

## **TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA LÁCTEA CON MUCÍLAGO DE NOPAL (*OPUNTIA FICUS-INDICA* [L.] MILL.)**

Wellington F. Lisintuña<sup>1</sup>, Edwin F. Cerda<sup>1</sup> y Mario A. García<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador. Av. Simón Rodríguez s/n Barrio El Ejido, Sector San Felipe, Latacunga, Ecuador.

<sup>2</sup>Departamento de Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Técnica de Manabí. Ave. Urbina, Portoviejo 130105, Manabí, Ecuador.

E-mail: marioifal@gmail.com

Recibido: 17-04-2020 / Revisado: 29-04-2020 / Aceptado: 01-05-2020 / Publicado: 05-05-2020

### **RESUMEN**

Se evaluó la influencia del mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica* [L.] Mill.) en la clarificación de aguas residuales de una industria láctea en relación al tiempo de proceso, concentración de mucílago y velocidad de agitación, a través del método de optimización numérica con un diseño de superficie de respuesta IV Óptimo. El tiempo de proceso no tuvo influencia y la concentración de mucílago incidió ( $p \leq 0,05$ ) sobre la turbidez, mientras que la velocidad de agitación resultó significativa, tanto para la turbidez como para la concentración de oxígeno disuelto. El pH varió de alcalino a ácido, tanto con el empleo del mucílago como del sulfato de aluminio. El empleo del mucílago redujo la turbidez en aproximadamente un 70 % y, aunque con el sulfato de aluminio se logró mayor remoción, el mucílago es una alternativa a los coagulantes tradicionales y una opción ambientalmente amigable para el tratamiento de aguas turbias.

**Palabras clave:** *Opuntia ficus-indica*, nopal, mucílago, aguas residuales, industria láctea.

### **ABSTRACT**

**Wastewater treatment of a milk industry with nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica* [L.] Mill.)**

The influence of nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica* [L.] Mill.) on the clarification of wastewater from a dairy industry in relation to process time, concentration of mucilage and stirring speed, was evaluated through the method of numerical optimization with an Optimal IV response surface design. The process time had no influence and the concentration of mucilage had an impact ( $p \leq 0.05$ ) on the turbidity, while the stirring speed was significant, both for the turbidity and for the concentration of dissolved oxygen. The pH varied from alkaline to acid, both with the use of mucilage and aluminum sulfate. The use of mucilage reduced turbidity by approximately 70%, and although more removal was achieved with aluminum sulfate, mucilage is an alternative to traditional coagulants and an environmentally friendly option for treating cloudy water.

**Keywords:** *Opuntia ficus-indica*, cactus, mucilage, wastewater, dairy industry.

---

\***Mario A. García-Pérez:** Licenciado en Ciencias Alimentarias (IFAL, 2006). Master en Ciencia y Tecnología de los Alimentos (IFAL, 2009). Doctor en Ciencias de los Alimentos (IFAL, 2015). Honoris Causa como Benemérito de la Investigación y de la Innovación (2016) del Centro de Investigaciones en Agricultura y Protección Ambiental, Italia. Su área de investigación está relacionada con el empleo de productos naturales en la industria alimentaria y desarrollo de materiales biodegradables como método de envasado activo de alimentos.

### **INTRODUCCIÓN**

Las aguas residuales de las industrias lácteas son habitualmente neutras o poco alcalinas. Sin embargo, tienden a volverse ácidas a causa del ácido láctico producido por la fermentación de los azúcares, sobre todo en ausencia de oxígeno con formación simultánea de ácido butírico, lo que disminuye el pH a valores entre 4,5 y 5,0.

Estas aguas presentan sustancias orgánicas disueltas como la lactosa, sales minerales y suspensiones coloidales de caseína, albúminas y globulinas (1-3).

Es así que los tratamientos aplicados a las aguas residuales constituyen alternativas válidas para devolver al ambiente aguas residuales industriales menos contaminadas. Estos procesos tratan de eliminar la mayor cantidad de agentes contaminantes mediante la utilización de coagulantes. Comúnmente, el sulfato de aluminio es uno de los coagulantes químicos más utilizados en la clarificación de aguas (4). Sin embargo, puede ser fácilmente asimilado por el hombre con consecuencias negativas a largo plazo, de igual manera que al ambiente, debido a su ecotoxicidad (2). Es por ello que, entre los coagulantes, los naturales, representan una propuesta atractiva por considerarse seguros y amigables con el ambiente (5-7). Los coagulantes naturales permiten la desestabilización de la contaminación coloidal, sólidos suspendidos, remoción de sólidos disueltos (8) y adsorción de metales pesados como plomo, cromo, cadmio y zinc (9).

Considerando esto, en el presente trabajo se evaluó la influencia del mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica* [L.] Mill.) en la clarificación de aguas residuales de una industria láctea en relación al tiempo de proceso, concentración de mucílago y velocidad de agitación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La extracción acuosa del mucílago se realizó a partir de los cladodios del nopal (10, 11), a los cuales se les retiró su epidermis y se cortaron en trozos. La mezcla de trozos y agua destilada en una relación 1:3, se mantuvo en reposo alrededor de 25 °C durante 24 h para favorecer la liberación del mucílago. Posteriormente, la mezcla se filtró para obtener un líquido mucilaginoso, al que se le añadió etanol en una relación de 1:1 para provocar la precipitación del mucílago (12).

Se evaluó, mediante la prueba de jarras (13), el efecto del tiempo de proceso (A), concentración de mucílago (B) y velocidad de agitación (C) en la coagulación-floculación de aguas residuales de una industria láctea a través del método de optimización numérica, mediante un diseño de superficie de respuesta IV Óptimo (Tabla 1) con el programa Design Expert 8.0.6 (Stat-Ease Inc., Minneapolis, EE.UU.). Al finalizar cada corrida experimental, las suspensiones se dejaron en reposo durante una hora para que sedimentaran los flóculos (14).

A las muestras de agua residual antes y después de ser tratadas con el mucílago, se les determinó su turbidez con un turbidímetro TB 300 IR (Lovibond, Lovibond® Tintometer Group, Amesbury) mediante el método nefelométrico con luz difusa a 90° (15). También se determinaron el pH, conductividad, sólidos totales, sólidos

**Tabla 1. Matriz del diseño experimental**

Corrida	Tiempo (h)	Mucílago (mg/L)	Velocidad de agitación (min <sup>-1</sup> )
1	15	120	200
2	6	120	100
3	24	60	100
4	15	60	200
5	6	90	200
6	24	120	100
7	6	60	100
8	15	90	100
9	24	90	200
10	15	90	100
11	6	90	200
12	15	90	100

fijos y oxígeno disuelto (OD) (16). Como tratamiento control se aplicó uno con sulfato de aluminio como coagulante convencional, a una concentración de 40 mg/L (17) y velocidad de agitación de 100 min<sup>-1</sup>.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 2 muestra los valores de los indicadores medidos en las muestras de agua residual de una industria láctea, antes y después del proceso de coagulación-floculación con el mucílago de nopal. El análisis de varianza de la regresión y coeficientes estimados para la turbidez y oxígeno disuelto de las aguas residuales (Tabla 3) mostró que los modelos resultaron significativos para un nivel de confianza del 95 %. El coeficiente de determinación indicó que los modelos ajustados explicaron el 97,86 y 87,09 % de la variabilidad en la turbidez y oxígeno disuelto, respectivamente. Se observa que el tiempo de proceso no tuvo influencia y la concentración de mucílago incidió ( $p \leq 0,05$ ) sobre la turbidez, mientras que la velocidad de agitación resultó significativa ( $p \leq 0,05$ ), tanto para la turbidez como para la concentración de oxígeno disuelto.

Las ecuaciones de los modelos codificados para cada una de las variables de respuesta fueron:

$$T = 418,3125 - 56,625A + 156,625B - 104,3541667C + 72,25AB - 158,375AC - 132,125BC + 121,0416667A^2 - 176,4583333B^2 \quad (\text{ec. 1})$$

$$OD = 4,162 - 0,235A + 0,067B - 1,209C \quad (\text{ec. 2})$$

Donde: T, turbidez (NTU); OD, oxígeno disuelto (%); A, tiempo de proceso (min); B, concentración de mucílago de nopal (%); C, velocidad de agitación (min<sup>-1</sup>).

Al analizar los coeficientes de la ec. 1 se observa que la concentración de mucílago (B) tuvo la mayor influencia sobre la turbidez, seguida por la velocidad de agitación (C). En el caso de la ec. 2, se tiene que la velocidad de agitación (C) tuvo la mayor influencia sobre la concentración de oxígeno disuelto.

La comprobación de la suposición de normalidad se realizó analizando la probabilidad normal de los residuos mediante un análisis de varianza. Se observó tanto para la turbidez como para el oxígeno disuelto, que los valores de la probabilidad de sus residuos estudentizados internamente se ajustaron a una recta como resultado de la distribución normal de los errores, por lo que se cumplió la hipótesis de normalidad.

**Tabla 2. Caracterización de las aguas residuales de una industria láctea antes y después del tratamiento con mucílago de nopal**

Corrida	Turbidez (NTU)	pH	Conductividad (μS/cm)	Sólidos totales (mg/L)	Sólidos fijos (mg/L)	Oxígeno disuelto (%)
Agua residual sin tratar	863 (94)	7,0 (1,0)	0,8 (0,8)	167,8 (0,7)	127,8 (0,2)	4,0 (0,6)
1	162 (23)	7,1 (1,2)	0,1 (0,3)	111,8 (0,6)	117,8 (0,3)	3,0 (0,6)
2	582 (66)	6,2 (0,8)	0,4 (0,2)	167,0 (0,7)	127,0 (0,4)	6,3 (0,3)
3	208 (37)	3,0 (1,0)	0,4 (0,2)	137,4 (0,2)	147,4 (0,2)	5,8 (0,4)
4	113 (21)	7,3 (0,4)	0,2 (0,4)	117,8 (0,1)	107,8 (0,4)	2,4 (0,1)
5	651 (46)	3,3 (0,9)	0,2 (0,6)	127,6 (0,1)	137,6 (0,8)	3,6 (0,1)
6	930 (88)	5,1 (0,8)	0,3 (0,1)	127,6 (0,3)	107,6 (0,8)	4,6 (0,4)
7	149 (27)	5,3 (0,4)	0,4 (0,5)	137,4 (0,4)	117,4 (0,7)	5,3 (0,7)
8	522 (62)	4,2 (0,3)	0,4 (0,4)	137,6 (0,2)	157,6 (0,5)	5,7 (0,9)
9	220 (31)	3,7 (0,3)	0,4 (0,2)	157,6 (0,2)	177,6 (0,3)	3,1 (0,6)
10	613 (39)	4,3 (0,4)	0,4 (0,2)	167,6 (0,1)	147,6 (0,4)	4,8 (0,3)
11	649 (41)	3,8 (0,7)	0,4 (0,8)	117,8 (0,7)	117,3 (0,4)	2,9 (0,2)
12	433 (54)	6,0 (0,9)	0,4 (0,6)	127,6 (0,4)	137,6 (0,2)	5,1 (0,1)

Media (desviación estándar); n= 2.

**Tabla 3. Análisis de varianza para la turbidez y oxígeno disuelto de las aguas residuales de una industria láctea**

Fuente	Valor p	
	Turbidez <sup>1</sup>	Oxígeno disuelto <sup>2</sup>
Modelo	0,0198	0,0006
A	0,1464	0,3035
B	0,0161	0,7772
C	0,0182	< 0,0001
AB	0,1440	-
AC	0,0121	-
BC	0,0254	-
A <sup>2</sup>	0,0721	-
B <sup>2</sup>	0,0284	-
Falta de ajuste	-	0,3613
R <sup>2</sup>	0,9786	0,8709

A: tiempo de proceso; B: concentración de mucílago de nopal; C: velocidad de agitación. <sup>1</sup>: Modelo cuadrático de superficie de respuesta; <sup>2</sup>: Modelo lineal de superficie de respuesta.

De las siete soluciones resultantes de la optimización numérica para el tratamiento de las aguas residuales, se seleccionó la de mayor conveniencia estadística (0,89), que se correspondió con una velocidad de agitación de 100 min<sup>-1</sup>, concentración de mucílago igual a 60 mg/L y 7,71 h como tiempo de proceso, para obtener una turbidez de 113 NTU y concentración de oxígeno disuelto de 5,5 %.

La Tabla 4 muestra los valores de los indicadores medidos en las muestras de agua residual antes y después de haber sido tratadas con sulfato de aluminio y mucílago de nopal en las condiciones óptimas antes mencionadas. Se observa que la turbidez resultó mayor que la estimada mediante la optimización numérica, mientras que la concentración de oxígeno disuelto fue similar al valor esperado. El empleo del mucílago redujo en alrededor del 70 %, la turbidez del agua residual, aunque con el sulfato de aluminio se logró disminuir la turbidez en aproximadamente 83 %. De acuerdo con lo anterior, la actividad del mucílago es comparable a la de otros materiales similares como el del *Cactus lefaria* crudo, para el cual se reportó una remoción de la turbidez entre 80 y 90 % (3). Además, se ha informado que el mucílago de nopal redujo la turbidez de aguas turbias entre un 92 y 99 %, sin que existiera una dependencia con la turbidez inicial (2). Ambos procesos de coagulación-floculación, cumplieron con los valores de turbidez normalizados entre 0,05 y 400 NTU (15), lo cual

indica que el mucílago de nopal es una alternativa a los coagulantes tradicionales y una opción ambientalmente amigable para el tratamiento de aguas turbias (18).

Los resultados indicaron que el pH varió de alcalino a ácido, tanto con el empleo del mucílago como del sulfato de aluminio, con valores de 4,7 y 3,8; respectivamente. Esta disminución del pH puede deberse a que durante el proceso de coagulación-floculación, precipitan las arcillas disueltas que le dan el carácter alcalino al agua cruda (19). Además, se ha informado que la actividad de la coagulación de *Opuntia* spp. es mayor en aguas con pH entre 8 y 10 (2). La norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes de Ecuador (20) establece valores de pH entre 6 y 9, como criterio de calidad admisible para la preservación de la flora y fauna.

El contenido de sólidos totales no varió prácticamente y resultó inferior al valor máximo permisible para aguas residuales, establecido como 1600 mg/L (21). Además, el empleo del mucílago incrementó en la conductividad y contenido de sólidos fijos del agua residual, lo cual pudo estar relacionado con la composición del material utilizado como coagulante y, que también pudo estar relacionado con el hecho de que la concentración de oxígeno disuelto solo se incrementara de 4,5 a 5,8 %.

No se observó una relación entre el resto de los indicadores con respecto al empleo de uno u otro coagulante, aunque en el caso del agua tratada con sulfato

de aluminio, con una menor concentración de sólidos totales, también presentó la mayor concentración de oxígeno disuelto.

## CONCLUSIONES

El tiempo de proceso no tuvo influencia y la concentración de mucílago incidió sobre la turbidez, mientras que la velocidad de agitación resultó significativa, tanto para la turbidez como para la concentración de oxígeno disuelto. El pH del agua varió de alcalino a ácido, tanto con el empleo del mucílago como del sulfato de aluminio. El empleo del mucílago redujo la turbidez en aproximadamente un 70 % y, aunque con el sulfato de aluminio se logró mayor remoción, el mucílago es una alternativa a los coagulantes tradicionales y una opción ambientalmente amigable para el tratamiento de aguas turbias.

**Tabla 4. Comprobación de la optimización numérica para el tratamiento de las aguas residuales de una industria láctea**

Tratamiento	Turbidez (NTU)	pH	Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Sólidos totales (mg/L)	Sólidos fijos (mg/L)	Oxígeno disuelto (%)
Agua residual sin tratar	796 (43)	7,4 (0,4)	1,4 (0,2)	118 (2)	128,0 (0,3)	4,5 (0,7)
Agua residual tratada con mucílago	167 (19)	4,7 (0,3)	2,19 (0,06)	118 (1)	148,0 (0,7)	5,8 (0,6)
Agua residual tratada con sulfato de aluminio	136 (22)	3,8 (0,1)	1,95 (0,02)	108 (1)	118,0 (0,1)	35,7 (0,1)

Media (desviación estándar); n= 2.

## REFERENCIAS

1. Rajesh-Banu J, Anandan S, Kaliappan S, Yeom I-T. Treatment of dairy wastewater using anaerobic and solar photocatalytic methods. *Solar Energy* 2008; 82(9):812-81.
2. Miller S, Fugate E, Craver V, Smith J, Zimmerman J. Toward understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia* ssp. as a natural coagulant for potential application in water treatment. *Environ Sci Technol* 2008; 42 (12):4274-9.
3. Martínez D, Chávez M, Díaz A, Chacín E, Fernández N. Eficiencia del cactus lefaria para uso como coagulante en la clarificación de aguas. *Rev Técn Fac Ing Univ Zulia* 2003; 26(1):27-33.
4. Yin CY. Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochem* 2010; 45(9):1437-44.
5. Choque-Quispe D, Choque-Quispe Y, Solano-Reynoso AM. Capacidad floculante de coagulantes naturales en el tratamiento de agua. *Tecnol Quim* 2018; 38(2):298-309.
6. Roque FJ. Desinfección y depuración bioelectroquímica de aguas residuales domésticas asistida por energía fotovoltaica a miniescala. Caso: Ptar Chilpina-Arequipa (tesis doctoral). Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa; 2016.
7. Fuentes L, Mendoza I, López A, Castro M, Urdaneta C. Efectividad de un coagulante extraído de *Stenocereus griseus* (Haw.) Buxb. en la potabilización del agua. *Rev Técn Fac Ing Univ Zulia* 2011; 34(1):48-56.
8. Salas G. Tratamiento fisicoquímico de aguas residuales de la industria textil. *Rev Per Quím Ing Quím* 2013; 5(2):73-80.
9. Sotheeswaran S, Nand V, Matakite M, Kanayathu K. *Moringa oleifera* and other local seeds in water purification in developing countries. *Res J Chem Environ* 2011; 15(2):135-8.
10. Nazareno MA, Padrón CA. Nuevas tecnologías desarrolladas para el aprovechamiento de las cactáceas en la elaboración de alimentos. Componentes funcionales y propiedades antioxidantes. *Rev Venez Cienc Tecnol Alim* 2011; 2(1):202-238.

11. Sudzuki F. Anatomía y morfología. En: Barbera G, Inglese P, Pimienta E, Ed. Agroecología, cultivo y usos del nopal. Estudio FAO Producción y Protección Vegetal, 132. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación; 1999. pp. 29-36.
12. Gowda C. Polysaccharide components of the seed-coat mucilage from *Hyptis suaveolens*. Phytochem 1984; 23(2):337-8.
13. García MA, Montelongo I, Rivero A, de la Paz N, Fernández M, Núñez de Villavicencio, M. Treatment of wastewater from fish processing industry using chitosan acid salts. Int Water Wastewater Treat 2016; 2(2):1-6.
14. Sáenz C, Berger H, Corrales J, Galletti L, García V, Higuera I, Mondragón C, Rodríguez-Félix A, Sepúlveda E, Varnero MT. Utilización agroindustrial del nopal. En: Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO 162. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación; 2006.
15. ISO 7027-1. Water quality - Determination of turbidity - Part 1: Quantitative methods; 2016.
16. APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st ed. Washington, DC: American Public Health Association; 2005.
17. Meza-Leones M, Riaños-Donado K, Mercado-Martínez I, Olivero-Verbel R, Jurado-Eraso M. Evaluación del poder coagulante del sulfato de aluminio y las semillas de *Moringa oleifera* en el proceso de clarificación del agua de la ciénaga de Malambo-Atlántico. Rev UIS Ingenierías 2018; 17(2):95-104.
18. Vaca M, López R, Flores J, Terres H, Lizardi A, Rojas M. Aplicación del nopal (*Opuntia ficus indica*) como coagulante primario de aguas residuales. Rev AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica 2014; 7(3):210-6.
19. Deloya A. Métodos de análisis físicos y espectrofotométricos para el análisis de aguas residuales. Tecnología en Marcha 2006; 19(2):31-40.
20. Decreto N° 3516. Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua. Anexo I, Libro VI: De la Calidad Ambiental, del Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, Ecuador; 2003.
21. Fernández J, Curt MD. Metodología de análisis de aguas residuales. En: Fernández J, Ed. Manual de fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación. Madrid: Proyecto LIFE; 2011. pp. 117-26.