



Microalgas en el tratamiento de aguas residuales generadas en industrias de curtiembres

Microalgae in the treatment of wastewater from the curtiembres industry

Carlos Jacome-Pilco¹, Carlos Ballesteros¹, Edwin Rea¹, Luz Margarita Rea Cayambe¹, Paulo Cesar Poma-Villafuerte²

¹Universidad Estatal de Bolívar, Carrera de Ingeniería Agroindustrial, CP: 0201520, Guaranda, Ecuador, cjacome@ueb.edu.ec.

²Unidad Educativa La Libertad, 0201520, Guaranda, Ecuador

Rec.: 02.10.2021 Acept.: 06.04.2021

Publicado el 30 de diciembre de 2021

Resumen

Las aguas residuales provenientes de la industria de curtiembre, presentan elevadas concentraciones de metales pesados, especialmente de cromo (Cr), así como también, de otros componentes como Nitritos, Nitratos, Fosfatos, Sulfatos, que de no ser tratados previa a su descarga puede alterar gravemente la calidad de los cuerpos de agua superficiales. De manera que, un tratamiento alternativo a estos efluentes industriales, se ha venido proponiendo en diversas investigaciones. En tal sentido, el objetivo de este trabajo fue realizar una revisión bibliográfica detallada sobre la utilización de microalgas para tratar aguas residuales procedentes de curtiembres. Para lo cual, se analizaron 42 trabajos de entre artículo científicos y tesis con index internacional todos ellos relacionados al tema de trabajo. Tras el análisis, las microalgas más utilizadas en los procesos de biorremediación en este tipo de industria son: *Scenedesmus sp*, *Espirulina sp*, *Chlorella sp*, *Tetraselmis sp*, y *Pseudochlorella sp*, importantes por su alta eficiencia en la remoción de Cromo, y otros elementos contaminantes; donde, los géneros *Scenedesmus* y *Espirulina* demostraron una eficiencia mayor al 85% de remoción de Cr, seguido por *Chlorella* y *Pseudochlorella* (>60%). En la remoción de nitratos y nitritos, el género *Scenedesmus*, mostró mejores niveles de remoción (90%), seguido por *Chlorella* y *Pseudochlorella* (65%). Con respecto a la remoción de Fosfatos y Sulfatos, los géneros *Chlorella* y *Pseudochlorella* fueron el tipo de alga que demostró un nivel de remoción del 100%, seguidos por *Tetraselmis*, *Scenedesmus* y *Tetraselmis* (>95%). Este consorcio de micro algas podrían ser buenas alternativas a los métodos de tratamiento convencionales para la industria del cuero.

Palabras clave: Microalgas, tratamiento, aguas residuales, curtiembre

Abstract

The wastewater from the tanning industry has high concentrations of heavy metals, especially chromium (Cr), as well as other components such as Nitrites, Nitrates, Phosphates, and sulfates, which, if not treated prior to discharge, can seriously alter the quality of surface water bodies. Thus, an alternative treatment to these industrial effluents has been proposed in various investigations. In this sense, the objective of this work was to carry out a detailed bibliographic review on the use of microalgae to treat wastewater from tanneries. For which, 42 papers between scientific articles and theses with international index were analyzed, all of them related to the subject of work. After the analysis, the most widely used microalgae in bioremediation processes in this type of industry are: *Scenedesmus sp*, *Spirulina sp*, *Chlorella sp*, *Tetraselmis sp*, and *Pseudochlorella sp*, important for their high efficiency in removing Chromium, and others polluting elements; where, the genus *Scenedesmus* and *Spirulina* demonstrated an efficiency greater than 85% of Cr removal, followed by *Chlorella* and *Pseudochlorella* (>60%). In the removal of nitrates and nitrites, the genus *Scenedesmus*, showed better levels of removal (90%), followed by *Chlorella* and *Pseudochlorella* (65%). Regarding the removal of Phostates and Sulfates, the genera *Chlorella* and *Pseudochlorella* were the type of algae that showed a removal level of 100%, followed by *Tetraselmis*, *Scenedesmus* and *Tetraselmis* (>95%). This consortium of micro algae could be good alternatives to conventional treatment methods for the leather industry.

Keywords: Microalgae, treatment, wastewater, tannery

Introducción

La bioingeniería es una nueva rama de estudio que se ocupa de todos los aspectos tecnológicos relacionados a la medicina y biología; además del estudio de los seres vivos a nivel molecular y celular. Gracias a esta ciencia se puede diseñar y fabricar nuevas tecnologías que son cada vez más complejas y la necesidad de normativas al respecto hacen que la demanda de bioingenieros sea cada vez más importante. Uno de los grandes problemas del mundo son las aguas residuales al cual la bioingeniería está presentando una posible solución, mediante el uso de algas para tratamientos biológicos (Terán, 2017).

La contaminación de las aguas es un problema que va en continuo crecimiento y requiere de mayor atención en especial si consideramos que la industria de curtimientos emite altos niveles de toxicidad en las aguas que se caracterizan típicamente por una alta carga orgánica, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), carbono orgánico total (TOC), carbono orgánico disuelto (DOC), sólidos suspendidos altos, nitrógeno orgánico y amoníaco, durabilidad del agua de lavado, alta salinidad (niveles totales disueltos) (Meriç *et al.*, 2005; Sawalha *et al.*, 2019; Tamersit *et al.*, 2018).

Además, durante el proceso de bronceado de los curtidos, se aplican algunos productos químicos como fungicidas, taninos sintéticos y colorantes, que puede inhibir la nitrificación (Claros, 2012).

Una gran cantidad de evidencia ha asociado un número de riesgos para la salud con la industria del curtido de cuero, ambos incluyendo exposiciones ocupacionales y contaminación del agua y la tierra que resulta en una serie de efectos sobre la salud, que afectan a los cultivos, acuáticos y terrestres biota y humanos (Pena *et al.*, 2020).

Las cargas contaminantes del efluente de la curtiduría varían ampliamente y dependen de las materias primas y productos químicos utilizados, así como de los pasos de procesamiento del cuero que son: (Puchana-Rosero *et al.*, 2018).

A. Etapa de Beamhouse: sacudida de sal a pasos de decapado. Los procesos químicos se llevan a cabo en tambores con adición de agua. También se realizan operaciones mecánicas; B. Etapa de bronceado: realizada en tambor con adición de agua y agente de bronceado; C. Etapa de acabado: procesamiento en húmedo en tambores, seguido de tratamientos de secado, pre-acabado y acabado final en la superficie del cuero.

Las aguas residuales de la industria del cuero generalmente están sujetas a tratamientos mecánicos (Romero-Dondiz *et al.*, 2016), físico-químicos

(Kuppusamy *et al.*, 2017) y biológicos (Ortiz-Monsalve *et al.*, 2019). Sin embargo, las aguas residuales de la etapa de acabado son difíciles de tratar por métodos convencionales debido a la presencia de químicos recalcitrantes, como sintanes, cromo, resinas, engrasadores y colorantes (Pena *et al.*, 2020; Montalvão *et al.*, 2018).

Idealmente, línea de cromo y sulfuro las corrientes residuales se separan y se pretratan para eliminación de cromo y sulfuro por coagulación / floculación y procesos de oxidación catalítica, respectivamente. Otros tratamientos de aguas residuales pueden incluir nitrificación y desnitrificación, o procesos fisicoquímicos, como la precipitación de estruvita (Arango Ruiz, 2005).

La limpieza o depuración de aguas residuales es cada vez de mayor importancia debido al aumento de la población y al crecimiento de las industrias en todos los países del mundo, al mismo tiempo las exigencias de las normativas de depuración de aguas residuales son cada vez más rigurosas, por lo que es necesario crear nuevas técnicas de depuración que no solo sean más eficientes sino también más sostenibles y limpias.

La eliminación de la materia orgánica presente en el agua residual es uno de los aspectos más optimizados en el proceso de depuración. No ocurre lo mismo con la depuración de nitrógeno y fósforo que supone mayores gastos energéticos además de la necesidad de instalar equipos y procesos adicionales (Oruko *et al.*, 2019).

La contaminación de los cuerpos de agua radica en la eutrofización, que es causada por la liberación de compuestos orgánicos e inorgánicos al medio (Rawat *et al.*, 2011). el curtido con cromo durante el procesamiento del cuero constituye una de las fuentes importantes de grandes cantidades de desechos sólidos y líquidos peligrosos. La liberación de cromo con alta calidad venenosa y portabilidad sigue siendo una gran preocupación para cualquier ecosistema. La gestión deficiente o inadecuada de los desechos ricos en cromo puede provocar daños irreversibles al medio ambiente y constituir un peligro para la salud pública. Con una mayor preocupación pública, un estricto control legislativo y una conciencia ecológica, existe un mayor interés en las tecnologías ecológicas para minimizar la producción y gestión de los desechos de cromo de las industrias del cuero. (Oruko *et al.*, 2019).

Además, es bien conocido que ciertas microalgas (consorcio de microalgas) presenta la capacidad de crecer bien en aguas residuales (Pena *et al.*, 2020; Ran *et al.*, 2019). De hecho, el cultivo de microalgas se ha aplicado recientemente en el tratamiento de aguas residuales municipales (Aketo *et al.*, 2020), agrícolas (Khalid *et al.*, 2019) e industriales (Nayak y Ghosh, 2019). Sin embargo, existen tratamientos limitados

sobre el tratamiento de aguas residuales de la curtiduría realizado con microalgas. La alta carga química, la turbidez y la salinidad en las aguas residuales de la curtiduría cruda restringen el crecimiento adecuado de microalgas (Saranya y Shanthakumar, 2019). Por lo tanto, algunas aplicaciones de microalgas en aguas residuales de la curtiduría se llevaron a cabo con aguas mediante etapas de pretratamiento: aguas diluidas o medios de cultivo agregados (Fontoura *et al.*, 2017; Sundaramoorthy *et al.*, 2016).

Se sabe que las microalgas son microorganismos fotosintéticos procariontes y eucariontes (presentan estos dos caracteres), capaces de utilizar nutrientes como agua, energía solar y el más importante dióxido de carbono, para producir biomasa y se consideran interesantes en este contexto ya que presentan un elevado contenido en ácidos grasos “aceites” (hasta un 60% en peso) (Coêlho *et al.*, 2019; Mulumba y Farag, 2012).

Además, pueden crecer extremadamente rápido, entre 20 y 200 veces más rápido que los cultivos terrestres vegetales, viven en condiciones no muy favorables (Cobos Ruiz *et al.*, 2016; Mata *et al.*, 2010) y se localizan en hábitats diversos como agua de mar, agua dulce, agua salobre, aguas residuales o en el suelo, bajo un amplio intervalo de temperaturas, pH y disponibilidad de nutrientes, debido a su estructura unicelular o multicelular simple (Coêlho *et al.*, 2019; Cartagena y Malo, 2017). Tienen una alta productividad, pues con pequeñas áreas de cultivo se pudiera abastecer grandes demandas energéticas (Rhodes, 2009; Cobos Ruiz *et al.*, 2016).

Considerando lo descrito, el objeto de esta revisión es determinar los géneros de microalgas más importantes y eficaces para el tratamiento de aguas residuales procedentes de la industria de curtiembres, así como, determinar el efecto de remoción de microalgas estudiadas.

Materiales y métodos

En el presente trabajo de investigación se realizó una revisión bibliográfica, la cual se llevó a cabo en los meses de junio a julio del 2020. De las principales fuentes y base de datos de investigación, de 58 manuscritos totales que tenían relación con el tema de trabajo, se seleccionaron artículos científicos de las bases de datos “Scopus” (24), “Scielo” (6) “EBSCO” (10), libros y tesis de “Google Académico” (2), se ha tomado como referencia artículos más relevantes publicados en los 5 últimos años, todos relacionados con el tema de estudio. Se ha iniciado principalmente con la caracterización de las fuentes documentales, recopilando información y por consiguiente realizando

un análisis de cada una de ellas. La primera búsqueda en la base de datos fue con las palabras “Microalgae y microalgas”, para poder ajustar al tema principal, se empleó otras palabras, como utilización de microalgas en procesos de biorremediación, importancia de las microalgas, tratamiento de aguas residuales con microalgas.

Para esta revisión bibliográfica se aplicaron 3 criterios de selección

1. De información: los cuales manifiesten que los artículos científicos escogidos para la investigación estén estrictamente relacionados con el tema de estudio.
2. Exhaustividad: fueron seleccionados ciertos artículos a la búsqueda de información con sus técnicas empleadas en procesos de biorremediación que empleen microalgas y aporten soluciones basadas en la reducción de efectos nocivos en fuentes de agua.
3. Rango: los artículos científicos escogidos fueron aquellos que cumplen con el criterio de no menos 5 años de publicación con información actualizada.

En esta investigación se pudo identificar las diferentes técnicas empleadas en la aplicación de microalgas para el tratamiento de aguas residuales, es especial en las EDAR (Empresas Depuradoras de Aguas residuales).

Los criterios para la inclusión de los artículos científicos a la revisión bibliográfica, exclusivamente fueron los que se encuentren publicados en los idiomas inglés y/o español con su respectivo resumen y metodología. Mientras que los criterios de exclusión fueron artículos que no tienen relación con el tema en estudio, de igual manera, se descartó revistas, libros y documentos que no presentaban relevancia e importancia sobre el tema.

Resultados y discusión

Evolución de las microalgas como alternativa biorremediadora

Las microalgas poseen una capacidad biorremediadora que consiste en la eliminación o biotransformación de contaminantes de un medio líquido o gaseoso. Estos compuestos contaminantes son captados por la biomasa algal y pueden ser recuperados mediante su cosecha. Esta capacidad resulta en un sistema de cultivo con 2 propósitos: eliminación de contaminantes y producción de biomasa con fines comerciales. Ambos objetivos dependen del sistema de cultivo, las especies cultivadas y los factores ambientales (Hernández-Pérez y Labbé, 2014).

Según el trabajo llevado a cabo por un equipo de investigadores de la UNER, una alternativa a las estaciones depuradoras para el tratamiento de aguas residuales es la ficorremediación, que consiste en el uso de macro o microalgas para la remoción o biotransformación de contaminantes, incluidos nutrientes, xenobióticos y CO₂ del agua residual. Esta tecnología es económica, versátil y tecnológicamente sencilla (Campos, 2017).

Condiciones de desarrollo de las microalgas

La elección de las especies de microalgas a cultivar depende directamente de la finalidad u propósito que se le desea brindar a la biomasa resultante (ejemplo: alimentos, pigmentos) y/o si el cultivo es para ficorremediación (Hernández-Pérez y Labbé, 2014).

Las microalgas en un cultivo para ficorremediación deben cumplir con 3 condiciones: alta tasa de crecimiento; alta tolerancia a la variación estacional y diurna si es un sistema abierto; y buena capacidad para formar agregados para una cosecha por simple gravedad (Coelho *et al.*, 2019; Cartagena y Malo, 2017). Además, altos niveles de componentes celulares valiosos (por ejemplo, lípidos para generación de biodiesel) también podrían ser deseables (Abdel-Raouf *et al.* 2012; Oruko *et al.*, 2019). Del mismo modo, un sistema cerrado se pueden lograr cultivos mono específicos aislados del medioambiente (Rodríguez-Ramos *et al.*, 2015).

Géneros y especies de microalgas en la industria de curtiembres

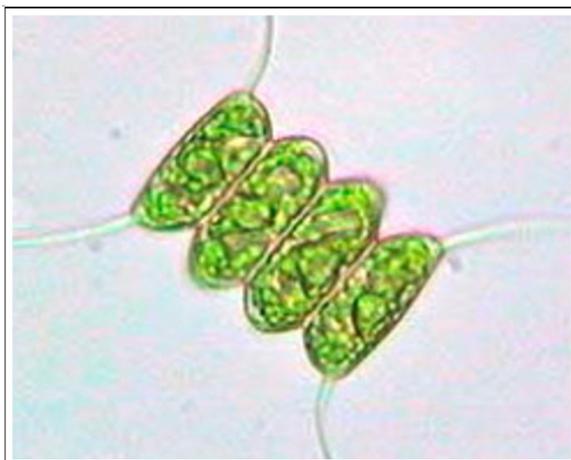
Las especies algales predominantes dentro de un sistema abierto dependen de factores ambientales, parámetros biológicos y operacionales (Abdel-Raouf *et al.*, 2012; Bwapwa *et al.*, 2017).

Las especies de microalgas más utilizadas en los procesos de biorremediación de aguas residuales de curtidurías (curtiembres) son: *Scenedesmus* sp, *Espirulina* sp, *Chlorella* sp, (*Ch. vulgaris*) *Tetraselmis* sp, y *Pseudochlorella* sp. (*P. pringsheimii*), importantes por su alta eficiencia en la remoción de Cromo, en especial cromo trivalente, que en forma de sulfato de cromo básico (BCS) se utiliza para curtir cueros / pieles y es un fuerte contaminante del suelo y los cuerpos de agua. También estas microalgas actúan reteniendo componentes químicos adicionales como sulfatos, cloruros, lo que contribuye a altos niveles de sólidos disueltos totales (TDS), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO) (Shashirekha *et al.*, 2011).

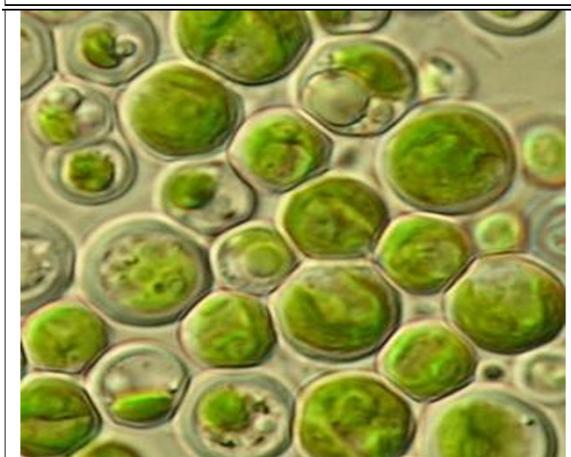
Aspectos técnicos de cultivo de microalgas específicas (curtilerías)

Tras la revisión, 9 trabajos han informado sobre

importantes efectos de biorremediación obtenidos mediante el uso de microalgas de diversos géneros y especies destacando los 6 géneros *Scenedesmus*, *Chlorella*, *Espirulina*, *Tetraselmis*, *Pseudochlorella*, *Microspora* (Cuadro 1; Figura 1).



Scenedesmus sp.



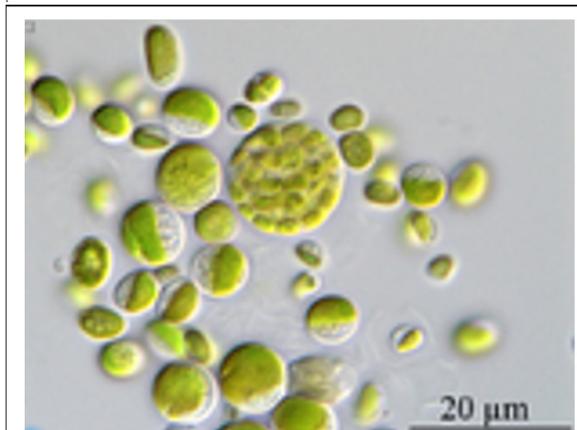
Chlorella sp.



Espirulina sp.



Tetrastelmis sp.



Pseudochlorella sp.



Microspora sp.

Figura 1. Géneros de algas más importantes en el tratamiento de aguas residuales procedentes de la Industria de curtiembres.

En la mayoría de estos estudios, los investigadores ponen hincapié en el aislamiento de microalgas a través

de una serie de diluciones y cultivos en placa utilizando el medio nutritivo BBM (Bold basal Medium). cuya composición lo constituye: NaNO_3 2.50 g * 100 mL⁻¹, MgSO_4 0.75 g * 100 mL⁻¹, NaCl 0.25 g * 100 mL⁻¹, K_2HPO_4 0.75 g * 100 mL⁻¹, KH_2PO_4 1.75 g * 100 mL⁻¹, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.25 g * 100 mL⁻¹, H_3BO_3 1.14 g * 100 mL⁻¹, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 8.82 g * L⁻¹, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 1.44 g * L⁻¹, MoO_3 0.71 g * L⁻¹, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 1.57 g * L⁻¹, $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.49 g * L⁻¹. Con cultivos mantenidos en condiciones de luz 12:12h y una temperatura controlada de ~20°C. Generalmente las diluciones evaluadas fueron 100 %, 50 % y 20 % (v/v) “microalga/agua residual”, con mediciones espectrofotométricas diarias.

El porcentaje de remoción para cada parámetro de análisis fue determinado mediante la siguiente formula: (Ec:1)

$$R = \frac{Co - Cf}{Co} \times 100$$

Donde: Co=Concentración Inicial del parámetro, Cf= Concentración final, R= Remoción.

Tipos de microalgas y sus efectos de remoción

Remoción de cromo hexavalente y total (Cr)

Tras el análisis comparativo, los géneros *Scenedesmus* y *Espirulina* demostraron mayor eficiencia en la remoción de Cr, con valores que superan el 85% (Pérez Silva y Vega-Bolaños, 2016; Ballén-Segura *et al.*, 2016; Meneses Barroso *et al.*, 2019). Por otra parte, la misma batería de algas ha sido también utilizadas en la remoción de cromo en aguas residuales de diferentes orígenes y con valores de remoción similares a los analizados en esta revisión (Pena-Castro *et al.*, 2004; Ardila, 2012; Han *et al.*, 2007) (Cuadro 1).

Los géneros *Chlorella* y *Pseudochlorella* también demostraron tener una eficacia de remoción superior al 60%, pero inferior al 85% (Arias. 2017; Saranya y Shanthakumar, 2019).

Remoción de nitritos y nitratos

Con respecto a la remoción de nitratos y nitritos, el género *Scenedesmus*,presento altos niveles de remoción superiores al 90%, mientras que *Chlorella* y *Pseudochlorella* alcanzaron un valor de remoción del 65%. (Pérez Silva y Vega-Bolaños, 2016; Ballén-Segura *et al.*, 2016; Saranya y Shanthakumar, 2019). (Cuadro 1)

Remoción Fostatos y Sulfatos

Los géneros *Chlorella* y *Pseudochlorella* fueron el tipo de alga que demostró un nivel de remoción del 100% (Saranya y Shanthakumar, 2019), seguido por

los géneros *Tetraselmis* y *Scenedesmus* con valores superiores al 94% (Pena *et al.*, 2020; Ballén-Segura *et al.*, 2016)

Del mismo modo, el género *Tetraselmis*, en un único trabajo demostró un nivel de remoción de fosforo total fue superior al 95% (Pena *et al.*, 2020) (Cuadro 1).

DQO y DBO

En la DQO y la cantidad de sólidos disueltos y totales indican la carga de compuestos orgánicos e inorgánicos, los cuales fueron removidos con mayor eficiencia por los géneros *Tetraselmis* y *Scenedesmus*, *Chlorella* y *Pseudochlorella*.

Cuadro 1. Tipos de microalgas y sus efectos de remoción de contaminantes provenientes de curtiembres

Tipo de alga	Elemento /agente contaminante	Concentración inicial	Concentración final	Remoción (%)	Autor
<i>Scenedesmus</i> sp	Cromo	0.88 (mg/L)	0.13 (mg/L)	85.13	Pérez-Silva y Vega-Bolaños (2016)
	Aluminio	3.23 (mg/L)	0.36 (mg/L)	88.84	
	NO ₂	291 (mg/L)	0.04 (mg/L)	99.99	
	NO ₃	60 (mg/L)	0.12 (mg/L)	99.80	
	DBO ₅	15 (mg/L)	86 (mg/L)	25.22	
<i>Scenedesmus</i> sp	Cromo hexavalente	0.613	<0.0010 (mg/L)	>98.37	Ballén- Segura (2016)
	Cromo total	5.055	4.687 (mg/L)	7.28	
	NO ₃	44.6	<0.4 (mg/L)	>90.10	
	NO ₂	187	<2 (mg/L)	>98.93	
	Cadmio	<0.06	<0.006 (mg/L)	--	
	PO ₄	13.23	<0.02 (mg/L)	>94.85	
	SO ₄ ²⁻	27.33	<2	>92.68	
<i>Scenedesmus</i> sp	Crmo	---	---	96.00	Ajayan <i>et al.</i> (2015)
	Cobre	---	---	98	
	Plomo	---	---	75-98	
	Zinc	---	---	65-98	
	NO ₃	---	---	>44.3	
	PO ₄	---	---	>95	
<i>Espirulina</i> sp (masa viva)	Cromo total	93.3 (mg/L)	1.02 (mg/L)	96.50	Meneses Barroso (2019)
<i>Espirulina</i> sp (masa muerta)	Cromo total	29.3 (mg/L)	20.3 (mg/L)	30.70	
<i>Chlorella</i> sp		10 ppm	--	61	Arias (2017)
	Cromo total	50 ppm	--	51	
		100 ppm	--	60	
<i>Tetraselmis</i> sp	Nitrógeno total	103.8 ppm	93.58 ppm	9.85	Pena (2020)
	Fósforo total	1.83 ppm	0.04 ppm	97.64	
	Carbono orgánico	685 ppm	445 ppm	33.58	
	DQO	1120 ppm	485 ppm	56.70	
	DBO	1330 ppm	155 ppm	20.68	
	Amonio	69.66 ppm	0.00 ppm	100	
<i>Chlorella vulgaris</i> & <i>Pseudochlorella pringsheimii</i>	Cromo total	20.90 (mg/L)	--	>80	Saranya y Shanthakumar (2019)
	NH ₃ -N	532 (mg/L)	--	>65	
	PO ₄ -P	1.7 (mg/L)	--	100	
	DQO	4800 (mg/L)	--	>80	
<i>Microspora</i>	AB 161	--	--	83.20	Tolfo da Fontoura <i>et al.</i> , 2017
	DMB	--	--	76.65	
	TOC	--	--	50.78	
	TN	--	--	19.8	

TOC: (Total organic carbon); TN (Total Nitrogen) Nitrógeno total; DMB (Defatted microalgal biomass) Biomasa de microalgas desgrasadas; AB 161: Colorante Acid Blue 161; DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno; DQO: Demanda Química de Oxígeno

Eficiencia de las microalgas frente a tratamientos físicos y químicos

Con respecto a la eficiencia demostrada en trabajos previos, se puede considerar que el método de biorremediación biológico utilizando microalgas resulta más eficiente y amigable con el ambiente (Figura 2).

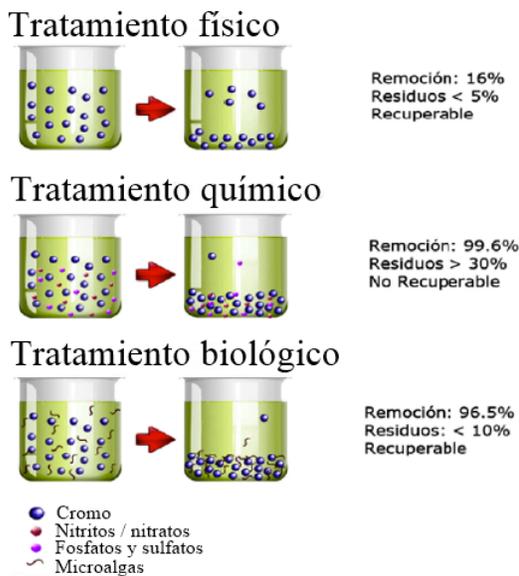


Figura 2. Microalgas frente a tratamientos físicos y químicos

Conclusiones

El consorcio de micro algas constituidas por los géneros: *Scenedesmus* sp, *Espirulina* sp, *Chlorella* sp, *Tetraselmis* sp, y *Pseudochlorella* sp. podrían ser buenas alternativas a los métodos de tratamiento convencionales para la industria del cuero. Además, los niveles de remoción de contaminantes como el Cromo, en la mayoría de los estudios analizados superan el 90%.

Literatura citada

Abdel-Raouf N, Al-Homaidan AA, Ibraheem IBM. (2012). Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences* 19: 257-275.
Ajayan KV, Selvaraju M, Unnikannan P, Sruthi P. (2015). Phycoremediation of Tannery Wastewater Using

Microalgae *Scenedesmus* Species. *International Journal of Phytoremediation*, 17(10), 907-916. doi:10.1080/15226514.2014.989313
Aketo T, Hoshikawa Y, Nojima D, Yabu Y, Maeda Y, Yoshino T, Takano H, Tanaka T. (2020). Selection and characterization of microalgae with potential for nutrient removal from municipal wastewater and simultaneous lipid production. *J. Biosci. Bioeng.* <https://doi.org/10.1016/J.JBIOSC.2019.12.004>
Arango-Ruiz Á. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, 2 (1): 49-56
Ardila A. (2012). Medición de la capacidad de *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus acutus* para la remoción de cromo de aguas de curtiembre. Tesis de grados, Universidad Nacional de Colombia. Pp: 239.
Arias A. (2017). Analisis de remoción de cromo por acción de la microalga *Chlorella* sp. Inmovilizadas en perlas de alginato, Tesis de grado, Universidad Politecnica Salesiana, pp: 65.
Ballén-Segura M, Hernández L, Parra D, Vega A, Pérez K. (2016). Using *Scenedesmus* sp. For the Phycoremediation of Tannery Wastewater, *Tecciencia*, Vol. 12 No. 21, 69-75. DOI: <http://dx.doi.org>
Bwapwa JK, Jaiyeola AT, Chetty R. (2017). Bioremediation of acid mine drainage using algae strains: A review. *South African Journal of Chemical Engineering*, 24, 62-70. doi:10.1016/j.sajce.2017.06.005
Campos C. (2017). Fitorremediación como alternativa para el tratamiento de efluentes industriales. Universidad Nacional de Entre Ríos - Facultad de Ciencias de la Alimentación - Argentina. Obtenidos de plataforma: <https://www.aguasresiduales.info/revista/noticias/fitorremediacion-como-alternativa-para-el-tratamiento-de-efluentes-industriales-xMlkp>
Cartagena J y Malo B. (2017). Evaluación del uso de la microalga *Chlorella vulgaris* en la remoción de materia orgánica de las aguas residuales de la PTAR El Salitre a nivel laboratorio. Tesis de grado, Fundación Universidad de América. Pp: 103.
Claros J (2012). Estudio del proceso de nitrificación y desnitrificación vía nitrito para el tratamiento biológico de corrientes de agua residual con alta carga de nitrógeno amoniacal. Tesis Doctoral, Medioambiente, Universitat Politecnica de Valencia (España), pp: 254. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/17653/tesisUPV3951.pdf?seque>
Cobos Ruiz M, Paredes Rodríguez JD, Castro Gómez JC. (2016). Inducción de la producción de lípidos

- totales en microalgas sometidas a estrés nutritivo. *Acta Biol. Colomb*, 21(1):17-26. doi: <https://doi.org/10.15446/abc.v21n1.47439>.
- Coêlho D, Tundisi L, Cerqueira K, Rodrigues J, Mazzola P, Tambourgi E, Souza R (2019). Microalgae: Cultivation Aspects and Bioactive Compounds. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 62, e19180343. Epub June 13, 2019. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2019180343>
- Fontoura JT, da Rolim G., Farenzena M, Gutterres M. (2017). Influence of light intensity and tannery wastewater concentration on biomass production and nutrient removal by microalgae *Scenedesmus* sp. *Process Saf. Environ. Prot.* 1, 355–362. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.07.024>
- Han X, Wong YS, Wong M and Tam N. (2007). Biosorption and bioreduction of Cr (VI) by a microalgal isolate, *Chlorella miniata*,” *Journal of hazardous materials*, vol. 146, pp. 65-72.
- Hernández-Pérez y Labbé, (2014). Microalgae, culture and benefits. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 49 (2): 157-173.
- Khalid AAH, Yaakob Z, Abdullah SRS, Takriff MS. (2019). Assessing the feasibility of microalgae cultivation in agricultural wastewater: The nutrient characteristics. *Environ. Technol. Innov.* 15, 100402. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2019.100402>
- Kuppusamy S, Jayaraman N, Jagannathan M, Kadarkarai M, Aruliah R. (2017). Electrochemical decolorization and biodegradation of tannery effluent for reduction of chemical oxygen demand and hexavalent chromium. *J. Water Process Eng.* 20, 22–28. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2017.09.008>
- Mata TM, Antonio A and Martins N. S. (2010) Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (1): 217-232.
- Meneses Barroso YM, Patiño Mantilla P, Betancur J. (2019). Remoción de cromo en aguas residuales industriales mediante el uso de biomasa de *Spirulina* sp, sedimentación primaria y precipitación química. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental. Bogotá - Colombia, Vol. 10 No. 1: 141-152*. DOI: <https://doi.org/10.22490/21456453.2326>
- Meriç S, Nicola ED, Iaccarino M, Gallo M, Gennaro AD, Morrone G, Pagano G. (2005). Toxicity of leather tanning wastewater effluents in sea urchin early development and in marine microalgae. *Chemosphere*, 61(2), 208–217. doi:10.1016/j.chemosphere.2005.02.037
- Montalvão MF, da Silva Castro AL, de Lima Rodrigues AS, de Oliveira Mendes B, Malafaia G. (2018). Impacts of tannery effluent on development and morphological characters in a neotropical tadpole. *Sci. Total Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.134>
- Mulumba N and Farag IH. (2012) Tubular photobioreactor for microalgae biodiesel production. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 4 (2): 703-709.
- Nayak JK, Ghosh UK. (2019). Post treatment of microalgae treated pharmaceutical wastewater in photosynthetic microbial fuel cell (PMFC) and biodiesel production. *Biomass and Bioenergy* 131, 105415. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2019.105415>
- Ortiz-Monsalve S, Valente P, Poll E, Jaramillo-García V, Pegas Henriques JA, Gutterres M. (2019). Biodecolourization and biodetoxification of dye-containing wastewaters from leather dyeing by the native fungal strain *Trametes villosa* SCS-10. *Biochem. Eng. J.* 141, 19–28. <https://doi.org/10.1016/J.BEJ.2018.10.002>
- Oruko RO, Selvarajan R, Ogola HJO, Edokpayi JN, Odiyo JO. (2019). Contemporary and future direction of chromium tanning and management in sub Saharan Africa tanneries, *Process Safety and Environmental Protection*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.11.013>
- Pena AC, Agustini CB, Trierweiler LF, Gutterres M. (2020). Influence of period light on cultivation of microalgae consortium for the treatment of tannery wastewaters from leather finishing stage, *Journal of Cleaner Production*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121618>.
- Pena-Castro J, Martínez-Jerónimo F, Esparza-García F, and Canizares-Villanueva R. (2004). Heavy metals removal by the microalga *Scenedesmus incrassatulus* in continuous cultures,” *Bioresource Technology*, vol. 94, pp. 219-222.
- Pérez-Silva KR, Vega-Bolaños AM, Hernández-Rodríguez LC, Parra-Ospina DA, Ballén-Segura MA. (2016). Uso de *Scenedesmus* para la remoción de metales pesados y nutrientes de aguas residuales de la industria textil. *Ingeniería Solidaria*, vol. 12, no. 20, pp. 95-105. doi: <http://dx.doi.org/10.16925/in.v19i20.1418>
- Puchana-Rosero MJ, Lima EC, Mella B, Da Costa D, Poll E, Gutterres M. (2018). A coagulation-flocculation process combined with adsorption using activated carbon obtained from sludge for dye removal from tannery wastewater. *J. Chil. Chem. Soc.* 63, 3867–3874. <https://doi.org/10.4067/s0717-97072018000103867>.
- Ran W, Wang H, Liu Y, Qi M, Xiang Q, Yao C, Zhang Y, Lan X. (2019). Storage of starch and lipids in

- microalgae: Biosynthesis and manipulation by nutrients. *Bioresour. Technol.* 291, 121894. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2019.121894>
- Rawat IR, Ranjith-Kumar R, Mutanda T, Bux R. (2011). Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Applied Energy*, 88: 3411–3424.
- Rhodes CJ. (2009) Oil from algae; salvation from peak oil? *Science Progress*, 92 (1): 39–90
- Rodríguez-Ramos P, Sánchez Y, Zumalacárregui de Cárdenas L, Pérez O, Hernández A, Echeveste de Miguel P, Lombardi A. (2016). Obtención de biomasa de microalga *Chlorella vulgaris* en un banco de prueba de fotobiorreactores de columna de burbujeo. *AFINIDAD LXXIII*, 574, Abril-junio: 125–129.
- Romero-Dondiz EM, Almazan JE, Rajal VB, Castro-Vidaurre EF. (2016). Comparison of the performance of ultrafiltration and nanofiltration membranes for recovery and recycle of tannins in the leather industry. *J. Clean. Prod.* 135, 71–79. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.06.096>
- Saranya D, Shanthakumar S. (2019). Green microalgae for combined sewage and tannery effluent treatment: Performance and lipid accumulation potential. *J. Environ. Manage.* 241, 167–178. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2019.04.031>
- Sawalha H, Alsharabaty R, Sarsour S, Al-Jabari M. (2019). Wastewater from leather tanning and processing in Palestine: Characterization and management aspects. *J. Environ. Manage.* 251, 109596. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2019.109596>
- Shashirekha Z, Ramanujam Sridharan M, Swamy M. (2011). Bioremediation of Tannery Effluents Using a Consortium of Blue–Green Algal Species. *Clean – Soil, Air, Water*, 39 (9), 863–873. DOI: 10.1002/clen.201000548
- Sundaramoorthy B, Thiagarajan K, Mohan Shalini, Mohan Sankari, Rajendra Rao R, Ramamoorthy S, Chandrasekaran R. (2016). Biomass characterisation and phylogenetic analysis of microalgae isolated from estuaries: Role in phycoremediation of tannery effluent. *Algal Res.* 14, 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.12.016>
- Tamersit S, Bouhidel KE, Zidani Z. (2018). Investigation of electrodialysis anti-fouling configuration for desalting and treating tannery unhairing wastewater: Feasibility of by products recovery and water recycling. *J. Environ. Manage.* 207, 334–340. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.058>
- Terán D. (2017). Bioingeniería libro, editorial Alfaomega, pp 440. México DF–México
- Tolfo da Fontoura J, Rolim G, Mella B, Farenzen M, Gutterres M. (2017). Defatted microalgal biomass as biosorbent for the removal of Acid Blue 161 dye from tannery effluent. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 5 (2017) 5076–5084. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2017.09.051>.