

Artículo científico

Efecto de la carga hidráulica en la remoción de nutrientes en un fotobiorreactor de algas clorofitas a flujos continuo y *batch*, en el efluente de un filtro percolador**Edwin Moisés Oviedo Acuña**

Ingeniero civil, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua UNAN-MANAGUA

Maestro en ciencias en ingeniería sanitaria, ERIS-USAC

Dirección para recibir correspondencia: edwinoviedo@yahoo.com

Félix Alan Douglas Aguilar Carrera

Ingeniero civil, Dr. en ciencias en cambio climático y sostenibilidad; Profesor titular ERIS-USAC. Guatemala

Trabajo: Consultor independiente

Dirección para recibir correspondencia: faguilar@inversionesambientales.com

Recibido 24.08.2018 Aprobado 31.08.18

Resumen

El presente artículo evalúa el efecto que produce la carga hidráulica, sobre la remoción nitrógeno total y fósforo total en un fotobiorreactor (FB) instalado en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala. El FB fue alimentado por la fuente del filtro percolador de la etapa III y expuesto a radiación solar durante los meses de marzo a mayo, periodo del cual se reportan crecimientos de algas del tipo *Chlorella*. Se construyeron tres fotobiorreactores, los que trabajaron a cargas hidráulicas: baja (FBHB), media (FBHM), alta (FBHA), a condiciones de flujo continuo y *batch*. Las cargas hidráulicas evaluadas fueron de 1.32, 3.23, 5.32 m³/m²/día. El crecimiento máximo de algas del tipo *Chlorella* se obtuvo al séptimo día alcanzándose un valor de 3.2x10⁶ cel/mL en el FBHM, en el FBHB un valor de 2.4x10⁶ cel/mL y en el FBHA un valor de 2.56x10⁶ cel/mL. La concentración promedio de nitrógeno total a la entrada de los FB trabajando a flujo continuo fue de 71.67 mg/L; en la salida del FBHB 65.67 mg/L; en la salida del FBHM, 63.00 mg/L; en el FBHA de 60.67 mg/L. La eficiencia de remoción de 8.37 %, 12.09 %, y 15.35 % respectivamente. El comportamiento del fotobiorreactor trabajando a flujo tipo *batch* mostró eficiencias similares, siendo estas de 17.65 % para el FBHB, 15.09 % para el FBHM, y 18.67 % para el FBHA. En el caso del fósforo total la concentración de entrada en los FB trabajando a flujo continuo fue de 14.77 mg/L; en las salidas del FBHB de 8.27 mg/L; para el FBHM de 5.00 mg/L; para el FBHA de 5.57 mg/L. Con eficiencias de remoción de 44.02 %, 66.14 % y 62.30 % respectivamente. La concentración de fósforo en la entrada de los FB trabajando con flujo tipo *batch* fue de 12.87 mg/L, en las salidas del FBHB fue de 13.87 mg/L, para el FBHM de 11.18 mg/L; para el FBHA de 10.15 mg/L, con eficiencias de remoción de -7.77 %, 13.08 % y 21.11 % respectivamente.

Palabras claves: Eutrofización, algas *Chlorella*, correlación, radiación solar, fósforo total, nitrógeno total.**Abstract**

The present article evaluates the effect that the hydraulic load produces, on the total nitrogen and total phosphorus removal in a photobioreactor (FB) installed in the wastewater treatment plant of the University of San Carlos of Guatemala. The FB was fed by the source of the percolating filter of stage III and exposed to solar radiation during the months of March to May, period of which growths of algae of the *Chlorella* type are reported. Three photobioreactors were built, those that worked at hydraulic loads: low (FBHB), medium (FBHM), high (FBHA), to conditions of continuous flow and batch. The hydraulic loads evaluated were 1.32, 3.23, 5.32 m³/m²/ day. The maximum growth of algae of the *Chlorella* type was obtained on the seventh day reaching a value of 3.2x10⁶ cel/mL in the FBHM, in the FBHB a value of 2.4x10⁶ cel/mL and in the FBHA a value of 2.56x10⁶ cel/mL. The average concentration of total nitrogen at the entrance of the FB working at continuous flow was 71.67 mg/L; at the output of the FBHB 65.67 mg/L; at the output of the FBHM, 63.00 mg/L; in the FBHA of 60.67 mg/L. The removal efficiency of 8.37 %, 12.09 %, and 15.35 % respectively. The behavior of the photobioreactor working at batch flow showed similar efficiencies, being 17.65 % for the FBHB, 15.09 % for the FBHM, and 18.67 % for the FBHA. In the case of total phosphorus, the concentration of entry into the FB working at a continuous flow was 14.77 mg/L; at the outputs of the FBHB of 8.27 mg/L; for the FBHM of 5.00 mg/L; for the FBHA of 5.57 mg/L. With removal efficiencies of 44.02 %, 66.14 % and 62.30 % respectively. The concentration of phosphorus at the entrance of the FB working with batch flow was 12.87 mg/L, at the outputs of the FBHB was 13.87 mg/L, for the FBHM of 11.18 mg/L; for the FBHA of 10.15 mg/L, with removal efficiencies of -7.77 %, 13.08 % and 21.11 % respectively.

Keywords: Eutrophication, *Chlorella* algae, correlation, solar radiation, total phosphorus, total nitrogen.

Introducción

Este artículo presenta los resultados del estudio de la eficiencia de remoción de nutrientes en un fotobiorreactor de algas clorofitas de la especie *Chlorella*; instalado en la planta de tratamiento de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

El sistema de fotobiorreactores es una alternativa de tratamiento terciario de tipo biológico que no necesita de energía comercial para su funcionamiento; solo necesita tener el medio de alimentación de aguas residuales y ser expuesto al medio de luz solar (radiación solar) para propiciar el crecimiento de microalgas, que son las encargadas de realizar la absorción de los contaminantes.

El sistema de fotobiorreactor fue sometido a diferentes cargas hidráulicas y a dos tipos de flujo, continuo y *batch* para su evaluación en el comportamiento de remoción de nitrógeno total y fósforo total, y establecer el nivel de correlación de Pearson entre estos, estableciendo para ello como límite un nivel de significancia bilateral del 5 %.

Antecedentes

El uso de algas ha sido estudiado en muchos países desarrollados, siendo los Estados Unidos de América donde se desarrollaron los primeros estudios desde los años 40, donde investigadores como Cadwell reportaron los primeros estudios para remover el nitrógeno inorgánico de las aguas residuales con el uso de las microalgas. En la década de los 70 se realiza el cultivo más grande en Estados Unidos alcanzando valores de biomasa de 12-18 g/m²/día, esto ha sido el punto de partida para que diversos países se interesaran para el desarrollo de tecnologías para el cultivo de algas.

La Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos ERIS-USAC, ha desarrollado una línea de investigación por parte de estudiantes de la maestría de Ingeniería Sanitaria, relacionado con el uso de microalgas, las que pueden ser empleadas para el desarrollo de tecnologías de bajo costo, con el objetivo de remover la concentración de nutrientes; como

solución a los problemas de la eutrofización de fuentes de agua, que puedan implementarse en los países centroamericanos.

Dentro de los estudios que se han realizado en ERIS-USAC se encuentran:

Guerra y Zea (2015), encontraron que las aguas del efluente de los filtros percoladores de la PTAR de la USAC y PTAR Ing. Arturo Pasos Sosa, son ideales para generar el crecimiento de algas de forma natural. En la PTAR de la USAC, encontraron que se puede reducir el nitrógeno amoniacal en 5,14 %, el nitrato en 18,73 % y fosfato en 16,38 %. En la planta de tratamiento de aguas residuales Arturo Pasos, la concentración de nitratos se redujo en 7.82 % y para los parámetros de nitrógeno amoniacal y fosfatos aumentaron sus concentraciones en este caso los resultados no superaron el porcentaje del 20 % propuesto en la hipótesis. Las algas identificadas, que se generan en la planta de tratamiento pertenecen a las familias: cianofitas, diatomeas, clorofitas y zooplancton, de la familia clorofitas sobresalen, *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Actinastrum* sp.

Argueta y Blandón (2016), confirman la existencia de algas clorofitas, la especie predominante es la *Chlorella* con un crecimiento exponencial a los 12 días, *Microcystis*, *Sphaerocystis*, *Closteriopsis* y *Navícula*, todas estas con un crecimiento exponencial a los 7 días, para posteriormente entrar en una etapa de decaimiento. Encontraron que a los 12 días las concentraciones de nutrientes obtuvo un máximo nivel de remoción, para el caso del amonio 41.78 %, para fosfatos 40.42 %, para nitratos 53 % y para nitritos un valor de 64.52%. Además plantearon un modelo matemático a nivel de laboratorio para determinar el nivel de remoción de nutrientes amonio, fosfatos, nitritos y nitratos en las aguas del efluente de los filtros percoladores de la USAC.

Asimismo, Aguilar (2017), en su tesis doctoral dentro del programa de postgrados de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, retoma los estudios realizados por Guerra y Zea (2015), y Argueta y Blandón (2016), logrando concluir en un modelo de regresión múltiple con nivel

de confianza de 95 % usando técnicas de fitorremediación. Se determinó que cultivos mixtos de algas *Chlorella* en simbiosis con bacterias entre otros microorganismos reducen en 31 % la concentración de fosfato del agua del efluente de los filtros percoladores de la USAC, lo cual conlleva a mitigar los procesos de eutrofización de las fuentes de agua. El estudio presenta que del día uno al día siete hay una tasa de incremento máxima de color residual de 0.84, y que a partir del séptimo día la tasa de incremento se reduce significativamente a valores por debajo de 0.06 con tendencias a no sufrir variaciones del día 7 al 14. Esto es asociable a los resultados en el que se obtiene el máximo crecimiento de biomasa algal entre los días 8 y 9. Las eficiencias de remoción que se encontraron en la PTAR de la USAC, para nitratos fue de 55.16 %, para fosfatos fue de 26.39 %. Para la PTAR ERIS la eficiencia de remoción, para nitratos fue de 31.54 %, para amoníaco fue de 56.57 % y para fosfatos fue de 27.83 %. Los valores promedios de remoción de fosfatos para ambas plantas de tratamiento fue de 26 a 27 %.

Ubicación del estudio

El desarrollo del estudio, se realizó en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos de la ciudad de Guatemala, la que se ubica dentro de la granja experimental de agronomía, a 740 metros de la entrada principal. Las coordenadas donde se instaló el sistema de fotobiorreactor son las siguientes: Latitud: 14°34'42.91"N, Longitud: 90°33'36.79"O, como se muestra en la figura 1.

Figura 1: Ubicación de fotobiorreactor en la planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC.



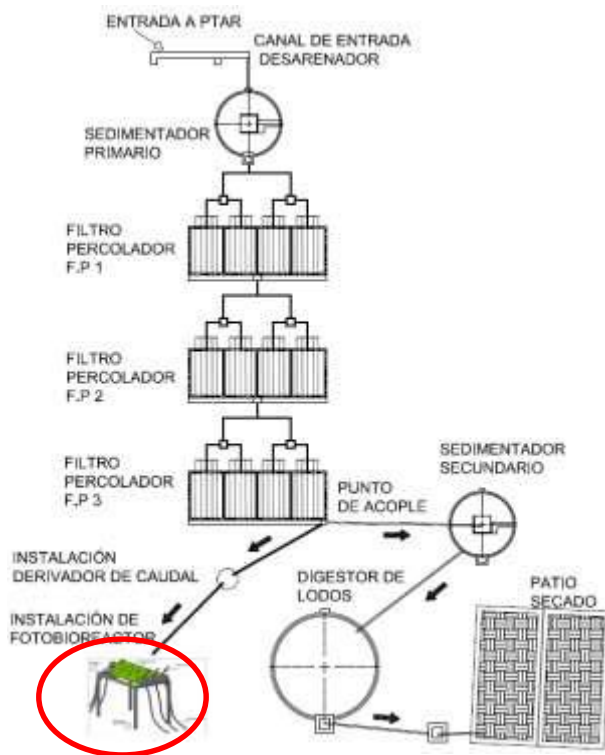
Metodología

El estudio utilizó una metodología de tipo cuantitativo, iniciando con la definición de variables objetos del estudio, determinación de la muestra con técnica de premuestra, captura de información, análisis de datos de laboratorio, análisis estadístico e interpretación de resultados.

La instalación de los fotobiorreactores se hizo en la salida del efluente del filtro percolador III, que es la última etapa del tratamiento secundario previo a la entrada del sedimentador secundario, dado que, las últimas investigaciones en ERIS, en el campo del crecimiento y remoción de nutrientes de microalgas fueron hechas en esta unidad de tratamiento de la PTAR de la USAC; Guerra y Zea (2015), Argueta y Blandón (2016).

El esquema de línea de tratamiento y ubicación de sistema de fotobiorreactor en la PTAR de la USAC, se muestra en la figura 2.

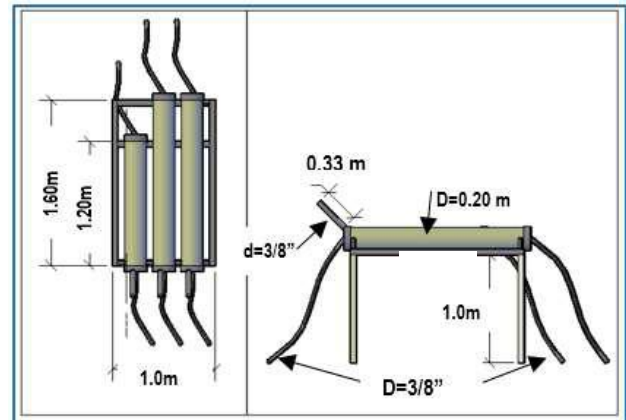
Figura 2: Esquema de línea de planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC y ubicación del fotobiorreactor.



Diseño y construcción de fotobiorreactor

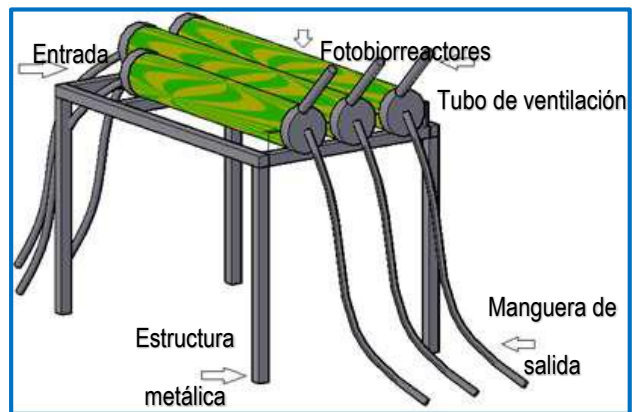
Se diseñó un modelo experimental para el sistema de fotobiorreactor; conteniendo tres unidades en paralelo colocadas horizontalmente sobre una estructura metálica, los que fueron fijados al suelo y expuestos a condiciones ambientales de radiación solar como fuente de energía y alimentado por aguas residuales del tratamiento secundario de los filtros percoladores. Las dimensiones de la unidad de fotobiorreactor se muestran en la figura 3.

Figura 3: Dimensiones del fotobiorreactor.



Para proveer ventilación dentro del sistema de fotobiorreactor se colocó un tubo de PVC 1 1/2" en la parte superior de cada fotobiorreactor, para expulsar los gases y evitar condiciones anaerobias y presión. La salida del agua tratada de cada fotobiorreactor se hizo con mangueras de 3/8" y válvulas de medio giro, para regular el caudal, y realizar la recolección de las muestras para su debido análisis de laboratorio (ver figura 4).

Figura 4: Ubicación de fotobiorreactor en la planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC.



La tabla 1, presenta las dimensiones con los que se trabajó cada fotobiorreactor.

Tabla 1: Diseño hidráulico de fotobiorreactores

| Descripción | Fotob. I Q mín | Fotob. II Q med | Fotob. III Q máx |
|-----------------------|-------------------|--------------------|---------------------|
| Diámetro interno (cm) | 19.12 | 19.12 | 19.12 |

| Descripción | Fotob. I | Fotob. II | Fotob. III |
|---|----------|-----------|------------|
| | Q mín | Q med | Q máx |
| Longitud (m) | 1.32 | 1.82 | 1.82 |
| Área (m ²) | 0.028 | 0.028 | 0.028 |
| Volumen F.biorreactor (m ³) | 0.038 | 0.052 | 0.052 |

La gráfica de la figura 5, muestra el perfil hidráulico del sistema de fotobiorreactor. Este inicia desde el punto de acople del filtro percolador de la etapa III, luego llega al derivador de caudales y finalmente hasta la unidad de fotobiorreactor, punto de interés del estudio.

Figura 5: Perfil hidráulico de fotobiorreactor.



Procesos de estabilización del sistema

El proceso de estabilización se hizo con las válvulas cerradas, y expuesto a la radiación solar. Pasados 7 días de la puesta en funcionamiento de los fotobiorreactores se pudo observar el desarrollo máximo de la biomasa, llegando a obtener una tonalidad verde en cada una de las unidades de fotobiorreactor; comprobando lo observado por Guerra y Zea (2015), quienes definieron que la máxima producción de biomasa se desarrolla entre los 8 y 9 días.

Muestras

Para determinar el número de muestras se empleó una estimación estadística que utiliza la distribución t-student que se define con la siguiente ecuación. (Walpole, 1999).

$$n = \left[\frac{t \cdot s}{\bar{x} - \mu} \right]^2 \quad \text{(EC. 1)}$$

Donde:

N: es el número sugerido de muestras

s: es la desviación estándar

t: es el nivel de confianza de la prueba t de *student*

\bar{x} : promedio real

μ : promedio esperado

La distribución T-student se usa cuando nos interesa comparar una característica de una población usando una sola muestra, pero en dos circunstancias distintas. Lo que interesa es comparar las diferencias entre dos variables numéricas antes y después de un mismo grupo.

Se debe contar con resultados previos de nitrógeno total y fósforo total, para obtener datos de la desviación estándar y emplear la fórmula para la definición del número de muestras. Se contaba con resultados de nitratos, nitritos, fosfatos y amoníaco de estudios anteriores realizados en la PTAR de la USAC; por ello se tuvo que realizar un pre-muestreo de nitrógeno total, para efectuar los cálculos finales del número de muestras.

Para el cálculo del número de muestras se establece una diferencia entre el promedio real y el estimado, con un error del 10 %. Se analizó las primeras dos muestras del parámetro nitrógeno total, con el fin de calcular los valores de la desviación estándar. Con la desviación estándar calculada, se realizó el cálculo del número de muestra, introduciendo los valores en la ecuación 1. Luego se agregó la muestra número tres y se realizó el cálculo de la nueva desviación estándar, obteniendo con la ecuación 1 el número de muestra para el estudio. Esto se hace así sucesivamente de manera iterativa, hasta obtener, un valor de número de muestra que se aproxima al anterior en el que no exista mucha variación en la desviación estándar.

Resultados

Cargas hidráulicas

El sistema fue ajustado en campo para trabajar a carga hidráulica: baja, media y alta. Los resultados se presentan en la tabla 2.

Tabla 2: Cargas hidráulicas de fotobiorreactores

| Descripción | Fotob. I | Fotob. II | Fotob. III |
|-------------|----------|-----------|------------|
| | Q mín | Q med | Q máx |
| Q (lts/día) | 38.02 | 52.26 | 197.2 |

| Descripción | Fotob. I | Fotob. II | Fotob. III |
|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | Q mín | Q med | Q máx |
| TRH (Hrs) | 23.92 | 13.50 | 7.37 |
| Carga Hidráulica (m3/m2/día) | 1.32 | 3.23 | 5.32 |

Determinación del número de muestra

El resultado final del cálculo del número de muestra se presenta en la tabla 3.

Tabla 3: Segunda corrida para el cálculo de muestra final.

| MUESTRA | FECHA | NITRÓGENO TOTAL |
|-----------------------|-----------|-----------------|
| Muestra 1 | 14/3/2018 | 70 mg/L |
| Muestra 2 | 11/4/2018 | 52 mg/L |
| Muestra 3 | 21/4/2018 | 64 mg/L |
| Promedio : | | 62 mg/L |
| Desviación Estándar : | | 9.17 |
| Grados de libertad : | | 2 |
| "t" 90% : | | 1.886 |
| Error (10%): | | 6.2 |
| Número de Muestra : | | 7.77 |

Conteo de algas *Chlorellas*

Los resultados del conteo de algas *Chlorellas* en el fotobiorreactor, se presentan en la tabla 4.

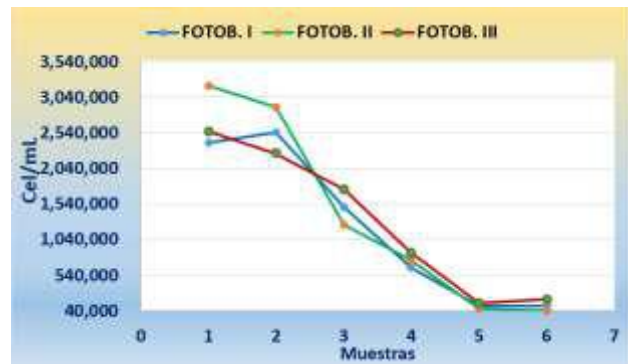
Tabla 4: Resultados de conteo de algas en fotobiorreactores

| MUESTRA | FECHA | FOTOB. I Qmín (cel/mL) | FOTOB. II Q med (cel/mL) | FOTOB. III Q máx (Cel/mL) |
|---------|-----------|------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 1 | 14/3/2018 | 2.40E+06 | 3.20E+06 | 2.56E+06 |
| 2 | 11/4/2018 | 2.55E+06 | 2.90E+06 | 2.25E+06 |
| 3 | 21/4/2018 | 1.50E+06 | 1.25E+06 | 1.75E+06 |
| 4 | 25/4/2018 | 6.50E+05 | 7.50E+05 | 8.50E+05 |
| 5 | 2/5/2018 | 1.08E+05 | 6.80E+04 | 1.44E+05 |

| MUESTRA | FECHA | FOTOB. I Qmín (cel/mL) | FOTOB. II Q med (cel/mL) | FOTOB. III Q máx (Cel/mL) |
|---------|-----------|------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 6 | 16/5/2018 | 1.12E+05 | 4.00E+04 | 2.00E+05 |

La gráfica de la figura 6, muestra los resultados del conteo de algas *Chlorella*.

Figura 6: Cantidad de microalgas *Chlorellas* en fotobiorreactor I, II, III



Potencial de hidrogeno

Las mediciones de las unidades de pH, durante la recolección de muestras para los análisis químicos se presentan en la tabla 5.

Tabla 5: Resultados de unidades de pH en fotobiorreactores

| No. | ENTRADA (U. de pH) | FOTOB. I Qmín (U. de pH) | FOTOB. II Qmed (U. de pH) | FOTOB. III Qmáx (U. de pH) |
|-----|--------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 1 | 7.50 | 9.10 | 9.30 | 9.40 |
| 2 | 6.80 | 8.60 | 8.80 | 8.30 |
| 3 | 7.95 | 8.04 | 8.20 | 8.12 |
| 4 | 7.40 | 8.00 | 8.50 | 8.00 |
| 5 | 5.80 | 7.50 | 8.30 | 7.50 |
| 6 | 4.70 | 6.90 | 6.50 | 6.60 |

| No. | ENTRADA (U. de pH) | FOTOB. I Q _{min} (U. de pH) | FOTOB. II Q _{med} (U. de pH) | FOTOB. III Q _{máx} (U. de pH) |
|-----|-----------------------|---|--|---|
| 7 | 6.72 | 7.24 | 7.03 | 7.94 |
| 8 | 6.30 | 8.20 | 8.50 | 8.60 |
| 9 | 7.20 | 8.10 | 8.50 | 8.60 |

La gráfica de la figura 7, muestra la variación del pH dentro del cada fotobiorreactor.

Figura 7: Comportamiento de medición de pH a la entrada y salida de fotobiorreactor



Nitrógeno total

La tabla 6, muestra los resultados de los análisis de nitrógeno total a la entrada y la salida de los fotobiorreactores.

Tabla 6: Resultados de concentración de nitrógeno total entrada y salida de fotobiorreactor

| No. | ENTR. mg/L | FOTOB I Q _{min} (mg/L) | % REM. | FOTOB II Q _{med} (mg/L) | % REM. | FOTOB III Q _{máx} (mg/L) | % REM. |
|-----|---------------|---------------------------------------|-----------|--|-----------|---|-----------|
| 1 | 79.00 | 74.00 | 6.33 | 68.00 | 13.92 | 66.00 | 16.46 |
| 2 | 58.00 | 55.00 | 5.17 | 51.00 | 12.07 | 48.00 | 17.24 |
| 3 | 78.00 | 68.00 | 12.82 | 70.00 | 10.26 | 68.00 | 12.82 |
| 4 | 79.00 | 62.00 | 21.52 | 63.00 | 20.25 | 64.00 | 18.99 |
| 5 | 63.00 | 60.00 | 4.76 | 60.00 | 4.76 | 56.00 | 11.11 |
| 6 | 67.00 | 53.00 | 20.90 | 58.00 | 13.43 | 54.00 | 19.40 |
| 7 | 68.00 | 55.00 | 19.12 | 54.00 | 20.59 | 51.00 | 25.00 |
| 8 | 56.00 | 47.00 | 16.07 | 55.00 | 1.79 | 52.00 | 7.14 |

| No. | ENTR. mg/L | FOTOB I Q _{min} (mg/L) | % REM. | FOTOB II Q _{med} (mg/L) | % REM. | FOTOB III Q _{máx} (mg/L) | % REM. |
|-----|---------------|---------------------------------------|-----------|--|-----------|---|-----------|
| 9 | 58.00 | 45.00 | 22.41 | 42.00 | 27.59 | 41.00 | 29.31 |

La gráfica de la figura 8, muestra el comportamiento de la concentración de nitrógeno en los fotobiorreactores.

Figura 8: Concentración de nitrógeno total a entrada y salida de fotobiorreactor



El cálculo de las eficiencias de remoción respecto a la entrada y salida en los fotobiorreactores se presenta en la tabla 7.

Tabla 7: Eficiencia en la remoción de concentración de nitrógeno total a la entrada y salida de fotobiorreactores

| DESCR. | ENTR | FOTOB. I (Q min) | | FOTOB. II (Q med) | | FOTOB. III (Q máx) | |
|--|-------|---------------------|-------|----------------------|-------|-----------------------|-------|
| | | Salida mg/l | %REM | Salida mg/l | %REM | Salida mg/l | %REM |
| Análisis para sistema de flujo continuo de la muestra no.1 hasta muestra no.3 | | | | | | | |
| Prom. % | 71.67 | 65.67 | 8.37 | 63.00 | 12.09 | 60.67 | 15.35 |
| máximo % | 79.00 | 74.00 | 12.82 | 70.00 | 13.92 | 68.00 | 17.24 |
| Min % | 58.00 | 55.00 | 5.17 | 51.00 | 10.26 | 48.00 | 12.82 |
| Análisis para sistema de flujo batch de la muestra no.4 hasta muestra no.9 | | | | | | | |
| Prom. % | 65.17 | 53.67 | 17.65 | 55.33 | 15.09 | 53.00 | 18.67 |

| DESCR. | ENTR | FOTOB. I (Q min) | | FOTOB. II (Q med) | | FOTOB. III (Q máx) | |
|----------|-------|---------------------|-------|----------------------|-------|-----------------------|-------|
| | | Salidamg/ | %REM | Salid | %REM | Salid | %REM |
| | | l | . | a | . | a | . |
| máximo % | 79.00 | 62.00 | 22.41 | 63.00 | 27.59 | 64.00 | 29.31 |
| Min % | 56.00 | 45.00 | 4.76 | 42.00 | 1.79 | 41.00 | 7.14 |

Los valores de eficiencia de remoción en la concentración de nitrógeno total a la salida del sistema de fotobiorreactores cuando estos trabajaron a carga hidráulica continua y batch se muestran en el gráfico de la figura 9.

Figura 9: Eficiencia de remoción de nitrógeno total a flujo continuo y batch entrada y salida de fotobiorreactor



Fósforo total

La tabla 8, muestra los resultados del análisis de fósforo total a la entrada y la salida de los fotobiorreactores.

Tabla 8: Resultados de concentración de fósforo total a la entrada y salida de fotobiorreactores

| No. | ENTRADA (mg/L) | FOTOB I Qmin (mg/L) | % REM. | FOTOB II Q med (mg/L) | % REM. | FOTOB III Qmáx (mg/L) | % REM. |
|-----|----------------|---------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|
| 1 | 13.10 | 1.20 | 90.84 | 1.10 | 91.60 | 3.30 | 74.81 |
| 2 | 17.00 | 11.00 | 35.29 | 4.00 | 76.47 | 5.00 | 70.59 |
| 3 | 14.20 | 12.60 | 11.27 | 9.90 | 30.28 | 8.40 | 40.85 |
| 4 | 13.70 | 11.50 | 16.06 | 6.70 | 51.09 | 9.50 | 30.66 |

| No. | ENTRADA (mg/L) | FOTOB I Qmin (mg/L) | % REM. | FOTOB II Q med (mg/L) | % REM. | FOTOB III Qmáx (mg/L) | % REM. |
|-----|----------------|---------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|
| 5 | 13.30 | 11.20 | 15.79 | 10.60 | 20.30 | 12.50 | 6.02 |
| 6 | 13.30 | 17.20 | - | 14.80 | - | 12.00 | 9.77 |
| 7 | 13.50 | 16.40 | - | 15.90 | - | 11.70 | 13.33 |
| 8 | 12.60 | 14.70 | - | 10.20 | 19.05 | 8.20 | 34.92 |
| 9 | 10.80 | 12.20 | - | 8.90 | 17.59 | 7.00 | 35.19 |

La gráfica de la figura 10, muestra el comportamiento de la concentración de fósforo en los fotobiorreactores.

Figura 10: Concentración de fósforo total a entrada y salida de fotobiorreactor



La tabla 9, muestra el cálculo de las eficiencias de los fotobiorreactores en relación a la entrada al sistema, los valores promedios y los porcentajes de remoción, cuando se operó el sistema a flujo continuo y flujo batch.

Tabla 9: Eficiencia en la remoción de concentración de nitrógeno total a la entrada y salida de fotobiorreactores

| DESCR. | ENTR. | FOTOB. I (Q min) | | FOTOB. II (Q med) | | FOTOB. III (Q máx) | |
|--|-------|---------------------|------|----------------------|------|-----------------------|------|
| | | Salida | %REM | Salida | %REM | Salida | %REM |
| | | mg/l | . | mg/l | . | mg/l | . |
| Análisis para sistema de flujo continuo de muestra no.1 hasta muestra no.3 | | | | | | | |

| DESCR. | ENTR. | FOTOB. I | | FOTOB. II | | FOTOB. III | |
|---|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|
| | | (Q min) | | (Q med) | | (Q máx) | |
| | | Salida mg/l | %REM | Salida mg/l | %REM | Salida mg/l | %REM |
| Promedio % | 14.77 | 8.27 | 44.02 | 5.00 | 66.14 | 5.57 | 62.30 |
| máximo % | 17.00 | 12.60 | 90.84 | 9.90 | 91.60 | 8.40 | 74.81 |
| Min % | 13.10 | 1.20 | 11.27 | 1.10 | 30.28 | 3.30 | 40.85 |
| Análisis para sistema de flujo <i>batch</i> de la muestra no.4 hasta muestra no.9 | | | | | | | |
| Promedio % | 12.87 | 13.87 | -7.77 | 11.18 | 13.08 | 10.15 | 21.11 |
| máximo % | 13.70 | 17.20 | 16.06 | 15.90 | 51.09 | 12.50 | 35.19 |
| Min % | 10.80 | 11.20 | - | 6.70 | - | 7.00 | 6.02 |

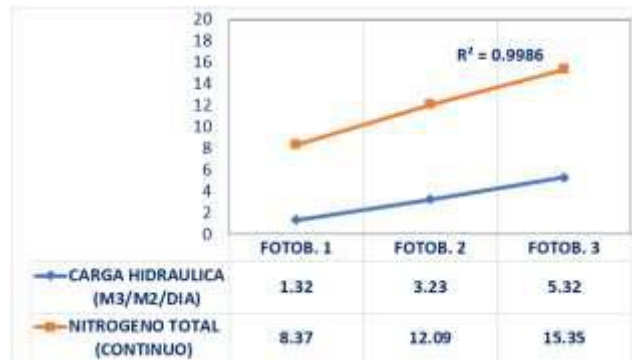
Los valores de eficiencia de remoción en la concentración de fósforo total a la salida del sistema de fotobiorreactores cuando estos trabajaron a carga hidráulica continua y batch se muestran en el gráfico de la figura 11.

Figura 11: Concentración de fósforo total a entrada y salida de fotobiorreactor



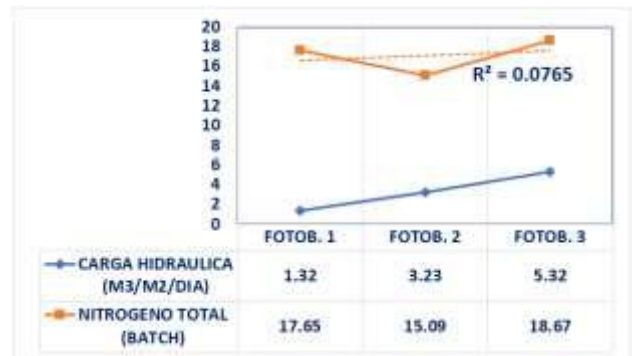
La gráfica de la figura 12, muestra el resultado del análisis de correlación de la carga hidráulica y la concentración resultante de nitrógeno total del proceso de remoción en los fotobiorreactores, cuando el sistema trabajó a flujo continuo.

Figura 12: Análisis de correlación de la carga hidráulica y nitrógeno total flujo continuo



La gráfica de la figura 13, muestra el resultado del análisis de correlación de la carga hidráulica y la concentración resultante de nitrógeno total obtenida en los fotobiorreactores, cuando el sistema trabajó a flujo batch.

Figura 13: Análisis de correlación de la carga hidráulica y fósforo total flujo batch



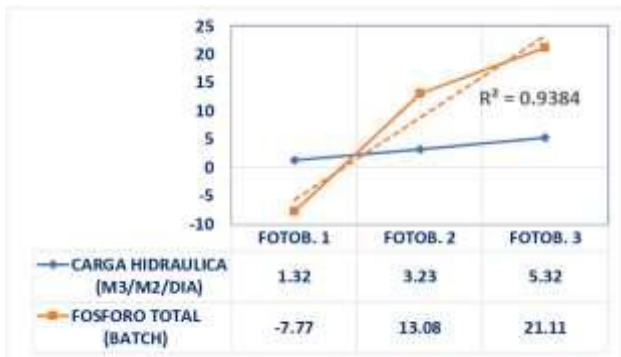
La gráfica de la figura 14, muestra el resultado del análisis de correlación de la carga hidráulica y la concentración resultante de fósforo total obtenida en los fotobiorreactores, cuando el sistema trabajó a flujo continuo.

Figura 14: Análisis de correlación de la carga hidráulica y fósforo total flujo continuo



La gráfica de la figura 15, muestra el resultado del análisis de correlación de la carga hidráulica y la concentración resultante de fósforo total obtenida en los fotobiorreactores, cuando el sistema trabajó a flujo batch.

Figura 15: Análisis de correlación de la carga hidráulica y fósforo total flujo batch



Análisis de resultados

Los resultados de los análisis presentados en este artículo, corresponden al período de operación y funcionamiento del sistema de fotobiorreactores durante los meses de marzo a mayo del año 2018. El funcionamiento a condiciones hidráulicas de flujo continuo corresponde a las tres primeras muestras, y el periodo de funcionamiento a condiciones de flujo tipo batch, es de la cuarta muestra a la novena.

Durante el periodo que el fotobiorreactor trabajó a flujo continuo, se observó una decoloración, debido a que las algas salían del sistema, y por ello se procedió a trabajar el sistema a tipo batch, esto a partir de la cuarta muestra, decisión tomada con el objetivo de garantizar

el tiempo de retención hidráulico definido en el diseño y así de este modo evitar que, las algas salieran del sistema.

En la fase de evaluación del sistema de fotobiorreactores, se presentaron agentes externos; los cuales salen fuera del alcance y control de este estudio, como es el tema del mantenimiento que se realizan a las instalaciones de la planta de tratamiento de aguas residuales, por parte de la administración de la Universidad de San Carlos, dado que, detuvieron el funcionamiento de la planta, para hacer mejoras en el tanque sedimentador I y por ello, el caudal fue desviado del sistema de los filtros percoladores.

Determinación del número de muestras

En la tabla 3, se muestran los resultados del cálculo del número de muestra final, el que se obtuvo en la segunda corrida. El número de muestra dio igual a 8 muestras, sin embargo para tener mayor información del comportamiento de remoción de nutrientes en los fotobiorreactores se realizaron 9 muestras.

Conteo de algas en el fotobiorreactor

La tabla 4, muestra los resultados del conteo de algas Chlorella; además indica que, el máximo crecimiento de microalgas, corresponde a los 7 días de estabilización de los fotobiorreactores, y que posteriormente cuando el sistema entra en operación, la cantidad de algas dentro del fotobiorreactor va en decadencia (ver figura 6), lo cual se atribuye al poco tiempo de retención que tenían las unidades, dado que se observó que la biomasa formada empezó a salir del sistema.

Potencial de hidrógeno en fotobiorreactor

De acuerdo a Romero (1999), el uso que hacen las algas del CO2 puede inducir a elevar el pH. Lo cual se hizo evidente, en el monitoreo realizado a las muestras después de 7 días, tiempo que se dejó estabilizar el sistema dándose el cambio de coloración, por el máximo crecimiento de algas.

La tabla 5, presentan los resultados de las mediciones del pH dentro del sistema de fotobiorreactores. Durante la fase de muestreo correspondiente a las tres primeras muestras en el que el fotobiorreactor trabajó a flujo continuo, se pudo observar que en los fotobiorreactores I, II y III, se generó un decaimiento del pH en un rango de 9.0 hasta 8.0 unidades de pH (ver Figura 7).

Concentración de nitrógeno total

El valor de la concentración de nitrógeno total en el ingreso de los fotobiorreactores fue en promedio de 67.33 mg/l, con valor máximo de 79 mg/l y un mínimo de 56 mg/l. Figura 8

La tabla 6, presenta los resultados de las concentraciones de la entrada y salida del fotobiorreactor. En el gráfico de la figura 9, se observa que, cuando los fotobiorreactores trabajaron a carga hidráulica continua, las eficiencias de remoción incrementan linealmente desde un 8.37 %, 12.09 %, a 15.35 %. Se puede observar mayores remociones para los fotobiorreactores, cuando estos trabajaron a flujo batch para los que se obtuvo valores de eficiencias de 17.65 %, 15.09 %, 18.67 %.

Concentración de fósforo total

La concentración de fósforo total en el ingreso de los fotobiorreactores fue de 13.5 mg/l. Existen factores, que hacen que se dificulte la remoción de fosfatos por parte de las algas, como un pH excesivamente alto o bajo, o la ausencia de iones como potasio, sodio o magnesio. (Ruíz, 2011, pág. 33)

La tabla 8, se presentan los resultados del fósforo total. La gráfica de la figura 10, indica el comportamiento del fósforo total, en los fotobiorreactores, el cual tiende a incrementarse en las muestras de la 1 a la 3, cuando el pH tuvo una tendencia a la bajar. Finalmente, en las muestras de la 4 a la 9 se aprecia una tendencia a aumentarse la concentración de fósforo lo cual responde a que en estas muestras los fotobiorreactores trabajaron a flujo batch.

En la gráfica 11, se indica que cuando los fotobiorreactores trabajaron a carga hidráulica continua lograron obtener altos índices de eficiencias de remoción de 44.02 %, 66.14 %, 62.30 %, los cuales incrementan linealmente en los fotobiorreactores I y II; para el fotobiorreactor III baja la tendencia a incrementar, pero aun así, la eficiencia es alta. Para los fotobiorreactores trabajando a carga hidráulica batch se muestran menores resultados de remoción, con valores de eficiencias en el fotobiorreactor II y III de 13.08 % y 21.11 %; y en el caso del fotobiorreactor I el resultado es adverso por el aumento en la concentración. De acuerdo a las eficiencias de remoción para fósforo total, la carga hidráulica a flujo batch hace que el sistema baje su eficiencia de remoción, probablemente por la

poca aireación dentro de los fotobiorreactores y por el consumo excesivo del CO₂.

Análisis de correlación

Se utilizó el programa SPSS como herramienta de cálculo; para determinar el grado de correlación entre la carga hidráulica y los nutrientes principales: nitrógeno total y fósforo total, resultantes del proceso de tratamiento de las aguas residuales en el fotobiorreactor, cuando éste trabajó a flujo continuo y a flujo batch.

La gráfica de la figura 12, presenta los resultados del análisis de correlación. El coeficiente de correlación de Pearson da un valor de 0.998, lo que indica que sí hay una fuerte correlación positiva, entre la carga hidráulica y la remoción de nitrógeno total, a mayor carga hidráulica la remoción es mayor para las unidades trabajando a flujo continuo, lo cual confirma la hipótesis planteada en la investigación dado que, la significancia bilateral es de $0.041 < 0.05$.

La gráfica de la figura 13, presenta los resultados del análisis de correlación. El coeficiente de correlación de Pearson da un valor de 0.301, lo que indica que no existe ninguna correlación, entre la carga hidráulica y la remoción de nitrógeno total, a carga hidráulica batch, y en este caso no hay comprobación de hipótesis dado que, la significancia bilateral es de $0.805 > 0.05$.

La gráfica de la figura 14, presenta los resultados del análisis de correlación. El coeficiente de correlación de Pearson da un valor de 0.757, lo que indica que no existe ninguna correlación, entre la carga hidráulica y la remoción de fósforo total, a carga hidráulica continua, y en este caso no hay comprobación de hipótesis dado que, la significancia bilateral es de $0.454 > 0.05$.

La gráfica de la figura 15, presenta los resultados del análisis de correlación. El coeficiente de correlación de Pearson da un valor de 0.962, el resultado indica que hay cierta relación entre la carga hidráulica y la remoción de fósforo total, a carga hidráulica batch, pero en este caso no hay comprobación de hipótesis dado que, la significancia bilateral es de $0.176 > 0.05$.

Para obtener mejores resultados en la eficiencia de remoción de nutrientes, se debe de instalar los fotobiorreactores en la Planta Piloto de Tratamientos de Aguas Residuales de ERIS-USAC Aurora II, Zona 13 Ciudad de Guatemala; porque esta provee una generación constante de aguas residuales de origen

doméstico durante todo el año. Además el fotobiorreactor, debe suministrarse agua residual de un sedimentador secundario, lo que reducirá la carga orgánica a la entrada del sistema para no interferir en el proceso de tratamiento con las microalgas, a fin de obtener mejor eficiencia en la remoción de nutrientes.

Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos, la carga hidráulica en los fotobiorreactores trabajando a flujo continuo, ejerce un efecto significativo en la remoción de nitrógeno total, al obtener una correlación de Pearson de 0.998 a 1, con significancia bilateral de 0.041 y un nivel de certeza del 95 %. Cuando el sistema de fotobiorreactores trabajó a flujo batch, los resultados indicaron que la carga hidráulica no ejerce efecto significativo en la remoción de nitrógeno total, la correlación de Pearson es de 0.301 y significancia de 0.805.

En el caso del fósforo total a flujo continuo, la carga hidráulica no ejerce un efecto significativo, la correlación de Pearson es de 0.757 y la significancia es 0.454. La carga hidráulica en los fotobiorreactores para el fósforo total trabajando a flujo tipo batch, no ejerce un efecto significativo, la correlación de Pearson es de 0.962 y la significancia de 0.176.

La máxima producción de microalgas, se obtuvo en el fotobiorreactor que trabajó a caudal medio, con un valor de 3.2×10^6 cel/mL al séptimo día de su funcionamiento. Para el fotobiorreactor que funcionó a caudal mínimo, el valor obtenido fue de 2.4×10^6 cel/mL y para el fotobiorreactor que funcionó a caudal máximo el valor obtenido fue de 2.56×10^6 cel/mL.

La remoción del nitrógeno total bajo el flujo continuo para caudal mínimo fue de 8.37 %, para caudal medio fue de 12.09 % y para caudal máximo fue de 15.35 %. Se logró mejor resultados de remoción para nitrógeno total a flujo tipo batch, con resultados, para caudal mínimo de 17.65 %, para caudal medio de 15.09 %, y para caudal máximo de 18.67 %.

La remoción del fósforo total con el fotobiorreactor trabajando a flujo continuo, para caudal mínimo fue de 44.02 %; para caudal medio fue de 66.14 %; para caudal máximo fue de 62.30 %, lo que demostró buena remoción en la etapa de operación a flujo continuo. Los resultados de remoción para el fósforo total, con el fotobiorreactor trabajando a flujo batch fue de -7.77 % para caudal mínimo; 13.08 % para caudal medio y

21.11 % para caudal máximo; lo que resulta deficiente para el fotobiorreactor I y mejor remoción para los fotobiorreactor II y III.

Los tiempo de retención a que fue sometido el fotobiorreactor I, fue de 23.92 horas, el fotobiorreactor II, fue de 13.50 horas y el fotobiorreactor III, de 7.37 horas; lo cual no fue suficiente, dado que al trabajar estos en continuo, se pudo observar barrido de la biomasa de algas.

Agradecimiento

Al personal de la ERIS y del Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina".

Referencias

- Aguilar Carrera, F. A. (Agosto de 2017). Trabajo de graduación de doctorado. Análisis del proceso de fitorremediación con algas clorofitas en las estaciones depuradoras de agua residual, para mitigar los efectos de eutrofización de los cuerpos receptores. Guatemala, Guatemala: Escuela de Posgrado USAC.
- Argueta Gálvez, J. E., & Blandón Blandón, R. A. (Agosto de 2016). Estudio especial. Modelo matemático para determinar el nivel de eficiencia de remoción de nutrientes a través del uso de algas clorofitas después de los filtros percoladores en tratamiento de aguas residuales. Guatemala, Guatemala: ERIS.
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. Elsevier, 295-306.
- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000). Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Santafé de Bogotá: McGraw-Hill.
- Guerra, H., & Zea, M. (Noviembre de 2015). Estudio especial. Identificación de algas en los efluentes del sistema de filtros percoladores de la PTAR de la USAC de Guatemala y de la PTAR Ing. Arturo Pasos, para uso potencial en remoción de nitrógeno y fósforo. Guatemala, Guatemala: ERIS.
- Metcalf & Eddy, I. (1995). Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización (1 ed.). Madrid: Mc Graw Hill/Interamericana de España, S.A.

- Mona, A. (2013). Sustainable algal biomass products by cultivation in waste water flows. Espoo, Finland: VTT TECHNOLOGY 147.
- Oviedo, E. (2018). Determinación del efecto de la carga hidráulica sobre la remoción de nutrientes en un fotobiorreactor de cultivo mixto de algas clorofitas, en la planta tratamiento de aguas residuales de la USAC, Guatemala, Guatemala, ERIS USAC.
- Romero, J. (1999). Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Walpole, R. E. (1999). Probabilidad y estadística para ingenieros. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A.

Información de los autores

Ingeniero civil, Edwin Moisés Oviedo Acuña, graduado en la facultad de ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, maestro en ciencias en ingeniería sanitaria de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos ERIS, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Ingeniero civil, Félix Alan Douglas Aguilar Carrera, graduado en la facultad de ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, doctor en ciencias en cambio climático y sostenibilidad, graduado de la Escuela de Posgrados de la Universidad de San Carlos de Guatemala, maestro en ciencias en ingeniería sanitaria de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos ERIS, de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Profesor titular de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria de la Universidad de San Carlos de Guatemala.