH)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Cada enzima de los microorganismos está en actividad solamente en un rango específico de pH y tiene su actividad máxima a un pH óptimo ◆ Para que el proceso de degradación en los 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; Ramón-Valencia y col., 2015)
Concentración de ácidos grasos volátiles (AGV)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Es un parámetro muy utilizado en los sistemas de control gracias a su rápida respuesta ante variaciones del sistema ◆ En un proceso de degradación anaerobio 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 generan 	(Contreras-Contreras, 2019)
Alcalinidad	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Los microorganismos acidogénicos tienen una mayor actividad que los microorganismos metanogénicos, por lo que, ante sobrecargas orgánicas son capaces de provocar la acidificación del digestor, lo que puede evitarse manteniendo en el digestor una óptima capacidad amortiguadora (que se mide mediante la propiedad: Alcalinidad) 	(Contreras-Contreras, 2019; Hernández-Martínez, 2010)



Factor de alcalinidad (α)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El factor de alcalinidad representa la relación entre los AGV presentes y la alcalinidad total ($\text{AGV} + \text{HCO}_3^-$) ◆ Un sistema se puede decir que es estable cuando tiene un valor de 'α' que se encuentra en el intervalo de 0.2 a 0.4 ◆ 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	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El biogás es un parámetro que funciona como indicador de estabilidad o 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 	(Ramón-Valencia y col., 2015)

Tabla A.2. 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 NH_3, H_2 y H_2S, 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 CO_2, lo que provoca un aumento del pH, lo que 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



Tabla A.3. Compilación de consideraciones a tomar en cuenta en el arranque de los RALLFA (Castro-González, 2004)

<p>Etapa 1</p> <p>Adaptación de la biomasa mesofílica al agua residual en condiciones mesófilas</p>	<p>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</p> <hr/> <p>El inóculo debe:</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Tener suficiente actividad metanogénica ◆ Contener una mezcla de diferentes géneros de arqueas metanogénicas que tengan la capacidad de asimilar el sustrato a tratar ◆ Estar adaptado a las propiedades específicas del agua residual ◆ Tener un volumen en el reactor que sea lo más grande posible en relación con las dimensiones del propio reactor (30%) <hr/> <p>Una de las estrategias que se ha seguido indica que, además de los puntos mencionados, 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%</p> <hr/> <p>La granulación de la biomasa es la clave para el arranque de un RALLFA y puede inhibirse por el H₂S que disgrega los gránulos o por los polifenoles que provocan una pérdida de actividad biológica anaerobia</p> <hr/> <p>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, contenidas en la Tabla B.1.</p>
<p>Etapa 2</p> <p>Adaptación del inóculo mesófilo a condiciones mesofílica intermedia y termofílicas</p>	<p>Una vez que los lodos se hayan adaptado al influente, se deben adaptar a condiciones mesofílicas intermedias para después pasar a condiciones termofílicas</p> <hr/> <p>Esta segunda etapa consta de cuatro pasos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. El primero de ellos consiste en inocular la biomasa adaptada a vinazas a 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% 2. Posteriormente, ya que la biomasa esté adaptada a las condiciones de trabajo, los reactores deben ser alimentados por cargas (o lotes) 3. Después se debe alimentar los reactores en forma semicontinua 4. Luego, hay que alimentar los reactores en forma continua



Algunas características que se presentan al adaptar una biomasa mesofílica a condiciones termofílicas son las siguientes:

- ◆ Cargas arriba de 20 kgDQO/m³día después de 60 días de inoculación
- ◆ Lisis de los microorganismos mesofílicos
- ◆ Presencia de microorganismos termofílicos a condiciones mesofílicas
- ◆ La estrategia de arranque 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
- ◆ Los tiempos de residencia hidráulica son menores
- ◆ El tratamiento termofílico puede soportar alimentaciones discontinuas y algunas fluctuaciones de temperatura

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



Anexo B

MEDICIÓN DE PARÁMETROS

Tabla B.1. Variables de operación y parámetros de seguimiento de los reactores anaerobios (Contreras-Contreras, 2019)

Parámetro	Métodos analíticos utilizados
AGV	CG-DIF
Alcalinidad	Valoración ácido base, NMX-AA-036-SCFI-2001 (SEECO, 2001c)
Biogás	Desplazamiento de líquidos
Cationes	<i>ICP-AES</i>
Conductividad eléctrica	Equipo de campo multiparamétrico
Factor de alcalinidad	Valoración ácido base
Metales pesados	Digestión con HNO ₃ y H ₂ O ₂ -Dilución con HCl
Nitrógeno amoniacal	Reacción amoniaco y reactivo de Nessler
Nitrógeno total	Reacción con H ₂ SO ₄ cc y K ₂ SO ₄ -Titulación con un álcali (NaOH-Na ₂ SO ₄ 0.05 N)
Polifenoles	Folin-Ciocalteu
Temperatura	Equipo de campo multiparamétrico
DBO₅	NMX-AA-028-SCFI-2001 (SEECO, 2001a)
DQO	NMX-AA-030/2-SCFI-2011 (SEECO, 2011)
Fósforos y ortofosfatos	NMX-AA-029-SCFI-2001 (SEECO, 2001b)
Nitratos	NMX-AA-079-SCFI-2001(SEECO, 2001d)
Nitritos	NMX-AA-099-SCFI-2006(SEECO, 2006)
pH	NMX-AA-008-SCFI-2016(SEECO, 2008)
SSV	NMX-AA-034-SCFI-2015(SEECO, 2015)
SST	NMX-AA-034-SCFI-2015(SEECO, 2015)
ST	NMX-AA-034-SCFI-2015(SEECO, 2015)
STV	NMX-AA-034-SCFI-2015(SEECO, 2015)
Sulfatos	NMX-AA-074-SCFI-2014(SEECO, 2014)
Sulfuros	PROY-NMX-AA-084-SCFI-2005(SEECO, 2005)



Anexo C

ACERVO FOTOGRÁFICO



Figura C.1. Carpeta de Google Drive donde se almacenaron todas las fuentes consultadas

Capítulo 4. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4-7. Con estos resultados se puede suponer que no hay eliminación de polifenoles en el tratamiento bioquímico anaerobico. Sin embargo, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) (Figura 4-11), que permitió justificar este supuesto.

Tabla 4-7. Concentración de polifenoles en los influentes y efluentes de los reactores

Muestra	Promedio	Intervalo de confianza al 95%	Desviación estándar
VC, mg eq. AG/L	8600	1018	820
VD, mg eq. AG/L	3622	397	320
R45°C, mg eq. AG/L	3689	395	318
R55°C, mg eq. AG/L	3222.2	244.4	196.4
VD65, mg eq. AG/L	2400	494	398
R65°C, mg eq. AG/L	2266.7	203.5	163.9

Grouping information Using the Games-Howell Method and 95% Confidence

Factor	N	Grouping
VC	11	A
R45°C	11	B
VD	11	B
R55°C	11	B
VD65	11	C
R65°C	11	C

Figura 4-11. Análisis estadístico de la concentración de polifenoles en las corrientes de vinaza

LOS POLIFENOLOS SIGUEN ESTANDO PRESENTES EN LA MISMA CANTIDAD QUE ANTES
De esta forma se corrobora que el tratamiento bioquímico anaerobico no disminuye la cantidad de polifenoles en las corrientes de salida, verificando que los compuestos de microorganismos que existen dentro de los tres reactores tipo BALUZA, no pueden utilizar los polifenoles como sustratos para su metabolismo.

5.5.1. Adsorción de polifenoles en carbón activado
Debido a que los compuestos polifenólicos deben ser removidos completamente para cumplir con las regulaciones legales de las plantas de alcohol etílico (DOF, 1996-98), se decidió utilizar un proceso de adsorción con carbón activado para remover específicamente los polifenoles. Los datos de adsorción recolectados se ajustaron a las ecuaciones linealizadas de los modelos de Langmuir, Freundlich y Dubinin-Radushkevich (DR). Los resultados se muestran en la Tabla 4-8. Estos datos definen el mejor modelo de

Trésis Doctoral-Resultados
Efecto de la temperatura en la actividad metabólica y sulfato-reductora de consorcios microbianos en un reactor anaerobico

volumétrica que son 10 veces mayores que las recomendadas. Como la concentración señalada por los autores para influente del reactor es de 1,000 mgDQO/L y la aplicada en esta investigación fue de 10,241 mgDQO/L, como resultado de la vinaza diluida al 10%, se decidió usar un factor de 10. Aun con la diferencia de concentración a alimentar, la operación no presentó ningún problema de desequilibrio anaerobio o sobrecarga. Por ello, puede recomendarse para futuras investigaciones, cuando el tratamiento anaerobio se aplique a sustratos de alta concentración de DQO que se consideren las cargas másica y volumétrica como factores directamente proporcionales de escalamiento.

Tabla 4.2 Características físico-químicas de la biomasa anaerobica para inocular el BALUZA para la adaptación a vinazas a condiciones mesofílicas

PARAMETRO	VALOR
Valor de pH	7.19
Sólidos totales, g/L	114.8
Sólidos suspendidos totales, g/L	67.6
Sólidos disueltos totales, g/L	47.20
Sólidos totales volátiles, g/L	91.65
Sólidos suspendidos volátiles, g/L	31.30
Sólidos disueltos volátiles, g/L	40.35
Sólidos totales fijos, g/L	47.20
Sólidos suspendidos fijos, g/L	36.3
Sólidos disueltos fijos, g/L	10.9
Nitrógeno, mg/g lodo anaerobico	37.71
Carbono, mg/g lodo anaerobico	238.04
Actividad metabólica pDQO-CH ₄ gSSV ₁₀	0.86

Tabla 4.3 Parámetros operacionales recomendados (Tabla 2.14) y usados en este trabajo para el reactor de 10 L

Parámetro	Recomendado (Lettung y col., 1982; Saltsjoga y col., 1983; Hubhoff y col., 1986; Hubhoff-Ped., 1987; Wu y col., 1988; Senca y col., 1992)	Obtenido para vinazas
Concentración del inoculo	12 a 15 kgSSV/m ³ reactor inoculo concentrado	10 kgSSV/m ³ reactor inoculo diluido
Temperatura	35° a 40°C	35°C
V _{max}	0.125 m/h a 6.3 m/h	0.0988 m/h
velocidad ascensional	0.25 m/h para lodo disperso 1 a 2 m/h para lodo flocculento 5 m/h para lodo granular	24 h
TRE	14 a los primeros 30 días de operación	24 h
h _c carga orgánica másica	0.05 a 0.1 kgDQO/kgSSV ₁₀ día	0.05 kgDQO/kgSSV ₁₀ día
h _v carga orgánica volumétrica	1 kgDQO/m ³ día	10.24 kgDQO/m ³ día
Concentración de DQO en el influente del reactor	1,000 mgDQO/L	10,241 mgDQO/L

A pesar de ser algunos muy diferentes a los recomendados, no presentaron malos resultados.

Facultad de Química Decanato de Ciencias Químicas (Ingeniería Química) UNAM

Figura C.2. Aplicación Xodo para la lectura y síntesis de las fuentes bibliográficas consultadas

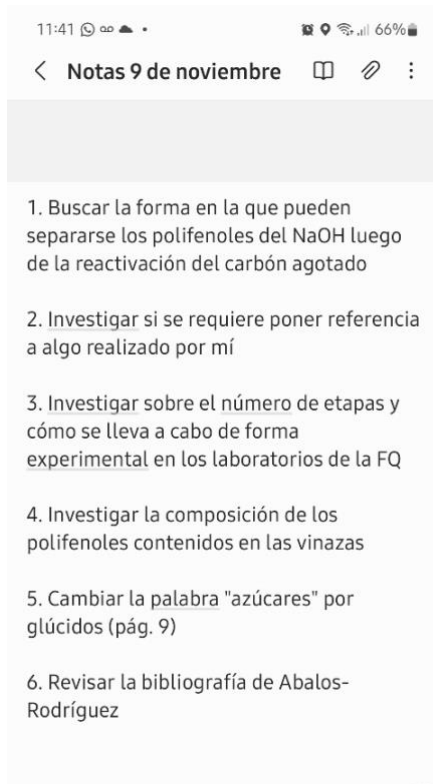


Figura C.3. Cuaderno digital de notas y dudas

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1		Alcohol destilado	Vinazas producción	DQO efluente RALFA	DQO efluente RALFA			DQO inicial	DQO final	% remoción de la DQO						
2		L / día	L / día	kgO ₂ / día	kgO ₂ / día			mgO ₂ / L solución	mgO ₂ / L solución							
3		25,769,573	12	1,149,234.876	76,738.547	11,962,348.32		33.363	13,895.02	58.35						
4			Cantidad de DQO de la vinaza cruda	Polifenoles efluente RALFA	Polifenoles efluente RALFA			Polifenoles inicial	Polifenoles final	% remoción de polifenoles						
5		Contreras Contreras	mgO ₂ / L vinaza	66,793	kgAG / día	kgAG / día		mg AG / L solución	mg AG / L solución							
6			kgO ₂ / L vinaza	0.066793	9,883.420	10,066,244.10		3,622	3,689.00	-1.85						
7			Cantidad de polifenoles de la vinaza cruda	Polifenoles del efluente del RALFA	Polifenoles de Etapa 1	Polifenoles de Etapa 2	Polifenoles de Etapa 3	Polifenoles de Etapa 4	Polifenoles de Etapa 5	Polifenoles de Etapa 6	Polifenoles de Etapa 7	Polifenoles de Etapa 8	Polifenoles de Etapa 9	Polifenoles de Etapa 10	Polifenoles de Etapa 11	Polifenoles de Etapa 12
8			mgAG / L	8,600	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día
9			kgAG / L	0.0086	10,066,244	2,999,740.74	893,922.74	266,388.98	79,383.92	23,656.41	7,049.61	2,100.78	626.03	186.56	55.59	16.57
10					Polifenoles de Etapa 1	Polifenoles de Etapa 2	Polifenoles de Etapa 3	Polifenoles de Etapa 4	Polifenoles de Etapa 5	Polifenoles de Etapa 6	Polifenoles de Etapa 7	Polifenoles de Etapa 8	Polifenoles de Etapa 9	Polifenoles de Etapa 10	Polifenoles de Etapa 11	Polifenoles de Etapa 12
11					kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día
12			SUMATORIA	9059619.69	6359853.02	1895236.20	564780.39	168304.56	50154.76	14946.12	4451.94	1327.28	395.53	117.87	35.12	11

Figura C.4. Hoja de Excel donde se hizo el cálculo de los polifenoles adsorbidos y desorbidos

BALANCE DE MATERIA - Guardado - Buscar

Archivo Inicio Insertar Disposición de página Fórmulas Datos Revisar Vista Ayuda

Calibre 11 Fuente Ajustar texto General Formato condicional Normal Buena Incorrecto Neutral Insertar Eliminar Formato Autosuma Rellenar Ordenar y filtrar Buscar y seleccionar Análisis de datos Confidencialidad

1	DQO final	% remoción de la DQO																	
2	mgO ₂ / L solución																		
3	13.895.00	58.35																	
4	Polifenoles final	% remoción de polifenoles																	
5	mg AG / L solución																		
6	3.689.00	-1.85																	
7	Polifenoles de Etapa 4	Polifenoles de Etapa 5	Polifenoles de Etapa 6	Polifenoles de Etapa 7	Polifenoles de Etapa 8	Polifenoles de Etapa 9	Polifenoles de Etapa 10	Polifenoles de Etapa 11	Polifenoles de Etapa 12	Polifenoles de Etapa 13	Polifenoles de Etapa 14	Polifenoles de Etapa 15	Polifenoles de Etapa 16	Polifenoles de Etapa 17	Polifenoles de Etapa 18				
8	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día
9	79.383.92	23.056.41	7.049.61	2.100.78	626.03	186.56	55.59	16.57	4.94	1.47	0.44	0.13	0.04	0.01	0.00				
10	Polifenoles de Etapa 4	Polifenoles de Etapa 5	Polifenoles de Etapa 6	Polifenoles de Etapa 7	Polifenoles de Etapa 8	Polifenoles de Etapa 9	Polifenoles de Etapa 10	Polifenoles de Etapa 11	Polifenoles de Etapa 12	Polifenoles de Etapa 13	Polifenoles de Etapa 14	Polifenoles de Etapa 15	Polifenoles de Etapa 16	Polifenoles de Etapa 17	Polifenoles de Etapa 18				
11	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día	kgAG / día
12	168304.56	50154.76	14946.12	4453.94	1327.28	395.53	117.87	35.12	10.47	3.12	0.93	0.28	0.08	0.02	0.01				

Figura C.4. Hoja de Excel donde se hizo el cálculo de los polifenoles adsorbidos y desorbidos



Anexo D

DISPOSICIÓN CONTROLADA DE LOS RESIDUOS PRODUCIDOS EN ESTA INVESTIGACIÓN (texto modificado de Correa-López, 2022)

Esta investigación fue teórica y no se produjeron residuos con relación al proceso descrito en la Figura 4.10. Sin embargo, todas las actividades generan, por lo menos, residuos de forma indirecta.

El simple hecho de tener que buscar las distintas fuentes consultadas y de redactar el presente documento, requirió de estar horas frente a la *laptop* y al *smartphone*. Por lo que, habría que considerar el uso de la electricidad y los contaminantes que se producen en las plantas que la generan, sean hidroeléctricas, termoeléctricas, carboeléctricas o nucleoeeléctricas.

A lo anterior, habrá que añadir que la *laptop*, el *smartphone* y la impresora que se va a utilizar para el trámite de titulación, usan partes de recambio que deben disponerse al término de su vida útil. Asimismo, el papel en el que se imprimirá este documento y los que se requieran para la titulación fueron fabricados a partir de una fuente de celulosa y deberá también considerarse el impacto ambiental correspondiente, así como el de los cartuchos de tinta, etc.

Una de las cosas que muchas veces no se ve como un problema, es que los residuos tangibles no son los únicos que contaminan. Durante la elaboración de la Tesis, hubo mucha comunicación por correo con la asesora y la supervisora técnica, mencionadas en el apartado correspondiente al Jurado. Esto generó mucha basura electrónica, ya que acumular correos; no vaciar la bandeja de entrada o incluso un correo con pocas letras de respuesta pueden llegar a contaminar igual que los aparatos. Y es que, aunque el envío de correos electrónicos emite una estimación baja de carbono, alrededor de 0.3 gramos de CO₂ cada uno, al ser guardados en



un servidor 'data center' y no ser eliminados provoca que los data centers sobre trabajen y consuman mayor energía de la que usualmente necesitan para brindar un servicio adecuado. Esto orilla a que los 'data centers' tengan un consumo excesivo y a su vez sea más costoso el mantenimiento y el enfriamiento, de los mismos.



Bibliografía

- Accinelli, R.A., Zhang-Xu, C.M., Ju-Wang, J.D., Yachachin-Chávez, J.M., Cáceres-Pizarro, J.A., Tafur-Bances, K.B., Flores-Tejada, R.G., Paiva-Andrade, A. del C. 2020. Covid-19: La pandemia por el nuevo virus *Sars-CoV-2*. Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública. 37(2): 302-311. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2020.372.5411>
- Acevedo, S., Colina, M., Díaz, A., Fernández, N., Behling, E., Marín, J., Colina, G. 2007. Activación química del bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en la adsorción de níquel (II) en efluentes industriales. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia. 30(3): 244-252. ISSN: 0254-0770. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702007000300006
- 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. Tucumán, Argentina.
- Alonso-Gómez, L.A., Bello-Pérez, L.A. 2018. Materias primas usadas para la producción de etanol de cuatro generaciones: retos y oportunidades/*Four generations of raw materials used for ethanol production: Challenges and opportunities*. Agrociencia. 52(7): 967-990. ISSN: 2521-9766. <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v52n7/2521-9766-agro-52-07-967.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 para obtener el título de Químico Bacteriólogo Parasitólogo. Facultad de Ciencias Biológicas, Departamento de Microbiología e Inmunología, Universidad Autónoma de Nuevo León. San Nicolás de los Garza, Nuevo León. 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 glúcidos simples empleados en la industria alimentaria. *Lámpsakos*. (22):123-136. ISSN: 2145-4086. DOI: 10.21501/21454086.3252
- Bailey, J.E, Ollis, D.F. 1986. *Biochemical Engineering Fundamentals*. Second Edition. McGRAW-HILL.
- 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. Ciudad de México, México. 132.248.9.195/pd2000/272955/Index.html
- 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.
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/3413/franciscojaviercaicedomessa.2006.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- CARBOTECNIA. 2022. The dark side of carbon: Reactivación de carbones. Blog.
<https://www.carbotecnia.info/reactivacion-del-carbon/>
- Castellar, G.C., Vilorio, C.A., Morrison, C.A., Angulo, E.R., Zambrano, A.M. 2017. Evaluación de un carbón activado comercial en la remoción del colorante DB2/*Evaluation of a comercial activated carbon in the removal of the dye DB2*. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*. 9(2):164-170. DOI: doi.org/10.24188/recia.v9.n2.2017.512
- 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. Ciudad de México, México.
- 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.

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. Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar.

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

CONADESUCA. 2020. Concluye la zafra 2019/2020. Comunicado de prensa CONADESUCA. Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. <https://www.gob.mx/conadesuca/prensa/concluye-la-zafra-2019-2020?idiom=es>

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. Ciudad de México, México.

Cordovés-Herrera, M., Valdés-Jiménez, M.E. 2006. Aprovechamiento integral de los efluentes residuales de la producción de alcohol etílico. En 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. de 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): 01-15. 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 profesional. Facultad de Química, UNAM. Ciudad de México, México.
- 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
- Cubero-Madriz, G.A. 2011. Evaluación de un sistema de digestión ‘anaerobia’⁷ 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.
- Delegación SADER SLP. 2018. La caña de azúcar cultivo agrícola más importante. Blog. Delegación de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural de San Luis Potosí.
<https://www.gob.mx/agricultura/sanluispotosi/articulos/la-cana-de-azucar-cultivo-agricola-mas-importante?idiom=es>
- Delgado-Bautista, M.K. 2016. Perspectiva actual de los polifenoles en México. Entre textos. 7(21): 1-12, ISSN: 2007-5316.
<https://entretextos.leon.uia.mx/num/21/PDF/ENT21-1.pdf>
- 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 de Químicas. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM. Cuautitlán Izcalli, Estado de México, México.
- Díaz-Castrillón, F.J., Toro-Montoya, A.I. 2020. SARS-CoV-2/COVID-19: El virus, la enfermedad y la pandemia/SARS-CoV-2/COVID-19: *The virus, the disease*

⁷ La digestión es un procedimiento inherentemente anaerobio por lo que no requiere del adjetivo (nota de la asesora)



- and the pandemic*. EDIMECO (Editora Médica Colombiana S.A.). 24(3): 183-205. <https://docs.bvsalud.org/biblioref/2020/05/1096519/covid-19.pdf>
- DOF. 2005. Ley de desarrollo sustentable de la caña de azúcar. Diario Oficial de la Federación <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LDSCA.pdf>
- DOF. 2009. 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. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5111108&fecha=24/09/2009
- Durán-de-Bazúa, M.-d.-C. 2005. Sugarcane Industry Wastewaters Treatment. En **Water Encyclopedia**. J.H. Lehr, J. Keeley, Eds. 1:614-620. Published Online: 15 JUL 2005. DOI: 10.1002/047147844X.iw154
- Durán-de-Bazúa, C., Noyola, A., Poggi-Varaldo, H.M., Zedillo, L.E. 1991. Biodegradation of process industry wastewater. Case problem: Sugarcane industry. En **Biological Degradation of Wastes**. Ed. A. M. Martin. Cap. 17. Pp. 363-388. Elsevier Science Pub. Ltd. ISBN 1-85166-635-4. Londres, Inglaterra.
- FAO. 2019. Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores. Colección de Documentos Técnicos N°12. Buenos Aires, Argentina. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.probiomasa.gob.ar/pdf/GuiadeBiogasyBiodigestores-19-08-29.pdf>
- FAO; MAGyP; MINPLAN. 2020. Futuro renovable: Biogás como fuente de energía. Hoja técnica. PROBIOMASA. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios <http://www.probiomasa.gob.ar/pdf/Biogas.pdf>
- González-Jiménez, F.E., Hernández-Espinosa, N., Cooper-Bribiesca, B.L., 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>

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'⁸ 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>

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. Ciudad de México, México.

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. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.09.011>

Jiménez, R., González, N., Hernández, M., Ojeda, N. 2014. La caña de azúcar como alimento funcional. Revista Iberoamericana de Ciencias. 1(3): 31-39. ISSN: 2334-2501.

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

⁸ La digestión es un procedimiento inherentemente anaerobio por lo que no requiere del adjetivo (nota de la asesora)



water. Desalination and Water Treatment. DOI:
10.1080/19443994.2016.1168133

- Lazo, J.C., Navarro, A.E., Sun-Kou, M.R., Llanos, B.P. 2008. Síntesis y caracterización de arcillas organofílicas y su aplicación como adsorbentes del fenol. Revista de la Sociedad Química del Perú. 74(1): 3-19.
<http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v74n4/a02v74n1.pdf>
- 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 para obtener el grado de Maestría en Ciencias en Microbiología. Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León, México.
- 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 para obtener título de Químico Farmacéutico Biólogo. Facultad de Química, UNAM. Ciudad de México, México.
- Linero-Gil, J.E., Guzmán-Carrillo, A. 2012. Proceso de tratamiento de vinazas. Patente 332661.
<https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1023/358/1/MX%20332661%20B.pdf>
- Lorenzo, Y., Obaya, M.C. 2006. La digestión 'anaerobia'⁹ y los reactores UASB. Generalidades. ICIDCA (Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar). 40(1): 13-21. ISSN: 0138-6204.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223121549002>
- Madigan, M.T., Martinko, J.M., Bender, K.S., Buckley, D.H., Stahl, D.A. 2015. Brock: Biología de los microorganismos (14.a edición). Pearson Educación.
- Márquez-Vázquez, M., Martínez-González, S.A. 2011. Reactores anaerobios de flujo ascendente (RAFA's o UASB). Antología. Centro Tecnológico Aragón, Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM. Ciudad de México, México.

⁹ Nuevamente autores latinoamericanos usando el pleonasma (nota de la asesora)



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'¹⁰ de vinazas de Cartavio RUM Company usando un biorreactor UASB. Tesis para obtener título de Ingeniero Químico. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo, Perú.
- Mhatre, S., Srivastava, T., Naik, S., Patravale, V. 2021. *Antiviral activity of green tea and black tea polyphenols in prophylaxis and treatment of COVID-19: A review*. *Phytomedicine*. 85: 1-8. DOI: 10.1016/j.phymed.2020.153286
- NTX. 2018. México produce casi 57 millones de toneladas de caña de azúcar al año. Noticia de Jalisco del Diario 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>
- Ospina-Guarín, V.M., Buitrago-Sierra, R., López-López, D.P. 2014. Preparación y caracterización de carbón activado a partir de torta de higuera. *Tecnología*. 17(32): 75-84. ISSN: 0123-7799.
<http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/v17n32/v17n32a08.pdf>
- 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>

¹⁰ Las palabras aerobio y anaerobio son perfectamente correctas ya que provienen del latín y éstas del griego. Es inadmisibles que el diccionario de la lengua española acepte los barbarismos aeróbico y anaeróbico (nota de la asesora)



- Pallares-García, A. 2014. Simulación rigurosa del proceso de digestión 'anaerobia'¹¹. Tesis de Posgrado en Ingeniería de Procesos. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco. Ciudad de México, México. DOI: 10.24275/uama.6746.7558
- 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 del Valle. Santiago de Cali, Colombia.
- Peters, M.S., Timmerhaus, K.D. 1980. Plant design and economics for chemical engineers. McGraw-Hill Book Company. 3ª edición. Cap. 5. Pp. 147-224. Nueva York, Estado Unidos.
- Procaña. 2020. Subproductos y derivados de la caña. Asociación Colombiana de Productores y Proveedores de Caña de Azúcar.
<https://procana.org/site/subproductos-y-derivados-de-la-cana/>
- Ramón-Valencia, J.A., Derley-Valencia, J., Rozo-Ibañez, D.A. 2015. Sistema de monitoreo y control basado en el software RTMC aplicado al proceso de biodigestión 'anaeróbica'¹² / *Monitoring and control system based on the software RTMC applied to 'anaerobic' biodigestion process*. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada. 2(26): 1-8. ISSN:1692-7257.
- Rincón-Acelas, I. R. 2008. Cinética de la degradación anaerobia termofílica de vinazas de caña. Tesis de maestría. Facultad de Química, UNAM. Ciudad de México, 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. ISSN: 0168-1656.
- SADER. 2020. Todo se arregla con un terrón de azúcar. Blog Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/todo->

¹¹ La digestión es un procedimiento inherentemente anaerobio por lo que no requiere del adjetivo. Debe ponerse solamente digestión o degradación anaerobia (nota de la asesora)

¹² Estos autores estuvieron peor, además del pleonasma 'biodigestión anaerobia' introdujeron un anglicismo —anaeróbico— aceptado por el diccionario de la lengua española aún existiendo el término correcto —anaerobio— (nota de la asesora)



[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](http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166773/NMX-AA-029-SCFI-2001.pdf)

SEECO. 2001a. Análisis de agua. Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO₅) y residuales tratadas. Método de prueba. NMX-AA-028-SCFI-2001. Secretaría de Economía.

<http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2001/nmx-aa-028-scfi-2001.pdf>

SEECO. 2001b. Análisis de aguas. Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. NMX-AA-029-SCFI-2001. Secretaría de Economía.

<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166773/NMX-AA-029-SCFI-2001.pdf>

SEECO. 2001c. Análisis de agua. Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. NMX-AA-036-SCFI-2001.

<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166776/NMX-AA-036-SCFI-2001.pdf>

SEECO. 2001d. Análisis de aguas. Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. NMX-AA-079-SCFI-2001.

<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166794/NMX-AA-079-SCFI-2001.pdf>

SEECO. 2005. Análisis de agua. Determinación de sulfuros en aguas naturales y residuales. Método de prueba. PROY-NMX-AA-084-SCFI-2005. Secretaría de Economía.

<http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/nmx-AA-05/proy-nmx-aa-084-scfi-2005.pdf>

SEECO. 2006. Análisis de agua. Determinación de nitrógeno de nitritos en aguas naturales y residuales. Métodos de prueba. NMX-AA-099-SCFI-2006. Secretaría de Economía.



<https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD1/D03046.pdf>

SEECO. 2008. Análisis de agua. Determinación del pH. Método de prueba. NMX-AA-008-SCFI-2008. Secretaría de Economía.

<http://legismex.mty.itesm.mx/normas/AA/proy0909/proy-nmx-aa-008-scfi-2008.pdf>

SEECO. 2011. Análisis de agua. Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. Parte 2: Determinación del índice de la demanda química de oxígeno. Método de tubo sellado a pequeña escala. NMX-AA-030/2-SCFI-2011. Secretaría de Economía.

<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166775/NMX-AA-030-2-SCFI-2011.pdf>

SEECO. 2014. Análisis de agua. Medición del ion sulfato en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. NMX-AA-074-SCFI-2014. Secretaría de Economía.

<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166149/nmx-aa-074-scfi-2014.pdf>

SEECO. 2015. Análisis de agua. Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. NMX-AA-034-SCFI-2015. Secretaría de Economía.

<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf>

Serna, F., Barrera, L., Montiel, H. 2011. Impacto social y económico en el uso de biocombustibles. Journal of Technology Management & Innovation. 6(1): 100-114. ISSN: 0718-2724. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/jotmi/v6n1/art09.pdf>

Sevillano, A.S., Torres, P.B. 2013. Obtención de carbón activado a partir de madera. Estudio de prefactibilidad. Realizado como Proyecto Final de la carrera de Ingeniería Química en Petroquímica. Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria, Universidad Nacional de Cuyo. San Rafael, Mendoza, Argentina.



- SIAP. 2018. La producción de caña de azúcar supera las 55 millones de toneladas en 2018. Blog. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <https://www.gob.mx/siap/articulos/la-produccion-de-cana-de-azucar-supera-las-55-millones-de-toneladas-en-2018>
- Siliceo-Rodríguez, M.L. 2014. Análisis de la productividad industrial de bioetanol. Trabajo recepcional de maestría. Facultad de Ciencias Químicas Zona Xalapa, Universidad Veracruzana. Xalapa de Enríquez, Veracruz, México.
- Solís-Fuentes, J.A., Morales-Téllez, M., Ayala-Tirado, R.C., Durán-de-Bazúa, M. del 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. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48224413006>
- Sotelo, D.I., Casas, F.N., Camelo, M.G. 2010. BOROJÓ (*Borojo apatino*): Fuente de polifenoles con actividad antimicrobiana. Vitae. 17(3): 329-336. ISSN: 0121-4004/ISSNe:2145-2660. <http://www.scielo.org.co/pdf/vitae/v17n3/v17n3a11.pdf>
- Tapie, W.A., Prato-García, D., Sánchez-Guerrero, H. 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/pdf/939/93946928004.pdf>
- Valencia-Avilés, E., Ignacio-Figueroa, I., Sosa-Martínez, E., Bartolomé-Camacho, M.C., Martínez-Flores, H.E., García-Pérez, M.E. 2017. Polifenoles: propiedades antioxidantes y toxicológicas/*Polyphenols: antioxidant and toxicological properties*. Revista de la Facultad de Ciencias Químicas. 16: 15-29. ISSN: 1390-1869. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/29781/1/2.%201583-4794-2-PB.pdf>
- 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 para obtener el título de Ingeniero Químico. Facultad de Química, UNAM. Ciudad de México, 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/uploads/2017/11/Art%2009.pdf>

Zúñiga-Cerón, M.A., Gandini-Ayerbe, V. 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>

