

Remoción de compuestos fenólicos contenidos en la vinaza mezcalera empleando polielectrolitos (PAM y PAC) y fotólisis UV/H₂O₂

Removal of phenolic compounds contained in mezcal vinasse using polyelectrolytes (PAM and PAC) and UV/H₂O₂ photolysis

Luis Armando De La Peña-Arellano^{1*}, Judith Alejandra Alférez-Ibarra¹, María Dolores Josefina Rodríguez-Rosales¹, Sergio Valle-Cervantes¹, Luis Alberto Ordaz-Díaz²

¹TecNM/Instituto Tecnológico de Durango. Maestría en Sistemas Ambientales. Blvd. Felipe Pescador 1830 Ote. Col. Nueva Vizcaya. CP 34080 Durango, Dgo. México

²Universidad Politécnica de Durango. Carretera Durango-México km 9.5 CP 34300 Durango, Dgo. México

*Correspondencia: aparellano@itdurango.edu.mx (Luis Armando De La Peña-Arellano)

DOI:

Recibido: 23 de junio de 2024; Aceptado: 10 de septiembre de 2024

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editor de Sección: Dr. José Rafael Minjares-Fuentes

Resumen

Las vinazas son residuos altamente contaminantes que se generan en los procesos de elaboración del mezcal. Estos efluentes se caracterizan por tener una alta carga orgánica, un color marrón, pH ácido y un alto contenido de compuestos recalcitrantes, como son los compuestos fenólicos. Para investigar la reducción de estos compuestos presentes en las vinazas mezcaleras se implementó un tren de tratamiento donde se realizó, primeramente, la caracterización del efluente, seguido de un pretratamiento fisicoquímico (coagulación/floculación) y posteriormente se aplicó un proceso de oxidación avanzada (fotólisis UV/H₂O₂). Los resultados de la caracterización de la vinaza mezcalera mostraron altos valores de la demanda química de oxígeno (DQO) de 45,730 mg O₂/L, pH de 3.4 y contenido de fenoles totales de 3,000 mg AG/L. Para el pretratamiento se utilizó el policloruro de aluminio (PAC) como coagulante y poliacrilamida (PAM) como floculante, se lograron remociones de color del 67 %, turbidez del 95 %, fenoles totales del 40 % y DQO de 56 %, con las condiciones de pH 5 y dosificaciones de PAC de 10 mg/L y PAM de 3 mg/L. Para las pruebas de fotólisis UV/H₂O₂ se utilizó la vinaza cruda y coagulada, obteniendo remociones de fenol cercanas al 60 % en un tiempo de retención de 35 min y una concentración de H₂O₂ de 0.99 g/L.

Palabras clave: vinaza, coagulación/floculación, polielectrolitos, fotólisis UV/H₂O₂

Abstract

Vinasses are highly polluting residues that are generated in the mezcal production process. These effluents are characterized by a high organic load, a brown color, acid pH and a high content of recalcitrant compounds, such as phenolic compounds. To investigate the reduction of these compounds, present in the mezcal vinasse, a treatment train was implemented where, first, the effluent was characterized, followed by a physicochemical pretreatment (coagulation/flocculation) and then an advanced oxidation process (UV/H₂O₂ photolysis) was applied. The results of the characterization of the mezcal vinasse showed high chemical oxygen demand (COD) values of 45,730 mg O₂/L, pH of 3.4 and total phenol content of 3,000 mg AG/L. For pretreatment, aluminum polychloride (PAC) was used as a coagulant and polyacrylamide (PAM) as a flocculant. Color removal of 67 %, turbidity of 95 %, total phenols of 40 % and COD of 56 % were achieved at pH 5 and PAC dosages of 10 mg/L and PAM of 3 mg/L. For the UV/H₂O₂ photolysis tests, the raw and coagulated stillage was used, obtaining phenol removals close to 60 % in a retention time of 35 min and a H₂O₂ concentration of 0.99 g/L.

Keywords: vinasse, coagulation/flocculation, polyelectrolytes, UV/H₂O₂ photolysis

1. Introducción

La producción de bebidas alcohólicas en México se remonta a miles de años, siendo las más importantes y representativas el bacanora, el sotol, el tequila y el mezcal, incluso son reconocidas como bebidas nacionales de gran tradición (Chávez-Parga *et al.*, 2016). La producción del tequila en México ha generado una industria económicamente muy atractiva, y que ha posesionado al tequila como una bebida de alto prestigio en el mundo. Asociado a esto, en los últimos 10 años la producción de mezcal ha buscado acceder a los mercados nacionales e internacionales para su comercialización. Al año se generan cerca de 8 millones de litros de mezcal (CRM, 2023), los cuales van en aumento debido a su gran popularidad nacional e internacional. Sin embargo, la generación de los subproductos que se producen en el proceso de fermentación y destilación del agave también aumenta de manera constante, ya que se estima que por cada litro de mezcal se producen cerca de 10 a 12 L de vinaza (Rodríguez-Cortés, 2016), lo que significa que anualmente se viertan al medio ambiente, entre 45 y 54 millones de litros de vinaza. Cerca del 80 % de las vinazas no reciben el tratamiento adecuado para su disposición y son descargadas a los cuerpos de agua y suelo, provocando efectos nocivos en la flora y fauna acuática.

Estos efluentes se caracterizan por ser altamente contaminantes y poseer un color marrón, debido al contenido de compuestos recalcitrantes, como son los polifenoles y las melanoidinas, así como valores de pH ácidos (Robles-González *et al.*, 2018). Además, contienen una alta concentración de sales, compuestos aromáticos, alcoholes, ácidos orgánicos (acético, isobutírico, butírico, valérico, cáprico, enántico, caprílico, láurico, palmítico y otros), furanos, alcanos, aldehídos, ésteres, cetonas, y píranos (Rodríguez-Félix *et al.*, 2018). Estas características están muy relacionadas con los procesos de producción y la especie de agave que se utiliza para elaborar el mezcal, ya que cada etapa que forma parte de este proceso tiene el potencial de afectar la calidad sensorial y química del producto final, así como sus rendimientos, y como consecuencia también los subproductos generados (vinazas) resultan muy variados en su composición, lo que los hace muy difíciles de tratar por métodos biológicos aeróbicos, (Díaz-Barajas *et al.*, 2024).

Los tratamientos de las vinazas han sido objeto de estudio en los últimos años, ya que los contaminantes recalcitrantes que se encuentran en mayor presencia no pueden ser degradados mediante la utilización de métodos convencionales de tratamiento, es decir, los tratamientos físicos, químicos y biológicos por sí solos no pueden eliminar en su totalidad a estos compuestos. Es necesario aplicar una serie de tratamientos combinados como los procesos fisicoquímicos y de oxidación avanzada para poder mineralizar estos compuestos (Díaz-Barajas *et al.*, 2024).

Se han desarrollado muchos trabajos de investigación con las vinazas provenientes de la elaboración del tequila, ya que tiene mucha similitud con las vinazas mezcaleras, al utilizar las mismas etapas de producción: selección y corte de la materia prima, la cocción del agave, la molienda del mosto, la fermentación del jugo de fructosa, la destilación, la rectificación y la maduración del destilado (Pérez-Hernández *et al.*, 2016). Estos tratamientos se pueden aplicar a las vinazas mezcaleras.

Se han llevado a cabo tratamientos de vinazas provenientes del tequila mediante el proceso de coagulación/floculación, utilizando como floculante poliacrilamida (PAM) catiónica (Iñiguez y Hernández, 2010), para ello utilizaron una vinaza que contenía una alta carga orgánica, con valores de la demanda química de oxígeno (DQO) de 55,000 mg/L y de 38,000 mg/L de sólidos suspendidos totales (SST), así como un valor de pH de 3.5. Se demostró con esta investigación que la adición de PAM logró remover gran parte de la materia orgánica y los SST, pero en este trabajo no se cuantificaron los compuestos recalcitrantes contenidos en las muestras analizadas.

Se investigó la aplicación del proceso de oxidación avanzada (POA), empleando el uso de luz UV y H₂O₂ como agente oxidante y un sólido contenedor de hierro. La vinaza fue caracterizada mediante lo establecido en distintas normas y el fenol con la técnica de Folin-Ciocalteu. Se encontraron las condiciones óptimas de operación, las cuales resultaron con un tiempo de reacción de 120 min, un pH de 2.8 y una temperatura de 35 °C. Los resultados obtenidos con la implementación de este proceso fueron de 30 % de COT, 62 % de fenoles, 53 % de ligninas y 47 % de melanoidinas. Con los resultados obtenidos en este estudio, se llegó a la conclusión de que la aplicación de POA por sí sola no logra recuperar grandes cantidades de polifenoles; sin embargo, al utilizarlos en combinación con procesos fisicoquímicos, se lograron tasas de recuperación más altas (Gómez-Martínez, 2017).

Estudios realizados por Rodríguez-Arreola (2019) demostraron que con la combinación de los procesos de coagulación/floculación seguida de una fotocatalisis heterogénea se logró eliminar el 99 % de sólidos suspendidos totales (SST), 86 % de color, 70 % de DQO y 90 % de fenol contenidos en las vinazas mezcaleras. Para la aplicación de estos procesos se utilizó sulfato de aluminio y quitosano como agente coagulante y floculante, respectivamente, así como nanopartículas de óxido de titanio (TiO₂) en el proceso de fotocatalisis heterogénea.

La aplicación de los POA es muy prometedora para el tratamiento de estos efluentes. Este tipo de tratamientos se caracterizan por llevar a cabo la oxidación de los contaminantes a través de radicales hidroxilos, hasta convertirlos en CO₂ y H₂O o en compuestos menos peligrosos. El proceso de fotólisis UV/H₂O₂ es uno de los más utilizados para la remoción de contaminantes recalcitrantes, ya que el peróxido de hidrógeno es un agente altamente oxidante, tiene la capacidad de producir radicales hidroxilos ya sea en presencia o en ausencia de radiación y es considerado un agente oxidante sustentable con el ambiente, ya que sus subproductos de oxidación son el oxígeno y agua. Estos procesos por sí solos no pueden modificar en su totalidad las características de la vinaza, por esta razón es necesaria la utilización de un proceso fisicoquímico primario como la

coagulación/floculación, la cual permitirá obtener grados de remoción más altos al trabajarse en conjunto con la oxidación avanzada.

Con base a lo anterior, el objetivo de esta investigación fue implementar una línea de tratamiento con los procesos de coagulación/floculación y fotólisis UV/H₂O₂ para determinar la remoción de compuestos fenólicos presentes en la vinaza mezcalera, iniciando con la caracterización de los compuestos fenólicos; color, turbidez y DQO contenidos en la vinaza, para evaluar la eficiencia de los polielectrolitos, policloruro de aluminio (PAC) y poliacrilamida (PAM), como agentes coagulantes/floculantes y el proceso de oxidación avanzada UV/H₂O₂.

2. Materiales y métodos

2.1 Vinaza

La vinaza para este estudio se obtuvo de la vinata denominada “Cuero viejo” que se localiza en el municipio de Nombre de Dios, Durango. La muestra de vinaza obtenida se almacenó en bidones plásticos de 20 L, los cuales se mantienen en refrigeración a 4 °C, esto con el objetivo de evitar el crecimiento de distintos microorganismos provenientes de las levaduras, los cuales crecen a temperatura ambiente. Al iniciar los tratamientos, la vinaza se condicionó hasta alcanzar una temperatura de 25 °C, para garantizar un manejo adecuado de los experimentos.

2.2 Caracterización fisicoquímica

La caracterización fisicoquímica de la muestra se llevó a cabo de manera periódica, esto mediante los métodos establecidos para el análisis de aguas y aguas residuales, y algunas normas mexicanas (NMX), las cuales se presentan en la **Tabla 1**.

Los sólidos totales se determinaron mediante el calentamiento y secado de muestras, calculándolos en mg/L al comparar el peso inicial con el final. Los valores de pH fueron determinados con un potenciómetro Hanna en escala de unidades estándar de 0 a 14. El color y la turbidez fueron determinados mediante un espectrofotómetro UV/Vis marca HACH, modelo DR 4000 (Loveland, CO, EUA) y la alcalinidad mediante el método de titulación con ácido sulfúrico. El valor de potencial zeta representa el carácter iónico de las vinazas, y se determinó empleando el analizador Zeta Meter 3.0+, Zeta-Meter Inc. (Staunton, VA, EUA) que consta de una celda de análisis donde se depositan las muestras y un microscopio con cámara de video para observar la dirección a la cual se desplazan (ánodo o cátodo) los coloides al momento de aplicar una corriente eléctrica. Se adaptaron también algunos métodos usando la bibliografía consultada respecto al tema de coagulación/floculación y oxidación avanzada.

Tabla 1. Métodos y técnicas de análisis para las muestras de vinaza mezcalera.**Table 1.** Methods and analysis techniques for mezcal vinasse samples.

Parámetro	Unidades	Equipo/Método	Norma/técnica
pH	UpH	Potenciómetro ST10	Potenciometría
Color	Pt-Co	Espectrofotómetro UV-Vis	Espectrometría
DQO	mg O ₂ /L	Reactor DQO, Hanna Mod. HI839800	NMX-AA-030-SCFI-2002
Turbidez	NTU	Espectrofotómetro UV-Vis	Espectrometría
Sólidos totales	mg/L	Estufa-mufla	NMX-AA-034-SCFI-2015
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	Potenciómetro	NMX-AA-036-SCFI-2021
Fenoles totales	mg AG/L	Espectrofotómetro UV-Vis	Folin-Ciocalteau
Potencial zeta	mV	Zeta meter 3.0+	Microelectroforésis

Los parámetros descritos en la **Tabla 1.** fueron monitoreados en cada uno de los experimentos realizados para determinar los porcentajes de remoción logrados, de este modo para la remoción de fenoles totales, color, turbidez, etc., se utilizó la **Ec. (1)**:

$$\%Remoción = \frac{(Ci - Cf)}{Ci} * 100 \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde **Ci** es la concentración inicial de cada parámetro analizado expresada en mg/L y **Cf** es la concentración final obtenida después de haber ejecutado cada uno de los experimentos en las mismas condiciones establecidas.

2.3 Equipos y reactivos utilizados

Los equipos y reactivos utilizados para la realización de cada una de las técnicas y métodos establecidos para realizar la caracterización de la vinaza y su tratamiento durante la experimentación se muestran en la **Tabla 1.**

Para la realización de las pruebas de coagulación/floculación se utilizó un equipo de agitación múltiple de cuatro paletas denominado prueba de jarras marca PHIPPS & BIRD, modelo PB-700 TM (Richmond, VA, EUA), para la determinación de turbidez, color y fenoles totales se empleó un

espectrofotómetro UV/Vis marca HACH, modelo DR 4000 (Loveland, CO, EUA) y para evaluar el carácter iónico (potencial zeta) de las muestras se dispuso de un analizador denominado Zeta Meter 3.0+, Zeta-Meter Inc. (Staunton, VA, EUA), equipado con cámara de video y microscopio de 20X. Para medir los valores de pH se usó un potenciómetro PH/EC/TDS marca Hanna, modelo HI98129, (CA, EUA) y un reactor DQO, Hanna modelo HI839800, (CA, EUA) se empleó para determinar la DQO.

Los reactivos utilizados fueron: Coagulante catiónico: policloruro de aluminio (PAC) $Al_2Cl(OH)_5$, peso molecular de 174.45 g/mol, floculante no aniónico: poliacrilamida (PAM) $(C_3H_5NO)_n$ peso molecular de 71.07 g/mol, ácido gálico, carbonato de sodio anhidro y reactivo de Folin-Ciocalteu 1N. Todos los reactivos utilizados fueron marca SIGMA ALDRICH, excepto el hidróxido de sodio 1M que fueron marca SUPELCO.

2.4 Cuantificación de fenoles totales

Para determinar la cantidad de fenoles totales presentes en las muestras de vinaza se empleó el método espectrofotométrico de Folin-Ciocalteu (García-Becerra, 2019), usando el ácido gálico como material de referencia. Se preparó una disolución patrón de ácido gálico de 0.1 g/L, para lo cual se pesaron 25 mg de ácido gálico, se colocaron en un matraz aforado de 25 mL y se llevaron a volumen con agua destilada, enseguida se preparó una dilución 1:10 con agua destilada (siempre se utiliza una solución recién preparada). A partir de la disolución patrón de ácido gálico, en viales protegidos de la luz, se hicieron las diluciones necesarias con agua destilada para obtener concentraciones en un rango de 0 a 800 mg/L para la preparación de la curva de calibración. Esto se realizó tomando respectivamente alícuotas de 20, 40, 60, 80 y 100 μ L de la disolución patrón de ácido gálico de 0.1 g/L en viales ámbar de 3 mL, luego se adicionó a cada vial, 250 μ L de reactivo de Folin- Ciocalteu 1N, se agitó durante 5 min en el ultrasonido, posteriormente se adicionaron 1,250 μ L de la disolución de carbonato de sodio al 20 % a cada vial, se llevó a un volumen final de 2 mL con agua destilada y se dejó reposar por 2 h. También se preparó un blanco con todos los componentes excepto la disolución de ácido gálico. Finalmente, se leyó la absorbancia a 760 nm en el espectrómetro de UV/Vis.

2.5 Pruebas de coagulación/floculación

Las pruebas de coagulación-floculación se llevaron a cabo a temperatura ambiente entre 22 a 25 °C en un equipo para prueba de jarras marca PHIPPS & BIRD, modelo PB-700 TM (Richmond, VA., USA) provisto de 6 jarras de acrílico con capacidad de 1 L y control de agitación simultánea en las seis jarras. El procedimiento para la realización de estas pruebas fue el siguiente:

1. Para cada condición experimental el volumen de trabajo fue de 500 mL.
2. Primeramente, se ajusta el pH de la muestra con una solución de NaOH (1M) según el valor requerido de pH para los ensayos, los cuales se fijaron en un rango de 3 a 6.
3. Después se adiciona a cada jarra la dosis del coagulante (PAC) en concentraciones de 2 a 12 mg/L.
4. Luego se agrega a cada jarra la dosis de floculante (PAM) a diferentes concentraciones de 1.5 a 6 mg/L.

5. Finalmente, se someten las muestras a agitación rápida de 100 rpm por un tiempo de 5 min, luego se reduce la agitación a 40 rpm por 15 min y después se detiene la agitación durante un tiempo de 60 min para dejar sedimentar las muestras.
6. Tras finalizar el tiempo de sedimentación se toma una muestra representativa de cada jarra y se realizan los análisis correspondientes.
7. Los experimentos se realizaron por triplicado, teniendo como variable de respuesta el color, turbidez, DQO y fenoles totales, así como el pH al final en cada tratamiento.

2.6 Pruebas de fotólisis UV/H₂O₂

La radiación UV combinada con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) es uno de los procesos de oxidación avanzada más apropiada para la remoción de compuestos orgánicos tóxicos. Este proceso combinado tiene la característica de acelerar la formación de radicales HO• los cuales son capaces de mineralizar los compuestos orgánicos presentes en el agua residual. En la **Fig. 1** se muestra el mecanismo de reacción de este proceso.

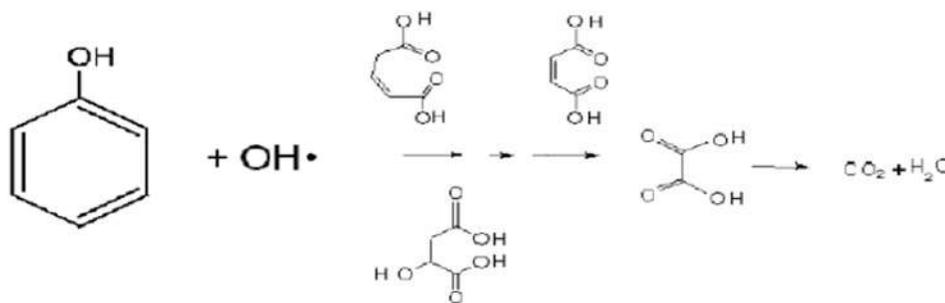


Figura 1. Mineralización del fenol a través de la oxidación por el radical hidroxilo. Fuente: Gómez-Martínez, 2017.

Figure 1. Phenol mineralization through oxidation by hydroxyl radical. Source: Gómez-Martínez, 2017.

Este proceso de oxidación avanzada consistió en la utilización de un reactor tubular de acero inoxidable equipado con lámparas de luz UV con las características que se muestran en la **Tabla 2**. y la utilización de una solución de H₂O₂ al 30% como agente productor de radicales HO•. El rompimiento o disociación de la molécula de H₂O₂ por fotones con energía genera un rendimiento el cual produce casi cuantitativamente dos HO• por cada molécula de H₂O₂. Los experimentos se llevaron a cabo en un proceso batch durante un tiempo de reacción de 60 min, con un volumen a tratar de 1 L de vinaza y variando la concentración del agente oxidante H₂O₂. Primeramente, se preparó una solución patrón de ácido gálico de 1,000 mg/L, para evaluar la efectividad de este sistema de fotólisis UV/H₂O₂. Para las pruebas de oxidación con la vinaza cruda se utilizaron

relaciones de H₂O₂:Vinaza de 1:100, 2:100, 3:100, 4:100 y 5:100, con pH original de la vinaza, esto para determinar las mejores condiciones de remoción de los compuestos fenólicos y demás parámetros.

Tabla 2. Especificaciones de las lámparas UV marca AWT.

Table 2. UV lamp specifications. Model AWT.

Parámetro	Unidades	Equipo
Capacidad	L	1.3
Longitud de Onda	Nm	254
Voltaje	V	110
Potencia	W	25
Longitud/diámetro de la lámpara	cm	52.5/2.6

Referencia: AWT, 2018.

El funcionamiento de este reactor tubular tipo batch consta de un proceso de carga manual a través de la válvula de entrada, el fluido llena el espacio entre el tubo de vidrio y las paredes del reactor durante el tiempo de tratamiento simultáneamente se enciende la lámpara UV, una vez cumplido este tiempo se realiza la descarga a través de la válvula de salida. Para la determinación de la eficiencia del proceso se determinó tomando alícuotas de 10 mL cada 10 min, esto para observar los cambios significativos del efluente durante la fotólisis. En la **Fig. 2** se muestra la secuencia de los tratamientos realizados durante esta investigación.

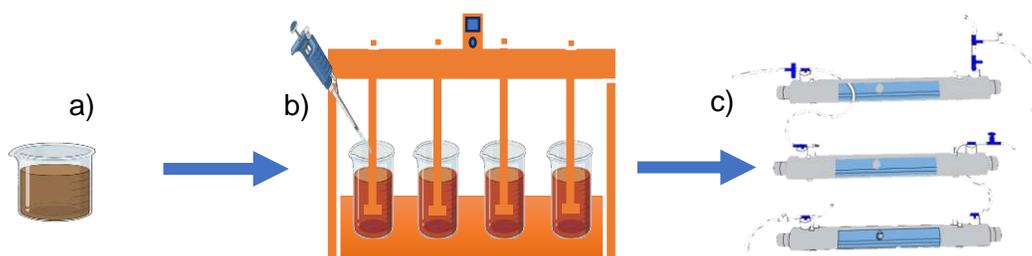


Figura 2. Sistema de tratamiento de coagulación/floculación y fotólisis UV/H₂O₂. a) Vinaza cruda, b) Prueba de Jarras y c) Lámparas UV.

Figure 2. UV/H₂O₂ Coagulation/Flocculation and Photolysis Treatment System. a) Raw vinasse, b) Jar Test y c) UV lamp.

3. Resultados y discusión

I. Caracterización fisicoquímica de la vinaza mezcalera. Los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica de la vinaza mezcalera y los límites permisibles de la norma se presentan en la **Tabla**

3. Se observa una alta concentración de materia orgánica medida como DQO de 45,730 mg O₂/L, un valor de pH de 3.4, una concentración de sólidos totales de 20,700 mg/L y valores de color y turbidez muy por encima de los valores límites permisibles establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021. Especialmente se identifica una gran cantidad de compuestos fenólicos (3,000 mg AG/L) lo que demuestra la presencia de compuestos biopersistentes en este tipo de efluentes, así como altos valores de alcalinidad, ya que los valores establecidos por la Organización Mundial de la Salud para considerar un agua potable son de 20 a 200 mg CaCO₃/L. El valor de Potencial zeta de la vinaza cruda fue de -26.77 mV, lo que representa un valor muy negativo y favorable para el uso de coagulantes/floculantes catiónicos como el PAM y PAC para lograr la desestabilización de las partículas coloidales presentes en las muestras de vinazas y así obtener una mayor formación de flóculos compactos de rápida sedimentación. El valor negativo del potencial zeta representa una fuerte estabilidad de los coloides presentes en las muestras de vinaza analizada y se espera que se alcance su punto isoeléctrico (0 mV) con las dosificaciones de los coagulantes/floculantes catiónicos, para desestabilizar estos coloides y aglomerarlos en flóculos pesados para su posterior sedimentación (López-Maldonado *et al.*, 2014).

Tabla 3. Caracterización fisicoquímica de la vinaza mezcalera.

Table 3. Physicochemical characterization of mezcal vinasse.

Parámetro	Unidad	Valor*	LP Norma**
pH	UpH	3.4 ± 0.1	6 - 9
Color	Pt-Co	7,080 ± 35	7.0 ⁽¹⁾
Turbidez	NTU	1,120 ± 15	NA
Fenoles totales	mg AG/L	3,000 ± 275	NA
DQO	mg O ₂ /L	45,730 ± 1,000	210 ⁽²⁾
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	1,633.4 ± 20	NA
Sólidos totales	mg/L	20,700 ± 84	140 ⁽²⁾
Potencial zeta	mV	-26.77 ± 5	NA

NA, No Aplica

* Media ± desviación estándar, n=3.

**Límites Permisibles (LP) establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021

- (1) Coeficiente de absorción máximo de valor de color verdadero, medido en m⁻¹ a 436 nm.
- (2) Valores instantáneos (V.I) para la descarga por infiltración en suelos.

II. Pruebas de coagulación. Primeramente, se realizaron investigaciones en las pruebas de jarras para determinar el pH óptimo del proceso de coagulación, para ello se desarrolló un experimento con una dosificación a cada jarra de 10 mg/L de PAC, según lo establecido por Yen *et al.*, 2022, y variando el pH entre valores de 3 y 6. Los resultados obtenidos se presentan en la **Tabla 4**, donde se puede observar que a un valor de pH de 5, se obtuvieron los porcentajes más altos de remoción que fueron del 41 % de color, 66 % de turbidez, 30 % de DQO y destacando la eliminación del 21 % de los compuestos fenólicos presentes en las vinazas mezcaleras. Las pruebas de jarras se llevaron a cabo considerando primeramente una agitación rápida a 100 rpm durante 5 min, seguida de una agitación lenta de 30 rpm por 10 min y finalmente un tiempo de sedimentación durante 60 min.

Tabla 4. Porcentajes de remoción con variación de pH. Dosis de PAC (10 mg/L).**Table 4.** Removal percentages with pH variation. PAC dose (10 mg/L).

pH	% Remoción			
	Color	Turbidez	Fenoles totales	DQO
3	32.7	40.1	2.4	11.2
3.3	38.0	45.0	0.6	15.0
4	38.0	58.6	3.5	22.3
4.5	41.7	62.0	10.0	22.6
5	41.0	66.0	21.0	30.4
5.5	42.7	32.7	12.0	32.3
6	19.6	13.2	3.3	5.0

Una vez obtenido el pH óptimo de trabajo de 5, se varió la dosificación del PAC en un rango de 2 a 12 mg/L, encontrando que la dosificación óptima a la cual se obtuvieron los mayores porcentajes de remoción de todos los parámetros analizados fue de 10 mg/L, estos resultados se pueden observar en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Porcentajes de remoción con variación de dosificación de PAC a pH de 5.**Table 5.** Removal percentages with PAC dosage variation at pH 5.

Dosificación de PAC (mg/L)	% Remoción*			
	Color	Turbidez	Fenoles totales	DQO
2	21.5	21.8	3.7	20
4	28.9	39.7	4.8	26.2
6	32.15	45	15	21
8	35	52	17	25
10	42	61.2	20	32
12	35	45.6	13	25

Los resultados mostrados en la **Tabla 5**, indican que con la dosificación de 10 ppm se obtuvieron los mayores porcentajes de remoción en todos los parámetros analizados, sin embargo, para esta investigación se consideró solo el mayor porcentaje de remoción del fenol para elegir las condiciones óptimas de dosificación del PAM y PAC, así como para el tiempo de reacción y la dosificación del H₂O₂ en las pruebas de fotólisis UV/H₂O₂.

III.1 Pruebas de floculación. Las pruebas de floculación se desarrollaron utilizando PAM como floculante, el cual fue agregado a cada jarra después del coagulante PAC y variando las dosificaciones en un rango de 1.5 a 6 mg/L. Los resultados presentados en la **Tabla 6**. se observa que con la dosificación de tan solo 3 mg/L de este floculante aumentan los porcentajes de remoción entre un 20 a 30 %.

Tabla 6. Porcentajes de remoción con variación de dosificación de PAM a pH de 5.**Table 6.** Removal percentages with PAM dosage variation at pH 5.

PAC (mg/L)	PAM (mg/L)	% Remoción			
		Color	Turbidez	Fenoles totales	DQO
10	1.5	51	73	21	48
	3	65.3	95	32	62
	4.5	59	86	25	63
	6	55	79	28	59

De igual manera en la **Fig. 2** se visualizan claramente los cambios obtenidos en el efluente después de cada tratamiento.

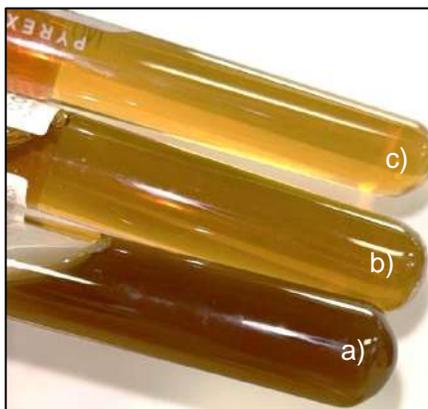


Figura 2. Coagulación-floculación de la vinaza; a) Vinaza sin tratamiento, b) Vinaza coagulada, c) Vinaza coagulada/floculada.

Figure 2. Coagulation-flocculation of vinasse; a) Untreated vinasse, b) Coagulated vinasse, c) Coagulated/flocculated vinasse.

III. Pruebas de fotólisis UV/H₂O₂. Para probar la efectividad del sistema en las pruebas de fotólisis se preparó una solución estándar de referencia de ácido gálico con una concentración de 1000 ppm. Se desarrolló el tratamiento de fotólisis en el reactor tubular durante 60 min y se tomaron alícuotas cada 10 min, aplicando una relación H₂O₂:Solución estándar de 1:100 y se removieron los compuestos fenólicos hasta en un 95 % a los 50 min de reacción, como se puede observar en la **Fig. 3**.

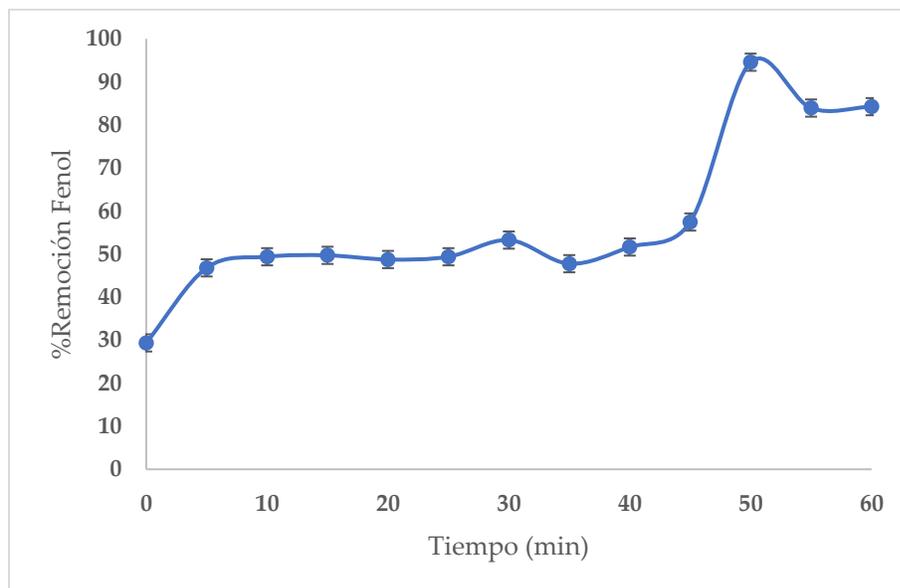


Figura 3. Proceso de fotólisis UV/H₂O₂ en solución de Ácido Gálico.

Figure 3. UV/H₂O₂ photolysis process in Gallic Acid solution.

Posteriormente, se evaluó la vinaza cruda (sin tratamiento previo) variando la relación H₂O₂:Vinaza de 1:100 (0.33 g/L), 2:100 (0.66 g/L), 3:100 (0.99 g/L), 4:100 (1.33 g/L) y 5:100 (1.66 g/L), obteniendo una remoción máxima de fenol del 56 % con una dosificación de 0.99 g/L de H₂O₂ en 35 min de tratamiento. En la **Tabla 7**. se muestran los resultados obtenidos de todas las dosificaciones de H₂O₂ en función del tiempo en el cual se obtuvo la máxima remoción del fenol.

Tabla 7. Variación de la dosificación de H₂O₂ en función del tiempo de reacción.

Table 7. Variation of H₂O₂ dosage as a function of reaction time.

Dosificación de H ₂ O ₂ (g/L)	Tiempo (min)	Remoción de fenol (%)
0.33	20	28.12
0.66	30	43.23
0.99	35	56.18
1.33	20	34.21
1.66	20	27.36

Posteriormente, se determinó la remoción de compuestos fenólicos presentes en la vinaza que quedaron después de realizar previamente la coagulación y floculación con PAC y PAM, respectivamente. Para ello se dosificaron 0.99 g/L de H₂O₂ al reactor tubular y se tomaron muestra cada 5 min durante un tiempo de reacción de 35 min. En la **Fig. 4** se muestra el comportamiento de los compuestos fenólicos en función del tiempo de reacción y en ella se puede observar que se logró remover un 25 % más de los compuestos fenólicos.

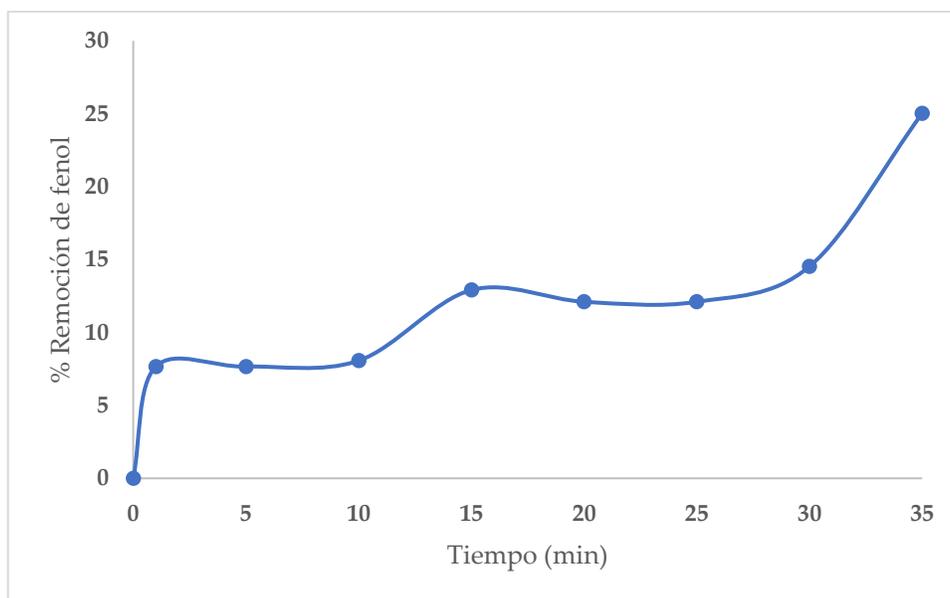


Figura 4. Proceso de fotólisis UV/H₂O₂ en vinaza cruda
Figure 4. UV/H₂O₂ photolysis process in raw vinasse

IV. Resultados de Coagulación/floculación y fotólisis UV/H₂O₂. Los valores acumulados de remoción de los compuestos fenólicos y demás parámetros en la aplicación a las vinazas mezcaleras de cada uno de los procesos de coagulación/floculación y la fotólisis UV/H₂O₂ se muestran en la **Tabla 8**. Los resultados indican que el proceso de coagulación/floculación es adecuado para realizar el pretratamiento de la vinaza al reducir hasta un 94 % la turbidez, más del 60 % del color y un 32 % de fenoles, lo cual nos garantiza que al aplicar la fotólisis UV/H₂O₂ se obtendrían mejores resultados. Sin embargo, la fotólisis UV/H₂O₂ aplicada a la vinaza coagulada-floculada logró remociones de fenoles cercanas al 65 %. Aunque esto muestra que el proceso tiene potencial para la remoción de fenoles, los resultados indican que es necesaria continuar con las investigaciones para alcanzar niveles de remoción más altos.

Tabla 8. Valores acumulados de remoción en la línea de tratamiento de las vinazas mezcaleras.
Table 8. Cumulative removal values in the mezcal vinasse treatment line.

Parámetro	Vinaza Cruda (mg/L) *	Vinaza C/F (mg/L) *	Remoción (%)	Fotólisis UV/H ₂ O ₂ (mg/L) *	Remoción Promedio** (%)
Color (Pt-Co)	7080±35	2430±25	66±0.3	4560±120	36±0.75
Turbidez (FAU)	1120±15	65±5	94±0.1	750±25	33±0.15
Fenoles totales (mg AG/L)	3000±275	2042±38	32±0.156	1050±10	65±0.24
DQO (mg/L)	45730±1000	17215±200	62±0.6	5350±140	88±0.17

* Media ± desviación estándar, n=3.

** Remoción acumulada.

4. Conclusiones

Con los resultados obtenidos en esta investigación se observó el alto poder contaminante que tienen las vinazas mezcaleras, en concordancia con otras investigaciones previas, al momento de realizar la caracterización, ya que los valores obtenidos superan por mucho los establecidos en la normatividad vigente. En especial, se detectó una alta concentración de fenoles, lo cual nos indicó que era necesario implementar técnicas eficientes de tratamiento para que pudieran ser desechadas o reutilizadas sin dañar al medio ambiente y disminuir sus impactos ambientales. Con el pretratamiento de coagulación-floculación se lograron remociones de turbidez, color, fenoles totales y DQO de 94, 66, 32 y 62 % respectivamente, verificando que con el uso de la poliacrilamida como floculante se aumentó entre un 20 y 30 %. Posteriormente, en la aplicación del proceso de fotólisis UV/H₂O₂ se comprobó la eficiencia de este proceso para llevar a cabo la mineralización de los compuestos fenólicos. Con un tiempo de 35 min se lograron eficiencias de remoción del 50 %, se espera que la aplicación en conjunto con la coagulación-floculación se logren resultados aún mejores. La eficiencia de la fotólisis UV/H₂O₂ podría incrementarse ajustando parámetros operativos como la dosis de H₂O₂, el tiempo de exposición y el pH del agua tratada. Una vez que sea tratada la vinaza por los procesos propuestos, se podría reutilizar en el mismo proceso de elaboración del mezcal o emplearse como agua de irrigación.

Contribuciones de los autores

Conceptualización, L.A.P.A. y J.A.A.I.; metodología, L.A.P.A. y J.A.A.I.; software, S.V.C.; validación, M.D.J.R.R.; análisis formal, S.V.C.; investigación, L.A.P.A.; recursos, L.A.P.A.; conservación de datos, J.A.A.I.; redacción-redacción del borrador original, J.A.A.I.; redacción-revisión y edición, L.A.P.A.; visualización, L.A.O.D., S.V.C y L.A.O.D; supervisión, L.A.P.A.; administración del proyecto, L.A.P.A.; obtención de financiación, L.A.P.A. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Agradecimientos

Se externa un agradecimiento al TecNM/Instituto Tecnológico de Durango por brindar las facilidades para el desarrollo de este proyecto de investigación que fue financiado por el Tecnológico Nacional de México (TecNM) a través de la Convocatoria 2023 de Proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación.

Conflicto de interés

Los autores no tienen ningún conflicto de intereses que declarar en relación con el contenido de este artículo.

5. Referencias

- AWT (2018), https://ferisa.com.mx/wp-content/uploads/2024/01/Catalogo-America-Water-Treatment_compressed.pdf
- CRM, Consejo Regulador del Mezcal. (2023). El Mezcal. La cultura líquida de México. Número 2. Oaxaca de Juárez. http://www.crm.org.mx/periodico/PDF/Revista_El_Mezcal2.pdf.
- Cuero Viejo. (2024). <https://cueroviejomezcal.com/proceso/>
- Chávez-Parga M. D. C., Pérez-Hernández E. & González-Hernández J. C. (2016). Revisión del agave y mezcal. *Revista Colombiana de Biotecnología* 18(1), 148-164. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.49552>
- Díaz-Barajas, S., Moreno-Andrade, L., & Garzón-Zúñiga, M. A. (2024). Mezcal vinasses treatment: A review of assessed processes. *Tecnología Y Ciencias Del Agua* 15(2), 164–206. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-15-02-04>
- García-Becerra, M. (2019). Efecto de la disminución de compuestos fenólicos de vinazas tequileras sobre la producción de hidrógeno. (Tesis de maestría. *Centro de investigación y asistencia en tecnología y diseño del estado de Jalisco*). <http://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1023/597>
- Gómez-Martínez, J.J. (2017). Degradación de los principales compuestos recalcitrantes presentes en las vinazas tequileras mediante fotofenton heterogéneo. (Tesis de maestría. *Universidad de Guadalajara*). <https://hdl.handle.net/20.500.12104/90620>
- Iñiguez, G. & Hernández, R. (2010). Estudio para la rehabilitación de una planta de tratamiento de vinazas tequileras mediante un floculante polimérico de poliácridamida (PAM). *Rev. Int. Contam. Ambient.* 26(4): 299-311. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992010000400005&lng=es&nrm=iso
- López-Maldonado, E. A., Oropeza-Guzmán, M. T., Jurado-Baizaval, J. L., & Ochoa-Terán, A. J. J. O. H. M. (2014). Coagulation–flocculation mechanisms in wastewater treatment plants through zeta potential measurements. *Journal of hazardous materials*, 279: 1-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.06.025>
- Pérez-Hernández, E., Chávez-Parga, M. C. & González-Hernández, J. C. (2016). Revisión del agave y el mezcal. *Revista Colombiana de Biotecnología* 18(1):148-164. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.49552>.
- Robles-González V., Poggi-Varaldo H.M., Galíndez-Mayer J. & Ruiz-Ordaz N. (2018) Combined treatment of mezcal vinasses by ozonation and activated sludge. *Water Environment Research* 90: 1985-1996. <https://doi.org/10.2175/106143017X15054988926433>
- Rodríguez-Arreola, A. (2019). Tratamiento de vinaza de tequila por medio de coagulación-floculación y fotocatalisis heterogénea empleando nanopartículas de TiO₂. (Tesis Doctoral. *Universidad de Guadalajara*). <https://hdl.handle.net/20.500.12104/98309>
- Rodríguez-Cortés, A. (2016). Fermentación anaerobia de la vinaza mezcalera para la obtención de productos de valor industrial. (Tesis Maestría. *BUAP*). <https://hdl.handle.net/20.500.12371/9309>

Rodríguez-Félix E., Contreras-Ramos S., Davila-Vazquez G, Rodríguez-Campos J, & Marino-Marmolejo E.N. (2018) Identification and quantification of volatile compounds found in vinasses from two different processes of Tequila production. *Energies* 11: 490. <https://doi.org/10.3390/en11030490>

Yao B., Zhao D., Guo J., Yan Ch., & Zheng C. (2022) Preparation and performance evaluation of hybrid polymer flocculants (PAC-PAM), and comparison experiments with other flocculants. *Environmental progress & Sustainable energy*. 41(4). <https://doi.org/10.1002/ep.13829>

2024 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>