

Revista de la Universidad del Zulia



Fundada en 1947
por el Dr. Jesús Enrique Lossada

Ciencias
Exactas,
Naturales y
de la Salud

70
ANIVERSARIO

Año 8 N° 21
Mayo - Agosto 2017
Tercera Época
Maracaibo - Venezuela

Uso de amargos de salmuera como coagulante en el tratamiento terciario de efluentes cárnicos

*Sedolfo Carrasquero**

Elsy Suarez

Yoselin López

Julio César Marín

Altamira Díaz

RESUMEN

Se evaluó la eficiencia de un tratamiento terciario en efluentes cárnicos provenientes de un tratamiento biológico. El tratamiento terciario consistió en la coagulación, floculación y sedimentación de los contaminantes utilizando amargos de salmuera y cloruro férrico como coagulantes. El tratamiento se llevó a cabo mediante el uso de la prueba de jarra, a través de corridas exploratorias con dosis que oscilaron entre 0,2 y 5 mg/L. El pH óptimo de coagulación de los amargos de salmuera fue de 9 unidades, debido a que este valor se obtuvo la mayor eficiencia de remoción de los parámetros: color, turbidez y DQO. El rango evaluado de dosis de amargos de salmuera permitió obtener remociones de 89,5%

de turbidez, 77,4% de color real, 94,1% de DQO y 76,2% de NT para valores iniciales de 23,7 NTU, 885 UC, 1211,7 mg DQO/L y 152 mg NT/L, utilizando como dosis óptima de coagulante 1,6 g/L.

PALABRAS CLAVE: amargos de salmuera; coagulación-floculación; efluentes cárnicos.

Use of brine bitters as a coagulant in the tertiary treatment of meat effluents

ABSTRACT

The efficiency of a tertiary treatment in meat effluents from a biological treatment was evaluated. The tertiary treatment consisted in the coagulation, flocculation and sedimentation of the pollutants using brine bitter and ferric chloride as coagulants. The treatment was carried out by using the jar test, through exploratory runs with doses ranging between 0.2 and 5 mg/L. The ideal pH of coagulation of the bitter brines was 9 units, due to the fact that this value obtained the major efficiency of removal of the parameters: color, turbidity and COD. The evaluated dose range of bitter of brine allowed to obtain removals of 89,5% of turbidity, 77,4% of real color, 94,1% of COD and 76,2 % of TN for initial values of 23,7 NUT, 885 CU, 1211,7 mg COD/L and 152 mg TN/L, using as ideal dose of coagulant 1,6 g/L.

KEYWORDS: bitter brines; coagulation-flocculation; slaughterhouse wastewater.

Introducción

Los efluentes provenientes de la matanza de reses son una fuente de contaminación de materia orgánica, nitrógeno, grasas, sólidos totales y coliformes fecales, provenientes de las heces, orina, sangre, residuos cárnicos y alimentos no digeridos por los intestinos de los animales sacrificados (Carrasquero *et al.*, 2014; Maldonado y Ramón, 2006). Para remover las altas cargas orgánicas que poseen estas aguas residuales, se han ensayado con éxito diferentes tipos de tratamientos fisicoquímicos y biológicos, aeróbicos y anaeróbicos (Carrasquero *et al.*, 2015; Amuda y Alade, 2006; Massé y Masse, 2000).

Entre los procesos fisicoquímicos que se han empleado comúnmente están la flotación por aire disuelto para la remoción de sólidos suspendidos y grasas, y la coagulación - floculación para remover sólidos suspendidos y coloidales. También han sido utilizados los procesos electroquímicos, adsorción con carbón activado y oxidación intensiva (Morales *et al.*, 2009).

La coagulación-floculación es el método más ampliamente usado para remover sustancias que producen turbidez en el agua, estas sustancias generalmente consisten en minerales de arcilla y materia orgánica de diferentes tamaños (Song *et al.*, 2004). En especial, la coagulación-floculación se utiliza como postratamiento en efluentes industriales que han sido tratados biológicamente para remover el contenido de materia orgánica inerte o refractaria que no puede ser eliminada por acción microbiana (Pire, 2012).

Dentro de los coagulantes químicos que se utilizan generalmente en el tratamiento de efluentes se tienen las sales de aluminio y las de hierro, así como otros de origen orgánico, que normalmente son combinados con polímeros para facilitar el proceso de remoción de contaminantes.

Los coagulantes químicos comerciales como el sulfato de aluminio y el cloruro férrico, han sido usados con gran éxito para el tratamiento de aguas residuales industriales, produciendo aguas más clarificadas y reduciendo significativamente el contenido de DQO inerte y de sólidos suspendidos (Song *et al.*, 2004).

Por otro lado, la salmuera concentrada generada como subproducto en el proceso de producción de sal por evaporación solar, constituye una sustancia de toxicidad comprobada para la biota de los ecosistemas naturales. Disposiciones emanadas por la agencia norteamericana del medio ambiente (EPA) señalan que los desechos de salmuera de la industria salinera deben ser altamente diluidos para mantener el 100% de sobrevivencia de peces en los ecosistemas acuáticos (Hinestroza, 2000).

Los amargos están constituidos por sales de magnesio. Si se añaden cantidades pequeñas de salmuera concentrada al agua residual, se suministrarán las cantidades requeridas de iones de magnesio para cargar la mezcla y realizar el proceso de coagulación-floculación con el resto de los constituyentes del agua residual (Aoyub *et al.*, 1999).

El objetivo de esta investigación fue evaluar la efectividad de un tratamiento fisicoquímico terciario utilizando como coagulantes amargos salmuera y cloruro férrico en efluentes de matadero de reses tratados biológicamente.

1. Materiales y métodos

1.1. Toma de muestra del agua residual

El estudio se llevó a cabo utilizando agua residual producida por las actividades llevadas a cabo en un matadero de reses (*Bos taurus*) ubicado en el Estado Zulia, Venezuela, la cual fue sometida a un proceso biológico en un reactor por carga secuencial (SBR) donde se ha removido la mayor parte de los componentes biodegradables y cierta cantidad de los no biodegradables particulados.

La recolección del efluente se realizó de acuerdo a los patrones establecidos en el Método Estándar, usando el método 1060 Recolección de muestras y preservación (APHA *et al.*, 2005). La captación del agua residual se realizó de manera manual a través de un muestreo aleatorio simple, tomando las aguas residuales a la salida del reactor por carga secuencial en recipientes de polietileno de alta densidad con capacidad de 20 L, de color oscuro y limpios, para preserválas a una temperatura de 4 °C, con el fin de garantizar sus características iniciales.

1.2. Caracterización del agua residual

Se realizó la determinación de los parámetros fisicoquímicos: Color real (2120 B), pH (4500-H+ B), turbidez (2130 B), alcalinidad total (2320 B), DQOT (5220-C), NTK (4500-Norg-B), N-NO₂- (4500-NO₂--B), N-NO₃- (4500-NO₃--D), NT (4500-Norg-B), PT (4500-P-C), cloruros (4500-Cl--B), siguiendo los procedimientos establecidos en el método estándar para el análisis de aguas y líquidos residuales (APHA *et al.*, 2005).

1.3. Montaje y operación del tratamiento físico-químico

El tratamiento físico-químico empleado fue coagulación-floculación para tratar el efluente del matadero de reses proveniente del proceso biológico. Se trabajó a escala de laboratorio con la prueba de jarras (Phipps y Bird Inc, Modelo No. 300), con un mezclado rápido a 100 revoluciones por minuto (rpm) durante cinco minutos, luego una mezcla lenta a 30 rpm durante 20 minutos y se finalizó el proceso con la fase de sedimentación, en la cual se dejó el agua en reposo durante un lapso de 30 minutos (Mattei *et al.*, 2005; Koohestanian *et al.*, 2008). Después del período de sedimentación, se procedió a captar una muestra del sobrenadante en un punto situado aproximadamente 2 cm por debajo de la parte superior del nivel de líquido de cada vaso de precipitado para la medición de los parámetros fisicoquímicos.

La fase experimental, se llevó a cabo en dos etapas, en la primera etapa se utilizaron los amargos de salmuera, y en la segunda etapa, el coagulante químico tradicional cloruro férrico.

1.4. Tratamiento con amargos de salmuera

Las muestras de salmuera concentrada (amargos) fueron recolectadas en una empresa productora de sal en diferentes puntos de un concentrador. Previo a realizar las corridas exploratorias con los amargos de salmuera, se determinó el pH óptimo de coagulación; para ello, se realizaron pruebas de jarra a valores de pH de 3, 7, 9, 10 y 12 unidades, con una dosis fija de solución coagulante de 1 g/L, aplicado desde una solución madre de amargos de salmuera de 50 g/L. El pH en las pruebas de jarra fue ajustado usando hidróxido de sodio 6 N o ácido sulfúrico 1 N.

Al pH óptimo de coagulación se realizó la determinación de la dosis óptima del coagulante, para ello la solución de amargos de salmuera se dosificó en un rango de 0,2 a 5 g/L. Cabe destacar que la solución madre a partir de la cual fueron agregadas las dosis fue 50 g/L.

Los parámetros de control determinados después del proceso de coagulación fueron: DQO, turbidez, color y pH. En función a estos resultados, se determinó el resto de las variables fisicoquímicas: NTK, NO_x^- , Cl^- , ST, SST, y alcalinidad total.

Para la selección de la dosis óptima de la solución coagulante se utilizaron los siguientes criterios: Porcentaje de remoción de turbidez, color y DQO, pH del efluente tratado, cantidad mínima de dosis a usar y verificación de remoción de NT, NO_x^- y sólidos suspendidos totales.

1.5. Tratamiento con cloruro férrico

El cloruro férrico (Riedel-de Haën) se dosificó en un rango de concentraciones entre 0,6 - 4 g/L (Mazumder y Mukherjee, 2011) y las pruebas de coagulación se realizaron a un pH de 9 unidades. (Arboleda, 2000). El pH en las pruebas de jarra fue ajustado usando hidróxido de sodio 6 N. La solución madre a partir de la cual fueron agregadas las dosis fue 10 g/L. Para la selección de la dosis óptima se utilizaron los criterios mencionados en el apartado anterior.

1.6. Diseño experimental

El experimento se condujo mediante un diseño completamente al azar, con un total de dos tratamientos (amargos de salmuera y cloruro férrico) con tres repeticiones cada uno, donde se seleccionó el más eficiente. Los resultados de los parámetros fisicoquímicos medidos se expresaron utilizando estadística descriptiva, señalando los valores de tendencia central (media) y su dispersión (desviación estándar). Los resultados de las remociones de las variables: color real, turbidez, DQO, NTK, NT, NO_x⁻ (NO₂⁻ + NO₃⁻) se compararon mediante un análisis de varianza y separación de medias a través de la prueba de Tukey, utilizando el programa estadístico Statistix versión 9.0.

2. Resultados y discusión

2.1. Caracterización del agua superficial

La caracterización fisicoquímica del efluente proveniente del matadero de reses tratado biológicamente se presenta en la Tabla 1, donde se reportan los valores medios y su dispersión expresada a través de la desviación estándar (DE), así como se indican los límites establecidos por la norma venezolana para la descarga a los cuerpos de agua (Gaceta Oficial, 1995).

El efluente del matadero de reses proveniente de un tratamiento biológico se caracterizó por presentar un contenido promedio de materia orgánica medida como DQO_T de 1211,7 mg/L. El valor obtenido para la DQO puede atribuirse al hecho de que las aguas residuales provenientes de la agroindustria se caracterizan por poseer elevadas concentraciones de DQO, en la que la fracción biodegradable oscila entre 79 y 83 % de la DQO total, siendo el resto no biodegradable o correspondiente con la fracción recalcitrante (Orhon *et al.*, 1999). Cabe mencionar, que este efluente proviene de un proceso biológico que sólo se encarga a través de la acción de los microorganismos de remover la parte biodegradable de la materia orgánica presente en el agua residual, por lo que dentro del valor obtenido en la caracterización correspondiente a 1217,00 mg DQO/L, el mayor porcentaje corresponde con el material recalcitrante que no pudo ser removido por vía biológico.

TABLA 1. Caracterización del agua residual proveniente del tratamiento biológico

Parámetro	Unidad de expresión	Valor (media ± DE)	Límites Permisibles
DQO _T	mg/L	1211,7 ± 78,9	350
NTK	mg/L	137,9 ± 13,0	-
NO ₂ ⁻	mg/L	0,06 ± 0,04	NO _x ⁻ = 10
NO ₃ ⁻	mg/L	15,25 ± 3,2	NO _x ⁻ = 10
NT	mg/L	153,21 ± 16,25	40
pH	-	7,70 ± 0,84	6 a 9
Alcalinidad total	mg CaCO ₃ /L	643,8 ± 362,4	-
Fosforo total	mg/L	8,6 ± 1,1	10
Color real	UC Pt-Co	885 ± 147	500
Turbidez	UNT	23,7 ± 1,55	-
Cloruros	mg/L	1770 ± 499	1000

n ≥ 5; n: número de mediciones realizadas, DE: desviación estándar. NO_x⁻ = NO₂⁻ + NO₃⁻

Investigadores como Özkan *et al.* (2010) han aplicado con éxito tratamiento fisicoquímico en efluentes industriales provenientes de una planta esterilizadora de desechos médicos, con concentraciones promedio de materia orgánica recalcitrante de 855 mg/L.

Con respecto a las formas de nitrógeno, se observa que el efluente presentó una concentración promedio de nitrógeno total de 153,21 mg/L, superando el valor de 40 mg/L establecido como límite máximo permitido por la normativa venezolana. El efluente proviene de un proceso biológico, donde ocurre la nitrificación y desnitrificación, removiéndose en mayor proporción la fracción correspondiente a nitritos, nitratos y nitrógeno amoniacal, de manera que el nitrógeno restante corresponde con la fracción inerte y soluble no biodegradable que no se pudo amonificar en procesos biológicos y por lo tanto se desea remover con el tratamiento físico-químico (Cegarra, 2011).

De acuerdo a los resultados obtenidos en la caracterización del agua residual se observó que los valores de pH cumplieron con lo establecido en la normativa venezolana que exige un valor de pH comprendido en el rango de 6 a 9 unidades. Con respecto a la alcalinidad total, el efluente industrial presentó un valor promedio de 643,75 mg/L CaCO₃. Dicho valor se encuentra por encima del valor reportado por Bhuptawat *et al.* (2007)

quienes reportaron un valor promedio de alcalinidad de 215 mg/L CaCO_3 para aplicar con éxito el tratamiento de aguas residuales por coagulación-floculación.

La concentración promedio de fósforo total fue de 8,6 mg/L, valor que cumplió con lo establecido en la normativa venezolana para descarga en cuerpos de aguas. Dicho valor es mayor al reportado por Bhuptawat *et al.* (2007), quienes obtuvieron una concentración promedio de fósforo de 3,06 mg/L.

Con respecto a los parámetros físicos color y turbidez, el valor promedio obtenido de color real fue de 885 UC y de turbidez 23,7 NTU. Los valores de turbidez obtenidos para el efluente del reactor biológico fueron menores a los reportados por otros autores que aplicaron tratamiento fisicoquímico en efluentes industriales como Shabe *et al.* (2011), quienes obtuvieron un valor promedio de turbidez de 235 NTU durante el tratamiento de aguas de pulpa de papel, y por Banuraman *et al.* (2013), quienes reportaron 207,1 NTU durante el tratamiento de efluentes de tenerías. Se infiere que las diferencias obtenidas pueden deberse al hecho de que el efluente proviene de un tratamiento biológico en un reactor por carga secuencial, que incluye una fase final de sedimentación que permite la clarificación del agua, y la disminución de material suspendido que origina turbidez.

Por otra parte, se obtuvo una concentración promedio de cloruros igual a 1770 mg/L, lo cual supera los 1000 mg/L establecidos en la norma venezolana para descarga en cuerpos de agua (Gaceta oficial, 1995). Este valor puede deberse a que durante los procesos de estabulación y aturcido, los animales producen una gran cantidad de orina, que conlleva una contaminación del agua con compuestos nitrogenados y sales como los cloruros. Estos cloruros no son eliminados durante el proceso de tratamiento biológico y quedan presentes en el efluente tratado.

La caracterización fisicoquímica del efluente del matadero de reses tratado biológicamente mostró que los parámetros que los valores de DQO_T , NT, NO_x^- , color real y cloruros se encontraron fuera de los límites establecidos por la normativa venezolana para descarga en cuerpos de agua (Gaceta oficial, 1995), por lo que se requiere aplicar un tratamiento terciario que permita generar un efluente que cumpla con los límites exigidos por la normativa ambiental vigente.

2.2. Tratamiento con amargos de salmuera

2.2.1. Efecto del pH sobre la eficiencia del tratamiento fisicoquímico en la remoción de color, turbidez y DQO_T

Los resultados obtenidos muestran que los menores valores de DQO se obtuvieron a un pH de 12 unidades (104 mg/L), seguido de las pruebas que se

realizaron a un pH de 9 unidades (144 mg/L), mientras que los tratamientos a pH de 3 y 7 unidades fueron los menos eficientes, ya que generaron un efluente que no cumple con lo establecido en la normativa venezolana para descargas a cuerpos de aguas (Gaceta oficial, 1995).

Los menores valores de color real se obtuvieron cuando los tratamientos se realizaron a pH alcalinos (9 - 12 unidades), obteniendo un valor residual de color después del tratamiento de 200 UC, lo que presenta una remoción de 77%. Con respecto a la turbidez residual, se observó que los menores valores se obtuvieron para los tratamientos que se realizaron a pH alcalinos. El pH que permitió el menor valor de turbidez (2,37 UNT) y el máximo porcentaje de remoción de turbidez (90%) en el agua residual durante esta fase fue de 10 unidades.

TABLA 2. Efecto del pH sobre la eficiencia del tratamiento fisicoquímico en la remoción de color, turbidez y DQO_T.

pH	Color (UC)	% Remoción de color	Turbidez (UNT)	% Remoción de turbidez	DQO _T (mg/L)	% Remoción de DQO
3	400 ± 15	60,6 ^b ± 1,7	5,36 ± 1,45	77,4 ^c ± 6,1	400 ± 75	63,5 ^c ± 6,2
7	400 ± 10	60,6 ^b ± 1,1	9,45 ± 2,3	60,1 ^d ± 5,7	576 ± 62	49,8 ^d ± 5,1
9	200 ± 20	77,4 ^a ± 2,3	3,5 ± 1,0	85,2 ^{a,b} ± 4,2	144 ± 24	83,5 ^a ± 2,0
10	200 ± 20	77,4 ^a ± 2,3	2,37 ± 0,5	90,0 ^a ± 1,9	244 ± 57	75,7 ^b ± 4,7
12	200 ± 20	77,4 ^a ± 2,3	3,99 ± 1,2	83,2 ^b ± 5,0	104 ± 67	86,6 ^a ± 5,5

Nota: Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$) ± desviación estándar (3 repeticiones)

De acuerdo a los resultados obtenidos para las concentraciones de DQO y los valores de color y turbidez al final del tratamiento fisicoquímico, se decidió que el rango de pH óptimo de coagulación para utilizar los amargos de salmuera como coagulante fue entre 9 y 12 unidades, seleccionando 9 unidades como pH ideal, ya que garantiza la mayor eficiencia de remoción en forma conjunta de estos parámetros y además implica menor gasto de alcalinizante al momento de realizar los tratamientos a escala industrial. Esto coincide con lo señalado por diversos investigadores quienes lograron los mejores rendimientos de un tratamiento fisicoquímico cuando la coagulación-floculación la realizaron a pH alcalino (Song et al., 2004.; Ryu et al., 2006)

2.2.2. Tratamiento del efluente con amargo de salmuera

En la Figura 1 se presentan los valores residuales de color y turbidez; así como los porcentajes de remoción para cada una de las dosis aplicadas (0,2 - 5 g/L). Se observó una disminución progresiva desde 500 hasta 200 UC a

medida que se aumentó la dosis de amargos de salmuera; sin embargo, a partir de una dosis de 1,6 g/L el valor de color residual aumentó, disminuyendo los porcentajes de remoción de 77,0 a 61,0%. Se infiere que esto sucedió debido a que el material coagulado no tuvo una buena sedimentación debido a la resuspensión del material coloidal.

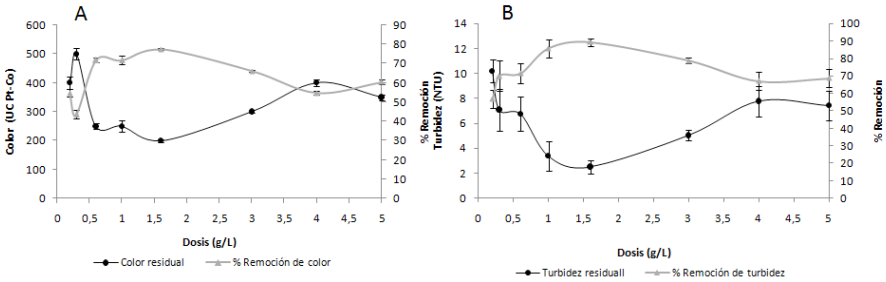


FIGURA 1. Porcentajes de remoción y valores residuales de color (A) y turbidez (B) en función de la dosis de amargos de salmuera

La dosis del coagulante que produjo el mayor porcentaje de remoción de color fue 1,6 g/L alcanzándose un valor de 77,4 %. Al igual que para el color, se observó una disminución progresiva de la turbidez desde 10,2 hasta 2,37 UNT a medida que se aumentó la dosis de salmuera; sin embargo, a partir de una dosis de 1,6 mg/L el valor de turbidez residual aumentó, disminuyendo los porcentajes de remoción de 89,0 a 79,0%.

En la Figura 2a, se muestran los valores de DQO obtenidos después del tratamiento fisicoquímico y los porcentajes de remoción para cada uno de las dosis aplicadas. Se observó que para una dosis de 1,6 mg/L se obtuvo el menor valor de DQO_T residual de 72 mg/L con un porcentaje de remoción de 94,0%, teniendo en cuenta que la DQO_T obtenida del agua proveniente del tratamiento biológico fue de 1211 mg/L.

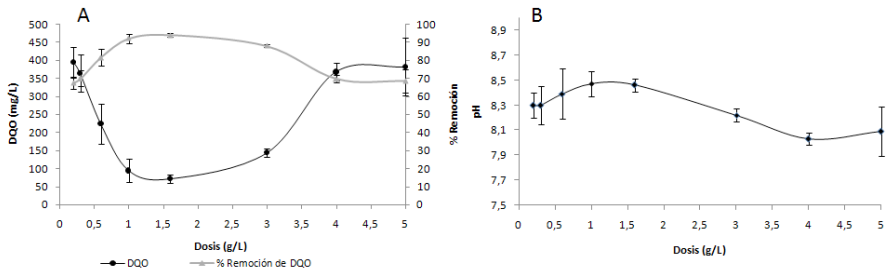


FIGURA 2. Porcentajes de remoción y valores residuales de DQO (A) y pH (B) en función de la dosis de amargos de salmuera

Los porcentajes de remoción obtenidos en la presente investigación se encuentran dentro del rango reportado Dosta *et al.* (2008) y Kargi y Uygur (2004) quienes lograron valores de remoción de 66 y 96%, respectivamente, tratando aguas residuales provenientes de la matanza de reses, utilizando un SBR en conjunto con otros procesos como coagulación-floculación y variaciones en las fases operacionales que les permitieron mejorar las tasas de remoción durante los tratamientos.

Se observó que a medida que se incrementó la dosis del coagulante, el pH fue disminuyendo de 8,58 unidades hasta 8,03 unidades con dosis que oscilaron entre 0,2 y 5 mg/L (Figura 2B). Cegarra (2011) también reportó una disminución en los valores de pH en aguas residuales de una curtiembre tratadas por coagulación usando amargos de salmuera, obteniendo que el pH del agua residual disminuyó de 12 a 10,2 unidades.

La dosis que permitió obtener los menores valores de color, turbidez y DQO después del tratamiento fisicoquímico, permitiendo la eliminación simultánea de estos parámetros y generando un efluente que cumpliera con los límites máximos exigidos por la normativa ambiental venezolana fue de 1,6 g/L de amargos de salmuera, por lo que se seleccionó como dosis óptima.

2.3. Tratamiento del agua residual con cloruro férrico

La Figura 3 muestra los valores de color residual y los porcentajes de remoción de color para cada una de las dosis aplicadas de cloruro férrico. Se evidencia que los menores valores de color se obtuvieron para las menores dosis aplicadas (0,6 - 1,3 g/L). Bidhendi *et al.* (2007) durante el tratamiento de aguas residuales de una industria textil obtuvieron porcentajes remoción de 90% con una dosis baja del coagulante (0,1 - 0,3 mg/L). Song *et al.* (2004), usando una dosis de 0,9 g/L de cloruro férrico al tratar un agua residual de tenería obtuvieron un porcentaje de remoción de color del 86 %

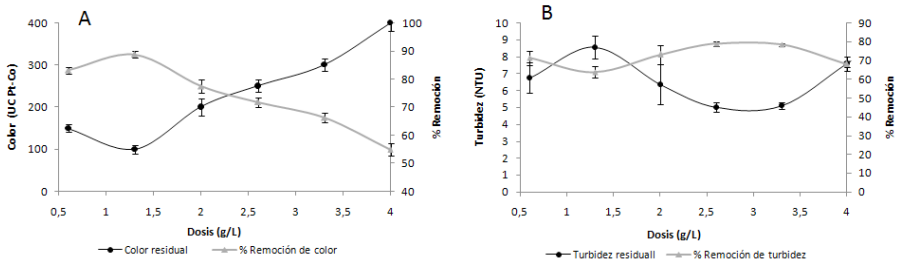


FIGURA 3. Porcentajes de remoción y valores residuales de color (A) y turbidez (B) en función de la dosis de cloruro férrico

Se observó que el mayor porcentaje de remoción de turbidez (78,9 %) y el menor valor de turbidez (5,01 UNT) se obtuvo cuando la dosis fue de 2,6 g/L.

En la Figura 4a, se muestran los valores y el porcentaje de remoción de DQO_T. Se constata que los mayores porcentajes de remoción (93,2 y 93,4%) y los menores valores de DQO residual del tratamiento fisicoquímico (82 y 80 mg/L) se obtuvieron con las menores dosis de 0,6 y 1,3 g/L, respectivamente.

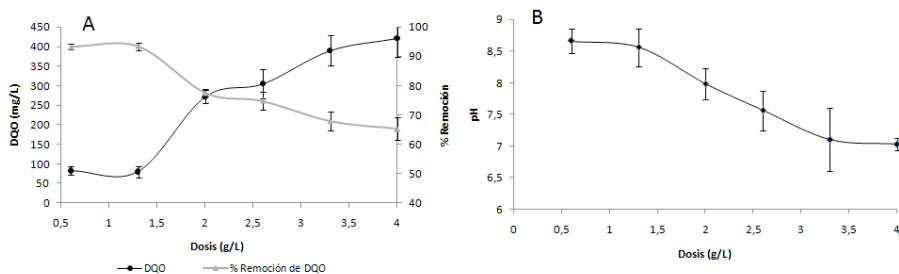


FIGURA 4. Porcentajes de remoción y valores residuales de DQO (A) y pH (B) en función de la dosis de amargos de salmuera

Se observó que a medida que aumentó la dosis de coagulante a partir de una dosis de 1,3 mg/L, disminuyó la eficiencia de remoción de DQO; esto se puede explicar debido a que el exceso de coagulante es absorbido en la superficie de la partícula, produciendo una carga invertida a la carga original (Andía, 2000).

Los porcentajes de remoción obtenidos fueron mayores a los reportados por Bidhendi *et al.* (2007), quienes trabajaron con dosis de 0,5 g/L, resultando un porcentaje de remoción de DQO de 70% en aguas residuales de una industria textil. Igualmente fueron mayores a los presentados por Song *et al.* (2004), quienes usaron una dosis de 0,80 g/L de cloruro férrico como coagulante en el proceso de coagulación- floculación para tratar un agua residual proveniente de una tenería obteniendo un 35% de remoción de DQO; igualmente, concluyeron que la utilización de dosis mayores de 0,80 g/L del coagulante no implicaban un mayor porcentaje de remoción de DQO.

De igual forma Hanan (2009) con un valor inicial de 522 mg/L de DQO_T, obtuvo una remoción de 61% con rangos de dosis que oscilaron entre 0,02 y 0,10 g/L. La diferencia puede atribuirse a los valores de DQO inicial de los efluentes industriales.

Se observó que el pH disminuyó 8,66 a 7,03 unidades a medida que se aplicaron las dosis del cloruro férrico desde 0,6 hasta 4 g/L (Figura 4b). La disminución en los potenciales de hidrógeno pueden ser atribuidos a que el

ión férrico (Fe^{3+}) es un ión ácido de Lewis, que reaccionando con los iones OH^- presentes en la solución acuosa producen $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (Letterman *et al.*, 1999; Song *et al.*, 2004). Este fenómeno también fue reportado por Özkan *et al.* (2010) quienes obtuvieron un pH de 10 unidades durante el tratamiento de aguas residuales provenientes de una planta esterilizadora de desechos médicos a pH iniciales de 12 unidades previo al tratamiento fisicoquímico.

Altaher *et al.* (2011) reportaron que pesar de ocasionar una disminución en los potenciales de hidrógeno, el cloruro férrico muestra una excelente eficiencia de remoción en la región básica a valores de pH cercanos a 12 unidades, este aumento de eficiencia se puede atribuir a que el precipitado formado podría tener una acción de barrido de los sólidos en suspensión presentes en el agua y por ende provoca una disminución en la turbidez y color.

2.4. Comparación de la efectividad de los tratamientos con amargos de salmuera y cloruro férrico

La Tabla 3 presenta los valores de los parámetros fisicoquímicos obtenidos después del tratamiento de coagulación-floculación y sedimentación, para las dosis óptimas seleccionadas de cada uno de los coagulantes.

TABLA 3. Valores finales después del tratamiento fisicoquímico con amargos de salmuera y cloruro férrico

Parámetro	Amargos de salmuera (1,6 g/L)	Cloruro férrico (0,6 g/L)	Límites permisibles
Color real (UC Pt-Co)	200 ± 10	150 ± 50	500
Turbidez (UNT)	2,50 ± 1,05	6,76 ± 1,12	-
pH	8,46 ± 0,35	8,66 ± 0,32	6 - 9
DQO _T (mg/L)	72 ± 28	82 ± 42	350
NTK (mg/L)	27,2 ± 6,5	35,6 ± 15,0	-
N-NO _x - (mg/L)	9,2 ± 2,3	11,2 ± 1,2	10
NT (mg/L)	36,4 ± 4,2	46,8 ± 8,1	40
Cloruros (mg/L)	1149 ± 148	1102 ± 353	1000
ST (mg/L)	520 ± 56	410 ± 50	-
SST (mg/L)	80 ± 11	142 ± 37	80
Alcalinidad total (mg/L)	115 ± 21	162,5 ± 17,7	-

n:3. N: número de mediciones realizadas. DE: Desviación estándar. N-NO_x-:
 N-NO₂⁻+ N-NO₃⁻.

De acuerdo a los resultados para las mejores dosis de los tratamientos con amargos de salmuera y cloruro férrico, se obtuvo que el efluente del tratamiento con amargos de salmuera presentó valores promedios de los parámetros fisicoquímicos: color real, pH, DQO, NT, N-NOx-, SST que cumplieron con lo establecido en la normativa ambiental venezolana para la descarga en cuerpos de agua, a excepción del valor medio de los cloruros (Gaceta oficial, 1995).

Para el caso del tratamiento con cloruro férrico se obtuvo que el efluente cumplió con respecto a los parámetros color real, pH y DQO, mientras que los valores promedios de NT, N-NOx- y SST no cumplen con los límites máximos permitidos para descarga a los cuerpos de agua.

En la Tabla 4 se presentan los porcentajes de remoción de color, turbidez, DQO_T, NTK y N-NOx y los resultados del análisis de varianza y separación de medias a través de la prueba de Tukey utilizando el programa estadístico Statistix versión 9.0

TABLA 4. % Remoción de los parámetros fisicoquímicos medidos.

Parámetro	Amargos de salmuera (1,6 g/L)	Cloruro férrico (0,6 g/L)
Color real (UC Pt-Co)	77,4 ^b ± 2,1	83,1 ^a ± 1,5
Turbidez (UNT)	89,5 ^a ± 2,3	71,5 ^b ± 3,4
DQO _T (mg/L)	94,1 ^a ± 1,8	93,2 ^a ± 2,6
NTK (mg/L)	80,2 ^a ± 3,4	74,0 ^a ± 3,3
N-NOx - (mg/L)	39,9 ^a ± 3,6	26,8 ^b ± 1,9
NT (mg/L)	76,2 ^a ± 3,0	69,2 ^b ± 2,3

Nota: Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$) ± desviación estándar (3 repeticiones)

Del análisis estadístico realizado, se observó que al comparar el desempeño de los coagulantes individuales, el tratamiento con salmuera presentó diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en la remoción de los parámetros fisicoquímicos (color, turbidez, N-NOx-, NT) con respecto al tratamiento con cloruro férrico. El coagulante que logró la mayor remoción de color real (83,1%) fue el cloruro férrico con la dosis de 0,6 g/L, mientras que el tratamiento con amargos de salmuera permitió obtener los mayores porcentajes de remoción de turbidez (89,5%) NT (76,2%) y N-NOx- (39,9%). No se encontraron diferencias estadísticas ($p > 0,05$) con respecto a la remoción de los parámetros DQO y NTK, por lo que ambos coagulantes son igualmente efectivos en la remoción de estas variables.

De acuerdo al análisis de la calidad de los efluentes tratados con respecto a la normativa ambiental para la descarga en cuerpos de aguas y el análisis estadístico realizado, el tratamiento con amargos de salmuera como coagulantes representa una opción viable para el tratamiento terciario de los efluentes del proceso de matanza de reses tratados biológicamente, ya que genera un efluente que cumple con la mayoría de los parámetros analizados a excepción de los cloruro y además se obtienen mayores porcentajes de remoción de color, turbidez, NT y NO_x- que los arrojados por el tratamiento con cloruro férrico.

Conclusiones

El pH óptimo de coagulación de los amargos de salmuera fue de 9 unidades, debido a que este valor se obtuvo la mayor eficiencia de remoción de los parámetros: color, turbidez y DQO y además implica un menor gasto de alcalinizante al momento de realizar los tratamientos a escala industrial.

El rango evaluado de dosis de amargos de salmuera (0,2 a 5 g/L) permitió obtener porcentajes de remoción de 89,5% de turbidez, 77,4% de color, 94,1% de DQO y 76,2% de NT para valores iniciales de 23,7 NTU, 885 UC, 1211,7 mg DQO/L y 152 mg NT/L, utilizando como dosis óptima de coagulante 1,6 g/L.

El tratamiento con cloruro férrico en el efluente del matadero de reses tratado permitió alcanzar una remoción de turbidez, color, DQO y NT de 71,5; 83,1; 93,2 y 69,2%, respectivamente, utilizando una dosis óptima de coagulante de 0,6 g/L.

En cuanto a las eficiencias de remoción obtenidas y la calidad del efluente, el tratamiento terciario que produjo los mejores resultados fue cuando se utilizó amargos de salmuera como coagulante con una dosis de 1,6 g/L, generando un efluente que cumple con los límites establecidos por la normativa ambiental venezolana para la descarga en cuerpos de agua con respecto a los parámetros DQO, NT, NO_x, color real y sólidos suspendidos totales, a excepción de cloruros.

Referencias

- Altaher, H., El Qada, E., Omar, W. (2011). Pretreatment of wastewater streams from petroleum/petrochemical industries using coagulation. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 1:245-251.
- American Public Health Association (APHA-AWWA-WEF). (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21st edition. American Public Health Association. Washington, D.C. USA.

- Amuda, O., Alade, A. (2006). Coagulation/flocculation process in the treatment of abattoir wastewater. *Desalination*, 196: 22-31
- Andía, Y. (2000). Tratamiento de agua: Coagulación y floculación. SEDEPAL. Evaluación de plantas y desarrollo tecnológico. 44 p. Lima, Perú
- Arboleda, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Editorial Acodal. Colombia.
- Ayoub, G; Merehbi, F; Abdallah, R; Acra, A; El Fadel, M. (1999). Coagulation of Alcalinized Municipal Wastewater using seawater bittem. *Water Envrionment Research*, 71 (4): 443-453.
- Banuraman, S., Meikandaan, T. (2013). Treatability study of tannery effluent by enhanced primary treatment. *Internatinal Journal of Modern Engineering Research*, 3 (1): 119-122.
- Bhuptawat, H., Folkard, G., Chaudhari, S. (2007). Innovative physico-chemical treatment of wastewater incorporating *Moringa oleifera* seed coagulant. *Journal of Hazardous Materials*, 142(1-2):477-482.
- Bidhendi, G., Torabian, A., Ehsani, H., Razmkhah, N. (2007). Evaluation of industrial dyeing wastewater treatment with coagulants and polyelectrolite as a coagulant aid. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 4, (1): 29-36.
- Carrasquero, S., Marquina, D., Soto, J., Vilorio, S., Pire, M., Díaz, A. (2015). Remoción de nutrientes en aguas residuales de un matadero de reses usando un reactor biológico secuencial. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(2):43-60.
- Carrasquero, S., Matos, E., Saras, F., Pire, M., Colina, G., Díaz, A. (2014). Evaluación de la eficiencia de un reactor por carga secuencial tratando aguas residuales de un matadero de reses provenientes de un matadero de reses. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la UCV*, 29(3):7-16.
- Cegarra. (2011). Tratamiento físico-químico en efluentes de una tenería provenientes de un tratamiento biológico. Trabajo de Grado para optar al grado académico de *Magister Scientiarum en Ingeniería del Zulia*. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela.
- Dosta, J., J. Rovira, A. Gali, S. Mace, J., Mata-Alvarez. (2008). Integration of a coagulation-flocculation step in a biological sequencing batch reactor for COD and nitrogen removal of supernatant of anaerobically digested piggery wastewater. *Bioresource Technology*, 99:5722-5730.
- Gaceta Oficial de la República de Venezuela. (1995). Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos. N° 5021, Decreto 883, Sección III de las Descargas a los cuerpos de aguas. Artículo 10.
- Hanan, A. (2009). Upgrading of Wastewater Treatment Plant by the Use of Coagulation Flocculation Process. *Ain Shams Journal of Civil Engineering Egypt*.
- Hinestroza, J. (2000). Los Desechos Tóxicos de una Industria Salinera Aumentará la Contaminación del Lago. Disponible en: <http://www.ambiente-ecologico.com/066-01-2000/jorgehinestroza66.htm>. Consultado el: 24 de octubre de 2015.

- Letterman, R., Amirtharajah, A.; Omelia, C. (1999). *Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies*, 5th edition. Mcgraw - Hill, USA.
- Kargi, F.; Uygur A. (2004). Hydraulic residence time effects in biological nutrient removal using five-step sequencing batch reactor. *Enzyme and Microbial Technology*, 35(2):167-172.
- Koohestanian, A., Hosseini, M., Abbasian, Z. (2008). The Separation Method for Removing of Colloidal Particles from Raw Water. *American-Eurasian journal of agricultural & environmental sciences*, 4(2): 266-273.
- Maldonado, J., Ramón, J. (2006). Sistema de tratamiento para aguas residuales industriales en mataderos. Grupo de Investigaciones Ambientales Agua, Aire y Suelo (GIAAS). Programa de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingenierías y Arquitectura - Universidad de Pamplona. 1:34-49
- Massé, D., Masse, L. (2000). Treatment of slaughterhouse wastewater in anaerobic sequencing batch reactors. *Agriculture and Agri-Food Canada*, 2(3):131-137.
- Mattei, M., Guida, M., Della Rocca, C., Melluso, G., Meriç, S. (2005). Optimization of alum-coagulation/flocculation for COD and TSS removal from five municipal wastewater. *International Journal on the Science and Technology of Desalting and Water Purification*, 2(3):113-127.
- Mazumder, D., Mukherjee, S. (2011). Treatment of automobile service station wastewater by coagulation and activated sludge process. *International Journal of Environmental Science and Development*, 2(1): 64-69.
- Morales F., Méndez R., Tamayo M. (2009). Tratamiento de aguas residuales de rastro mediante semillas de Moringa oleifer Lam como coagulante. 10 (3): 523-529.
- Orhon, D., Karahan, O., Sözen, S. (1999). The effect of residual microbial products on the experimental assessment of the particulate inert COD in wastewaters. *Waters Research*, 30(14):3191-320
- Özkan, O., Mihçioğur, H., Azgin, S., Özdemir, Ö. (2010). Characterization of medical-waste sterilization-plant wastewater and a preliminary study of coagulation-flocculation treatment options. *Water Science & Technology*, 62(2): 266-272.
- Pire, M. (2012). Remoción de nutrientes en aguas residuales de una tenería aplicando tratamiento biológico y fisicoquímico. Tesis Doctoral para optar al grado académico de Doctor en Ingeniería Ambiental. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela
- Ryu, H., Lee, S., Chung, K. (2007). Chemical Oxygen demand removal efficiency of biological treatment process treating tannery wastewater following seawater flocculation. *Environmental Engineering Science*, 24(3):249-259.
- Shabe, K., Salah, S., Janbi, M. (2011). Coagulation-flocculation process to treat pulp and paper mill wastewater by enugreek mucilage coupled with alum and polyaluminum chloride. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 7, (3): 39-47.
- Song, Z., Williams, C., Edyvean, R. (2004). Treatment of tannery wastewater by chemical coagulation. *Desalination*, 164(3): 249-259.