

## Tratamiento de vinazas tequileras a partir de biochar derivado de bagazo de agave

Montserrat López-Covarrubias <sup>1</sup>, y Oscar Aguilar-Juárez <sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Ingeniería en Nanotecnología, CUTONALÁ, Universidad de Guadalajara, Tonalá, Jalisco, México

<sup>2</sup> Unidad de Tecnología Ambiental, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C., Av. Normalistas 800, Colinas de la Normal, 44270, Guadalajara, Jalisco, México

\* Autor de correspondencia: [oaguilar@ciatej.mx](mailto:oaguilar@ciatej.mx); Tel.: 52 (33)33.45.52.00

**Desarrollo Sustentable** (Materiales Sustentables). **Ponencia Presencial.**

Recibido: 22 de agosto de 2023

Aceptado: 5 de octubre de 2023

Publicado: 23 de noviembre de 2023

**Resumen:** Las vinazas tequileras son el resultado de una actividad económica esencial en la región centro-occidente de México con un alto contenido cultural, como es la producción de tequila. Sin embargo, la generación de residuos y las externalidades ambientales que se generan son aún una situación no resuelta que requiere atención inmediata ante el acelerado crecimiento de la industria. La incorporación de conceptos básicos de balance de materia y energía, así como la introducción de conceptos como la producción de biochar pueden fortalecer la economía circular de esta actividad productiva al reducir en 50% la producción de bagazo, producir composta estable, disminuir en 15% la carga orgánica y detoxificar las vinazas para favorecer su metanización y por lo tanto su valorización energética. De esta forma, se favorece el desarrollo sostenible de la industria con el aprovechamiento de residuos que pueden configurarse como materiales adsorbentes que favorecen la eliminación de los contaminantes presentes, reduciendo así los costos.

**Palabras clave:** Biochar, adsorción, compuestos fenólicos, vinaza, bagazo de agave.

## Tequila vinasse treatment using biochar derived from agave bagasse

**Abstract:** Tequila vinasses are the result of an essential economic activity in the central-western region of Mexico, with a high cultural significance, such as tequila production. However, the generation of waste and the resulting environmental externalities remain an unresolved issue that requires immediate attention due to the rapid growth of industry. The incorporation of fundamental concepts of material and energy balance, along with the introduction of ideas like biochar production, can enhance the circular economy of this productive activity by reducing bagasse production by 50%, producing stable compost, decreasing organic load by 15%, detoxifying the vinasses to promote their methanization, and consequently, their energy valorization. In this way, sustainable development of the industry is promoted by harnessing waste that can be fashioned into adsorbent materials, aiding in the removal of contaminants present, thus reducing costs.

**Keywords:** Biochar, adsorption, phenolic compounds, vinasse, agave bagasse.

### Introducción

Las vinazas tequileras son un problema ambiental que se ha acentuado significativamente en los años recientes. La producción y las exportaciones de tequila han presentado un crecimiento acelerado, de tal manera que en 2022 se produjeron 651 millones de litros anuales de tequila con un consumo asociado de 2.61 millones de toneladas de agave para su producción (CRT, 2023). De acuerdo con Marino-Marmolejo et al. (2015), se producen de 7 a 12 litros de vinazas por litro de tequila. La producción de estas vinazas conlleva paralelamente una generación de 3.5 a 7 kg de bagazo por litro de tequila producido (Crespo-González et al., 2018). De esta manera, en la actualidad se producen de 4.56 a 7.81 millones de m<sup>3</sup> de vinaza tequilera y 2.3 a 4.6 millones de toneladas de bagazo en el año 2022.

Existe una gran diversidad de tamaños de tequileras que cumplen las necesidades de mercado tanto nacional como internacional y por lo tanto existen grandes, medianas y pequeñas empresas, que en 2008 tenían una proporción aproximada de 139 productores y 1,018 marcas de tequila (embotellado en México y en el extranjero). Con base en el número de empleados, solo el 7% son fábricas grandes y el resto son fábricas pequeñas y medianas, con un total de alrededor de 30,500 empleados directos (López-Lopez, 2010). De esta manera, las grandes empresas pueden tener un potencial de acción mayor para el tratamiento de las vinazas, sin embargo, las medianas, pequeñas y micro empresas tienen una capacidad de acción limitada poniendo en riesgo el medio ambiente regional.

Dependiente del grado de tecnificación, de la empresa se cumple con el proceso de la Figura 1 donde el agave requiere un tiempo de desarrollo entre 7 a 9 años y luego cuando la planta está lista, esta se jima (se quitan las hojas y el corazón de la planta que se conoce como piña de agave) que es recolectada y posteriormente procesada en hornos (con cocción) o difusores (sin cocción) (CRT 2023c, Sanchez-Ureña et al. 2022). Los azúcares son recuperados y la fracción sólida de la piña de agave sin azúcares se llama bagazo. El bagazo es luego transportado para sitios de disposición o reciben un uso o aplicación fuera del sitio. Las vinazas obtenidas con cocción y sin cocción tienen características que favorecen uno u otro tratamiento (Sánchez-Ureña et al., 2022), dadas las características propias de las vinazas que tienen una DQO total de 60,000 a 100,000 mg/L, DQO soluble de 40,000 a 80,000 mg/L un pH de 3.4 a 4.5 (López-Lopez, 2010), y generadas a una temperatura elevada tienen un potencial contaminante al agua, aire, suelo y térmico.

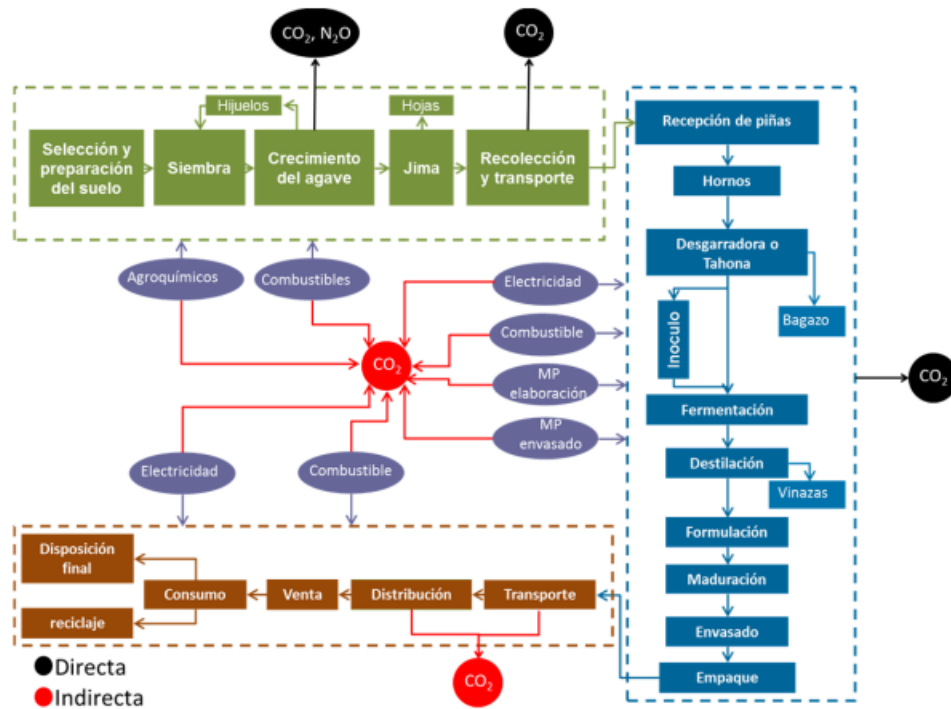


Figura 1. Análisis de ciclo de vida de la cadena productiva agave-tequila. Fuente: CRT, 2023b.

A pesar que el Consejo Regulador de Tequila (CRT) cuenta desde 2016 con una estrategia de sustentabilidad agave-tequila (CRT, 2023b), que incluye el análisis de ciclo de vida de la cadena productiva agave-tequila, existe amplias áreas de oportunidad en el desempeño ambiental de la industria tequilera, como es el caso de contingencias recientes como el caso de la queja presentada ante el T-MEC por daños que ocasiona la producción del tequila (Enciso, 2023) y el derrame de vinazas en el municipio de Ayotlán (Ruiz y Sánchez, 2021), entre otros. En el presente trabajo se plantea una propuesta técnicamente viable en prácticamente cualquier escala de empresa tequilera, que pretende fortalecer el concepto de economía circular, dado que se aplican conceptos básicos de balance de materia y energía que permiten reducir el bagazo producido in situ, con bajo consumo de energía y generar simultáneamente composta y vinaza con mayor potencial metanogénico resultado de una detoxificación (eliminación de compuestos fenólicos) que favorece una posterior valorización.

## Materiales y Métodos

A continuación se describe los materiales y métodos utilizados en el desarrollo experimental del trabajo.

### *El bagazo de Agave tequilana Weber var. Azul*

La Unidad de Tecnología Ambiental (UTA) del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ) proporcionó el bagazo de *Agave tequilana* Weber var. Azul (ATW) proveniente de una empresa tequilera del municipio de Tequila, Jalisco. El bagazo se secó al sol durante 3 días para eliminar el mayor porcentaje de humedad, para después almacenarlo en un lugar oscuro y seco.

### *Vinaza Tequilera*

La Unidad de Tecnología Ambiental (UTA) del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ) proporcionó la vinaza de *Agave tequilana* Weber var. Azul (ATW), proveniente de una empresa tequilera del municipio de Tequila, Jalisco. La vinaza se centrifugó a 5000 rpm durante 5 min para eliminar la mayor cantidad de sólidos.

### *Azul de Metileno*

Se preparó una solución de azul de metileno a 100 ppm como solución madre y se diluyó a 10 ppm.

### *Síntesis del Biochar*

Doce gramos de biomasa de bagazo de agave se empacaron con papel aluminio y se pirolizaron a 250 °C en una mufla de laboratorio durante 20 min. El biocarbón se trituró en mortero y se tamizó en dos medidas (0.6 - 0.08 mm) para eliminar el polvo. Posteriormente se lavó y centrifugó hasta eliminar todas las impurezas. Finalmente se dejó secar durante una noche a 100 °C.

## **Métodos Analíticos**

### *Cinética de Adsorción de Azul de Metileno*

Con la finalidad de determinar la eficiencia de la adsorción de nuestros materiales se realizaron cinéticas de adsorción en batch. Se utilizaron 150 mL de una solución de azul de metileno (AM) a 10 ppm, con 0.15 g de biomasa. La cinética se realizó a 500 rpm durante 5 h.

### *DQO*

Para determinar la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se utilizó la técnica de Hach en alto rango.

### *Fenoles Totales*

Para determinar los Fenoles Totales se utilizó la técnica de Folin-Ciocalteu.

## **Resultados y Discusión**

La Figura 2 esquematiza la propuesta de tratamiento de los principales residuos que se generan en el proceso de fabricación de tequila y el proceso de tratamiento propuesto. En la figura, el cuadro punteado comprende la producción estándar de producción, donde el bagazo es obtenido ya sea con cocción o sin cocción de la piña de agave y que posteriormente es transportado fuera de la empresa con los respectivos costos asociados de transporte. En el proceso alterno propuesto, el bagazo se piroliza y como se muestra en la Tabla 2, se logra una reducción de al menos el 45% del volumen inicial del bagazo y por lo tanto se reduce a la mitad este gasto. El biochar (biocarbón producido con el tratamiento térmico en ausencia de oxígeno) obtenido, tiene un potencial de adsorción que puede reducir el contenido de carga orgánica principalmente mediante la filtración de macropartículas como son fibras y materia en suspensión y retenidas en el biochar que posteriormente será materia compostable (con valor agregado). Asimismo, la vinaza obtenida en el proceso (en la parte inferior derecha de la figura), gracias a la capacidad de adsorción del biochar, tendrá un contenido menor de carga orgánica y de fenólicos con potencial inhibidos, que se describe más adelante.

En la Tabla 1 se muestra el porcentaje de reducción en el peso del bagazo de agave en el proceso de síntesis del biochar. Se realizaron varias pruebas con diferentes tiempos y cantidades de bagazo con el propósito de tener una estimación de la reducción de biomasa. Los datos obtenidos arrojaron que el peso del bagazo seco se redujo en un 50.8% en promedio.

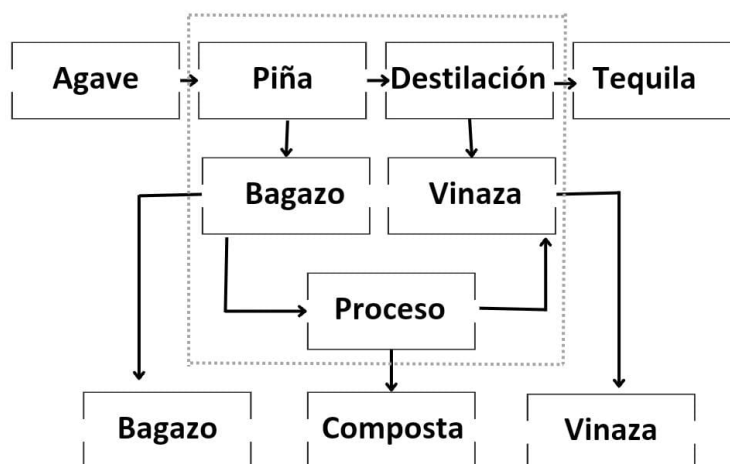


Figura 2. Esquema sintético de producción de tequila. El cuadro punteado muestra la generación actual de residuos *in situ*, fuera del cuadro el bagazo, la composta y vinaza con la aplicación del proceso propuesto en el presente trabajo.

Tabla 1. Reducción de peso en el proceso de síntesis del biochar.

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Porcentaje (%)
250	60	2.0209	1.0913	54
250	30	2.0182	0.963	48
250	30	5.0018	2.5613	51
250	15	2.0068	0.9032	45
250	15	5.0157	2.4084	48
250	20	12.2358	7.2574	59

### Cinética de Adsorción de Azul de Metileno

Para comparar la eficiencia del biochar sintetizado, se utilizó carbón activado comercial (C.A.) marca Darco como base. Se realizaron tres diferentes cinéticas para encontrar el rendimiento óptimo de adsorción con un tiempo de contacto de 5 h en una solución de azul de metileno a 10 ppm. El biochar obtenido se denomina "biochar 20 min" ya que corresponde al obtenido en la Tabla 1, el cual fue activado mediante el uso de hidróxido de sodio al 40% y posteriormente lavado con agua caliente o agua fría. En la Figura 3 (a) se comparó el C.A. con el biochar 20 min sin activar, donde se obtuvo una remoción de 86% y 68% respectivamente. En la Figura 3 (b) se comparó el biochar 20 min activado con agua fría y caliente con el propósito de conocer el efecto del agua en la activación; donde se obtuvieron resultados del 22% de remoción de azul de metileno con el biochar activado con agua fría, mientras que se obtuvo un 64% de remoción con el biochar activado con agua caliente. En la Figura 3 (c) se comparan los rendimientos obtenidos con el biochar sin activar y con el biochar activado con agua caliente que tuvieron rendimientos de 68% y 64% respectivamente, la ventaja observada al activar el biochar, fue que la adsorción se realizó en un menor tiempo en comparación con el que no se activó.

En la Tabla 2 se muestra la comparación de remoción de colorantes con un carbón activado obtenido a partir de bagazo de agave y el biochar obtenido de bagazo de agave. Para realizar la réplica en las pruebas de adsorción, se preparó una solución de azul de metileno a 20 ppm en 25 mL, se dejó en agitación durante 1 min y se tomó la muestra a los 5 min de contacto obteniendo una remoción del 31% de azul de metileno, a comparación de las pruebas realizadas a una concentración de azul de metileno a 10 ppm en 150 mL, con un tiempo de contacto de 5 h obteniendo una remoción del 68% de azul de metileno, se tomó como referencia comparativa el tiempo de contacto de 5 minutos considerado el experimento de Pérez et al. (2017) bajo el supuesto de haberse tomado un tiempo de contacto equivalente.

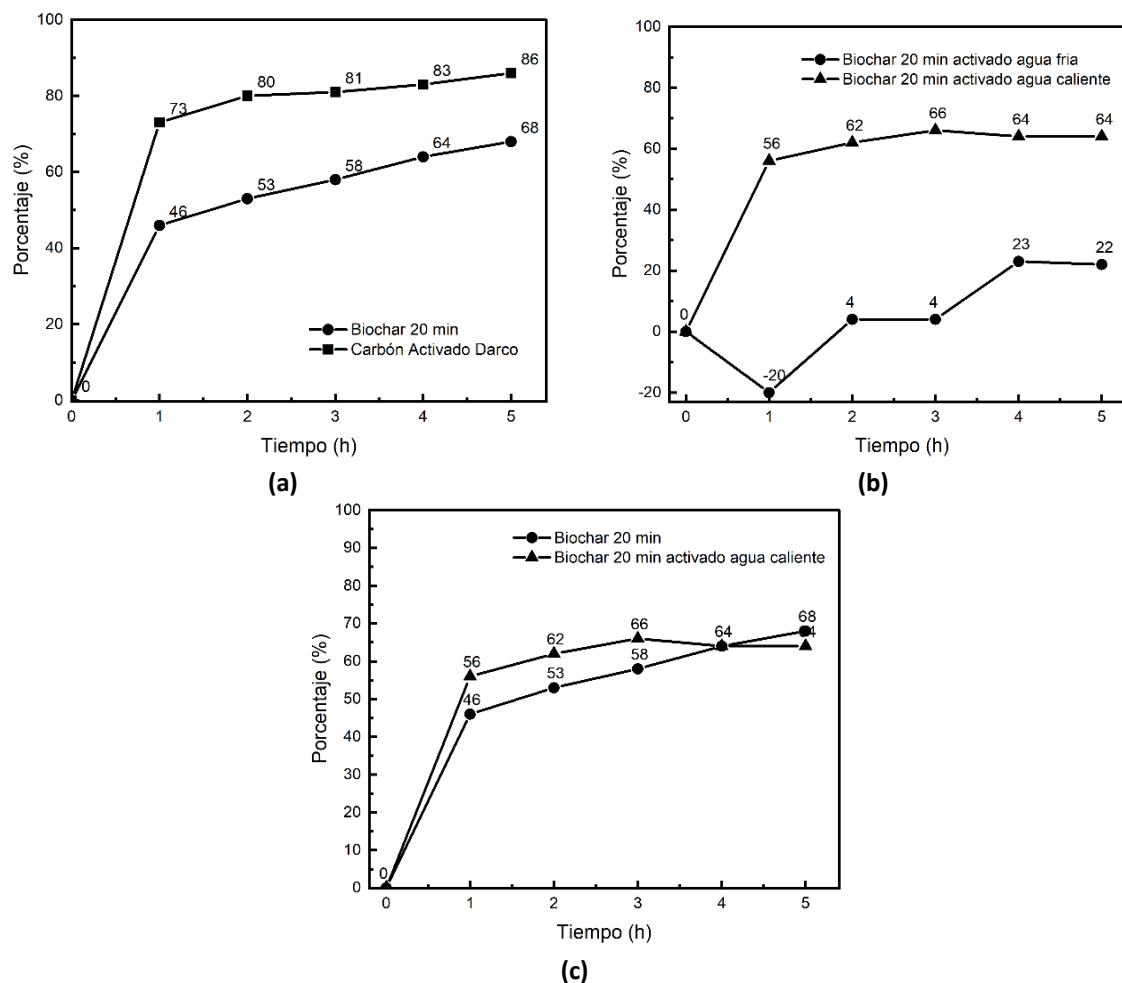


Figura 3. Porcentaje de adsorción de azul de metileno (a) comparación entre “biochar 20 min” sin activar y carbón activado comercial (b) comparación entre “biochar 20 min” activado, lavado con agua fría y lavado con agua caliente y (c) comparación entre “biochar 20 min” sin activar y activado con agua caliente.

Tabla 2. Cuadro comparativo de remoción de colorantes.

Material	Peso (g)	Solución (mL)	Remoción (%)	Fuente
Carbón activado obtenido de bagazo de agave	0.5 g	25 mL de naranja de metilo a 20 ppm.	95%	Pérez et al. (2017)
Biochar obtenido de bagazo de agave	0.5 g	25 mL de azul de metileno a 20 ppm.	31%	Este trabajo
Biochar obtenido de bagazo de agave	0.15 g	150 mL de azul de metileno a 10 ppm.	68%	Este trabajo

### Demanda Química de Oxígeno

En la Figura 4 se tomó la demanda química de oxígeno como parámetro para la determinación del grado de contaminación que tienen las vinazas tequileras, y qué tanto pueden ser tratadas con el biochar y el carbón activado.

En los resultados se obtiene que el carbón activado pudo reducir el 70% de la contaminación encontrada en la vinaza, mientras que el biochar eliminó el 14%. Estos resultados aparentan no son significativos; sin embargo, demuestran que el biochar es capaz de disminuir la DQO de una sustancia altamente contaminante y favorecer su posterior tratamiento.

### Fenoles Totales

En la Figura 5 se realizó la cuantificación de fenoles con la intención de conocer la capacidad del biochar para remover los fenoles totales presentes en la vinaza tequilera, ya que estos son conocidos como inhibidores para la producción de biogás (García-Becerra et al., 2019). En la Figura 5 podemos observar que el carbón activado removió el 100% de los fenoles presentes en la vinaza, mientras que por su parte el biochar removió el 28% de compuestos fenólicos lo cual induce un índice del impacto positivo en su posterior tratamiento (metanización).

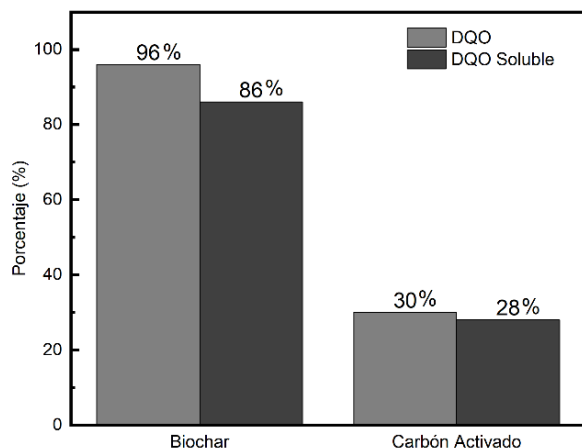


Figura 4. Comparación entre el biochar sintetizado y el carbón activado para la eliminación de DQO y DQO soluble.

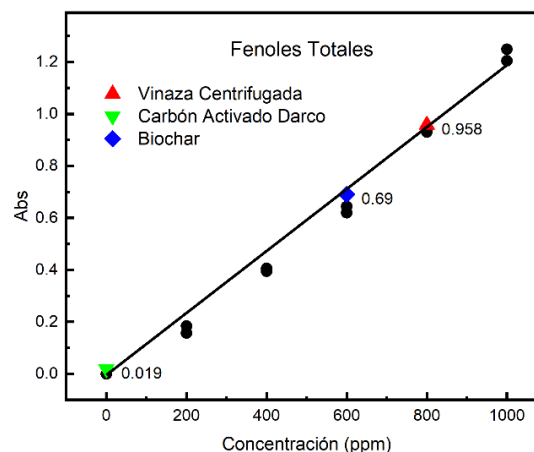


Figura 5. Remoción de fenoles de la vinaza tequilera con biochar y carbón activado.

## Conclusiones

Los residuos agroindustriales, como el bagazo de agave, pueden ser una alternativa útil para dar solución a la contaminación presente en los recursos hídricos al proporcionar un valor agregado por medio de su transformación en adsorbentes valorizables como es el caso del biochar. Esta es una manera eficiente, económica y sencilla de producir un material biodegradable capaz de descontaminar aguas residuales.

Los resultados de las biomásas evaluadas demostraron que es posible reducir el  $50.8 \pm 5\%$  de la masa seca del bagazo de agave y transformarlo en biochar, que es un material con uso potencial como adsorbente en la remoción de contaminantes presentes en las aguas (carga orgánica, contenido de sólidos suspendidos y fenoles totales) con resultados de remoción en pruebas controladas del 68% de colorante azul de metileno, y del 14% de DQO y un 28% de compuestos fenólicos en muestras de vinaza.

**Agradecimientos y financiamiento:** Proyecto Ciencia de Frontera CF 2019 – 2095609 “Modificación enzimática y/o quimioenzimática de la quercetina recuperada de vinazas de tequila y bagazo de agave residual para elevar su biodisponibilidad como potencial fármaco contra las enfermedades de mayor incidencia en México”.

## Bibliografía

- Crespo González, M. R., González Eguiarte, D. R., Rodríguez Macías, R., Ruiz Corral, J. A., & Durán Puga, N. (2018). Caracterización química y física del bagazo de agave tequilero compostado con biosólidos de vinaza como componente de sustratos para cultivos en contenedor. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 34(3), 373-382.
- CRT, Consejo Regulador del Tequila. (2023a). Información estadística. [en línea] <https://www.crt.org.mx/EstadisticasCRTweb/> 20/08/2023.
- CRT, Consejo Regulador del Tequila. (2023b). Estrategia de sustentabilidad de la Cadena Agave-Tequila 2016 [en línea] [https://www.crt.org.mx/images/Documentos/Estrategia\\_Sustentabilidad.pdf](https://www.crt.org.mx/images/Documentos/Estrategia_Sustentabilidad.pdf) 20/08/2023.

- CRT, Consejo Regulador del Tequila. (2023c). Proceso de Elaboración de Tequila. [en línea] <https://www.crt.org.mx/index.php/es/el-tequila-3/elaboracion-normativa/63-proceso-de-elaboracion-de-tequila> 20/08/2023.
- Díaz-Vázquez, D., Carrillo-Nieves, D., Orozco-Nunnally, D. A., Senés-Guerrero, C., & Gradilla-Hernández, M. S. (2021). An integrated approach for the assessment of environmental sustainability in agro-industrial waste management practices: the case of the tequila industry. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 682093. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.682093>
- Enciso L., Angélica (2023). Queja ante el T-MEC por daños que ocasiona la producción del tequila. *La Jornada*. Publicado el 24 de abril de 2023. <https://www.jornada.com.mx/2023/04/24/politica/008n1pol>
- García-Becerra, M., Macías-Muro, M., Arellano-García, L., & Aguilar-Juárez, O. (2019). Bio-hydrogen production from tequila vinasses: Effect of detoxification with activated charcoal on dark fermentation performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(60), 31860-31872. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.059>
- López-López, A., Dávila-Vázquez, G., León-Becerril, E., Villegas-García, E., & Gallardo-Valdez, J. (2010). Tequila vinasses: generation and full scale treatment processes. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 9, 109-116. <https://doi.org/10.1007/s11157-010-9204-9>
- Marino-Marmolejo, E.N., Corbalá-Robles, L., Cortez-Aguilar, R.C. et al. (2015). Tequila vinasses acidogenesis in a UASB reactor with *Clostridium* predominance. *SpringerPlus* 4, 419. <https://doi.org/10.1186/s40064-015-1193-2>
- Pérez Macedo, P. M., Hernández Arrazola, S. E., Aquino González, L. V., Cano Barrita, P. F. D. J., & Rojas Olivos, A. (2017). Propiedades adsorptivas del carbón activado obtenido a partir de bagazo de agave y cascarón de huevo. <https://repositorio.lasalle.mx/handle/lasalle/1951>
- Sánchez-Ureña, S.G., Bolaños-Rosales, R.E., Aguilar-Juárez, O. et al. (2022). Tequila Production Process Influences on Vinasses Characteristics. A Comparative Study Between Traditional Process and Non-cooked Agave Process. *Waste Biomass Valor* 13, 3183–3195. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01731-y>
- Ruiz Refugio y Sánchez Fabiola. (2021). Contaminación de presa pone en riesgo a pescadores en México. *Apnews*. Publicado el 22 de diciembre de 2021. <https://apnews.com/article/noticias-03b5db689de5c5d189c10956d1e2c83b>