

USO DE *SCENEDESMUS* PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS Y NUTRIENTES DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL

Karen Rocío Pérez-Silva¹, Asly Michell Vega-Bolaños¹,
Luisa Carolina Hernández-Rodríguez¹, David Alejandro Parra-Ospina¹,
Miguel Ángel Ballen-Segura²

¹ Estudiante de Ingeniería Ambiental

² Doctorado en Ecología. Profesor de tiempo completo, Programa de Ingeniería Ambiental.
Correo electrónico: miguel.ballen@usa.edu.co

Escuela de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Sergio Arboleda, Bogotá, Colombia

Recibido: 22 de enero del 2016 Aprobado: 26 de mayo del 2016

Cómo citar este artículo: K. R. Pérez-Silva, A. M. Vega-Bolaños, L. C. Hernández-Rodríguez, D. A. Parra-Ospina, M.A. Ballén-Segura, "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, oct. 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.16925/in.v19i20.1418>

Resumen. *Introducción:* este artículo es producto de investigación derivado del proyecto "Uso de aguas residuales como sustratos alternativos para la generación de biomasa microalgal", desarrollado por el Semillero de Investigación en Ingeniería Ambiental y Bioprocesos (SIIAB), de la Universidad Sergio Arboleda, y ejecutado durante el 2015. El objetivo de la investigación fue evaluar el uso de la microalga *Scenedesmus sp.* como herramienta de tratamiento de las aguas residuales industriales producidas en una empresa de textiles ubicada en Bogotá (Colombia), las cuales presentan altas concentraciones de metales pesados, aluminio y nutrientes inorgánicos, lo que puede alterar la calidad de los cuerpos de agua superficiales o subterráneos. *Metodología:* durante la investigación se evaluaron tres diluciones diferentes del agua residual (100, 50 y 20 %), para valorar el efecto que podría presentar el efluente industrial sobre el crecimiento de la microalga en un periodo de 15 días. *Resultados:* se obtuvo un mayor crecimiento de *Scenedesmus* en el agua sin diluir (concentración 100 %) y se alcanzaron así reducciones de aluminio (88,8 %), cromo (85,21 %), nitratos (99,81 %) y nitritos (99,9 %) y en menor medida, de la carga orgánica (25,2 %). *Conclusiones:* la microalga *Scenedesmus sp.* exhibió un papel de ficorremediación sobre las aguas residuales de la industria textil, las cuales pueden ser utilizadas como sustratos alternativos para la generación de biomasa microalgal.

Palabras clave: agua residual, remoción de metales, *Scenedesmus*, textiles.



USE OF SCENEDESMUS FOR THE REMOVAL OF NUTRIENTS AND HEAVY METALS FROM WASTE WATERS OF THE TEXTILE INDUSTRY

Abstract. *Introduction:* This article is a derivative research product from the project “Use of waste waters as alternative substrate to generate microalgae biomass”, developed by the Environmental and Bioprocessing Engineering Research Incubator (SIAB) of the Universidad Sergio Arboleda. The project was implemented during the year 2015. The objective of the research was to evaluate the use microalgae *Scenedesmus sp.* as a processing tool of industrial waste waters produced in a textile company located in Bogota (Colombia) that presents high concentrations of heavy metals, aluminum and inorganic nutrients, all of which can alter the quality of superficial and subterranean body of waters. *Methodology:* The research evaluated three different dilutions of waste waters (100 %, 50 % and 20 %) in order to assess the effect the industrial effluent has on the growth of microalgae during a 15-day period. *Results:* A faster growth of *Scenedesmus* was obtained in undiluted water (100 % concentration) and in such a way were obtained reductions in aluminum (of 88.8 %), chrome (of 85.21 %), nitrates (of 99.81 %) and nitrites (of 99.9 %), and to a lesser degree in content of organic material (of 25.2 %). *Discussion:* The microalgae *Scenedesmus sp.* showed to contribute in phytoremediation on waste waters of the textile industry, which can be used as alternative substrate to generate microalgae biomass.

Keywords: waste waters, metal removal, *Scenedesmus*, textile.

USO DE SCENEDESMUS PARA A REMOÇÃO DE METAIS PESADOS E NUTRIENTES DE ÁGUAS RESIDUAIS DA INDÚSTRIA TÊXTIL

Resumo. *Introdução:* este artigo é produto da investigação do projeto “Uso de águas residuais como substratos alternativos para a geração de biomassa microalgal”, desenvolvido pelo Viveiro de Investigação em Engenharia Ambiental e Bioprocessos (SIAB), da Universidad Sergio Arboleda, e executado durante o ano 2015. O escopo da investigação foi avaliar o uso da microalga *Scenedesmus sp.* como ferramenta de tratamento das águas residuais industriais produzidas em uma companhia de têxteis situada na cidade de Bogotá (Colômbia), que apresentam elevadas concentrações de metais pesados, alumínio e nutrientes inorgânicos, o que pode alterar a qualidade dos corpos de água superficiais ou subterrâneos. *Metodologia:* durante a investigação foram avaliadas três diluições diferentes da água residual (100, 50 e 20 %), para valorar o efeito que poderia apresentar o efluente industrial sobre o crescimento da microalga em um período de 15 dias. *Resultados:* obteve-se um maior crescimento de *Scenedesmus* na água sem diluir (concentração 100 %) e atingindo assim reduções de alumínio (88,8 %), cromo (85,21 %), nitratos (99,81 %) e nitritos (99,9 %) e, em menor medida, da carga orgânica (25,2 %). *Conclusões:* a microalga *Scenedesmus sp.* exibiu um papel de fitorremediação sobre as águas residuais da indústria têxtil, as quais podem ser utilizadas como substratos alternativos para a geração de biomassa microalgal.

Palavras chave: água residual, remoção de metais, *Scenedesmus*, têxteis.

1. Introducción

La industria textil genera aguas residuales que contienen agentes surfactantes como fenoles, compuestos bioácidos como el pentaclorofenol, sulfuros [1] y metales pesados como Cu, Zn, Cr, Mn, Fe, entre otros, los cuales son generalmente descargados a sistemas naturales [2]. La llegada de estos efluentes sin previo tratamiento a fuentes hídricas superficiales puede traer consigo procesos de eutrofización y perturbaciones en parámetros físico-químicos, como disminución en niveles de oxígeno, alteraciones del pH, aumento de la demanda bioquímica de oxígeno, entre otros [3, 4].

Si bien es conocida la capacidad de algunos microorganismos, como bacterias y hongos, para reducir la concentración de compuestos orgánicos en estos efluentes industriales [2, 5], el uso de microalgas como tratamientos terciarios es una alternativa interesante para reducir concentraciones de nutrientes y lograr la eliminación de metales pesados, especialmente plomo y cromo presentes en estas aguas [6-8]. Mutanda et al. [9] demostraron la factibilidad del uso de aguas residuales para el crecimiento de microalgas en Sudáfrica. De igual forma, Mostafa et al. [10] evaluaron el crecimiento de nueve especies de microalgas en las aguas residuales domésticas obtenidas de la Planta de Tratamiento de Aguas residuales Zenein (zwwTP), de Giza, Egipto. Las especies fueron cultivadas en diferentes tratamientos de aguas residuales, y se obtuvo así crecimiento de las diferentes especies en cada una de ellos. A nivel industrial, las microalgas han sido utilizadas para el tratamiento de aguas residuales de curtiembres [11], generación de alfombras [12], producción de aceite de olivas [13], entre otros, lo que ha logrado remociones de metales pesados, nutrientes inorgánicos, entre otros compuestos contaminantes. Todos estos trabajos demuestran la factibilidad de usar efluentes domésticos o industriales como sustratos alternativos para la generación de biomasa microalgal logrando alternamente mejorar las condiciones de estas aguas.

Las microalgas son organismos fotosintéticos que utilizan luz, CO₂, N, P y K para crecer y han sido ampliamente utilizadas para reducir nutrientes en aguas residuales domésticas e industriales [12, 14-16]. Además, presentan la ventaja de no requerir grandes espacios para ser cultivadas. Estas durante su crecimiento producen lípidos, proteínas

y carbohidratos en grandes cantidades durante periodos cortos, los cuales pueden ser procesados y utilizados en la generación de productos de interés industrial y comercial como biocombustibles, productos farmacéuticos, biofertilizantes, etc. [17]. Pandey et al. [18] y Chisti [19] subrayan la importancia que pueden presentar las microalgas como fuentes de biomasa para la producción de biocombustibles, y cómo esta generación debe ir acoplada al uso de las aguas residuales, domésticas e industriales, como sustratos de crecimiento con el fin de disminuir los costos de producción.

Sin embargo, a pesar de las múltiples ventajas que puede representar el uso de microalgas, su aplicación como agentes remediadores ha sido poco extendido, debido a los costos asociados a la generación de biomasa y su posterior uso. Así es como el objetivo del presente trabajo fue evaluar el crecimiento de la microalga *Scenedesmus sp.* en un agua residual de la industria textil, estimando la remoción de carga orgánica, nutrientes y metales pesados como resultado del proceso de ficorremediación.

2. Antecedentes

La idea del uso de microalgas para el tratamiento de aguas residuales no es nueva; sin embargo, el enfoque de las aguas residuales como sustrato de crecimiento para microalgas ha sido poco explorado. Debido a sus características, las aguas residuales domésticas o municipales han recibido una mayor atención por las bajas o nulas concentraciones de compuestos difíciles de degradar, como lo son hidrocarburos, metales pesados, entre otros. En estos sustratos, las microalgas pueden remover concentraciones hasta del 99% de nutrientes como el nitrógeno (N) y el fósforo (P), y reducir así el riesgo de procesos de eutrofización sobre cuerpos de agua superficiales [20-22]. De igual forma, se ha evaluado la remoción de nutrientes por medio de células microalgales inmovilizadas en diferentes matrices, principalmente alginatos y carrageninas [23-28]; de esta manera, se han obtenido altos porcentajes de eliminación, pero con la desventaja de ser procesos complejos y costosos, además de no ser aplicados a escalas industriales.

La principal característica de las aguas residuales industriales es la presencia de compuestos orgánicos de difícil degradación (BETX, HAP, etc.), así como de metales pesados, utilizados durante los procesos industriales. No obstante, la presencia de

estos compuestos no es un obstáculo para el crecimiento de las microalgas. Semple et al. [29] realizan una revisión y discusión de la capacidad de las microalgas para degradar compuestos aromáticos. De igual forma, Lei et al. [30] mostraron la remoción de Fluoranteno y Pireno por células de los géneros *Chlorella* y *Scenedesmus*. Por otro lado, se ha reportado la remoción de metales pesados como el cromo [11, 31], mercurio [32], cobre [31], cadmio [33], entre otros; todos habituales componentes de las aguas residuales industriales.

Las microalgas han sido utilizadas como fuentes de remediación de aguas de textiles, especialmente enfocadas en la remoción de colorantes y metales pesados [34, 35]. También han sido empleados para el tratamiento de aguas de curtiembre. Ajayan et al. [11] en la India, utilizaron *Scenedesmus sp.* para el tratamiento de aguas residuales de curtido de pieles y obtuvieron crecimiento de la microalga en diferentes concentraciones del efluente, así como reducciones superiores al 80% de N, P y Cromo, principalmente en su forma hexavalente (Cr^{+6}). De igual forma, Shashirekha et al. [36] evaluaron el uso de Cianobacterias para el tratamiento de estas aguas residuales, y encontraron remoción (95-100%) de Cromo trivalente (Cr^{+3}), así como la disminución de la carga orgánica (DBO y DQO). De estos trabajos se puede concluir que las microalgas efectivamente exhiben una capacidad de biorremediación sobre las aguas residuales, pero además las reducciones de N, P y C indican un consumo de estos nutrientes para su crecimiento, por lo cual estos efluentes industriales podrían ser utilizados como sustratos alternativos de crecimiento.

Las microalgas no solo presentan la ventaja de poder crecer en presencia de estos compuestos contaminantes, también pueden ser importantes consumidores de dióxido de carbono (CO_2), además de presentar altas tasas de crecimiento en comparación con otros organismos fotosintéticos [19]. Esto las ha hecho una fuente promisoría de biomasa para diferentes procesos biotecnológicos, de los cuales se destaca la producción de biodiésel. Chisti [19] hace una comparación entre los diferentes cultivos utilizados a nivel mundial para la generación de biodiésel y sugiere que las microalgas parecen ser la únicas que pueden reemplazar el diésel obtenido a partir del petróleo; esto debido a que las microalgas pueden generar una mayor producción de lípidos por unidad de espacio y tiempo, hasta un 70% de su peso seco, los

cuales son extraídos en forma de aceites para ser convertidos en biodiésel. Sin embargo, Lam y Lee [37] realizan una revisión crítica al uso de microalgas como materia prima para la producción de biocombustibles por medio de un análisis del ciclo de vida, en la cual concluyen que es inviable para su comercialización a causa de un gran uso de energía durante la producción; esto como consecuencia del bajo desarrollo tecnológico en el área, además de los costos asociados a la nutrición, cosecha y al procesamiento de la biomasa. De igual forma, sugieren como estrategia de optimización el uso de aguas residuales como sustrato de crecimiento y técnicas de inmovilización para facilitar la recolección de la biomasa. Ambas estrategias son planteadas en el presente proyecto.

3. Métodos y materiales

3.1 Obtención de la muestra

La muestra de agua residual fue obtenida del efluente en una empresa de textiles de Bogotá y no presentó ningún tipo de tratamiento. Para su recolección fueron utilizadas botellas ámbar de 1L, las cuales se refrigeraron para su transporte hasta el laboratorio. Una vez en el laboratorio, la muestra fue subdividida en cuatro: una para análisis de metales pesados, otra para determinar la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), una tercera para la caracterización fisicoquímica y la última para los experimentos de crecimiento microalgal. La muestra para la determinación de metales pesados fue ajustada a un pH de 2 con ácido nítrico y almacenado a 4°C hasta su procesamiento. Las muestras restantes fueron procesadas de inmediato.

3.2 Caracterización de la muestra

La muestra obtenida en la empresa textil fue caracterizada fisicoquímicamente para conocer las condiciones iniciales (tabla 1). Los parámetros evaluados fueron oxígeno disuelto (WTW OXI3310 SET1), pH (Thermo Scientific Star A211), y conductividad (WTW COND 7310). De igual forma, se midieron concentraciones de nitratos (método reducción de cadmio) y nitritos (método Usepa Diazotization) por espectrofotometría UV/visible (espectrofotómetro HACH DR6000). La concentración de cromo

y aluminio fue medida en un espectrofotómetro de absorción atómica por llama (ContraA700) sobre una muestra previamente digerida en ácido, siguiendo los protocolos del Standard Methods 3111B y 3111D. Finalmente, la DBO se determinó por incubación durante cinco días (DBO_5) de una muestra sin centrifugar ni sedimentar.

Tabla 1. Características iniciales del agua residual evaluada en el presente estudio

Parámetro	Concentración	Unidades
pH	7,68	
Conductividad	1482	$\mu\text{S}/\text{cm}$
Oxígeno disuelto	0,48	mgL^{-1}
DBO	115	mgL^{-1}
Cromo	0,88	mgL^{-1}
Aluminio	3,23	mgL^{-1}
Nitritos	291	mgL^{-1}
Nitratos	60,0	mgL^{-1}
Sulfatos	>70	mgL^{-1}
Fosfatos	>2,5	mgL^{-1}

Fuente: elaboración propia

3.3 Puesta en marcha y seguimiento del experimento

Se aisló la *Scenedesmus sp.* (figura 1) por medio de diluciones seriadas y siembra en placa de una muestra de un humedal de Bogotá y mantenida en medio Bold Basal Medium (BBM), cuya composición fue 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, CaCl_2 * 2H₂O 0.25 g * 100 ml⁻¹, H_3BO_3 1.14 g * 100 ml⁻¹, ZnSO_4 * 7H₂O 8.82 g * L⁻¹, MnCl_2 * 4H₂O 1.44 g * L⁻¹, MoO_3 0.71 g * L⁻¹, CuSO_4 * 5H₂O 1.57 g * L⁻¹, $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ * 6H₂O 0.49 g * l⁻¹ [38]. Estos cultivos fueron mantenidos con condiciones de luz 12:12h y una temperatura controlada de ~20°C.

El experimento fue diseñado con el objetivo de evaluar el crecimiento de la microalga *Scenedesmus sp.* a diferentes concentraciones de un agua residual de la industria textil. Las diluciones evaluadas fueron 100 %, 50 % y 20 % (v/v), para las dos últimas

concentraciones las diluciones fueron realizadas con agua destilada. Cada una de las concentraciones se hizo por triplicado. Un volumen de 500 ml del cultivo en seco con una concentración aproximada de 106 células/ml (se centrifugó el volumen a 5.000 rpm por 5 minutos, el sobrenadante fue desechado y el *pellet* fue adicionado al agua residual) se adicionó a 500 ml de cada una de las concentraciones de agua residual evaluadas, puestas en botellas plásticas transparentes de 600 ml, las cuales se mantuvieron en ciclos de luz de 16/8h, a una temperatura de ~20°C y sin ningún sistema de aireación. Adicionalmente, se tuvo un control que consistió en el agua residual sin adición de la microalga. Las botellas se mantuvieron levemente cerradas con el fin de evitar al máximo la pérdida por evaporación y no se realizó restitución del volumen que se iba utilizando. Diariamente se hicieron mediciones espectrofotométricas de densidad óptica (absorbancia a 660 nm) por un periodo de quince días, con el fin de estimar el crecimiento.

3.3.1 Conversión de densidad óptica en biomasa

Para poder estimar la biomasa microalgal a partir de los valores de densidad óptica, se realizaron diluciones de un cultivo concentrado de *Scenedesmus* que permitiera obtener diferentes concentraciones de la microalga. De cada una de las diluciones se tomó la densidad óptica (660 nm) y el peso seco. Para este último se filtró un volumen de 100 ml de cada una de las diluciones sobre filtros de celulosa, previamente pesados, y se pusieron a secar en un



Figura 1. Fotografía microscópica (1000X) de la microalga *Scenedesmus sp.*

Fuente: elaboración propia

horno a 60 °C por 24 horas. Finalizado el tiempo se pesaron los filtros y el peso seco fue determinado como la diferencia del peso inicial con respecto al peso final.

Finalmente, los valores de densidad óptica fueron relacionados con el peso seco de cada concentración microalgal (figura 2) y la relación obtenida fue utilizada para estimar los valores de biomasa en los diferentes experimentos.

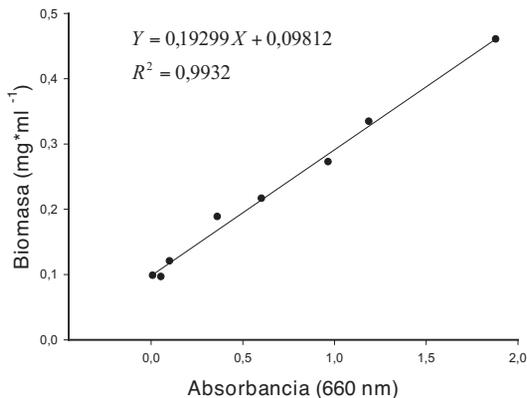


Figura 2. Relación de la densidad óptica (absorbancia a 660 nm) con la biomasa en peso seco para el cultivo de *Scenedesmus sp.*

Fuente: elaboración propia

3.3.2 Caracterización final y remoción de contaminantes

Una vez transcurridos los quince días de ensayo, se tomó cada botella y el total del volumen fue centrifugado (5000 rpm por 5 minutos), con el fin de cosechar la biomasa microalgal, la cual fue congelada para posteriores estudios. Por su parte, se colectó el sobrenadante de cada dilución fue colectado (agua residual tratada) y caracterizado para su comparación frente a las condiciones iniciales de la muestra. El porcentaje de remoción para cada parámetro se determinó de acuerdo con la ecuación 1.

$$R = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad (1)$$

Donde R es el porcentaje de remoción, C_i es la concentración inicial del parámetro y C_f la concentración final.

3.4 Análisis estadístico

Se realizaron análisis no paramétricos de Kruskal-Wallis, utilizando el paquete estadístico SPSS, para evaluar la significancia de las posibles diferencias observadas entre las concentraciones de agua residual utilizadas.

4. Resultados y discusión

4.1 Efecto de la dilución del agua residual sobre el crecimiento de *Scenedesmus sp.*

El crecimiento que mostró *Scenedesmus sp.* en las diferentes condiciones evaluadas puede ser observado en la figura 3. Se pudieron evidenciar diferencias en el crecimiento entre las tres concentraciones de agua residual utilizadas ($p < 0,05$; $n = 405$), y se observó una mayor biomasa en el agua sin diluir, seguido por la dilución de 50% y finalmente de 20%. Esto parece demostrar que la microalga utilizó los nutrientes presentes en el agua residual, principalmente los nitratos y fosfatos, los cuales se presentaban en concentraciones considerables (ratio N: P de 24) al inicio del experimento en el agua sin diluir. Las aguas residuales industriales generalmente presentan altos niveles de nitrógeno y fósforo que, se ha comprobado, pueden ser utilizados por organismos fotoautótrofos para su crecimiento [3, 39]. Durante el experimento no se observó que

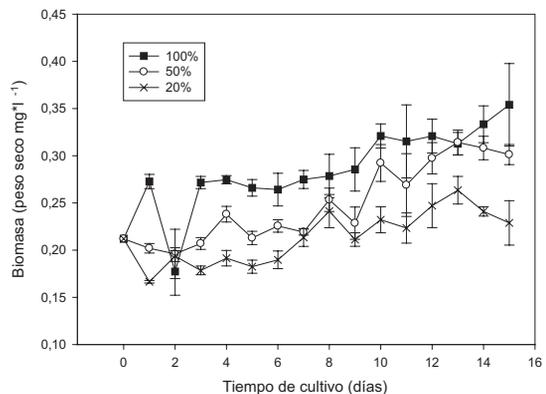


Figura 3. Efecto de la concentración del agua residual de textil sobre el crecimiento de *Scenedesmus sp.*

Fuente: elaboración propia

la biomasa entrara en fase estacionaria, lo que indica que los nutrientes aportados por el efluente residual permitieron el crecimiento durante los quince días del experimento. Adicionalmente, es de esperarse que las bacterias presentes en el agua realicen procesos de degradación de materia orgánica y recirculación de nutrientes, lo cual puede prolongar la fase exponencial de crecimiento por parte de la microalga [40].

En los resultados se puede observar que *Scenedesmus* no presentó fase de latencia en el agua sin diluir, e incrementó rápidamente la biomasa durante las primeras 24 horas del experimento. En contraste, se evidenció un periodo de adaptación por parte de la microalga en las diluciones de 20 y 50 %, en el cual hubo un incremento de biomasa solo a partir del quinto y séptimo día, respectivamente. Este pudo ser consecuencia de la menor concentración de nutrientes presentes en el medio. Cabe mencionar que el crecimiento de la microalga en las tres diluciones, pero principalmente en el agua sin dilución, puede implicar un uso de esta agua residual como un sustrato alternativo de crecimiento que resultaría económico, puesto que otorga los nutrientes necesarios para el desarrollo de la microalga y no requiere un gasto adicional de agua para disminuir la concentración de este. De igual forma, permitiría la producción de biomasa con fines biotecnológicos e industriales.

4.2 Remoción de metales pesados, nutrientes y carga orgánica

Debido a que el mayor crecimiento de *Scenedesmus sp.*, se presentó en el agua sin diluir (concentración 100 %), se utilizó esta condición para evaluar los cambios en las concentraciones de nitratos, nitritos, DBO, cromo y aluminio; asimismo, se estimaron los porcentajes de remoción de estos. En la tabla 2 se pueden observar las características al inicio y después de los quince días de tratamiento del agua residual utilizada. El pH presentó un aumento de 7,68 a 8,61 debido al consumo de HCO_3^- por parte de la microalga, lo cual tiende a alcalinizar el medio, más teniendo en cuenta que a los tratamientos no se les incorporaron fuentes adicionales de CO_2 . De igual manera, se presentó un aumento del oxígeno disuelto de 0,48 a 2,38 mg l^{-1} proveniente de la actividad fotosintética del microorganismo, ya que los tratamientos no mostraron ningún sistema de aireación.

Tal vez uno de los aspectos más llamativos del uso de microalgas es la capacidad de remoción sobre diferentes contaminantes en cuerpos de agua, principalmente metales pesados [7-8]. En el presente trabajo se pudieron evidenciar reducciones en las concentraciones de cromo y aluminio. El primero cambio es de una concentración inicial de 0,88 mg l^{-1} a una final de 0,13 mg l^{-1} , lo que

Tabla 2. Características del agua residual textil al inicio y al final de los quince días de experimentación para el agua sin dilución y el control

Parámetro	Inicial	Final			
		Concentración 100 %	% Remoción	Control	% Remoción
pH	7,68	8,61	-	6,38	-
Conductividad	1482	1482	-	1516	-
Oxígeno disuelto	0,48	2,38	-	0,34	-
Cr	0,88	0,13	85,23	0,87	1,14
Al	3,23	0,36	88,84	0,16	95,11
NO_2^-	291	0,04	99,99	0,136	99,95
NO_3^-	60	0,12	99,8	0,05	99,9
DBO_5	115	86	25,22	-	-

* Las unidades son $\text{mg}^* \text{l}^{-1}$ excepto para conductividad dada en $\mu\text{S/cm}$

Fuente: elaboración propia

representa un porcentaje de remoción del 85 %. Este valor es similar al obtenido en tratamientos de agua residual de curtiembres con *Scenedesmus sp.*, donde obtuvieron remociones cercanas al 90 % [11]. De igual manera, estos valores concuerdan con los reportados en tratamiento de aguas residuales con células de *Chlorella minutissima* inmovilizadas [41] y la cianobacteria *Spirulina platensis* en aguas residuales suplementadas con un medio de cultivo artificial [42].

Una disminución similar se observa con el aluminio, que cambió de una concentración inicial de 3,23 mg l⁻¹ a una final de 0,36 mg l⁻¹; así se obtuvo una remoción del 88 %. Aunque son escasos los reportes bibliográficos de eliminación de aluminio, este resultado es importante si se tiene en cuenta que este es el metal predominante en el agua textil evaluada y que, según lo observado en la figura 1, permitió el crecimiento de la microalga *Scenedesmus sp.*

Es de tener en cuenta que al agua residual evaluada no se le realizó ningún tipo de esterilización, por lo cual es posible que contara con la presencia de otros microorganismos que participaran en la remoción. Para evaluar esto se tuvo un control que consistió en el agua del efluente, sin la adición de la microalga. De esta forma, se pudo observar que en la remoción de aluminio parece ser predominante el papel de las bacterias, ya que la concentración del blanco al finalizar el tiempo de experimentación fue de 0,158 mg l⁻¹, correspondiente a un 95 % de remoción de este; mientras que en el tratamiento con *Scenedesmus*, esta remoción fue del 88 %, el cual puede darse por un efecto conjunto bacteria-microalga. Sin embargo, con respecto al cromo, parece ser más importante el efecto de la microalga (remoción del 85 %) que el efecto único de las bacterias (1 %).

De manera alternativa a los procesos de remoción directa por parte de las microalgas, es posible una participación indirecta de estas, con lo cual se generan condiciones que propician reacciones de precipitación química de los metales. Se conoce que la precipitación química de algunos metales es dependiente del pH, ya que bajo condiciones de alcalinidad estos disminuyen su solubilidad y pueden reaccionar con hidróxidos para finalmente precipitar [43]. En el presente trabajo, se observó un aumento en el pH del experimento, pasando de 7,68 a 8,61, derivado del crecimiento microalgal. Lo anterior pudo generar procesos de precipitación

química del cromo, aunque no del aluminio, que en condiciones alcalinas se encuentra predominantemente en forma de aluminato (Al(OH)₄⁻), siendo este altamente soluble [44].

Los nitritos y nitratos presentaron valores iniciales de 291 y 60 mg l⁻¹, y finales de 0,04 y 0,02 mg l⁻¹ respectivamente, lo que equivale a porcentajes de remoción del 99 % (tabla 2). La asimilación de diferentes fuentes de nitrógeno por parte de microalgas es un fenómeno ampliamente reconocido. Aunque la fuente primaria para estos organismos es el nitrógeno amoniacal (NH₄⁺), que se convierte rápidamente en nitrógeno orgánico, estos microorganismos también presentan la capacidad de asimilar nitratos que son reducidos como amonio en el interior celular, para finalmente ser utilizados en la síntesis de compuestos orgánicos nitrogenados [45, 46]. Nuevamente hay que tener en cuenta la presencia de otros microorganismos en la muestra, ya que según los resultados obtenidos en la muestra de control se observaron remociones cercanas al 100 %, por lo cual el efecto no puede ser solo atribuible a *Scenedesmus*, sino también a un consorcio microbiano entre microalga-bacteria.

Por su parte, la DBO cambió de 115 mg l⁻¹ iniciales a 86 mg l⁻¹ después del tratamiento con *Scenedesmus*. Esta reducción de la carga orgánica puede ser atribuida a las poblaciones microbianas heterótrofas presentes en el agua residual. Sin embargo, es posible pensar que parte de dicha reducción fue llevada a cabo por *Scenedesmus sp.*, ya que es bien reconocida la capacidad mixotrófica que presentan muchas microalgas [47, 48], que utilizan materia orgánica disuelta como fuente de carbono, y complementan así el generado con su actividad fotosintética, especialmente en condiciones de estrés, como puede ser crecer en un agua residual industrial.

Finalmente, se concluye que *Scenedesmus sp.* presentó una función fitorremediadora sobre el agua residual de una industria textil, ya que se encargó de remover o disminuir los niveles de cromo, aluminio y DBO, y así consumir algunos nutrientes presentes en el agua para su crecimiento.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos en el presente trabajo evidencian que *Scenedesmus sp.* exhibió un papel remediador sobre el efluente industrial de textiles,

lo que mejoró algunos parámetros fisicoquímicos con el oxígeno disuelto y removió metales pesados y nutrientes inorgánicos, contaminantes habituales de cuerpos de agua superficiales. Esta capacidad mostrada por *Scenedesmus* la convierte en una alternativa potencial para complementar los tradicionales tratamientos secundarios de aguas residuales. De igual forma, se destaca que la microalga puede crecer mejor en el agua residual sin dilución, lo cual facilitaría el tratamiento del efluente y evitaría el uso de agua como diluyente. Alternamente, estos efluentes podrían ser utilizados como sustratos alternativos para el crecimiento de microorganismos fotoautótrofos, lo cual generaría un impacto positivo sobre los costos totales de la producción de biomasa a gran escala. Sin embargo, es necesario que futuras investigaciones evalúen el potencial biotecnológico de esta biomasa, que presenta una alta carga de metales pesados y otras sustancias altamente contaminantes; asimismo, es importante evaluar la respuesta de otras especies microalgales para determinar si los resultados son generalizados o, por el contrario, son específicos a la especie.

6. Agradecimientos

A la Universidad Sergio Arboleda, por el apoyo y soporte experimental de este trabajo. A los doctores Luisa González y Carlos Rivera, por los aportes y sugerencias realizadas a esta investigación. A la Universidad ECCI, por los análisis de metales pesados, y a Analquim, por los análisis de DBO. A Natalia Rivera, por su ayuda y soporte en el laboratorio.

Referencias

- [1] J. S. Bae, H. S. Freeman y S. D. Kim, "Influences of new azo dyes to the aquatic ecosystem", *Fibers and Polymers*, vol. 7, pp. 30-35, 2006. [en línea]. Disponible en: <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBBF02933599>
- [2] S. Sharma, A. Munjal y S. Gupta, "Comparative studies on decolorization of textile Azo dyes by different bacterial consortia and pure bacterial isolate", *Journal of Pharmacy Research*, vol. 4, pp. 3180-3183, 2011. [en línea]. Disponible en: <http://jpr solutions.info/newfiles/journal-file-56f780bd666dd1.10475241.pdf>
- [3] H. Y. El-Kassas y L. A. Mohamed, "Bioremediation of the textile waste effluent by *Chlorella vulgaris*", *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, vol. 40, pp. 301-308, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejar.2014.08.003>
- [4] A. Asghar, A. Raman, A. Aziz, W. Daud y W. M. Ashri, "Challenges and recommendations for using membranes in wastewater-based microbial fuel cells for in situ Fenton oxidation for textile wastewater treatment", *Reviews in Chemical Engineering*, vol. 31, pp. 45-67, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1515/revce-2014-0030>
- [5] N. Daneshvar, M. Ayazloo, A. Khataee y M. Pourhassan, "Biological decolorization of dye solution containing Malachite Green by microalgae *Cosmarium sp.*", *Bioresource technology*, vol. 98, pp. 1176-1182, 2007. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2006.05.025>
- [6] N. Abdel-Raouf, A. A. Al-Homaidan y I. B. M. Ibraheem, "Microalgae and wastewater treatment", *Saudi Journal of Biological Sciences*, vol. 19, pp. 257-275, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.04.005>
- [7] S. Mehta y J. Gaur, "Use of algae for removing heavy metal ions from wastewater: progress and prospects", *Critical Reviews in Biotechnology*, vol. 25, pp. 113-152, 2005. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/07388550500248571>
- [8] K. S. Kumar, H.-U. Dahms, E.-J. Won, J.-S. Lee y K.-H. Shin, "Microalgae—A promising tool for heavy metal remediation", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 113, pp. 329-352, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.12.019>
- [9] T. Mutanda, S. Karthikeyan y F. Bux, "The utilization of post-chlorinated municipal domestic wastewater for biomass and lipid production by *Chlorella* spp. under batch conditions", *Applied Biochemistry and Biotechnology*, vol. 164, pp. 1126-1138, 2011. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s12010-011-9199-x>
- [10] S. S. Mostafa, E. A. Shalaby y G. I. Mahmoud, "Cultivating microalgae in domestic wastewater for biodiesel production", *Notulae Scientia Biologicae*, vol. 4, no. 1, pp. 56-65, 2012.
- [11] K. V. Ajayan, M. Selvaraju, P. Unnikannan y P. Sruthi, "Phycoremediation of tannery waste water using microalgae *Scenedesmus* species", *International Journal of Phytoremediation*, vol. 17, pp. 907-916, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/15226514.2014.989313>
- [12] S. Chinnasamy, A. Bhatnagar, R. W. Hunt y K. Das, "Microalgae cultivation in a wastewater dominated by carpet mill effluents for biofuel applications", *Bioresource Technology*, vol. 101, pp. 3097-3105, 2010. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.026>

- [13] G. Hodaifa, M. E. Martínez y S. Sánchez, "Use of industrial wastewater from olive-oil extraction for biomass production of *Scenedesmus obliquus*", *Bioresource Technology*, vol. 99, pp. 1111-1117, 2008. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2007.02.020>
- [14] N. C. Bhatt, A. Panwar, T. S. Bisht y S. Tamta, "Coupling of algal biofuel production with wastewater", *The Scientific World Journal*, vol. 2014, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/210504>
- [15] A. F. Aravantinou, M. A. Theodorakopoulos y I. D. Manariotis, "Selection of microalgae for wastewater treatment and potential lipids production", *Bioresource Technology*, vol. 147, pp. 130-134, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.024>
- [16] J. Pires, M. Alvim-Ferraz, F. Martins y M. Simões, "Wastewater treatment to enhance the economic viability of microalgae culture", *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 20, pp. 5096-5105, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-013-1791-x>
- [17] P. J. McGinn et al., "Integration of microalgae cultivation with industrial waste remediation for biofuel and bioenergy production: opportunities and limitations", *Photosynthesis Research*, vol. 109, pp. 231-247, 2011. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11120-011-9638-0>
- [18] A. Pandey, D.-J. Lee, Y. Chisti y C. R. Soccol, Eds., *Biofuels from algae*. Burlington: Newnes, 2013, p. 338.
- [19] Y. Chisti, "Biodiesel from microalgae", *Biotechnology Advances*, vol. 25, n.º 3, pp. 294-306, 2007. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>
- [20] P. Lau, N. Tam y Y. Wong, "Effect of algal density on nutrient removal from primary settled wastewater", *Environmental Pollution*, vol. 89, pp. 59-66, 1995. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0269-7491\(94\)00044-E](http://dx.doi.org/10.1016/0269-7491(94)00044-E)
- [21] M. Martínez, S. Sánchez, J. Jiménez, F. El Yousfi y L. Muñoz, "Nitrogen and phosphorus removal from urban wastewater by the microalga *Scenedesmus obliquus*", *Bioresource Technology*, vol. 73, pp. 263-272, 2000. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00121-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00121-2)
- [22] A. Ruiz-Marín, L. G. Mendoza-Espinosa y T. Stephenson, "Growth and nutrient removal in free and immobilized green algae in batch and semi-continuous cultures treating real wastewater", *Bioresource Technology*, vol. 101, pp. 58-64, 2010. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.02.076>
- [23] P. Chevalier y J. de la Noüe, "Wastewater nutrient removal with microalgae immobilized in carrageenan", *Enzyme and Microbial Technology*, vol. 7, pp. 621-624, 1985. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0141-0229\(85\)90032-8](http://dx.doi.org/10.1016/0141-0229(85)90032-8)
- [24] P. Chevalier y J. de la Noüe, "Efficiency of immobilized hyperconcentrated algae for ammonium and orthophosphate removal from wastewaters", *Biotechnology Letters*, vol. 7, pp. 395-400, 1985. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01166210>
- [25] J. Jeanfils, M. Canisius y N. Burlion, "Effect of high nitrate concentrations on growth and nitrate uptake by free-living and immobilized *Chlorella vulgaris* cells", *Journal of Applied Phycology*, vol. 5, pp. 369-374, 1993. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02186240>
- [26] P. Lau, N. Tam y Y. Wong, "Wastewater nutrients (N and P) removal by carrageenan and alginate immobilized *Chlorella vulgaris*", *Environmental Technology*, vol. 18, pp. 945-951, 1997. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/09593331808616614>
- [27] N. Tam y Y. Wong, "Effect of immobilized microalgal bead concentrations on wastewater nutrient removal", *Environmental Pollution*, vol. 107, pp. 145-151, 2000. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00118-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00118-9)
- [28] M. Jiménez-Pérez, P. Sánchez-Castillo, O. Romera, D. Fernández-Moreno y C. Pérez-Martínez, "Growth and nutrient removal in free and immobilized planktonic green algae isolated from pig manure", *Enzyme and Microbial Technology*, vol. 34, pp. 392-398, 2004. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enzmictec.2003.07.010>
- [29] K. T. Semple, R. B. Cain y S. Schmidt, "Biodegradation of aromatic compounds by microalgae", *FEMS Microbiology Letters*, vol. 170, pp. 291-300, 1999. doi: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1574-6968.1999.tb13386.x>
- [30] A.-P. Lei, Z.-L. Hu, Y.-S. Wong y N. F.-Y. Tam, "Removal of fluoranthene and pyrene by different microalgal species", *Bioresource Technology*, vol. 98, pp. 273-280, 2007. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2006.01.012>
- [31] K. Chojnacka, A. Chojnacki y H. Gorecka, "Biosorption of Cr³⁺, Cd²⁺ and Cu²⁺ ions by blue-green algae *Spirulina* sp.: kinetics, equilibrium and the mechanism of the process", *Chemosphere*, vol. 59, pp. 75-84, 2005. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.10.005>
- [32] S. Wilkinson, K. Gouilding y P. Robinson, "Mercury removal by immobilized algae in batch culture systems", *Journal of Applied Phycology*, vol. 2, pp. 223-230, 1990. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02179779>
- [33] D. Kaplan, Y. M. Heimer, A. Abeliovich y P. B. Goldsbrough, "Cadmium toxicity and resistance in *Chlorella* sp.", *Plant Science*, vol. 109, pp. 129-137, 1995. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0168-9452\(95\)04165-Q](http://dx.doi.org/10.1016/0168-9452(95)04165-Q)

- [34] S.-L. Lim, W.-L. Chu y S.-M. Phang, "Use of *Chlorella vulgaris* for bioremediation of textile wastewater", *Bioresource Technology*, vol. 101, pp. 7314-7322, 2010. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.04.092>
- [35] C. B. Sekomo, D. P. Rousseau, S. A. Saleh y P. N. Lens, "Heavy metal removal in duckweed and algae ponds as a polishing step for textile wastewater treatment", *Ecological Engineering*, vol. 44, pp. 102-110, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eco-leng.2012.03.003>
- [36] V. Shashirekha, M. Pandi y M. Swamy, "Bioremediation of tannery effluents and chromium containing wastes using cyanobacterial species", *The Journal of the American Leather Chemists Association*, vol. 100, pp. 419-426, 2005. [en línea]. Disponible en: <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsid=17465777>
- [37] M. K. Lam y K. T. Lee, "Microalgae biofuels: a critical review of issues, problems and the way forward", *Biotechnology Advances*, vol. 30, pp. 673-690, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.11.008>
- [38] H. W. Bischoff y H. C. Bold, *Some soil algae from Enchanted Rock and related algal species*. Texas, USA: University of Texas, 1963, p. 95.
- [39] A. R. Krishna, L. Dev y V. Thankamani, "An integrated process for Industrial effluent treatment and Biodiesel production using Microalgae", *Research in Biotechnology*, vol. 3, n.º 2, pp. 47-60, 2012. [en línea]. Disponible en: <http://scienceflora.org/journals/index.php/rib/article/view/2390/2368>
- [40] F. Azam et al. "The ecological role of water-column microbes in the sea", *Marine Ecology Progress Series*, vol. 10, pp. 257-263, 1983. [en línea]. Disponible en: <http://people.uncw.edu/borretts/courses/BIO602/Azam%20et%20al%201983%20Microbial%20Loop.pdf>
- [41] S. K. Singh, A. Bansal, M. Jha y A. Dey, "An integrated approach to remove Cr (VI) using immobilized *Chlorella minutissima* grown in nutrient rich sewage wastewater", *Bioresource Technology*, vol. 104, pp. 257-265, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.044>
- [42] C. D. Magro et al. "Chromium (VI) biosorption and removal of chemical oxygen demand by *Spirulina platensis* from wastewater-supplemented culture medium", *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, vol. 47, n.º 12, pp. 1818-1824, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/10934529.2012.689539>
- [43] R. W. Peters y L. Shem, "Separation of heavy metals: removal from industrial wastewaters and contaminated soil", en *Symposium on Emerging Separation Technologies for Metals and Fuels*, Palm Coast, FL., 1993. [en línea]. Disponible en: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/10136865>
- [44] W. Stumm y J. J. Morgan, *Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters*. Nueva York, USA: John Wiley & Sons, 2012, p. 1040.
- [45] J. M. V. A. Menacho y J. Leon, "Nitrate assimilation by microalgae", *Trends in Photochemistry & Photobiology*, vol. 2, pp. 69-111, 1991.
- [46] R. Inokuchi, K. I. Kuma, T. Miyata y M. Okada, "Nitrogen assimilating enzymes in land plants and algae: phylogenetic and physiological perspectives", *Physiologia Plantarum*, vol. 116, pp. 1-11, 2002. doi: <http://dx.doi.org/10.1034/j.1399-3054.2002.1160101.x>
- [47] J.-M. Girard et al., "Mixotrophic cultivation of green microalgae *Scenedesmus obliquus* on cheese whey permeate for biodiesel production", *Algal Research*, vol. 5, pp. 241-248, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.algal.2014.03.002>
- [48] J.-S. Deschênes, A. Boudreau y R. Tremblay, "Mixotrophic production of microalgae in pilot-scale photobioreactors: Practicability and process considerations", *Algal Research*, vol. 10, pp. 80-86, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.algal.2015.04.015>

