



EVALUACIÓN DE UN POSTRATAMIENTO FÍSICOQUÍMICO PARA LA REMOCIÓN DE TURBIDEZ DE EFLUENTES DE UNA TENERÍA

Hernández José Eduardo, Lameda-Cuicas Eudimar, Pire-Sierra María Gabriela,
Molina-Quintero Luisa, Pire-Sierra María Carolina

Programa de Ingeniería Agroindustrial. Decanato de Agronomía. Universidad
Centroccidental Lisandro Alvarado, Barquisimeto, Venezuela

ASA/EX -2016-14.

Recibido: 12-07-2016

Aceptado: 01-11-2016

RESUMEN

Se realizó un postratamiento fisicoquímico de coagulación-floculación a escala de laboratorio aplicando la prueba de jarra a efluentes de tenería provenientes de un tratamiento biológico. Se utilizaron coagulantes químicos (cloruro férrico) y coagulantes naturales (agua de mar) con una dosis fija 30 mL/L de floculante policloruro de aluminio marca Nalco (10 g/1000 mL). El objetivo fue evaluar el comportamiento de estos coagulantes probados individualmente en la eficiencia de remoción de turbidez. El postratamiento se ejecutó en dos etapas, de las cuales la primera correspondió al proceso de determinación del pH óptimo. El pH 11 permitió que los coagulantes actuaran de manera eficaz. Posteriormente, en la segunda etapa se determinó la dosis ideal de cada coagulante. La dosis óptima para el cloruro férrico fue de 10 mL/L, mientras que para el agua de mar la dosis ideal fue de 20 mL/L, en ambos casos removiendo porcentajes cercanos al 100% de turbidez. En esta segunda etapa ambos coagulantes lograron remover la turbidez a niveles no detectables. Se concluye que la aplicación de un postratamiento fisicoquímico basado en el proceso de coagulación-floculación permitió generar un efluente cuya turbidez cumple con lo especificado en la normativa ambiental venezolana para un agua tipo 1, sub-tipo 1A.

Palabras clave: Turbidez, coagulación-floculación, cloruro férrico, agua de mar, efluente de tenería.



EVALUATION OF A PHYSICOCHEMICAL POST-TREATMENT FOR REMOVAL OF TURBIDITY FROM TANNERY WASTEWATER

ABSTRACT

A physico-chemical post-treatment of coagulation-flocculation was carried out at laboratory scale, applying the jar test to tannery effluents from a biological treatment. Chemical coagulants (ferric chloride) and natural coagulants (seawater) were used with a fixed dose of 30 mL / L of Nalco brand polychloride aluminum flocculant (10 g / 1000 mL). The objective was to evaluate the behavior of these individually tested coagulants in turbidity removal efficiency. Posttreatment was performed in two stages, the first one corresponded to the selection of optimal pH. The pH 11 allowed the coagulants to act effectively. Subsequently, in the second stage, the ideal dose of each coagulant was determined. The optimal dose for ferric chloride was 10 mL / L, while for seawater the ideal dose was 20 mL / L, in both cases removing percentages close to 100% turbidity. In this second stage both coagulants were able to remove the turbidity to non-detectable levels. It was concluded that the application of a physico-chemical post-treatment based on the coagulation-flocculation process allowed the generation of an effluent whose turbidity complies with that specified in the Venezuelan environmental regulations for a type water 1, subtype 1A.

Key words: Turbidity, coagulation-flocculation, ferric chloride, seawater, tannery effluent.



INTRODUCCIÓN

Todos los procesos industriales requieren la aplicación de métodos para ayudar a controlar las variables que resulten riesgosas para los trabajadores, los consumidores y también, no menos importante, el ambiente. En la antigüedad el curtido se consideraba una industria nociva y era relegada a las afueras de las ciudades y a las zonas pobres; de hecho, los antiguos métodos de curtido eran tan malolientes que las tenerías donde se emplean aún siguen estando aisladas de las ciudades, es por ello que este tipo de industrias requiere de métodos de control y de mayor cuidado debido a los procesos que ejecutan.

Un aspecto del proceso productivo de curtido de pieles que requiere mayor atención, está referido a las aguas residuales que estas industrias

generan. Estos efluentes son muy contaminantes, debido a la elevada carga de compuestos orgánicos e inorgánicos que poseen provenientes de los procesos de transformación de las pieles animales en cuero (Durai y Rajasimman, 2012; Lofrano et al., 2013). El efluente proveniente del proceso productivo de una tenería se caracteriza por poseer altas cargas orgánicas, niveles elevados de amonio y nitrógeno orgánico, además de la presencia de compuestos inorgánicos, tales como el sulfuro y cloruro de sodio, que son adicionados durante el proceso de limpieza y acondicionamiento de las pieles (De Gisi et al., 2009).

Hoy en día se han utilizado métodos optimizados para permitir controlar y remover los contaminantes de estas aguas residuales. Particularmente, se han utilizado con éxito los procesos biológicos, sin



embargo, éstos no son eficientes para remover las fracciones poco biodegradables o inertes, por lo que la combinación de procesos biológicos con los fisicoquímicos resultan ideales para el tratamiento de los efluentes de tenerías (Oller et al., 2011; Pire-Sierra, 2012). Al respecto, Dosta et al.. (2008) señalaron que los procesos fisicoquímicos como postratamiento al tratamiento de las aguas residuales optimiza el funcionamiento del proceso, ya que se agrega sólo la cantidad de coagulante requerido para remover los contaminantes remanentes de procesos previos de tratamiento.

En este orden de ideas, Nemerow (1977) indica que la coagulación química es la eliminación de los coloides sólidos que generan demanda de oxígeno y producen turbiedad en las aguas residuales, se llama frecuentemente tratamiento intermedio, puesto que los coloides tienen un comportamiento intermedio

entre los sólidos en suspensión y los disueltos. El método más común y práctico de eliminar estos sólidos es por coagulación química consistente en desestabilizar los coloides y posteriormente juntarlos para facilitar la sedimentación. Implica la formación de flóculos químicos que absorben, unen y arrastran la materia en suspensión, facilitando su sedimentación.

Dado esto, en la presente investigación se evaluó un proceso fisicoquímico de coagulación-floculación como postratamiento al efluente de una tenería que había sido previamente tratado por un sistema biológico, con el fin de remover la turbidez remanente. Para esto, se comparó la eficiencia de remoción empleando dos coagulantes, uno químico cloruro férrico (FeCl_3) y otro natural (agua de mar), utilizando una



dosis fija del floculante (policloruro de aluminio).

MATERIALES Y MÉTODOS

Origen del agua residual y postratamiento realizado

Se utilizó un efluente de tenería que había sido tratado previamente por un proceso de depuración biológico. El postratamiento se ejecutó en el Laboratorio de Investigación Ambiental y en el Laboratorio de Análisis y Tratamientos Industriales de Agua de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Programa de Ingeniería Agroindustrial, Barquisimeto, Edo. Lara.

La investigación consistió en aplicar un tratamiento fisicoquímico de coagulación-floculación empleando dos coagulantes diferentes, uno químico como es el Cloruro Férrico (FeCl_3) [$5 \text{ g}/1000 \text{ mL}$] (Fluka Analytical)

y otro natural, como es el agua de mar (Parque Nacional Morrocoy, Edo. Falcón, Venezuela). Estos coagulantes fueron probados de forma individual para evaluar su efecto sobre la remoción de turbidez remanente del tratamiento previo (biológico).

Análisis realizados

Las variables medidas fueron la turbidez y el pH. La turbidez de las muestras fue determinada por un turbidímetro nefelométrico, el cual fue calibrado diariamente para realizar la determinación de las muestras antes y después del tratamiento fisicoquímico. Por su parte, el pH fue medido con un potenciómetro (pHmetro) marca Hanna Instruments, modelo 211, siguiendo en ambos casos los procedimientos establecidos en el método estándar internacional (APHA-AWWA-WEF, 2005).



Procedimiento del postratamiento fisicoquímico

Se trabajó con el equipo usado para la prueba de jarras que consistió en un agitador múltiple de 6 paletas y velocidad regulable, que permitió ejecutar el postratamiento a escala de laboratorio. El equipo de jarras se utilizó con volúmenes de 1 L del efluente proveniente del tratamiento biológico empleando vasos de precipitado de 1 L.

La fase experimental se llevó a cabo en dos etapas, en la primera se probaron tres pH diferentes, para determinar el ideal para cada tipo de coagulante (pH 7, pH 8,9 y pH 11), siendo el pH intermedio, el pH original del efluente de la tenería. Para ajustarlo se empleó ácido sulfúrico o hidróxido de sodio. Posteriormente, luego de determinado el pH óptimo, se pasó a la segunda etapa, donde se

probaron diferentes dosis de cada uno de los coagulantes. Inicialmente, se probaron dosis distantes entre sí, luego el rango se fue estrechando hasta obtener la dosis óptima para el tratamiento del efluente en estudio. Durante todas las etapas de la investigación se adicionó una dosis fija de 30 mL/L del floculante, Policloruro de Aluminio, marca Nalco, cuya concentración fue de 10 g/L.

Etapa 1. Criterios para la selección del pH óptimo para cada coagulante

El pH se seleccionó en función de aquel tratamiento que produjera el mayor porcentaje de remoción de turbidez. Así como también se evaluó la formación, estabilidad y compactación del floculo formado para garantizar una adecuada separación del agua residual.



Etapa 2. Criterios empleados para la selección de la dosis ideal de cada coagulante

La mejor dosis de coagulante fue aquella que logró el mayor porcentaje de remoción de turbidez, también se consideró la cantidad de coagulante a usar (prefiriendo las dosis menores) y finalmente, fue importante la formación, estabilidad y compactación del flóculo formado. Luego de aplicar todos estos criterios, se verificó el cumplimiento de los límites o especificaciones para turbidez establecidos en la normativa ambiental venezolana (MARN, 1995).

Análisis estadístico de los resultados

Se realizó una validación estadística para determinar las mejores pruebas obtenidas en las etapas 1 y 2. La variable estudiada fue la turbidez. El diseño que se empleó es uno completamente al azar y luego se

aplicó la prueba de separación de medias de Tukey ($P \leq 0,05$). Se realizaron tres repeticiones de cada tratamiento. El programa estadístico utilizado fue el STATISTIX 8.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La turbidez del agua residual antes del postratamiento presentó un valor promedio de $918,8 \pm 44,2$ NTU, siendo significativamente superior al valor límite para que el agua pueda ser catalogada del sub-tipo 1B (<250 NTU). Es importante señalar que la normativa venezolana no regula parámetros como turbidez en el artículo 10 del Decreto 883 que está referido a los límites de descarga de efluentes a cuerpos de agua (MARN, 1995), por esta razón la comparación se realizó en función de la posible clasificación que tiene el agua para su uso.



En este caso particular, el efluente de la tenería luego del tratamiento biológico, posee una turbidez muy superior a la máxima aceptada para que el agua sea clasificada como del Tipo 1 (sub-tipo 1B) que son aguas que pueden ser acondicionadas por medio de tratamientos convencionales de coagulación-floculación, sedimentación, filtración y cloración (MARN, 1995). Estos resultados evidencian la necesidad de tratamiento que requieren estos efluentes industriales para poder adecuarse y descargarse de forma segura a la naturaleza.

Evaluación del postratamiento:

Etapas 1. Determinación del pH óptimo para el proceso de coagulación-floculación.

Durante el proceso de búsqueda del pH óptimo, se ajustó el agua residual de tenería proveniente del tratamiento biológico a diferentes pH para ser

tratadas individualmente con coagulante químico (cloruro férrico) y natural (agua de mar) a una dosis fija. El objetivo era determinar el pH ideal para lograr una mayor remoción de turbidez.

Uso del coagulante químico: Cloruro férrico

En el Gráfico 1, se muestran los resultados al aplicar una dosis fija de 120 mL/L del coagulante cloruro férrico (FeCl_3) [$5 \text{ g}/1000 \text{ mL}$] variando el pH en 7, 11 y el original del efluente a tratar que presentó un pH de 8,9₁₀₀

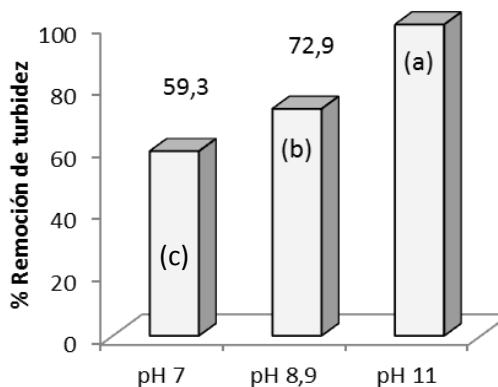


Gráfico 1. Influencia del pH en la remoción de turbidez al usar FeCl_3 (120 mL/L) con dosis fija de



floculante (30 mL/L). Letras diferentes para una misma variable representan diferencia estadística, según Prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

Para seleccionar el mejor pH se evaluó el efecto de este coagulante sobre la remoción de turbidez, observándose que en la salida del postratamiento a pH 7 la turbidez presentó un promedio de 14,25 NTU, el pH natural del efluente en estudio arrojó una turbidez promedio en la salida de 9,5 NTU y al ajustar a pH 11 la turbidez fue no detectable (≈ 0 NTU). Los porcentajes de remoción de turbidez (Gráfico 1) para pH 7 fue 59,3 %, el pH natural del efluente en estudio arrojó un porcentaje de remoción de 72,9 % y al ajustar a pH 11 la remoción de turbidez fue cercana al 100 %. Estos resultados fueron significativamente diferentes ($P \leq 0,05$) lo que representa que el mayor porcentaje de remoción de turbidez se logró para el mayor de los pH

probados, seguido por el pH intermedio (pH natural del efluente crudo), mientras que la menor remoción de turbidez se logró para el pH neutro.

Por lo expuesto anteriormente, el mejor tratamiento para la remoción de turbidez utilizando el coagulante químico (cloruro férrico) fue a pH de 11, donde se obtuvo una remoción casi total de esta variable, así también se detectó la mejor formación del flóculo; y por tanto, mejores características de separación del material sedimentable del agua tratada.

Además utilizar el pH de 11 presentó un beneficio adicional, relacionado con el menor consumo de reactivos químicos requeridos para ajustar el pH, debido a que la muestra del agua residual en estudio tiene un pH promedio de 8,9 y para ajustar su pH generó menos consumo de



reactivos al momento de aumentar su pH a 11 unidades que disminuirlo a un pH neutral (7 unidades).

Respecto al pH óptimo, los resultados coincidieron con los rangos de pH recomendados por Arboleda (2000) para usar el coagulante químico: cloruro férrico, quien observó que pH extremos (ácidos o básicos) favorecían la acción del coagulante, funcionando adecuadamente a niveles de cuatro unidades, así como de once unidades, de esta forma el pH ideal obtenido en la siguiente investigación coincide con uno de los señalados por este investigador.

Uso del coagulante natural: Agua de mar

En el Gráfico 2, se muestran los resultados al aplicar una dosis fija de 120 mL/L de coagulante agua de mar a pH 7, 8,9 y 11 y la influencia que

estos tuvieron sobre los porcentajes de remoción de turbidez. Se obtuvo la mayor remoción de turbidez al utilizar pH de 11, siendo estadísticamente superior al resto de los pH probados ($P \leq 0,05$), logrando una remoción de 92,8% de turbidez y excelente formación de floculo. Decidiendo trabajar las muestras de la segunda etapa de esta investigación con pH de 11. En el Gráfico 2 se puede observar la deficiente remoción de turbidez lograda al utilizar el pH de 7 unidades.

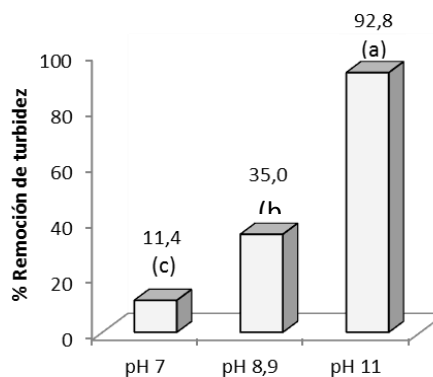


Gráfico 2. Influencia del pH en la remoción de turbidez usando agua de mar (120 mL/L) con dosis fija de floculante (30 mL/L). Letras diferentes para una misma variable representan diferencia estadística, según Prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).



Los resultados demostraron la influencia determinante que tiene el pH sobre el efecto de los coagulantes, tanto para el cloruro férrico como para el agua de mar, en la remoción de turbidez del agua residual de la tenería. El pH más alcalino favoreció el tratamiento, independientemente del coagulante probado.

Etapa 2. Determinación de la dosis ideal de coagulante

El objetivo del presente ensayo fue determinar la dosis ideal de los coagulantes a un pH de 11, que fue obtenido experimentalmente como el pH ideal u óptimo para el proceso de coagulación-floculación.

Uso del coagulante químico: Cloruro férrico

En el Gráfico 3 se muestran los resultados de la remoción de turbidez al utilizar diferentes dosis de cloruro férrico a un pH fijo de 11 unidades.

Las dosis empleadas fueron 10, 20, 30, 100 y 200 mL/L. Al inicio, se probaron dosis distantes entre sí y luego según el rango donde se obtuvieron mejores resultados, se fue disminuyendo la diferencia entre las dosis probadas.

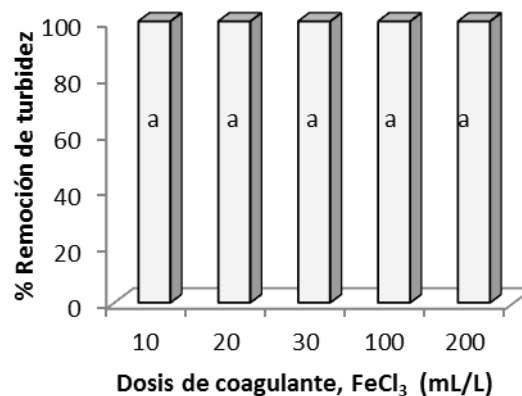


Gráfico 3. Influencia de la dosis de coagulante químico sobre la remoción de turbidez usando dosis fija de floculante (30 mL/L). Letras diferentes para una misma variable representan diferencia estadística, según Prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

La turbidez de las muestras luego del postratamiento para las dosis de



coagulante cloruro férrico (FeCl_3) usadas no fue detectable (≈ 0 NTU), por lo que se estima que los porcentajes de remoción fueron cercanos al 100%. Estos resultados representan que las muestras, luego del tratamiento, no fueron capaces de desviar el haz luminoso, es decir la turbidez no fue detectable debido a la remoción de partículas de materia orgánica lograda por el proceso de coagulación-floculación (postratamiento fisicoquímico).

Como se mencionó anteriormente, la normativa ambiental venezolana no regula la turbidez en el efluente de descarga a un cuerpo de agua, sin embargo, para poder validar el efecto de los coagulantes se comparó con los rangos establecidos en el Decreto 883 para tipos de agua según su posible uso, correspondiendo, en este caso, a aguas sub-tipo 1A (turbidez < 25 NTU) y esta clasificación sería válida

sólo en el caso hipotético que el único contaminante fuera la turbidez.

Finalmente, se considera que la dosis óptima o ideal de FeCl_3 fue de 10 mL/L a pH 11, para la cual la estructura del flóculo fue la más adecuada comparada con las otras dosis usadas. Con dosis de coagulante mayores a 10 mL/L se generaría un consumo innecesario (en exceso) de reactivo químico en el postratamiento.

Uso del coagulante natural: Agua de Mar.

En el Gráfico 4 se muestran los resultados de la remoción de turbidez al utilizar diferentes dosis de coagulante natural agua de mar a un pH fijo de 11 unidades. Las dosis empleadas fueron 20, 40, 60, 80, 100 y 200 mL/L y fueron obtenidas experimentalmente.

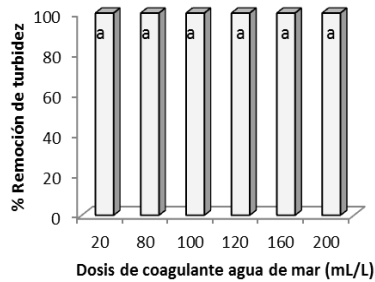


Gráfico 4. Influencia de la dosis de coagulante natural (agua de mar) sobre la remoción de turbidez usando dosis fija de floculante (30 mL/L). Letras diferentes para una misma variable representan diferencia estadística, según Prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

La turbidez del agua residual después del postratamiento para las dosis de coagulante agua de mar probadas no fue detectable (≈ 0 NTU), asumiéndose porcentajes de remoción de turbidez cercanas al 100% sin diferencia estadística entre ellas ($P > 0,05$). Por tanto, la dosis óptima para remover turbidez del agua residual de la tenería es la de 20 mL/L de agua de mar que logró disminuir esta variable desde 918,8 NTU hasta valores no detectables por el método nefelométrico utilizado.

Comparando estos resultados con el Decreto 883 (MARN, 1995), el postratamiento físicoquímico contribuyó a acondicionar el efluente a niveles por debajo a los establecidos en normas, ajustándose a los rangos establecidos en el Decreto 883 para aguas del sub-tipo 1A (turbidez < 25 NTU).

Finalmente, ambos coagulantes demostraron ser eficientes para la remoción de la turbidez del agua residual de la tenería. La selección del coagulante para el postratamiento dependerá mucho de la disponibilidad del mismo. El uso del coagulante químico es eficiente, ya que con dosis relativamente bajas se logra remover la turbidez a niveles aceptables para su descarga a cuerpos de agua; sin embargo, este coagulante por ser un químico que se vende comercialmente, representa un costo importante que



debe considerarse al momento de seleccionar el coagulante. Por su parte, el agua de mar resultó ser igualmente eficiente que el cloruro férrico, pero sus dosis son más elevadas (doble gasto en volumen respecto al FeCl_3), a pesar de esto el coagulante natural está disponible de forma mucho más accesible y es de bajo costo, siempre y cuando, el postratamiento se realice en una zona cercana a un cuerpo de agua salada, ya que el transporte de las cantidades de agua de mar requeridas para un tratamiento a escala industrial, representaría un costo elevado comparable o superior a la adquisición del coagulante químico.

CONCLUSIONES

El postratamiento fisicoquímico basado en coagulación-floculación, usando cloruro férrico (FeCl_3) [$5 \text{ g}/1000 \text{ ml}$] o agua de mar, más dosis fija de floculante (30 mL/L) demostró ser

efectivo en la remoción de la turbidez de los efluentes de las tenerías.

Tanto el coagulante químico como el natural fueron eficientes para remover la turbidez remanente de los efluentes de una tenería, generando un agua residual con turbidez no detectable por el método de medición utilizado, siendo comparable o similar a el agua tipo 1 (sub-tipo 1A) de la normativa ambiental venezolana.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue apoyada y financiada por el Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, UCLA - Barquisimeto, Venezuela, así como también por la Fundación Nacional de Ciencia y Tecnología



(FONACIT) (Proyecto 618-FAG-2013).

REFERENCIAS

APHA, AWWA, WCF.(2005). *Standard methods for examination of water and wastewater.*

Arboleda, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua.* 3a. edición. Santa Fe de Bogotá. 163-180

De Gisi, S., Galasso, M., De Feo, G. (2009). *Treatment of tannery wastewater through the combination of a conventional activated sludge process and reverse osmosis with a plane membrane.* Desalination, 249:337-342.

Dosta, J., Rovira, J., Galí, A., Macé, S., Mata-Álvarez, J. (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. Biosource Technology, 99 (13):5722-573.

Durai, G.; Rajasimman, M. (2011). *Biological Treatment of tannery wastewater – A review.* Journal of Environmental Science and Technology, 4(1):1-17.

Lofrano, G. Meric, S. Emel Zengin, G., Orthon, D. (2013). *Chemical and biological treatment technologies for leather tannery chemicals and wastewaters: A review.* Science of the total Environment 461-462: 265-281.

MARN. Ministerio del Ambiente de Recursos Naturales Renovables y no Renovable. (1995). *Ley ambiental venezolana.* Decreto 883 de la Gaceta oficial 5.021.



Extraordinario 18/12/1995. Sección
III de las descargas a cuerpos de
aguas Artículo 10.

Nemerow, N. (1977). *Aguas
residuales industriales: teoría,
aplicaciones y tratamiento.*
España.

Oller, S. Malato, J.A. Sánchez-Pérez.
(2011). *Combination of advanced
oxidation processes and biological
treatments for wastewater
decontamination – A review.*
Science of Total Environment
409:4141-4166.

Pire-Sierra, M.C. (2012). *Remoción de
nutrientes en aguas residuales de
una tinería aplicando tratamiento
biológico y fisicoquímico.* Tesis
doctoral presentada en la
Universidad del Zulia. Venezuela.
307 p.