

Biorremediación del efluente de un frigorífico utilizando microalgas nativas en fotobiorreactores a escala piloto

Felipe Sabatté, Adelina Nashiro, Raúl Bini, Belén Mayer, Fleite Santiago, Alicia Iorio de F., Agustín Rearte

Cátedra de Química Analítica; Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.

E-mail: tarearte@agro.uba.ar

RESUMEN: La descarga de efluentes contaminados sin tratamiento es una problemática ambiental con gran impacto en cuerpos acuáticos. Es necesario proponer sistemas de tratamientos innovadores de bajo costo y eficientes. La utilización de microalgas en el tratamiento de efluentes es una tecnología novedosa e incipiente. Sus altas tasas de crecimiento y absorción de nutrientes, y las aplicaciones de la biomasa, son algunas de las características que las hacen una alternativa de bajo costo y alta eficiencia para el tratamiento de efluentes. El objetivo del trabajo fue evaluar el tratamiento del efluente de un frigorífico a partir de microalgas nativas en fotobiorreactores (FBR) a escala piloto a campo. Se utilizaron dos tipos de FBRs con inyección de CO₂: piletón abierto tipo raceway (200 l) y plano vertical cerrado (45 l). Se desarrollaron las experiencias utilizando co-cultivos de dos cepas aisladas y seleccionadas en estudios previos (*Chlorella* sp y *Franceia* sp). Los FBRs se operaron en modo discontinuo hasta alcanzar la fase estacionaria y luego se operaron en modo semicontinuo a una tasa de dilución 0,2d⁻¹ (TRH 5 días) durante 10 días. Se monitoreó absorbancia, irradiancia, pH, oxígeno disuelto, densidad celular, y biomasa seca. Se tomaron muestras para análisis en laboratorio de nutrientes mayoritarios, DQO, y DBO del efluente y análisis bioquímico de la biomasa generada. En los ensayos discontinuos el FBR plano presentó una cinética de crecimiento y remoción de nutrientes más elevada que el raceway, sin embargo éste alcanzó una concentración de biomasa final mayor. En el modo de operación en semicontinuo, el FBR plano presentó una mayor productividad en biomasa y remoción de nutrientes (% remoción DBO 87%; P-PRS 99,9%; NH₄⁺ 28%) respecto del raceways. La utilización de microalgas en el tratamiento del efluente de un frigorífico es una alternativa viable y eficiente con producción de biomasa microalgal de valor agregado.

INTRODUCCIÓN

La cuenca Matanza-Riachuelo es una zona con un estado ambiental crítico ya que atraviesa una de las regiones más densamente pobladas de Latinoamérica, con alta cantidad de descargas de efluentes de distintas actividades desde hace más de 200 años (Malpartida, 2003). Los principales contaminantes provienen de frigoríficos, prácticas agrícolas, efluentes cloacales domésticos, basurales a cielo abierto y actividades industriales. Los efluentes pueden estar compuestos por altos contenidos de nitrógeno (N), fósforo (P) y materia orgánica, por lo cual su liberación al cauce sin un previo tratamiento podría provocar la eutrofización de los cuerpos de agua con graves consecuencias sanitarias y ecológicas (Correl, 1998; Smith, 2003). El tratamiento de efluentes es una pieza clave en la mejora de la calidad ambiental, por este motivo resulta de gran interés el estudio y la mejora en los procesos de tratamiento de efluentes.

Existe una serie de metodologías químicas y fisicoquímicas para remover contaminantes inorgánicos y orgánicos de efluentes. Sin embargo, considerando los grandes volúmenes de efluentes a tratar, las tecnologías actuales no suelen ser suficientemente efectivas o sus elevados costos limitan su implementación. Es por esto que las nuevas investigaciones se focalizan en tecnologías innovadoras, y particularmente costo – efectivas. En los últimos años se ha prestado especial interés al uso de microalgas para el tratamiento de efluentes (Cho et al. 2011; Fouilland 2012; Cai et al. 2013; Azapira et al., 2014). El principio de la biorremediación con microalgas radica en que los efluentes industriales son ricos en diversos tipos de compuestos que permiten sostener el metabolismo de este tipo de microorganismos fotosintéticos (Azapira et al., 2014). Esta tendencia ascendente se debe a las ventajas que presenta este grupo de microorganismos: altas tasas de crecimiento y absorción de nutrientes, gran diversidad taxonómica y metabólica, manipulación relativamente fácil, capacidad de crecimiento tanto en aguas dulces como salinas, y la posibilidad de utilizar la biomasa microalgal para la obtención de materia prima para energías renovables y productos con valor agregado.

En este marco, Ventura (2015) realizó ensayos de remediación de un efluente de frigorífico asentado en la Cuenca Matanza-Riachuelo utilizando microalgas nativas a escala de laboratorio. Este efluente presentaba elevados contenidos de nitrógeno y fósforo necesarios para el crecimiento microalgal y elevados niveles de materia orgánica, los cuales superaban los niveles de vuelco permitidos por la normativa de Autoridad de Cuenca Matanza-Riachuelo (ACUMAR). Las cepas de microalgas utilizadas fueron *Chlorella* sp (Figura 1) y *Franceia* sp (Figura 2) por presentar los porcentajes de remoción más elevados para NH_4^+ (amonio) y P-PO_4^{3-} (fosfatos) y altas productividades de biomasa, $0,067\text{g.l}^{-1}.\text{d}^{-1}$ y $0,127\text{g.l}^{-1}.\text{d}^{-1}$ respectivamente en el efluente. Además Ventura (2015) evaluó estos parámetros en el efluente utilizando cultivos bi-específicos (co-cultivo de ambas cepas) obteniendo como resultado una productividad similar en biomasa y una mayor remoción de amonio que utilizando ambas especies por separado. Al cultivar más de una especie se obtiene la ventaja de que los cultivos tengan una capacidad

de respuesta mayor debido a la posible complementariedad de sus nichos y la distinta plasticidad de ambas especies. Es probable que las condiciones del efluente varíen con el tiempo asociado a la actividad productiva del frigorífico y que una especie se adapte mejor que otra en cada nueva situación.

El trabajo de Ventura (2015) demostró la viabilidad de utilizar estas especies en co-cultivo para el tratamiento del efluente. Este sistema representa una alternativa de bajo costo ya que no requiere la adición de reactivos químicos y posee la ventaja de obtener un producto secundario (biomasa) potencialmente aprovechable.

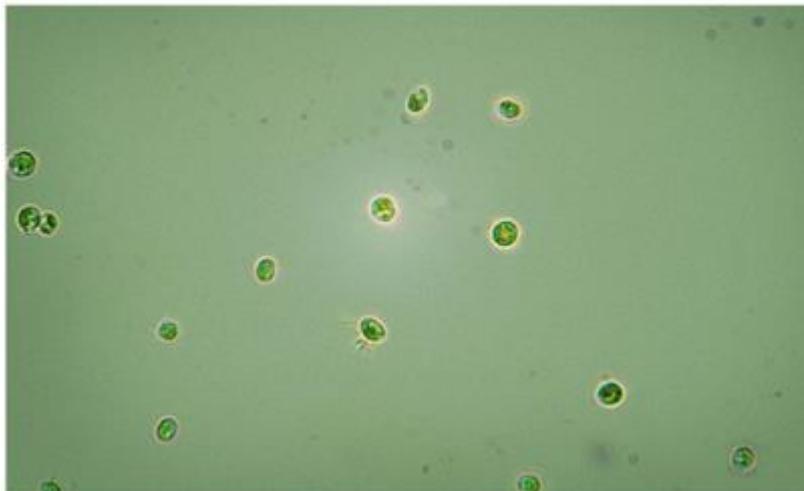


Figura 1.- Fotografía por microscopía óptica de la microalga *Chlorella sp.*

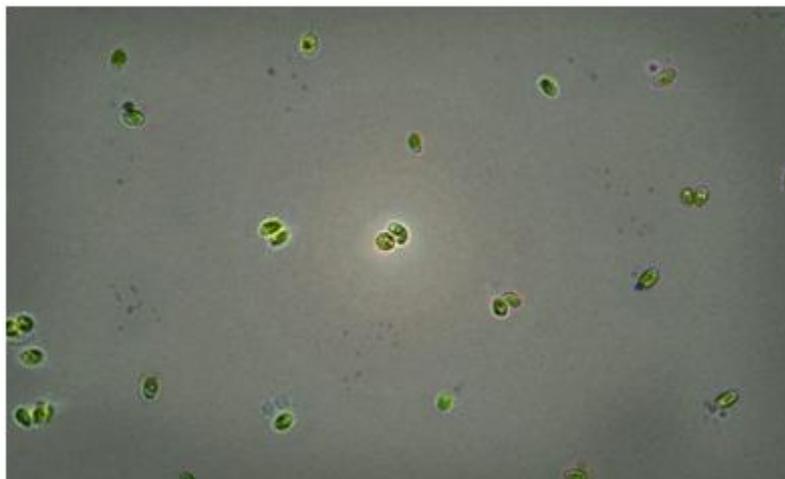


Figura 2.- Fotografía por microscopía óptica de la microalga *Frankeia sp.*

Para que este tipo de tratamiento sea efectivo, es necesario contar con sistemas de producción algal masivos de bajo costo que puedan ser fácilmente instalados y mantenidos. Los sistemas de cultivo masivo se denominan fotobiorreactores ya que son reactores con actividad biológica (-bio-) y que permiten la disponibilidad lumínica necesaria para la fotosíntesis (foto-). Se suelen clasificar en sistemas abiertos y cerrados. Los abiertos son aquellos que se encuentran en contacto directo con el

aire, dentro de los cuales podemos mencionar los piletones abiertos (open ponds) circulares o tipo “raceways”. Los sistemas cerrados son aquellos que no se encuentran en contacto directo con la atmósfera, de los cuales existen más variantes que para los abiertos, como por ejemplo los planos verticales o inclinados (Flat Panels).

Los raceways son los más utilizados a nivel comercial y reciben su nombre por la similitud de la forma con una pista de carreras ovalada. Suelen implicar bajos costos de construcción y operación, pueden llegar a cubrir grandes extensiones, generalmente presentan menor productividad, bajo control de variables, y elevado riesgo de contaminación biológica. En el caso de los planos verticales, los costos de infraestructura son más elevados, poseen menor relación superficie:volumen, mayor control de variables, suelen presentar mayor productividad, y menor riesgo de contaminación biológica.

Una compañía de Estados Unidos, Algae Systems LLC, ha diseñado e implementado una planta de tratamiento de aguas residuales de un municipio, basado en el aprovechamiento del mismo para cultivar microalgas en fotobiorreactores a campo a gran escala. Novoveská et al (2016) comprobaron que el tratamiento resulta muy eficiente, removiendo el 75% del nitrógeno total, el 93% del fósforo y el 92% de la DBO (demanda biológica de oxígeno) del efluente de entrada.

El objetivo del presente trabajo es evaluar el tratamiento del efluente proveniente de una industria frigorífica asentada en la cuenca Matanza-Riachuelo utilizándolo como fuente de nutrientes y carbono para el cultivo de microalgas en fotobiorreactores (FBR) a escala piloto y en condiciones a campo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño y construcción de fotobiorreactores

Se diseñaron y construyeron dos prototipos de fotobiorreactores, uno tipo raceway y otro tipo plano vertical. Además se diseñó y desarrolló un dispositivo de monitoreo y control remoto de pH y temperatura (T°C) e inyección automatizada de CO₂ (dióxido de carbono).

Raceway

En la Figura 3 se presentan las medidas y componentes del diseño de este fotobiorreactor. Posee 150 cm de largo, 50 cm de ancho y 30 cm de profundidad, con una capacidad de carga máxima de 210 l. Se encuentra dividido por una pared interna que delimita dos canales de circulación de 25 cm de ancho cada uno, y posee baffles curvos en los extremos para facilitar el mezclado del cultivo y evitar la sedimentación de las células. Posee un sistema de agitación mecánico por paletas movilizadas por un motorreductor de servicio continuo. La velocidad de circulación del cultivo es de 20 cm s⁻¹. La inyección de CO₂ se realizó en forma automática mediante el controlador de pH-T°C. Una vez construido fue

instalado en el campo experimental de la Cátedra de Química Analítica de la FAUBA con orientación este-oeste.

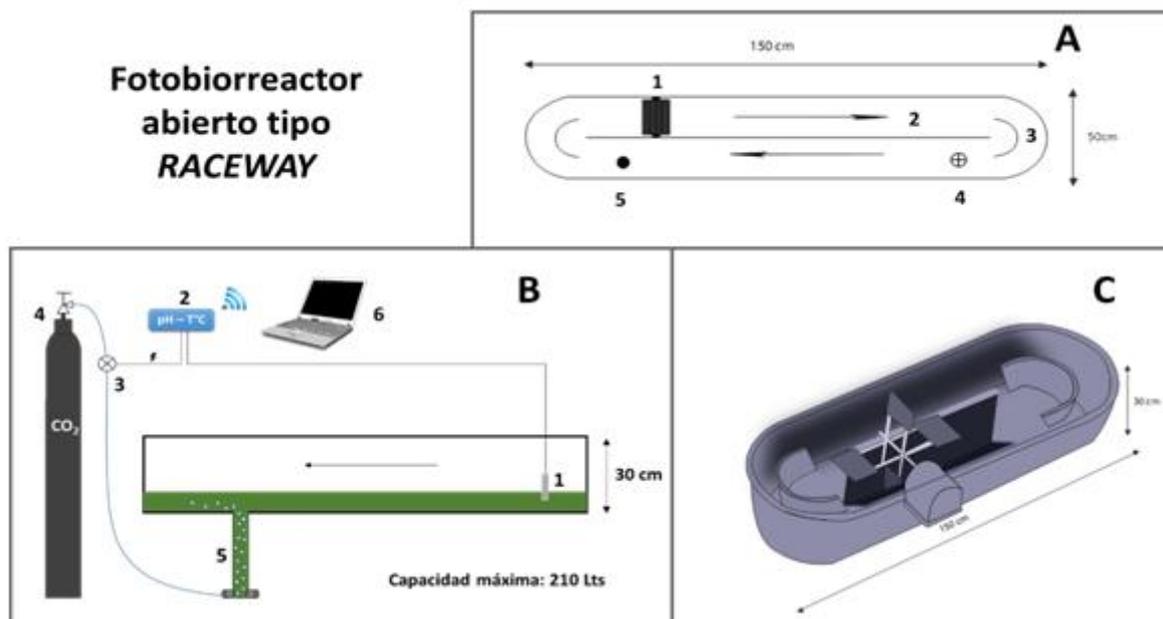


Figura 3.- Diseño de FBR tipo Raceway. (A) Medidas y componentes: 1. paletas de agitación; 2. canal de circulación de cultivo; 3. bafle curvo; 4. sector de toma de muestras; 5: intercambiador de CO₂. (B) Esquema integrado del sistema de control y monitoreo de pH y T°C con fotobiorreactor: 1. sensores de T°C y pH; 2. dispositivo de medición, control, registro y emisión de datos; 3. electroválvula de CO₂; 4. válvula reguladora de presión y caudalímetro de CO₂; 5. intercambiador de CO₂; 6. visualización de datos en tiempo real. (C) Diseño tridimensional.

Plano vertical

En la Figura 4 se presenta un esquema del diseño y componentes de este fotobiorreactor. Las dimensiones fueron: 100 cm de alto, 50 cm de ancho y 10 cm de espesor, con una capacidad de carga máxima de 45 l. Ambas caras del FBR están compuestas por vidrios transparentes de 6 mm de espesor que representan un área de exposición a la luz de 0,9 m² en total. Posee un sistema de aireación compuesto por un caño difusor transversal en la sección inferior y bomba de aireación (35 l.min⁻¹). Posee dos tomas de muestras de ½ pulgada: una inferior y otra superior; y una llave inferior de ¾ de pulgada para la inyección de CO₂ o descarga de cultivo. Se le instaló un calentador de 300 Watts para el control de la temperatura. Al igual que el fotobiorreactor raceway, fue instalado en el campo experimental de la Cátedra de Química Analítica de la FAUBA con orientación este-oeste de las caras expuestas a la luz.

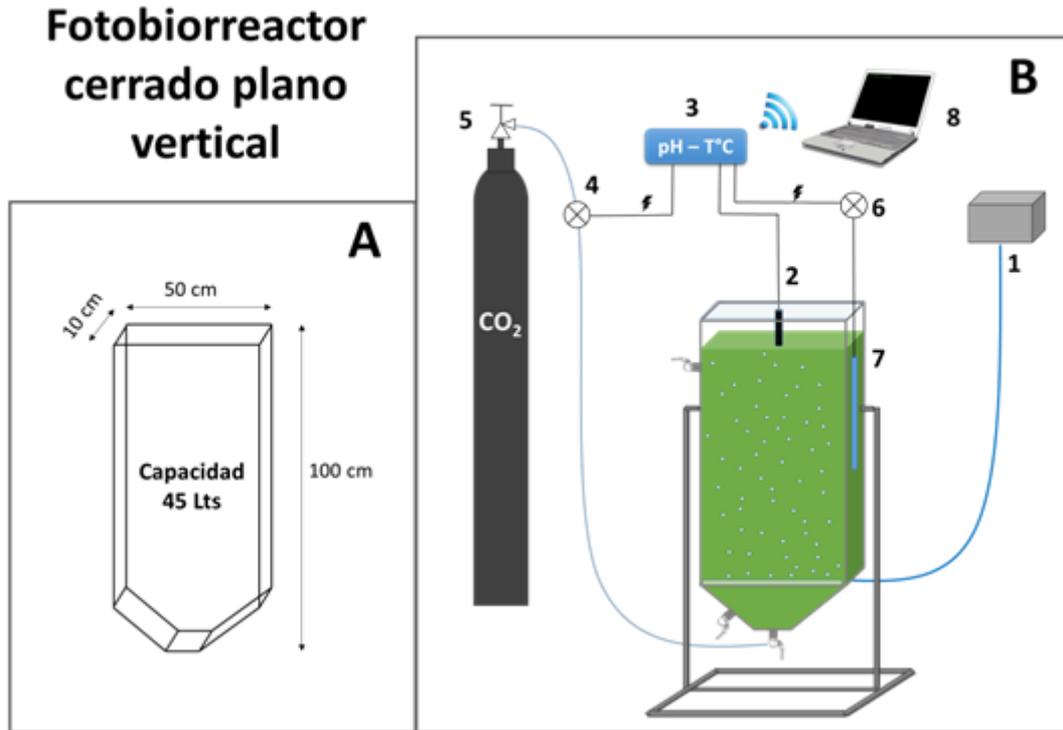


Figura 4. - Diseño de FBR tipo Plano Vertical. (A) Medidas del contenedor de cultivo. (B) Esquema integrado del sistema de control y monitoreo de pH y T°C con fotobiorreactor: 1. bomba de aireación; 2. sensores de pH y T°C; 3. dispositivo de medición, control, registro y emisión de datos; 4. electroválvula de CO₂; 5. válvula reguladora de presión y caudalímetro de CO₂; 6. calentador eléctrico sumergible; 7. visualización de datos en tiempo real.

Sistema de monitoreo y control remoto de pH y temperatura

El control y monitoreo de las variables de cultivo se vuelven un requisito fundamental para el escalamiento a sistemas de producción masivos. Por este motivo, en colaboración con profesores de la Universidad Nacional de General Sarmiento, se desarrolló un sistema de bajo costo de monitoreo y control remoto de pH y temperatura e inyección automática de CO₂ en los cultivos de microalgas.

Se programó para inyectar CO₂ durante las horas diurnas (8-19 hs) a partir de valores de pH por encima de 8 y corte de la inyección en valores de pH menores a 7,8. A su vez se programó el control de la temperatura mediante activación-desactivación (activación T°C<18 – desactivación T°C>23) del calentador eléctrico sumergible.

La visualización de datos y control manual del dispositivo fue llevada a cabo en páginas web independientes mediante servidores gratuitos orientados a IoT (Internet de las cosas). Finalmente se implementó el análisis de datos en tiempo real a través de la plataforma QuikView para facilitar la visualización de datos en forma personalizada, generación de informes periódicos automáticos, y transformación y correlación de variables. Todas estas configuraciones reducen el tiempo de trabajo

permitiendo un monitoreo en tiempo real, una mayor agilidad y facilidad en la toma de decisiones y manejo de los cultivos. En la figura 5 se encuentra una imagen de este dispositivo.



Figura 5.- Distintas vistas reales del dispositivo de medición, control y envío de datos y sensor de pH.

Ensayos

Se llevaron a cabo experiencias de cultivo en los FBRs en condiciones a campo en el período comprendido entre el 22 de abril al 21 de mayo de 2016 con efluentes pre-tratados en el establecimiento Lago-Mar SRL por coagulación-floculación para eliminar sólidos suspendidos. La elección de la industria se debió a que el mismo fue el que proveyó de efluente para los ensayos realizados por Ventura (2015) mencionados anteriormente. Se trasladaron 1200 l de efluente desde el establecimiento hasta el predio de la FAUBA para el desarrollo de las experiencias de cultivo en los fotobiorreactores.

Se realizaron ensayos en modo de operación discontinuo (batch) y en semicontinuo en las siguientes condiciones:

- BATCH: se inoculó cada FBR con 1×10^6 cel.ml⁻¹ de cada especie (*Chlorella sp* y *Franceia sp*) a partir de cultivos en medio sintético BBM (Bold Basal Medium) en cada reactor y se desarrollaron los cultivos por un período de 17 días.
- SEMICONTINUO: una vez alcanzada la fase estacionaria en los cultivos batch, estos se operaron en modo semicontinuo con una tasa de dilución de 0,2 d⁻¹ durante 10 días para cada reactor.

Se monitorearon periódicamente en los cultivos pH (peachímetro), oxígeno disuelto (OD) (oxímetro), temperatura, irradiancia incidente (E₀) fotosintéticamente activa (PAR 400-700nm) (radiómetro), densidad óptica a 680 nm como estimador de la densidad celular y la biomasa (espectrofotómetro), densidad celular por recuento en cámara de Neubauer, biomasa seca por peso seco a 70°C, y nutrientes: amonio (NH₄⁺) (electrodo de ion selectivo), nitratos (NO₃⁻) por reducción con sulfato de hidrazina y nitrito (NO₂⁻) por diazotación, fósforo reactivo soluble (PRS) con molibdato ascórbico. Además, al final

de cada experimento se determinó demanda biológica de oxígeno (DBO₅) (APHA, 1992), carbono orgánico total (COT) por el método de oxidación sulfocrómica (Golterman et al., 1987) y se estimó a partir del COT la demanda química de oxígeno (DQO).

Con los datos obtenidos se calculó el porcentaje de remoción de nutrientes y materia orgánica aplicando la fórmula presentada a continuación:

$$\%Remoción = \frac{[C]_{t_0} - [C]_{t_f}}{[C]_{t_0}} \times 100 \quad (1)$$

[C]_{t₀} y [C]_{t_f}; definidos como las concentraciones del compuesto de interés al inicio y al final del tratamiento respectivamente.

Por otro lado, se realizó un análisis bioquímico de la biomasa obtenida en cada uno de los fotobiorreactores al final de los ensayos en semicontinuo. Este análisis consistió en la determinación de porcentaje de pigmentos (clorofila *a*, clorofila *b*, y carotenoides) (Wellburn, 1994), hidratos de carbono (Dubois et al., 1956), lípidos (Folch, 1956; Bligh & Dyer, 1959) y proteínas (Lowry et al., 1951).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el ensayo de cultivos batch el FBR raceway fue el que presentó mayor biomasa final (Tabla 1). El cultivo del FBR plano presentó una velocidad de crecimiento mayor alcanzando su máximo desarrollo a los 8 días de cultivo (Figura 6).

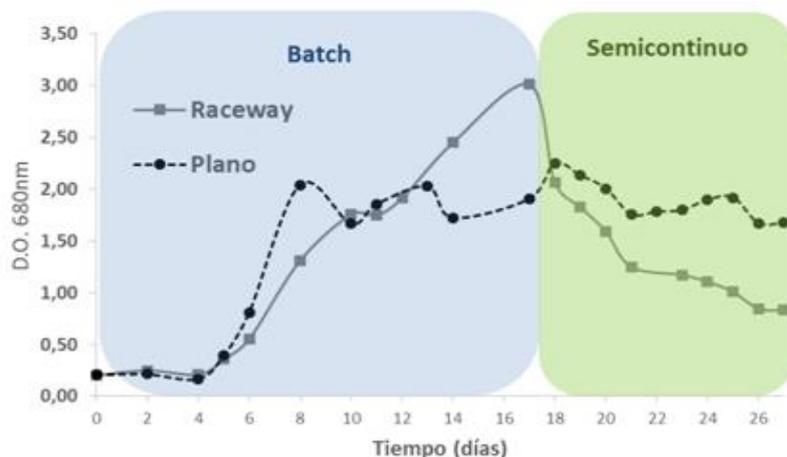


Figura 6.- Densidad óptica a 680 nm en función del tiempo de cultivo para los diferentes fotobiorreactores y modos de operación.

En las Figuras 7 y 8 se presentan la dinámica de consumo de amonio y fósforo respectivamente. El consumo de fósforo es total a los 10 días de cultivo en ambos fotobiorreactores. El consumo de amonio en cambio no fue total alcanzando un porcentaje de remoción alrededor del 70% en ambos cultivos (Tabla 2), probablemente debido a una limitación por fósforo.

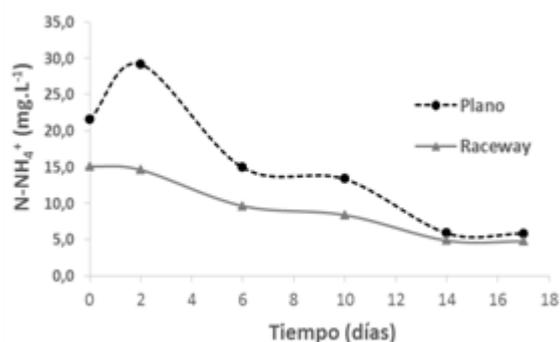


Figura 7. Consumo de amonio en función del tiempo.

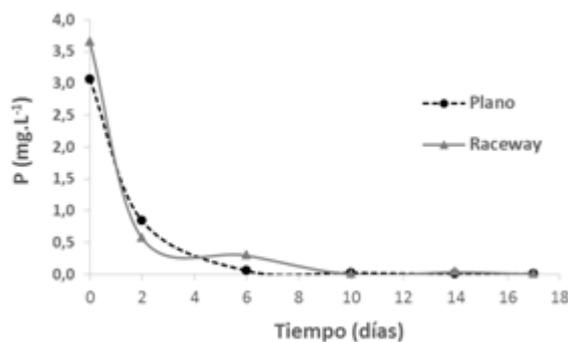


Figura 8. Consumo de fósforo en función del tiempo.

En el ensayo de cultivos en semicontinuo el cultivo en el FBR plano fue el que presentó una mayor productividad en biomasa (Tabla 1) alcanzando el estado estacionario a los 4 días de cultivo (día 21) (Figura 6). En cambio el cultivo en el FBR raceway no alcanzó el estado estacionario en el período de cultivo (Figura 6) y presentó una productividad menor en biomasa (Tabla 1).

Tabla 1.- Parámetros físico-químicos y producción de biomasa en las distintas experiencias de cultivo.

	PLANO		RACEWAY	
	BATCH	SEMICONTINUO	BATCH	SEMICONTINUO
pH*	8,1	7,9	7,6	8,3
OD* (mg.L ⁻¹)	8,28	11,1	11,94	9,5
Temperatura* (°C)	20,1	19,4	17,5	16,1
Biomasa seca Final (g.L ⁻¹)	0,47	0,43	0,68	0,31
Productividad biomasa (g.L ⁻¹ .d ⁻¹)	0,03	0,09	0,04	0,06

*valores medios del período de cultivo

Para ambos tipos de FBRs, la productividad en biomasa es superior en el modo de operación semicontinuo. A su vez este último, permite un mayor volumen de tratamiento diario del efluente. En el caso del FBR plano la productividad fue tres veces mayor en cultivo semicontinuo respecto del cultivo en batch. Sin embargo, al comparar estos valores con los obtenidos en las experiencias a escala laboratorio por Ventura (2015) a la misma tasa de dilución, éstos fueron muy superiores (0,26 gr.L⁻¹.d⁻¹). Esto podría deberse a las bajas temperaturas

registradas en el período de cultivo con los FBRs y al menor contenido de nutrientes en el efluente inicial para los ensayos en los FBRs comparado con el efluente utilizado en los ensayos en laboratorio mencionados.

Con respecto al porcentaje de remoción de nutrientes y materia orgánica se obtuvo una remoción elevada de fósforo y DBO y baja remoción de amonio, para ambos FBRs (Tabla 2). A su vez el tratamiento con microalgas aumenta los niveles de oxígeno disuelto en el efluente producto de la fotosíntesis mejorando la calidad del mismo. El oxígeno disuelto de entrada del efluente fue de 0 mg.L⁻¹ y el de descarga varió entre 9 y 11 mg.l⁻¹.

Tabla 2.- Concentraciones iniciales y finales y remoción de contaminantes para cada tipo de FBR en modo de operación en semicontinuo.

	Efluente inicial	FBR PLANO		FBR RACEWAY	
	mg.L ⁻¹	mg.L ⁻¹	% remoción	mg.L ⁻¹	% remoción
N-NH ₄ ⁺	35,1	26	27,8	22,9	36,4
P-PO ₄ ³⁻	0,93	0	99,9	0,1	89,3
DBO	224,8	29,7	86,8	31,5	86
DQO	317,9	194,4	48,5	217,2	42,5
COT	238,4	145,8	48,5	162,9	42,5

Tabla 3.- Límites admisibles para descargas de Efluentes Líquidos según la Resolución 1/2007 de la ACUMAR.

Parámetro	Unidades	Límites para descargar a		
		Colectora Cloacal	Pluvial / Cuerpo Superficial	Absorción Suelo
D.Q.O.	mg.l ⁻¹	≤700	≤250	≤500
D.B.O.	mg.l ⁻¹	≤200	≤50	≤200
Fósforo Total	mg.l ⁻¹	≤10	≤1,0	≤10
Nitrógeno Amoniacal	mg.l ⁻¹	≤75	≤25	≤75
pH	pH	7,0-10,0	6,5-10,0	6,5-10,0

El efluente inicial presentaba valores de DBO por encima de la normativa para descarga a colectora cloacal y en el caso del amonio para colector pluvial (Tabla 2). Luego del tratamiento con microalgas en los distintos

FBR el efluente se encuentra dentro de los valores permitidos para la descarga a colectora pluvial para todos los parámetros analizados, siendo esta descarga la que presenta los niveles más exigentes de la normativa de ACUMAR (ver tabla 3).

Análisis bioquímico de la biomasa

La figura 9 muestra los contenidos de hidratos de carbono, lípidos, y proteínas en los cultivos finales en semicontinuo. Los porcentajes de hidratos de carbono y lípidos en la biomasa seca fueron similares para ambos FBRs. En el caso de las proteínas se observó un mayor contenido en el FBR plano. En la figura 10 se presentan los porcentajes de pigmentos por biomasa seca (clorofila *a*, clorofila *b* y carotenoides) en cada uno de los FBRs. El contenido de pigmentos fue mayor en el FBR plano. Esto puede deberse a que los cultivos en dicho FBR presentaron mayor densidad celular y contenido de biomasa lo que genera una menor penetración lumínica. En estas condiciones las células suelen presentar un mayor contenido de pigmentos lo que les permite aumentar la captación lumínica.

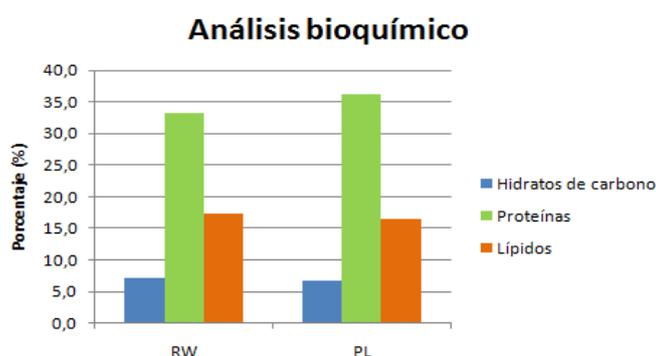


Figura 9.- Porcentaje de hidratos de carbono, proteínas y lípidos por biomasa seca en los fotobiorreactores raceway (RW) y plano (PL).

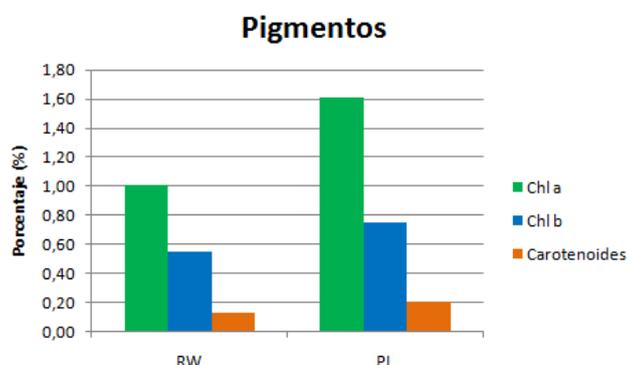


Figura 10.- Porcentaje de Clorofila a (Chl a), Clorofila b (Chl b) y Carotenoides por biomasa seca en los fotobiorreactores raceway (RW) y plano (PL)..

A partir de la biomasa generada y en función de sus contenidos en proteínas, hidratos de carbono y lípidos, este sistema de tratamiento de efluentes podría ofrecer algunas alternativas potenciales para la obtención de productos con valor agregado y producción biocombustibles. Entre ellos podemos mencionar, la producción de bioetanol a partir de hidratos de carbono, biodiesel a partir de lípidos, y bioestimulantes de crecimiento vegetal a partir de proteínas.

Actualmente el área más prometedora y con mayor desafío para la utilización de lípidos es la producción de biodiesel, sin embargo aún no se logran superar las barreras que impiden su desarrollo a nivel comercial (Zhang et al., 2016). Según las condiciones de cultivo y las especies involucradas en los procesos de biorremediación se observa una amplia variación en el contenido y la composición lipídica (Lv, J.-M. et al. 2010). De esta manera resulta importante para la potencial implementación tecnológica de la biomasa producida llevar a cabo estudios de determinación de la composición de ácidos grasos, debido a que son los que determinan la calidad del biodiesel producido (Mayfield, 2012).

Las proteínas de estos microorganismos sirven como materia prima para la producción de hidrolizados proteicos que pueden utilizarse como biofertilizantes o bioestimulantes de crecimiento vegetal (Becker, 2007; Bulgari et al., 2015; Chojnacka et al., 2012). Además, este tipo de compuestos suele estar asociado a sustancias promotoras del crecimiento de plantas (citoquininas, auxinas, giberelinas, ácido abscísico, etileno, betaina y poliaminas) que hoy en día se usan como enmiendas en producciones agrícolas. Considerando los elevados porcentajes de proteínas obtenidos, una de las alternativas posibles de mayor viabilidad es la producción de bioestimulantes de crecimiento vegetal.

Otra aplicación de la biomasa producida es su utilización como biosorbente para la remoción de metales pesados en efluentes industriales por el proceso de biosorción (Michalak et al., 2013). Ésta es una alternativa a los métodos tradicionales de descontaminación de efluentes que contienen metales pesados. En los últimos años, la comunidad científica ha mostrado un gran interés en esta técnica en vistas de los resultados obtenidos (Romera et al, 2006). En este sentido, nos encontramos realizando ensayos de biosorción con biomasa obtenida de los fotobiorreactores sobre un efluente proveniente de industria de galvanoplastia con altos niveles de zinc y níquel.

CONCLUSIONES

Se logró cumplir con éxito el objetivo planteado demostrando la capacidad de las microalgas nativas de la cuenca Matanza-Riachuelo para la biorremediación de efluentes con materia orgánica y nutrientes. El FBR plano operado en modo semicontinuo fue el que presentó mayor productividad en biomasa. En ambos FBRs el efluente final presentó valores de los parámetros estudiados por debajo de los límites para descarga a colector pluvial según la normativa vigente. A su vez, el tratamiento de efluentes a partir de microalgas permite la obtención de biomasa algal con potencial valor agregado.

REFERENCIAS

- APHA – AWWA – WPCF (1992): *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*, Madrid, Ed. Díaz de Santos. S. A
- Azarpira, H.; Behdarvand, P.; Dhumal, K. & Pondhe, G., 2014. *Comparative studies on phycoremediation of sewage water by using blue green algae*, International Journal of Biosciences (IJB), 4(4):58-64.
- Becker, E.W., 2007. *Micro-algae as a source of protein*, Biotechnol. Adv, 25:207–210.
- Bligh, E.G., Dyer, W.J., 1959. *A rapid method for total lipid extraction and purification*, Can.J. Biochem.Physiol, 37:911-917
- Bulgari, R., Cocetta, G., Trivellini, A., Vernieri, P., Ferrante, A., 2015. *Biostimulants and crop responses: a review*, Biol. Agric. Hortic. 31, 1–17.
- Cai T., Park S.Y., Racharaks R., Li Y., 2013. *Cultivation of Nannochloropsis salina using anaerobic digestion effluent as a nutrient source for biofuel production*, Applied Energy, 108:486–492.
- Cho S., Luong T.T., Lee D., Oh Y-k., Lee T., 2011. *Reuse of effluent water from a municipal waste water treatment plant in microalgae cultivation for biofuel production*, Bioresource Technology 102:8639–8645.
- Chojnacka, K., Saeid, A., Michalak, I., 2012. *The possibilities of the application of algal biomass in the agriculture*, Chemik. 66:1235–1248.
- Correl D., 1998. *The Role of Phosphorus in the Eutrophication of Receiving Waters: A Review*. Journal of Environmental Quality 27:261–266.
- Dubois, M.; Gilles A.; Hamilton, J.; Rebers, P. y Smith, F., 1956. *Colorimetric method for determination of sugars and related substances*, Analytical chemistry, 28(3):350-356.
- Folch, J., Lees, M., Sloane Stanley, G. H., 1957. *A simple method for isolation and purification of total lipids from animal tissues*, J. Biol. Chem
- Fouilland, E., 2012. *Biodiversity as a tool for waste phycoremediation and biomass production*. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 11(1):1-4.
- Golterman H, Clymo R, Ohndtad M (1978): *Methods for the physical and chemical examination of freshwaters*, Oxford, Blackwell Scientific Publication
- Lowry, O. H., Rosebrough, N. J., Farr, A. L., and Randall, R. J. 1951. *Protein measurement with the Folin phenol reagent*. J. Biol. Chem. 193:265-215.
- Ly, J.-M., Cheng, L.-H., Xu, X.-H., Zhang, L., Chen, H.-L., 2010. *Enhanced lipid production of Chlorella vulgaris by adjustment of cultivation conditions*, Bioresour. Technol., 101:6797–6804.
- Mayfield, S. y Georgianna, D. R., 2012. *Exploiting diversity and synthetic biology for the production of algal biofuels*. Nature 488:329-335
- Michalak, I., Chojnacka, K., Witek-Krowiak, A., 2013. *State of the art for the biosorption process - A review*, Appl. Biochem. Biotechnol., 170:1389–1416.
- Malpartida, A. R., 2003. *La cuenca del río Matanza-Riachuelo. Revisión de antecedentes de recursos naturales, compuestos xenobióticos y otros contaminantes de la cuenca*, Multimedia Ambiente Ecológico. 144pp.
- Novoveská L., Zapata A.K.M., Zabolotney J.B., Atwood M.C. y Sundstrom E.R., 2016. *Optimizing microalgae cultivation and wastewater treatment in large-scale offshore photobioreactors*. Algal research 18:86-94.
- Romera E., González F., Ballester A., Blázquez L. y Muñoz J.A. 2006. *Biosorption with algae: A statistical review*. Critical Reviews in Biotechnology, 26:223-235.
- Smith V., 2003. *Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems a global problem*. Environmental Science and Pollution Research 10(2):126-139.
- Ventura M., 2015. *Selección de microalgas nativas para la biorremediación de efluentes con alta carga de nutrientes y materia orgánica. Producción de biomasa para distintos usos tecnológicos*. Tesis de grado para optar al título de Licenciada en Ciencias Ambientales (FAUBA). Director: Lic. Rearte T.A. Codirector: Dra. Iorio de F. A.
- Wellburn A. R. 1994, *The spectral determination of chlorophylls a and b, as total carotenoids using various solvents with spectrophotometers of different resolution*, Physiol. 144:307-313.

Zhang, T.-Y., Hu, H.-Y., Wu, Y.-H., Zhuang, L.-L., Xu, X.-Q., Wang, X.-X., Dao, G.-H., 2016. *Promising solutions to solve the bottlenecks in the large-scale cultivation of microalgae for biomass/bioenergy production*. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 60:1602–1614.