

# Capacidad de remoción de nutrientes en aguas residuales por porcinaza por Cyanobacterias Colombianas de alta montaña

## Removal capacity of nutrients in wastewater from pig farm by high mountain Colombian Cyanobacteria

Darwich-Cedeño, Mohamed-Toufic <sup>\*</sup>; Montenegro-Ruiz, Luis-Carlos <sup>\*\*</sup>; Suarez-Pulido, Dalia-X. <sup>\*\*\*</sup>, Torres-Vargas, D.-Arley <sup>\*\*\*\*</sup>; Gutierrez-Jimenez, Johan-Felipe <sup>\*\*\*\*\*</sup>; Ramirez-Tovar, Dianne-Helain <sup>\*\*\*\*\*</sup>

DOI: 10.15446/rev.colomb.biote.v26n1.109101

### RESUMEN

El uso de microalgas se ha planteado como alternativas prometedoras para el tratamiento de aguas residuales a bajos costos, sumado a la producción de oxígeno y reducción de la huella de carbono se pueden obtener productos de valor agregado en el proceso proveniente de las algas. Se pretende evaluar la remoción de nitratos, fosfatos y materia orgánica disuelta en agua residual sintética por primera vez con cianobacterias de alta montaña de Colombia. Se determinó la capacidad de remoción a nivel de laboratorio con aguas residuales sintéticas y a escala reactor con aguas residuales de porcinaza. Las cianobacterias colombianas dulceacuícolas que se utilizaron corresponden al orden de la Synechococales y fueron depositadas en la colección del laboratorio de cultivo de algas de la Universidad Nacional de Colombia bajo los códigos LAUN55, LAUN69 y LAUN71. Se comparó la capacidad de biorremediación de las cianobacterias con los tratamientos tradicionales de las microalgas *Parachlorella kessleri* y *Desmodesmus sp.*, obteniendo, a nivel laboratorio, rendimientos en remoción de materia orgánica de 85,4% por LAUN71 alcanzando una DBO final de 15,4 mgO<sub>2</sub>/L<sup>-1</sup>, mientras que en el tratamiento con *Parachlorella kessleri* se alcanzan porcentajes de remoción de 35,2% y una mayor demanda bioquímica de oxígeno (121,1 mgO<sub>2</sub>/L<sup>-1</sup>), así mismo reducciones entre 77% y 89% en ion nitrato y reducción entre 86% y 98% en iones fosfato para las cepas de cianobacterias. A escala reactor de 20 L con aguas residuales de porcinaza, *Parachlorella kessleri* presentó remoción del 76%, 75%, 75% y 94% para los parámetros de nitratos, fosfatos, DQO y DBO respectivamente, rendimientos significativamente mayores a LAUN71.

**Palabras clave:** Aguas residuales, biorremediación, *Parachlorella kessleri*, porcinaza, Synechococales.

### ABSTRACT

The use of microalgae has been raised as promising alternatives for the treatment of wastewater at low costs, added to the production of oxygen and reduction of the carbon footprint, value-added products can be obtained in the process from algae. It was evaluated the removal of nitrates, phosphates and dissolved organic matter in synthetic and pigsty wastewater for the first time with high mountain cyanobacteria from Colombia. The removal capacity was determined at the laboratory level with synthetic wastewater and at the reactor scale with wastewater from pig farm. The Colombian freshwater cyanobacteria that were used correspond to the order Synechococales and were deposited in the collection of the algae culture laboratory of the National University of Colombia under the codes LAUN55, LAUN69 and LAUN71. The bioremediation capacity of the cyanobacteria was compared with the traditional treatments of the microalgae *Parachlorella kessleri* and *Desmodesmus armatus*, obtaining at the laboratory level organic mat-

<sup>\*</sup> Universidad Nacional de Colombia, Bogotá-Colombia. correo electrónico: mdarwich@unal.edu.co

<sup>\*\*</sup> Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. correo electrónico: lcomontenegror@unal.edu.co

<sup>\*\*\*</sup> Universidad de Cundinamarca, Girardot, Colombia. correo electrónico dxsuarez@ucundinamarca.edu.co

<sup>\*\*\*\*</sup> Universidad de Cundinamarca, Girardot, Colombia. correo electrónico darleytorres@ucundinamarca.edu.co

<sup>\*\*\*\*\*</sup> Universidad de Cundinamarca, Girardot, Colombia. correo electrónico johanfgutierrez@ucundinamarca.edu.co

<sup>\*\*\*\*\*</sup> Universidad de Cundinamarca, Girardot, Colombia. correo electrónico dhramirez@ucundinamarca.edu.co

ter removal yields of 85.4% by LAUN71, reaching a final BOD of 15,4 mgO<sub>2</sub>/L<sup>-1</sup>, while in the treatment with *Parachlorella kessleri* removal percentages of 35.2% and a greater biochemical oxygen demand (121.1 mgO<sub>2</sub>/L-1) are reached. Reductions between 77% and 89% in ion nitrate and 86% and 98% in phosphate ions for the cyanobacterial strains was obtained. At a 20 L reactor scale with wastewater from pig farm, *Parachlorella kessleri* presented removal of 76%, 75%, 75% and 94% for the parameters of nitrates, phosphates, COD and BOD respectively, significantly higher yields than LAUN71.

**Keywords:** Wastewater, Bioremediation, *Parachlorella kessleri*, piggery manure, Synechococcales.

**Recibido:** mayo 23 de 2023      **Aprobado:** mayo 15 de 2024

## INTRODUCCIÓN

El sector porcícola colombiano ha mejorado su productividad, calidad y nivel de competitividad con la implementación de infraestructura y un mayor nivel de tecnificación (PORKCOLOMBIA, 2017). En 2017 se presentó una producción de carne cerdo de 371.369 toneladas, en respuesta a la demanda de consumo (9,4 kg per cápita) (Ministerio de Agricultura, 2018).

Los porcinos convierten en desechos (porcinaza) aproximadamente dos tercios de los alimentos suministrados (Valencia *et al.*, 2009). La porcinaza es la mezcla de heces y orina de los cerdos, con algo de descamaciones, pelo, comida no digerida y cantidades variables de agua alrededor del 82% de su peso. En algunos casos, contiene material de origen vegetal usado como cama. El 60% es concentrado que puede ser recuperado, y las propiedades de este desecho facilitan su reutilización como abono para diversos cultivos (Castrillón *et al.*, 2004; Noreña *et al.*, 2016). La porcinaza ofrece un aporte de nutrientes a las microalgas entre 45% al 60% de nitrógeno, 50% al 80% de calcio y fósforo, 70% al 95% de potasio, sodio, magnesio, cobre, zinc, manganeso y hierro consumido, además de otros nutrientes como cobre, azufre y zinc (Castrillón *et al.*, 2004), al acumularse estos nutrientes en cuerpos de agua por malas condiciones de saneamiento de las granjas, puede configurar un problema mayor al promover condiciones eutróficas disminuyendo la calidad del agua y evitando el crecimiento de organismos con capacidad biorremediadora que reviertan dichas condiciones.

Las aguas residuales producto de las industrias agropecuarias se caracterizan por altas cargas de materia orgánica, nitrógeno amoniacal y fósforo. Éstos constituyen un factor crítico en problemáticas ambientales como la erosión del suelo, contaminación atmosférica producto de la volatilización del amoníaco, sulfuro de hidrógeno y la eutrofización de cuerpos de agua (Mousavi *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020). En la actualidad las aguas residuales se suelen someter a procesos oxidativos en lagunas, posteriormente son tratadas en lagunas anaeróbicas y como etapa final lagunas aeróbicas facultativas o reac-

tores de película con lecho móvil (Wang *et al.*, 2020) en donde las microalgas son las protagonistas generando el más alto consumo de CO<sub>2</sub> en la columna de agua y brindando una alternativa segura y rentable en comparación con la aireación mecánica (Chen *et al.*, 2020).

La biorremediación con tecnologías basadas en microalgas puede contribuir a la solución de esta problemática, estos procesos se han centrado en la utilización de la diversidad genética y metabólica que caracteriza a estos microorganismos para transformar contaminantes en productos inocuos o, en su defecto, menos tóxicos, que pueden integrarse en los ciclos biogeoquímicos naturales. Estos procesos de biodegradación con en biorreactores han mostrado resultados prometedores para el tratamiento de aguas residuales, proyectándolos a la implementación en plantas de tratamiento como lo muestra Hena *et al.*, (2015) y Su *et al.*, (2011) con remociones de hasta el 98% y 99% respectivamente, Mustafá *et al.*, (2012) en tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios con remociones de 91%, Kumar & Goyal (2008) y Rengifo *et al.*, (2012) en tratamiento de metales pesados, con remociones de Cr(IV) 86, 16% y Pb(II) 87% respectivamente.

En ambientes eutróficos presentan altas tasas de remoción y/o asimilación de material orgánico, prestando una importante labor ecológica en la purificación y reutilización del agua dentro de los diferentes ecosistemas (Watanabe *et al.*, 2005; de Bashan & Bashan, 2003; de Bashan *et al.*, 2008; Imase *et al.*, 2008; Giraldo, 2012). Estos microorganismos demuestran una notable capacidad de absorber nitrógeno y fósforo inorgánicos de forma eficiente, esto por supuesto de la mano de la acción de microorganismos heterotróficos, encargados de degradar y mineralizar compuestos orgánicos de mayor complejidad (Nur & Buma, 2019; Y. Wang *et al.*, 2020); por lo tanto, el uso de la acción conjunta de ambos microorganismos resulta ser útil para tratar aguas residuales con alto contenido de nitrógeno y fósforo que usando estos por separado. En los últimos años, estos tratamientos se han propuesto como métodos eficaces, reportándose variedad de consorcios que incluyen microalgas-bacterias, hongos e incluso sistemas simbióticos de

múltiples bacterias y algas (Y. Wang *et al.*, 2020). Por otra parte, no se conocen sistemas de biorremediación basados en cianobacterias del grupo de las Synechococcales, especies filamentosas que presentan un alto potencial en la producción de metabolitos secundarios como colorantes, antimicrobianos, insecticidas, anticancerígenos, entre otros, de ahí la importancia en utilizar estas especies en procesos de biorremediación, para cerrar el ciclo de producción utilizando la biomasa de cianobacterias en la obtención de productos con valor agregado para la industria. Sólo espirulina se ha usado en biorremediación de aguas residuales con el eventual problema de cultivarlas en aguas contaminadas y luego ser utilizadas como alimento de consumo directo.

En el presente trabajo se buscó establecer la capacidad de biorremediación de cianobacterias colombianas del orden Synechococcales, provenientes de la Colección de Algas y Cianobacterias (LAUN) de la Universidad Nacional de Colombia, y comparar su efectividad con los tratamientos tradicionales usando la microalga *Parachlorella kessleri*. Las pruebas realizadas se efectuaron a escala de laboratorio con aguas residuales sintéticas, en donde se seleccionó la cianobacteria de mejor rendimiento en la remoción de nitratos, fosfatos y materia orgánica en términos de DQO y DBO<sub>5</sub> y a mayor escala, tratando aguas residuales de porcina evaluando los mismos parámetros anteriormente enunciados.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Obtención de los Microorganismos

Todos los microorganismos utilizados *Parachlorella kessleri* (LAUN83), *Desmodesmus armatus* (LAUN84), LAUN55 (*cianobacteria Synechococcal*), LAUN69 (*cianobacteria Synechococcal*) y LAUN71 (*cianobacteria Synechococcal*), fueron suministrados la Colección de Algas y Cianobacterias LAUN, de la Universidad Nacional de Colombia. Las clorofíceas adaptadas a medio de cultivo líquido BBM y las cianobacterias adaptadas en medio de cultivo líquido BG11.

N55 (*cianobacteria Synechococcal*), LAUN69 (*cianobacteria Synechococcal*) y LAUN71 (*cianobacteria Synechococcal*), fueron suministrados la Colección de Algas y Cianobacterias LAUN, de la Universidad Nacional de Colombia. Las clorofíceas adaptadas a medio de cultivo líquido BBM y las cianobacterias adaptadas en medio de cultivo líquido BG11.

### Sustratos de Crecimiento

Para escala de laboratorio se diseñó un medio de agua residual sintética basado en Githinji *et al.*, (2011); Gkotsis *et al.*, (2020) y Suraraksa *et al.*, (2017) (Tabla 1), buscando alcanzar cargas orgánicas alrededor de 450 mg O<sub>2</sub>/L mediante evaluación de la DQO, similares a las aguas residuales porcícolas del sitio de muestreo de la fase de campo.

Con la información obtenida de la prueba piloto en laboratorio, se escala a reactores de 20 L, en donde se utilizaron residuos líquidos de la industria porcícola, denominados lixiviados de porcina, siendo esta el resultado de las aguas de lavado de los corrales donde se realiza la zocria.

### Tratamiento de Aguas Residuales

Para los tratamientos a escala de laboratorio se utilizó un diseño tipo batch con recipientes de vidrio de 300 mL con 200 mL de medio de cultivo agua residual sintética estéril e inóculo en una proporción 9/1 respectivamente, en cinco botellas de vidrio estériles por cada cepa utilizada (previamente activadas en medio BG11 para cianobacterias y BBM para microalgas, con microburbujeo y a una temperatura de 22 °C). Burbujeo con aire ambiental esterilizado por microfiltración con filtros

Tabla1. Composición del agua residual sintética (Medio Basal Agua Residual Sintética)

Componente	Concentración mg/L
<b>Macronutrientes</b>	
Peptona	150
Glucosa	150
Almidón	150
NaHCO <sub>3</sub>	300
NaNO <sub>3</sub>	234
KH <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	17,5
CaCl <sub>2</sub>	5
MgSO <sub>4</sub> . 7H <sub>2</sub> O	19,5
<b>Micronutrientes</b>	
FeSO <sub>4</sub> . 7H <sub>2</sub> O	2,49
NaCl	0,25
MnSO <sub>4</sub> . H <sub>2</sub> O	0,189
CuSO <sub>4</sub>	0,25
CoCl <sub>2</sub> . 6H <sub>2</sub> O	0,41
NaMoO <sub>4</sub> . 2H <sub>2</sub> O	1,26
ZnSO <sub>4</sub> . 7H <sub>2</sub> O	0,44

de nylon de poro de 0,45  $\mu\text{m}$ . Las mediciones se hicieron a los 4 días de digestión.

A escala reactor de 20 L en campo se estableció un diseño de reactor en batch por triplicado, en cada uno se dispuso 20 L de porcinaza líquida y un inóculo en una proporción 9/1 respectivamente, sistema de por burbujeo garantizó  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$  y agitación en toda la columna de agua. La digestión se lleva a cabo por 4 días.

Las condiciones de iluminación para ambas fases del experimento se generaron con luz artificial a 100  $\mu\text{mol}_{\text{fotones}}/\text{m}^2/\text{s}$  con luces LED blancas y fotoperiodo 12:12 horas luz/oscuridad, a una temperatura constante de 25 °C.

Se estableció para efectos del experimento las condiciones iniciales de cada analito a analizar en ausencia de microorganismos como control negativo inicial "C(-)" y las condiciones de cada analito en ese control negativo luego de 4 días de digestión, como control negativo final "C(-)<sub>F</sub>" de esta forma se censó los efectos espontáneos de remoción de los iones en el agua residual.

#### Medición de Parámetros

La cuantificación de nitratos, fosfatos, DQO y DBO se siguieron conforme a lo propuesto al Standar Methods (APHA et al., 2017), haciendo uso de los kits colorimétricos de la casa Hanna Instruments con códigos HI93728-01 para ion Nitratos, HI93717-01 para ion fosfato, HI93754C-25 para medición de DQO de rango alto (0-1500  $\text{mg/L O}_2$ ), todas las mediciones se efectuaron con

un fotómetro Hanna 83314. Finalmente, la medición de  $\text{DBO}_5$  se realizó con el equipo de medición respirométrica Oxitop iHS-6 ECOSPHERE. Los datos se tomaron al inicio y al final de los tratamientos (4 días de digestión) en cada una de las 5 réplicas.

#### Análisis Estadístico

Para el procesamiento de los datos obtenidos se realizaron pruebas de normalidad y homocedasticidad, posteriormente se aplicaron análisis de varianzas de una vía para detección de diferencias significativas y prueba de Tukey (fase experimental de laboratorio), para detectar diferencias entre medias. Lo anterior se realizó mediante análisis por el programa IBM SPSS Statistics, por otro lado, el procesamiento visual de los datos fue elaborado en la plataforma Graphpad Prims.

#### RESULTADOS

Los resultados de remoción del ion nitrato demostró que en el agua residual sintética *P. kessleri* presenta valores de remoción significativamente superiores a las tres cepas de cianobacterias (Figura 1).

La remoción del ion fosfato (Figura 2) fue significativamente mayor de todas las cepas probadas en relación con el control negativo.

Así mismo, en la reducción de la DQO en el medio de cultivo luego de 4 días de digestión se encontró que

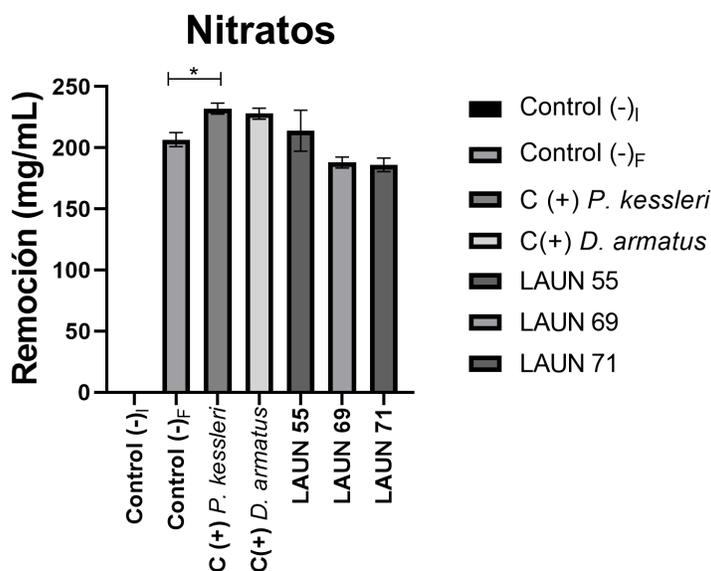


Figura 1. Remoción del ion nitrato por parte de las cinco cepas, diferencias significativas ( $p= 0,05$ ) contra el control negativo luego de 4 días de digestión en agua residual sintética.

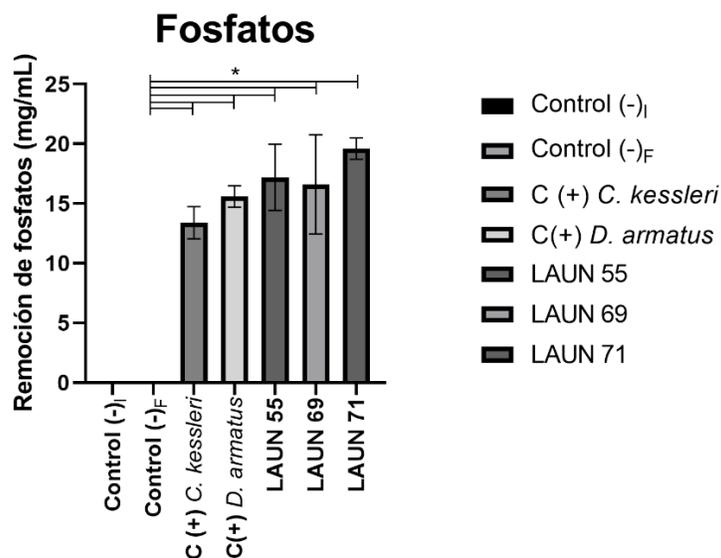


Figura 2. Remoción del ion fosfato por parte de las cinco cepas, diferencias significativas ( $p= 0,05$ ) contra el control negativo luego de 4 días de digestión en agua residual sintética.

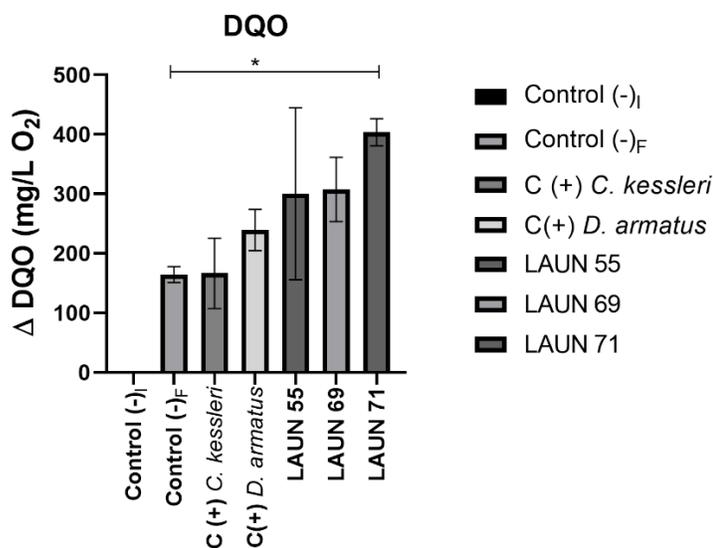


Figura 3. Reducción de la demanda química de oxígeno (DQO) por parte de las cinco cepas, diferencias significativas ( $p= 0,05$ ) contra el control negativo luego de 4 días de digestión en agua residual sintética.

solo la cepa LAUN71 presentó una remoción significativamente distinta a las demás cepas utilizadas (Figura 3)

Por último, se observó una importante reducción de la actividad microbiológica en los medios de cultivo correspondientes a las tres cianobacterias indicando una baja disponibilidad de compuestos oxidables por medios biológicos (DBO)(Figura 4).

En los resultados de reactor de 20 L con porcina se encontró un mejor desempeño por parte de *P. kessleri*

contra la cianobacteria LAUN71, siendo esta ultima la que demostró un mejor desempeño en la fase de laboratorio. En la remoción del ion nitrato (Figura 5) se muestra diferencias significativas de *P. kessleri* (75%) con respecto a la cepa LAUN71 (74%).

Se observa un comportamiento similar en la remoción del ion fosfato (Figura 6), *P. kessleri* con 75% mientras que la cepa LAUN71 muestra remociones de 65% en la porcina liquida.

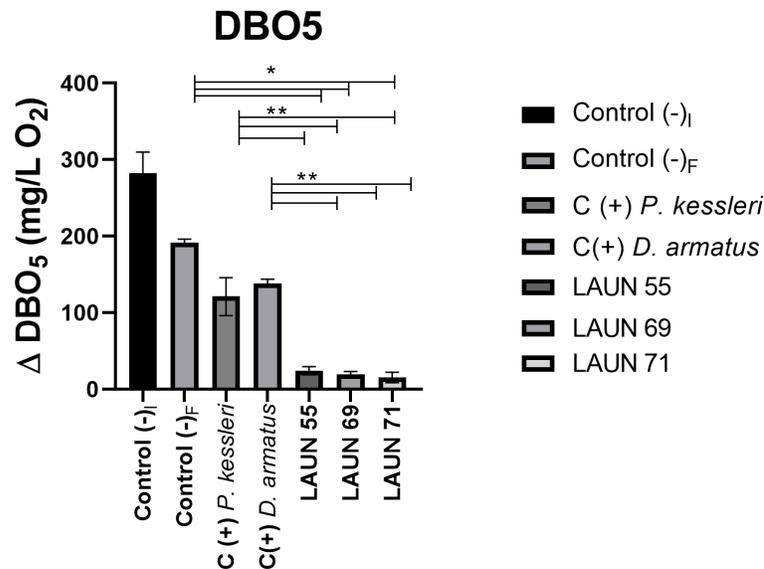


Figura 4. Reducción de la demanda biológica de oxígeno (DBO) por parte de las cinco cepas, diferencias significativas ( $p= 0,05$ ) contra el control negativo luego de 4 días de digestión en agua residual sintética.

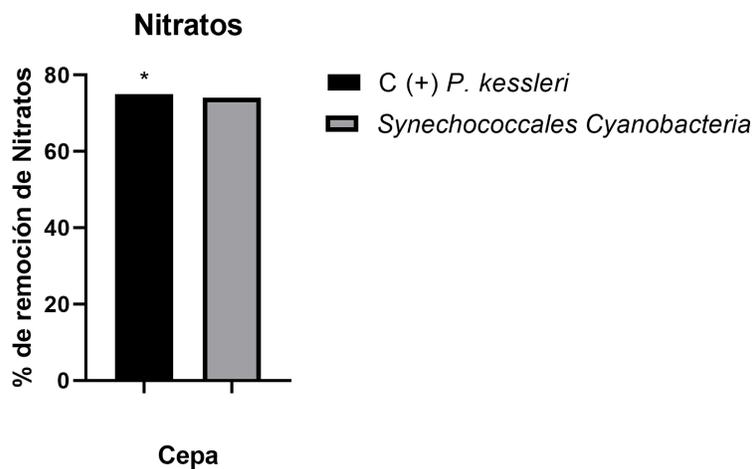


Figura 5. Reducción del ion nitrato por *P. kessleri*. y LAUN71, diferencias significativas ( $p= 0,05$ ) entre tratamientos luego de 4 días de digestión en porcinaza líquida.

En cuanto a la DQO (Figura 7), ambas cepas exhiben un comportamiento similar en remoción, sin embargo, el porcentaje de remoción de *P. kessleri*. es estadísticamente mayor (75%) con respecto a LAUN71 (72%).

Por último, en la medición del parámetro de DBO en porcinaza líquida (Figura 8), *P. kessleri* demostró diferencias significativas en el porcentaje de disminución (94%) con relación al presentado por LAUN71 (88%).

## DISCUSIÓN

En las últimas décadas, diversas investigaciones destacan la elevada eficiencia de microalgas en la remoción de

nutrientes y materia orgánica; dada su alta capacidad de biotransformación de nitrógeno, carbono y fósforo (Chen *et al.*, 2020; Sepehri *et al.*, 2020; Y. Wang *et al.*, 2020), y como consecuencia, los atractivos rendimientos de biomasa por m<sup>2</sup> que estas pueden llegar a presentar (Nur & Buma, 2019; Park *et al.*, 2017).

En la remoción de nitratos no se observan diferencias significativas de ninguna de las cepas de cianobacterias con respecto a la medición del control negativo final (C<sub>F</sub>) (Figura 1), sugiriendo que solo la cepa de *P. kessleri* (C+) muestra una disminución significativa ( $p < 0,05$ ) de nitratos respecto al control final, para las condiciones de laboratorio en recipientes de 300 mL. Según los resultados reportados por Lin *et al.* (2022) los reactores en con-

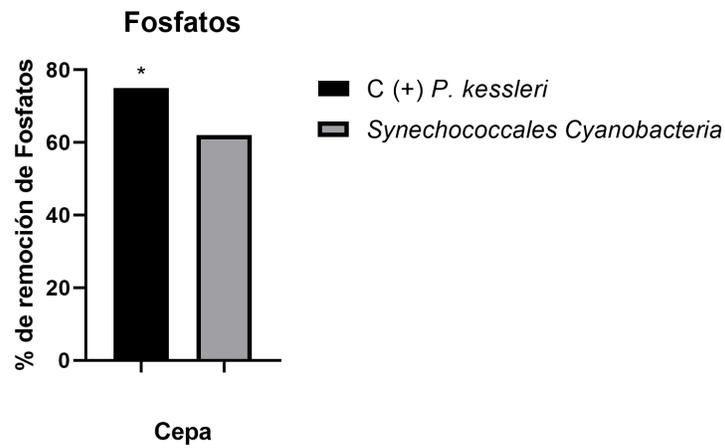


Figura 6. Reducción del ion fosfato por *P. kessleri*. y LAUN71, diferencias significativas ( $p= 0,05$ ) entre tratamientos luego de 4 días de digestión en porcinaza líquida.

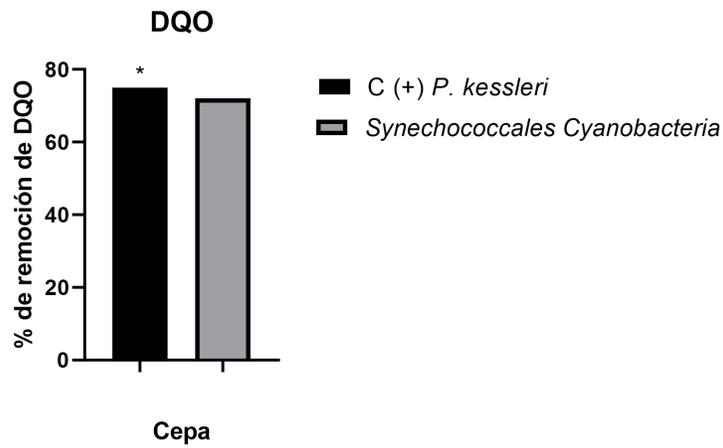


Figura 7. Reducción de la demanda química de oxígeno (DQO) por *P. kessleri*. y LAUN71, diferencias significativas ( $p= 0,05$ ) entre tratamientos luego de 4 días de digestión en porcinaza líquida.

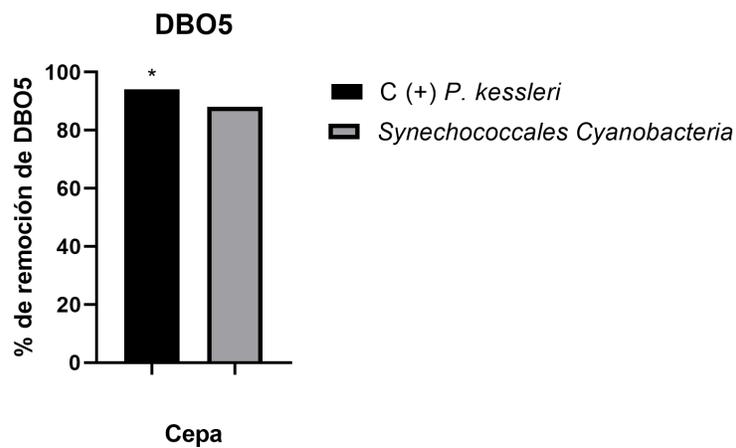


Figura 8. Reducción de la demanda biológica de oxígeno (DBO) por *P. kessleri*. y LAUN71, diferencias significativas ( $p= 0,05$ ) entre tratamientos luego de 4 días de digestión en porcinaza líquida.

figuración BATCH son poco eficientes con rangos de remoción entre 3,51 y 16,0  $\text{mg}^*\text{L}^{-1}*\text{d}^{-1}$ . Sin embargo, Lin *et al.*, (2022), señala que la configuración de reactor en biopelículas con flujos lentos de agua residual (5,8  $\text{L}^*\text{d}^{-1}$ ) promueven una mejor remoción de nitrato (24  $\text{mg}^*\text{L}^{-1}$ ), lo que sugiere que la matriz de sostenimiento de las microalgas facilita el contacto con el ion nitrato que a su vez facilita la asimilación por parte de la microalga. En este caso particular las cianobacterias utilizadas forman colonias entretejiendo una intrincada red de filamentos y exopolizacáridos que según Zhang *et al.*, (2022), además de facilitar la exposición al ion, aumentar la densidad celular por área e incrementa en más del 100% la presencia de enzimas periplásmicas encargadas de la asimilación de nitrógeno, lo que puede explicar las tasas de remoción de nitratos (150 - 200  $\text{mg}^*\text{L}^{-1}*\text{4d}^{-1}$ ), en la misma medida, en los ensayos en reactor de 20 L se observa un comportamiento similar entre *P. kessleri* y LAUN71, lo cual se puede atribuir a la densidad celular (Sepehri *et al.*, 2020) y formación de la biopelícula por LAUN71, compensando así la eficiencia presentada por *P. kessleri*, con un mayor número de células efectuando sorción del ion  $\text{NO}_3^-$  sobre el sustrato. Por otro lado, es notable la disminución de nitratos de forma espontánea en el medio de cultivo ( $C_1 / C_F$ ), esto se debe a que el medio en sí mismo representa un ambiente altamente reductor debido a las altas concentraciones de glucosa; ocasionando la reducción espontánea de los iones nitrato hacia nitritos (Miranda, 2018), para los cuales los ensayos de detección no poseen sensibilidad.

En cuanto a remoción de fosfatos en laboratorio se evidencian diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en todos los tratamientos incluidos los controles positivos con *P. kessleri* y *Desmodesmus armatus* con respecto al control negativo final (67% en *P. kessleri* y 98% en LAUN71), lo cual supera los valores reportados en literatura para algas similares como *Chlorella* para este nutriente (Sepehri *et al.*, 2020; Nur & Buma, 2019), lo que indica un aprovechamiento por parte de los microorganismos y un mayor rendimiento en aumento de biomasa inherente en cada una de las cepas (Mtaki *et al.*, 2021; Sepehri *et al.*, 2020; Torres-Valenzuela *et al.*, 2019). En los ensayos de reactor se observó un comportamiento diferente por parte de LAUN71, esto posiblemente a la variabilidad en la concentración de nutrientes en cada muestra de porcínaza líquida, siendo LAUN71 más sensible que *P. kessleri* a este tipo de variaciones evidenciándose en menores porcentajes de remoción de  $\text{PO}_4^-$  respecto a *P. kessleri*. dado que, a mayores concentraciones del ion, disminuye su biodisponibilidad (Su, 2020).

En remoción de materia orgánica bajo condiciones de laboratorio se observó diferencia significativa ( $p= 0,05$ ) en la cepa LAUN71 con respecto al control, sugiriendo una mayor eficiencia en la oxidación de materia orgánica por parte de esta cepa (85%) De igual forma, se observa una disminución espontánea de materia orgánica en el control, esto debido a la oxidación de macromoléculas que tiene lugar en medios acuosos por la acción de moléculas de agua, oxígeno disuelto o aniones  $\text{SO}_4^-$  (Guerra-Rodríguez *et al.*, 2018), que se presentan en los procesos de aireación de los reactores y en la elaboración del medio de cultivo. En los datos de reactor se encontró resultados similares entre las dos especies, aunque en este caso *P. kessleri* supera levemente a LAUN71, siendo un factor determinante la disponibilidad de nutrientes en el sustrato, la agitación, temperatura y disponibilidad de luz (Chan *et al.*, 2022), así, es probable que al ser el proceso de cría de porcinos una práctica parcialmente tecnificada en Colombia (Ministerio de Agricultura, 2018), el uso de antibióticos en los animales puede significar presencia de los mismos en la porcínaza tratada, siendo LAUN71 especialmente más sensible a estos compuestos con relación a *P.kessleri* la cual ha sido utilizada extendidamente para el tratamiento de estos compuestos en aguas residuales (Qian *et al.*, 2022; Suárez-Martínez *et al.*, 2022; Z. Wang *et al.*, 2022)

En laboratorio se encontraron diferencias significativas ( $p= 0,05$ ) de todos los tratamientos con respecto al control, indicando el papel que juega el metabolismo de los microorganismos en la remoción de materia. Por otra parte. los datos señalan que las cianobacterias se desempeñan de mejor manera respecto a los controles con clorofíceas dado que existen diferencias altamente significativas ( $p= 0,01$ ) entre los tres tratamientos con cianobacterias y dichos controles, esto significa que hay mayor eficiencia de remoción por parte de las cianobacterias, esto apoyado en la menor cantidad de materia orgánica oxidable de manera biológica en el agua residual sintética, con tan solo un tiempo de digestión de 4 días, superando las especies que se utilizaban en tratamientos de remoción de materia orgánica tradicionales (Ahmad, 2022). Por otro lado en el tratamiento de porcínaza líquida se observa que la cianobacteria LAUN71 alcanza niveles similares para la disminución de la  $\text{DBO}_5$  a los obtenidos con *P. kessleri*, esta posible disminución en comparación con laboratorio se puede deber a una posible interacción de antibióticos y una mayor turbidez en la porcínaza líquida, la baja incidencia de luz en la columna de agua, así como presencia de bacterias resistentes en el agua residual, podría llevar a una situación de estrés metabólico, disminución del crecimiento y de la toma de nutrientes del medio.

## CONCLUSIONES

El tratamiento de aguas residuales por parte de cianobacterias es una alternativa eficiente al evaluar remoción de iones y reducción de la demanda química y biológica de oxígeno dada la alta flexibilidad metabólica de sus maquinarias celulares, además de que su cultivo masivo es menos costoso que otros tratamientos biológicos (Ahmad, 2022), sin embargo es prudente monitorear constantemente la concentración de las principales fuentes de macronutrientes dado que a concentraciones excesivas, se observa una marcada disminución de la actividad bioremediadora por parte de estos organismos (Su, 2020), de esta forma será posible tener un parámetro optimizado de dilución para cada sustrato.

Al observarse una disminución de la actividad de biorremediación de LAUN71 en campo con respecto al desempeño en laboratorio, se propone un tratamiento anaerobio previo que facilite la degradación de compuestos tóxicos (H. Y. Chen *et al.*, 2022; Oberoi *et al.*, 2022) para las cianobacterias y así evitar la inhibición metabólica de los microorganismos buscando alcanzar los rendimientos observados en laboratorio.

Se propone un tratamiento simultaneo por parte de cianobacterias filamentosas y clorofitas, con lo que se abarca un mayor espectro de compuestos a remover de aguas residuales como es propuesto por El-Sheekh *et al.*, (2022) de esta forma se facilita una dinámica poblacional que optimiza los recursos metabólicos de ambos organismos, un soporte físico para la comunidad de microalgas facilitando el diseño de biorreactores que optimicen el área de contacto con el sustrato.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ahmad, I. Z., (2022), The usage of Cyanobacteria in wastewater treatment: prospects and limitations. *Letters in Applied Microbiology*, 75(4), 718–730.
- APHA, AWWA, & WEF., (2017), Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, American Public Health Association. In R. Baird, A. Eaton, & E. Rice (Eds.), *APHA* (23rd ed.). APHA.
- Castrillón, O., Ricardo, Q., Jiménez, A., Oswaldo, P., & Mejía, B., (2004), Porcinaza en la alimentación animal. *Revista Lasallista de Investigación*, 1(1), 72–76.
- Chan, S. S., Khoo, K. S., Chew, K. W., Ling, T. C., & Show, P. L., (2022), Recent advances biodegradation and biosorption of organic compounds from wastewater: Microalgae-bacteria consortium - A review. *Bioresource Technology*, 344(PA), 126159.
- Chen, C. Y., Kuo, E. W., Nagarajan, D., Ho, S. H., Dong, C. Di, Lee, D. J., & Chang, J. S., (2020), Cultivating *Chlorella sorokiniana* AK-1 with swine wastewater for simultaneous wastewater treatment and algal biomass production. *Bioresource Technology*, 302 (January), 122814.
- Chen, H. Y., Li, X. K., Meng, L., Liu, G., Ma, X., Piao, C., & Wang, K., (2022), The fate and behavior mechanism of antibiotic resistance genes and microbial communities in anaerobic reactors treating oxytetracycline manufacturing wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 424(PC), 127352.
- Chen, Z., Shao, S., He, Y., Luo, Q., Zheng, M., Zheng, M., Chen, B., & Wang, M., (2020), Nutrients removal from piggery wastewater coupled to lipid production by a newly isolated self-flocculating microalga *Desmodesmus* sp. PW1. *Bioresource Technology*, 302(January), 122806.
- de-Bashan, L. E., Antoun, H., & Bashan, Y., (2008), Involvement Of Indole-3-Acetic Acid Produced By The Growth-Promoting Bacterium *Azospirillum* Spp . In Promoting Growth Of *Chlorella Vulgaris* <sup>1</sup>. *Journal of Phycology*, 44(4), 938–947.
- de Bashan, L. E., & Bashan, Y. (2003), Bacterias promotoras de crecimiento de microalgas: una nueva aproximación en el tratamiento de aguas residuales. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 5, 85–90.
- El-Sheekh, M., El-Dalatony, M. M., Thakur, N., Zheng, Y., & Salama, E. S., (2022), Role of microalgae and cyanobacteria in wastewater treatment: genetic engineering and omics approaches. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(3), 2173–2194.
- Giraldo, M., (2012), Aislamiento y caracterización de microalgas formadoras de tapetes microbianos asociados a un cultivo hidropónico de plantas halófitas Isolation and Characterization of The Microbial Mats Associated to a Hydroponic Culture of Halophytic Plants. *Universidad de Las Palmas de Gran Canaria*.
- Githinji, L. J. M., Musey, M. K., & Ankumah, R. O., (2011), Evaluation of the fate of ciprofloxacin and amoxicillin in domestic wastewater. *Water, Air, and Soil Pollution*, 219(1–4), 191–201.
- Gkotsis, P., Peleka, E., & Zouboulis, A., (2020), The use of natural minerals in a pilot-scale MBR for membrane fouling mitigation. *Separations*, 7(2), 1–13.
- Guerra-Rodríguez, S., Rodríguez, E., Singh, D. N., & Rodríguez-Chueca, J., (2018), Assessment of sulfate radical-based advanced oxidation processes for water and wastewater treatment: A review. *Water (Switzerland)*, 10(12).
- Imase, M., Watanabe, K., Aoyagi, H., & Tanaka, H., (2008), Construction of an artificial symbiotic community using a *Chlorella*-symbiont association as a model. *FEMS Microbiology Ecology*, 63(3), 273–282.

- Lin, Y., Koutsospyros, A., Braid, W., Christodoulatos, C., Terracciano, A., & Su, T. L., (2022), MicroAlgal Biofilm Reactor (MABR) – Evaluation of Biomass Support Materials and Nitrate Removal Performance. *Environmental Processes*, 9(2).
- Ministerio de Agricultura, (2018), *Cadena cárnica porcina*.
- Miranda, F., (2018), Purificación de agua: eliminación de nitratos, nitritos y compuestos orgánicos utilizando catalizadores en polvo y estructurados. In *Universidad Nacional Del Litoral* (Vol. 1, Issue 4).
- Mousavi, S. A., Sarshad Ghahfarokhi, M., & Soltani Koupaei, S., (2020), Negative impacts of nomadic livestock grazing on common rangelands' function in soil and water conservation. *Ecological Indicators*, 110(November 2019), 105946.
- Mtaki, K., Kyewalyanga, M. S., & Mtolera, M. S. P., (2021), Supplementing wastewater with NPK fertilizer as a cheap source of nutrients in cultivating live food (*Chlorella vulgaris*). *Annals of Microbiology*, 71(1).
- Noreña, J., Osorio, N., & Gómez, J., (2016), *Manual de Uso de la Porcinaza en la Agricultura* (Issue 1).
- Nur, M. M. A., & Buma, A. G. J., (2019), Opportunities and Challenges of Microalgal Cultivation on Wastewater, with Special Focus on Palm Oil Mill Effluent and the Production of High Value Compounds. *Waste and Biomass Valorization*, 10(8), 2079–2097.
- Oberoi, A. S., Surendra, K. C., Wu, D., Lu, H., Wong, J. W. C., & Kumar Khanal, S., (2022), Anaerobic membrane bioreactors for pharmaceutical-laden wastewater treatment: A critical review. *Bioresource Technology*, 361(May).
- Park, S., Kim, J., Park, Y., Son, S., Cho, S., Kim, C., & Lee, T., (2017), Comparison of batch cultivation strategies for cost-effective biomass production of *Micractinium inermum* NLP-F014 using a blended wastewater medium. *Bioresource Technology*, 234, 432–438.
- PORKCOLOMBIA., (2017), Análisis de coyuntura del sector porcicultor del año 2017 y perspectivas 2018. *Asociación Porkcolombia FONDO NACIONAL DE LA PORCICULTURA*, 1–15.
- Qian, Z., Na, L., Bao-Long, W., Tao, Z., Peng-Fei, M., Wei-Xiao, Z., Sraboni, N. Z., Zheng, M., Ying-Qi, Z., & Liu, Y., (2022), Capabilities and mechanisms of microalgae on nutrients and florfenicol removing from marine aquaculture wastewater. *Journal of Environmental Management*, 320(August).
- Rengifo, A. L., Peña, E., & Benitez, N., (2012), Efecto de la asociación alga-bacteria *Bostrychia calliptera* (Rhodomelaceae) en el porcentaje de remoción de cromo en laboratorio. *Biología Tropical*, 60 (September), 1055–1064.
- Sepehri, A., Sarrafzadeh, M. H., & Avateffazeli, M., (2020), Interaction between *Chlorella vulgaris* and nitrifying-enriched activated sludge in the treatment of wastewater with low C/N ratio. *Journal of Cleaner Production*, 247.
- Su, Y., (2020), Revisiting carbon, nitrogen, and phosphorus metabolisms in microalgae for wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, 144590.
- Su, Y., Mennerich, A., & Urban, B., (2011), Municipal wastewater treatment and biomass accumulation with a wastewater-born and settleable algal-bacterial culture. *Water Research*, 45(11), 3351–3358.
- Suárez-Martínez, D., Angulo-Mercado, E., Mercado-Martínez, I., Vacca-Jimeno, V., Tapia-Larios, C., & Cubillán, N., (2022), Enhanced Tetracycline Removal from Highly Concentrated Aqueous Media by Lipid-Free *Chlorella sp.* Biomass. *ACS Omega*, 7(16), 14128–14137.
- Suraraksa, B., Nopharatana, A., Chaiprasert, P., Bhumiratana, S., & Tanticharoen, M., (2017), Effect of Substrate Feeding Concentration on Initial Biofilm Development in Anaerobic Hybrid Reactor. *ASEAN Journal on Science and Technology for Development*, 20(3&4), 361–372.
- Torres-Valenzuela, L. S., Sanín-Villarrea, A., Arango-Ramírez, A., & Serna-Jiménez, J. A., (2019), Caracterización fisicoquímica y microbiológica de aguas mieles del beneficio del café. *Revista ION*, 32(2), 59–66.
- Wang, Y., Wang, S., Sun, L., Sun, Z., & Li, D., (2020), Screening of a *Chlorella*-bacteria consortium and research on piggery wastewater purification. *Algal Research*, 47(October 2019), 101840.
- Wang, Z., Chu, Y., Chang, H., Xie, P., Zhang, C., Li, F., & Ho, S. H., (2022), Advanced insights on removal of antibiotics by microalgae-bacteria consortia: A state-of-the-art review and emerging prospects. *Chemosphere*, 307(P4), 136117.
- Watanabe, K., Takihana, N., Aoyagi, H., Hanada, S., Watanabe, Y., Ohmura, N., Saiki, H., & Tanaka, H., (2005), Symbiotic association in *Chlorella* culture. *FEMS Microbiology Ecology*, 51(2), 187–196.
- Zhang, H., Chen, X., Song, L., Liu, S., & Li, P., (2022), The mechanism by which *Enteromorpha linza* polysaccharide promotes *Bacillus subtilis* growth and nitrate removal. *International Journal of Biological Macromolecules*, 209(PA), 840–849.