

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

RENDIMIENTO DE UN REACTOR AEROBIO DE LECHO FLUIDIZADO CON TERCERA CÁMARA EN LA REMOCIÓN DE NITRÓGENO

*Paula Andrea Montenegro Chaucanes'
Tsunao Matsumoto'
Milton Dall'Aglio Sobrinho'

PERFORMANCE OF A BIOFILM AIRLIFT SUSPENSION REACTOR WITH THIRD CHAMBER IN NITROGEN REMOVAL

Recibido el 20 de septiembre de 2017; Aceptado el 16 de octubre de 2018

Abstract

This paper shows the operation of a Biofilm Airlift Suspension – BAS reactor, with concentric pipes adding a third chamber (an additional concentric pipe), to generate two reaction zones, an aerobic zone for the chambers 1 and 2, the chamber 1 being fully aerobic by the action of the gas injector, and the chamber 2 moderately aerobic by the action of recirculating air bubbles; and an anoxic zone for the chamber 3, due to the non-recirculation of air bubbles towards this chamber. This configuration is intended of facilitate the process of nitrification and denitrification. The results obtained to removal COD were $3.69 \pm 1.44 \text{ Kg COD m}^{-3}\text{d}^{-1}$ with a removal efficiency of $80.5 \pm 9.6\%$, and an average total nitrogen removal of $0.18 \pm 0.07 \text{ kg N m}^{-3} \text{ d}^{-1}$, with a removal efficiency of $42.27 \pm 17\%$, with a HRT of 3 hours and the application of two flow rates.

Keywords: nitrification, denitrification, biofilm airlift suspension reactor, simultaneous nitrification denitrification.

¹Departamento de Ingeniería Civil, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus Ilha Solteira, Brasil.

*Autor correspondente: Departamento de Ingeniería Civil, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus Ilha Solteira, Brasil. Email: paula_andrea_mon@hotmail.com

Resumen

El presente estudio muestra el funcionamiento de un reactor aerobio de lecho fluidizado – BAS reactor, de tubos concéntricos con la adición de una tercera cámara (un tubo concéntrico adicional), con el fin de generar dos zonas de reacción, una zona aerobia para las cámaras 1 y 2, siendo la cámara 1 totalmente aerobia por acción del inyector de gas, y la cámara dos medianamente aerobia por acción de la recirculación de burbujas de aire, y una zona anóxica para la cámara 3, debido a la no recirculación de burbujas de aire hacia esta cámara. Esto con el objetivo de facilitar, los procesos de nitrificación y desnitrificación. Los valores medios obtenidos en la remoción de DQO fueron $3.69 \pm 1.44 \text{ Kg DQO m}^{-3}\text{d}^{-1}$ para una eficiencia de remoción del $80.5 \pm 9.6\%$ y una remoción media de Nitrógeno Total de $0.18 \pm 0.07 \text{ Kg N m}^{-3} \text{ d}^{-1}$, para una eficiencia de remoción del $42.27 \pm 17 \%$, con un TRH de 3 horas y la aplicación de dos relaciones de flujo. El reactor con la configuración de tubos concéntricos propuesta proporcionó zonas de reacción bien diferenciadas, manteniendo concentraciones de OD diferentes, aunque la zona anóxica no alcanzó a mantener concentraciones menores a 1 mg.L^{-1} , el reactor presentó remoción de nitrógeno, por lo tanto, puede servir como un reactor prometedor para remoción de DQO y nitrógeno.

Palabras clave: reactor aerobio de lecho fluidizado, nitrificación, desnitrificación, nitrificación desnitrificación simultáneas.

Introducción

El agua residual doméstica en general está compuesta por un 99% de agua, el restante contiene una abundancia de compuestos nitrogenados, compuestos carbonados y de lípidos en menores cantidades (Bungay y Bungay, 2009), los cuales deben ser retirados antes de su vertimiento en los cuerpos de agua para evitar el consumo de oxígeno, problemas de toxicidad acuática y la eutrofización.

La remoción biológica convencional del nitrógeno envuelve la combinación de los procesos de nitrificación y desnitrificación, el primero hace referencia a la conversión biológica de amonio a nitrato, el cual es un proceso estrictamente aerobio, mientras el segundo ocurre en condiciones anóxicas donde el nitrato es reducido a nitrógeno gaseoso (EPA, 1993) y (WEF, 2009). Para conseguir estos dos ambientes de reacción se ha planteado trabajar en un reactor aerobio de lecho fluidizado, aprovechando la alta tasa de transferencia de oxígeno que este tipo de reactor posee, entre otras más ventajas (Li et al., 2008), para así garantizar el proceso de nitrificación y, para conseguir una región anóxica en este mismo reactor se ha propuesto adicionar un tubo concéntrico externo que impida la entrada y circulación de burbujas de aire, generando así las condiciones para que el proceso de desnitrificación se desarrolle dentro de este mismo reactor.

La recirculación de un fluido trifásico a través de tubos cilíndricos y concéntricos, denominados como *riser* y *downcomer* según el sentido del flujo, es la clave del funcionamiento de este tipo de reactores. Y la inyección de aire en el fondo del tubo *riser* es la responsable de generar la fuerza motriz de dicha recirculación debido a la diferencia de presión del fluido entre los tubos *riser* y *downcomer*, La adición de partículas inertes con diámetros inferiores a 2 mm (la fase sólida del fluido) como arena, carbón activado, entre otros; sirven como soporte de los microorganismos

responsables de llevar a cabo los procesos biológicos del tratamiento del agua residual. El uso de partículas pequeñas como medio de soporte puede incrementar el área superficial del reactor hasta valores de $2000 - 4000\text{m}^2/\text{m}^3$ del volumen total del reactor (van Loosdrecht, *et al.*, 2000), aumentando así la capacidad de concentración de microorganismos en un reactor compacto y además permitiendo tratar cargas volumétricas elevadas a bajos tiempos de retención hidráulica.

La literatura no reporta muchos trabajos en los que se haya usado un reactor de lecho fluidizado con una configuración de tubos concéntricos como la propuesta. Van Benthum *et al.*, (1999a) quienes usaron una configuración igual, alcanzaron una eficiencia de remoción de nitrógeno del 95%. Como referencia de comparación fueron también tomados en cuenta otros reactores aerobios en cuanto a la remoción de nitrógeno, como el reactor aerobio de lecho fluidizado consiguiendo una eficiencia de remoción de NT del 72% (Gebara, 2006), un reactor de lecho fluidizado integrado con un decantador (Zhang y Wei, 2013) el cual reportó una eficiencia de remoción de nitrógeno del 76.3%, tres reactores de lecho fluidizado reportados por Correia (2012), alcanzando eficiencias del 38, 40 y 54%. Este trabajo también fue comparado con otro tipo de reactores como los de lecho móvil, Zinatizadeh y Ghaytooli (2015) que reportaron eficiencias de remoción de NT del 46 y 50%. Finalmente, una planta de tratamiento convencional de lodos activados donde fue alcanzada una eficiencia de remoción de nitrógeno del 50% la cual fue reportada por Nourmohammadi *et al.*, (2013).

El objeto de esta investigación es evaluar el desempeño del reactor de lecho fluidizado con tercera cámara, abordando dos condiciones hidráulicas diferentes y su influencia en la remoción de nitrógeno, a fin de presentar este reactor como una estrategia favorable en el tratamiento de agua residual doméstica para la remoción de materia orgánica y nitrógeno.

Materiales y métodos

La figura 1 indica el esquema de funcionamiento del experimento. El reactor fue construido en PVC. Los diámetros de los tubos concéntricos fueron 0.05, 0.10 y 0.20 m. La altura total del reactor fue 2.00 m para un volumen útil de 0.055 m^3 (55 L). Las partículas soporte usadas para este experimento fueron partículas de tereftalato de polietileno (PET) triturado, de diámetros entre 0.85 a 1.12 mm, densidad específica de 390 kg m^{-3} y área superficial específica de $13.59\text{ m}^2\text{g}^{-1}$.

El reactor fue aireado continuamente mediante un difusor de aire usando una piedra porosa de vidrio en el fondo del reactor conectado a un compresor de aire, el caudal aplicado durante la operación fue de 400 L h^{-1} , el cual fue controlado por un rotámetro. Adicional a este difusor, el reactor contó con una inyección de aire ubicada en el fondo del reactor en el tubo 3 con el fin de ser usado para re-suspender partículas que se encuentren sedimentadas.

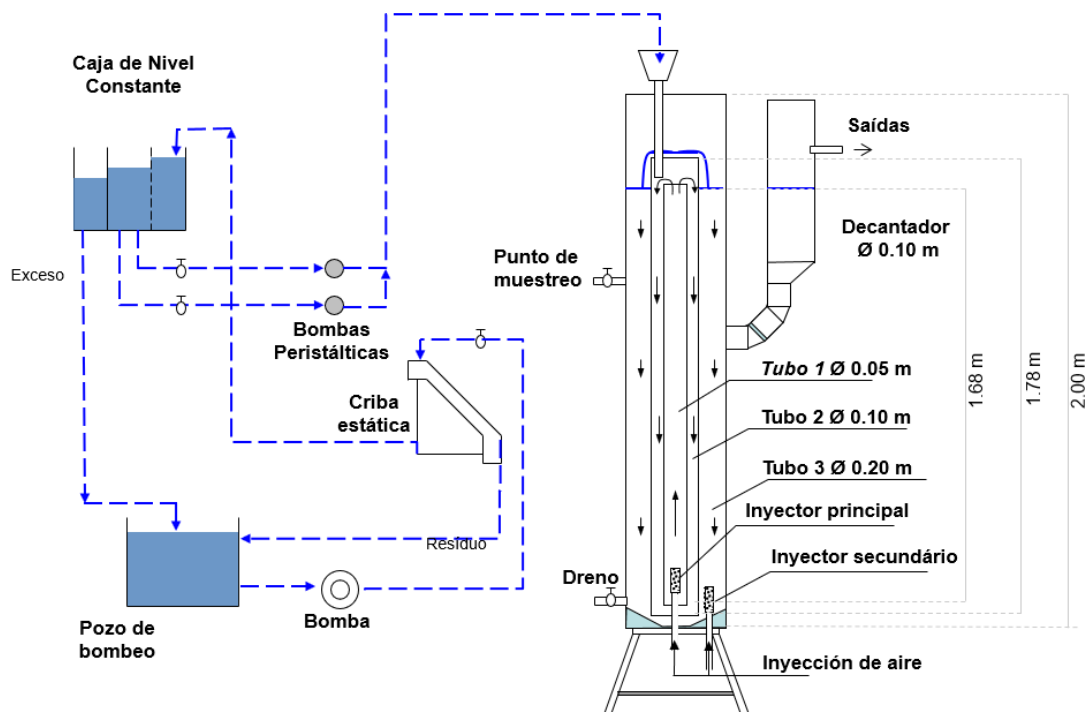


Figura 1. Esquema de funcionamiento del reactor

El reactor fue aireado continuamente mediante un difusor de aire usando una piedra porosa de vidrio en el fondo del reactor conectado a un compresor de aire, el caudal aplicado durante la operación fue de 400 L h^{-1} , el cual fue controlado por un rotámetro. Adicional a este difusor, el reactor contó con una inyección de aire ubicada en el fondo del reactor en el tubo 3 con el fin de ser usado para re-suspender partículas que se encuentran sedimentadas.

El afluente usado fue agua residual doméstica (de la ciudad de Ilha Solteira – SP, Brasil) después de pasar por una criba estática, la alimentación del reactor se realizó mediante una bomba peristáltica con un caudal de 0.05 L s^{-1} controlado por medio de un inversor de frecuencia. La DQO del afluente se mantuvo entre 500 y 700 mg L^{-1} , un pH fluctuando entre 7.2 y 7.6 y temperatura oscilando entre los 15 a 30°C debido a las condiciones climáticas de la región.

Los puntos de muestreo fueron en la entrada y la salida del reactor para los parámetros de DQO, Nitrógeno Total, Nitrógeno amoniacal como $\text{NH}_3\text{-N}$ y Nitrato. El oxígeno disuelto fue monitoreado en el afluente, efluente, en la parte superior del tubo *riser* y en la altura media de la cámara del tubo 3 (externo), usando un oxímetro (YSI *incorporated*® modelo 55). Los métodos de análisis para estos parámetros fueron el método colorimétrico (flujo cerrado) para DQO y por método colorimétrico con Kit (HACH®) para nitrógeno total, amoniacal y nitrato, según lo indicado en los Métodos Estándar para el Análisis de Agua y Agua residual (1992).

Durante la operación fueron aplicadas tres relaciones de caudal diferentes para cada una de las cámaras, las cuales fueron controladas cambiando la altura en la salida del reactor, lo cual indujo a una variación en la altura del nivel del agua residual en el reactor. El tiempo de retención celular del reactor fue aproximadamente 3.5 días.

Operación del reactor

El primer periodo de operación del reactor fue denominado como tiempo de adaptación de los microorganismos, en la cual el reactor fue alimentado con el agua residual y además fueron añadidas de forma gradual las partículas soporte. Semanalmente fueron añadidas 325 g hasta alcanzar 1300 g. Para el monitoreo de este periodo de adaptación fueron realizados análisis de DQO con el fin de identificar la estabilidad en el sistema. Este periodo tuvo una duración de 40 días.

Una vez se alcanzó la estabilización del reactor, el reactor operó de forma continua durante 100 días, este periodo de operación se dividió en dos etapas en las cuales se aplicó diferentes relaciones de caudal para cada una de las cámaras afectando así la recirculación del sistema, la Tabla 1 indica estas relaciones.

Tabla 1. Relación de caudales para cada cámara

Altura del nivel de agua (m)	Relaciones de caudal (Tubo1:Tubo2:Tubo3)	Relación
1.76	5.5 : 4.5 : 1.0	1
1.79	5.0 : 4.0 : 1.0	Transición
1.81	4.8 : 3.8 : 1.0	2

Nota: La relación de Transición fue usada durante un tiempo corto (una semana) para evitar desestabilizar el sistema entre una relación y otra.

Resultados e discusión

Las concentraciones de OD para el afluente, efluente, y las cámaras aerobia y anóxica pueden observarse en la Figura 2. El afluente y efluente presentaron concentraciones de 0.22 ± 0.24 mg O₂ L⁻¹ y 0.79 ± 0.64 mg O₂ L⁻¹ respectivamente, indicando así que, a pesar de la oxigenación aplicada en el reactor, existe alta demanda del gas por oxidación de materia orgánica y oxidación de amonio en todo el sistema.

La cámara aerobia presentó una concentración de 3.57 ± 1.24 mg O₂ L⁻¹, lo cual evidencia que el caudal de aire de 400 L h⁻¹ es suficiente para transferir la cantidad de oxígeno suficiente para permitir los procesos de oxidación de materia orgánica y de nitrificación, siendo este último el más exigente en cuanto a la cantidad de oxígeno disponible, requiriendo de al menos 2 mg L⁻¹ (WEF, 2009), y en la cámara anóxica esta concentración fue de 1.41 ± 0.78 mg O₂ L⁻¹,

concentración superior a lo que se esperaba para una zona de reacción anóxica, ya que las condiciones necesarias para forzar a las bacterias facultativas a quebrar las moléculas de nitrato para usar el oxígeno es menor a $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (WEF, 2009).

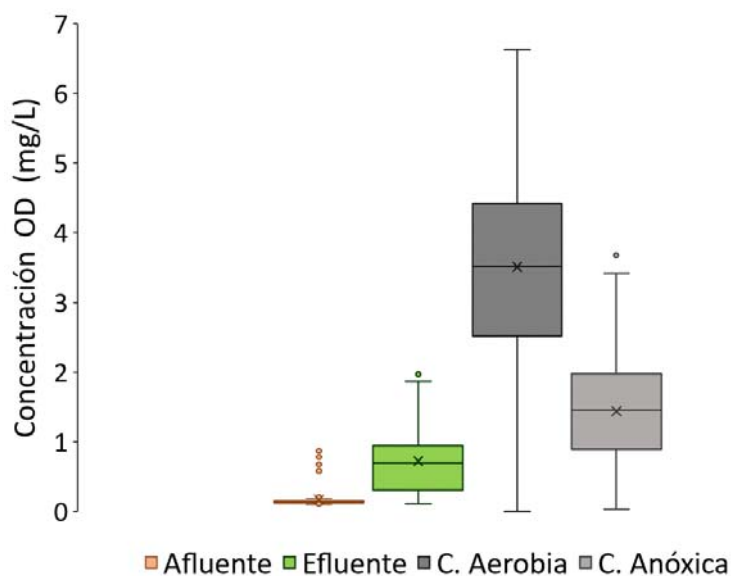


Figura 2. Concentración del OD en diferentes puntos del reactor

La figura 3 ilustra las cargas volumétricas de DQO del afluente y efluente y la eficiencia de remoción en función del tiempo, como también puede ser evidenciado el efecto de la relación de caudal sobre el comportamiento del proceso. El afluente presentó una carga de $4.65 \pm 2.22 \text{ kg DQO m}^{-3} \text{ d}^{-1}$. El sistema consiguió remover una carga de $3.69 \pm 1.44 \text{ kg DQO m}^{-3} \text{ d}^{-1}$, lo cual es comparable con otros reactores reportados en la literatura. Zhang y Wei (2013), reportaron una carga removida de $0.12 \text{ kg DQO m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ en un reactor aerobio de lecho fluidizado para un TRH de 16 horas, y Fdez- Polanco (1994), que reportó una carga removida de $1.2 \text{ kg DQO m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ en un reactor piloto de lecho fluidizado anaerobio – aerobio para la remoción simultánea de carbono y nitrógeno de agua residual doméstica.

De esta forma fue alcanzada una eficiencia de remoción de $80,5 \pm 9,6\%$ lo cual también coincide con eficiencias reportadas en la literatura (Fdez-Polanco, 1994) que alcanzó una eficiencia del 80% en la remoción de DQO. Guevara (2006), trabajó con dos reactores de lecho fluidizado en el tratamiento de agua residual doméstica, alcanzando una eficiencia de remoción de DQO del 89% para ambos reactores para un TRH de 3 horas, por su parte Correia (2012), consiguió una eficiencia del 90% para un reactor de lecho fluidizado variando la concentración del material soporte.

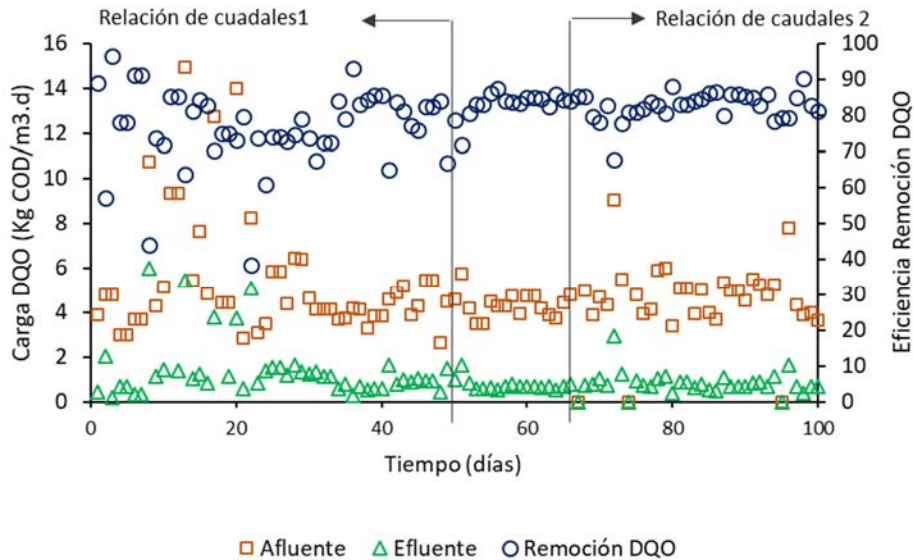


Figura 3. Remoción de la carga orgánica DQO

El comportamiento que presenta esta variable parece estar ligada a la carga de entrada, identificando que la eficiencia se torna estable cuando la carga a la entrada del sistema no presenta variaciones bruscas. Analizando también la influencia que ejerce la relación de caudales en las diferentes cámaras, puede decirse que para la relación 1, aunque alcanzó remociones por encima del 90%, el comportamiento no fue estable, llegando a presentar eficiencias por debajo del 70%. Por otra parte, para la relación 2, aunque la eficiencia de remoción no superó el 90%, esta se mantuvo constante durante el periodo en que esta relación de caudales fue aplicada, presentando eficiencias por encima del 80% en su mayoría.

En cuanto al nitrógeno (Figura 4), la carga volumétrica en el afluente fue de $0.47 \pm 0.23 \text{ kg NT m}^{-3} \text{ d}^{-1}$, removiendo una carga de $0.18 \pm 0.17 \text{ kg NT m}^{-3} \text{ d}^{-1}$, alcanzando una eficiencia de remoción del $42.27 \pm 17\%$, valor que se encuentra por debajo del reportado por van Benthum *et al.* (1999a), quienes alcanzaron una remoción de NT del 95%, los autores enfatizan en la disminución de la velocidad en la extensión (como los autores llaman a la cámara 3). Por otra parte, (Zhang y Wei, 2013) reportaron una eficiencia del 76.3%, cabe resaltar que para el reactor de lecho fluidizado usado el TRH fue de 16 h, y consiguió una zona anóxica en el decantador del reactor antes de la salida. De la misma forma, fue obtenida una remoción del 72% para un reactor de lecho fluidizado con un TRH de 3 horas, el cual fue reportado por Gebara (2006), el autor indica que fueron variadas las condiciones hidráulicas del sistema al disminuir el diámetro del *riser*, para un caudal de aire de 2100 L.h^{-1} . Correia (2012) también trabajó con reactores de lecho fluidizado, quien reportó una eficiencia de remoción de NT del 38, 40 y 54% incrementando la concentración del medio de soporte. Zinatizadeh y Ghaytooli (2015), reportaron eficiencias de 46 y 50% bajo condiciones de TRH de 4 a 12 horas para un reactor de lecho móvil.

Por otra parte, comparando la eficiencia conseguida por el reactor de lecho fluidizado con tercera cámara propuesto en este estudio con un tratamiento convencional de lodos activados, se tiene que la eficiencia alcanzada en este trabajo se encuentra cerca de la conseguida por Nourmohammadi *et al.*, (2013), quienes alcanzaron una remoción aproximadamente del 50% para una planta de tratamiento con lodos activados y filtro por goteo.

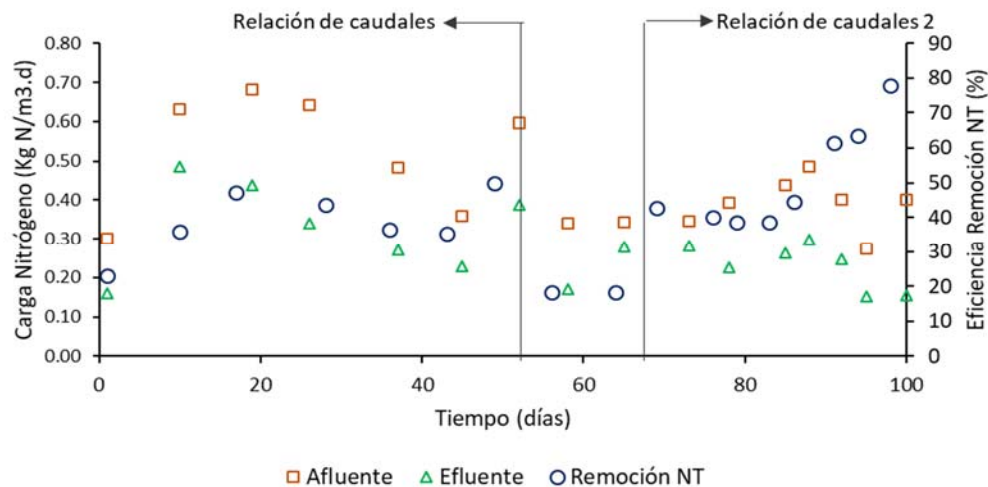


Figura 4. Remoción del nitrógeno total

En la Figura 4 puede ser observado el comportamiento de la remoción de nitrógeno, para el cual puede identificarse que para la relación de caudales 1, tuvo una tendencia creciente, la eficiencia de remoción máxima alcanzada operando en esta condición hidráulica fue de 50%. El comportamiento de la eficiencia de remoción operando en la relación 2 fue igualmente creciente, sin embargo, consiguió alcanzar una eficiencia de remoción máxima del 78%, lo cual puede estar relacionado a que la nitrificación es mayor para esta relación hidráulica, debido a que existe mayor oxigenación del agua residual durante la aplicación de la relación 2.

Conclusiones

Con los resultados obtenidos se puede concluir que en términos de DQO y NT, la relación de caudales 1 benefició los procesos de remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno.

Adicionalmente, la relación de caudales 2 favoreció el proceso de nitrificación, incrementando la oxidación de amoníaco.

Aunque la cámara del tubo 3 no alcanzó a mantener concentraciones de OD menores a 0,5 mg/L, el reactor consiguió remover nitrógeno.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Estatal Paulista – UNESP, por el recurso humano y la estructura brindada, a la Fundação de Ensino, Pesquisa e Extensão de Ilha Solteira – FEPISA, por haber brindado los recursos necesarios para los insumos operacionales de este trabajo de investigación, y a la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível Superior – CAPES, por la beca otorgada.

Referencias bibliográficas

- Bungay, M. L., Bungay, H. R. (2009). Fundamental Concepts for Environmental Processes. In Wang L. K., Pereira N. C. y Hung Y. T. (Eds.), *Handbook of Environmental Engineering, Biological Treatment Processes*, Humana Press, New York. 1 – 27.
- Gebara, D. (2006) *Desempenho de um reator aeróbio de leito fluidizado no tratamento de esgoto sanitário*, Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação da Escola Politécnica na Área de Engenharia Hidráulica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 402 pp.
- EPA (1993) *Process Design Manual: Nitrogen Control*. United States Environmental Protection Agency, D.C. EPA/625/R-93/010, Washington, DC. 322 pp.
- Fdez-Polanco, F., Real, F. J., Garcia, P. A. (1994) Behaviour of an anaerobic/aerobic pilot scale fluidized bed for the simultaneous removal of carbon and nitrogen, *Water Science and Technology*, **29** (10-11), 339–346.
- Jin, R. C., Zheng, P., Mahmood, Q., Zhang, L. (2009) Performance of a nitrifying airlift reactor using granular sludge, *Separation and Purification Technology*, **63**(3), 670–675.
- Li Y. Z., He, Y. L., Ohandja, D. G., Ji, J., Li, J. F., Zhou, T. (2008) Simultaneous nitrification-denitrification achieved by an innovative internal-loop airlift MBR: comparative study, *Bioresource Technology*, **99** (13), 5867–5872.
- Nourmohammadi, D., Esmaeeli, M. B., Akbarian, H., Ghasemian, M. (2013). Nitrogen Removal in a Full-Scale Domestic Wastewater Treatment Plant with Activated Sludge and Trickling Filter. *Journal of Environmental and Public Health* (2013), Article ID 504705 (6). Consultado el 20 de agosto de 2017, desde: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/504705>
- Tao Zhang, T., Wei, C. (2013) A New Developed Airlift Reactor Integrated Settling Process and Its Application for Simultaneous Nitrification and Denitrification Nitrogen Removal. *The Scientific World Journal*, Article ID 345725, 7 pages. Consultado el 30 de Julio de 2017 desde: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/345725>
- Van Benthum, W.A.J., van den Hoogen, J.H.A., van der Lans, R.G.J.M., van Loosdrecht, M.C.M., Heijnen, J.J. (1999a) The biofilm airlift suspension extension reactor. Part I: Design and two-phase hydrodynamics, *Chemical Engineering Science*, **54**(1999) 1909 – 1924.
- Van Loosdrecht, M.C.M., van Benthum W.A.J. and Heijnen, J.J. (2000) Integration of nitrification and denitrification in biofilm airlift suspension reactors, *Water Science and Technology*, **41**(4–5), 97–103.
- WEF (2007) *Biological Nutrient Removal Processes in Operation of Water Resource Recovery Facilities, Manual of Practice No. 11*, Water Environment Federation, Chapter 22, Edición 7, 1-66.
- Zinatizadeha, A.A.L., Ghaytoolib, E. (20015) Simultaneous nitrogen and carbon removal from wastewater at different operating conditions in a moving bed biofilm reactor (MBBR) Process modeling and optimization, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **53**, 98-111.