

PROCESOS BIOLÓGICOS DE REMOCIÓN DE NITRÓGENO Y MODELADO DE LA DIFUSIÓN DE OXÍGENO EN FLOCULOS Y BIOGRANULOS DE REACTORES DISCONTINUOS SECUENCIALES

Paula Bucci^a, Juan C. Alzate Marin^{a,b}, Noemí Zaritzky^{a,b}, Alejandro Caravelli^a

^a Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA). Calle 47 y 116, La Plata.

^b Depto. de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, UNLP. E-mail: alejandrocavelli@hotmail.com

RESUMEN

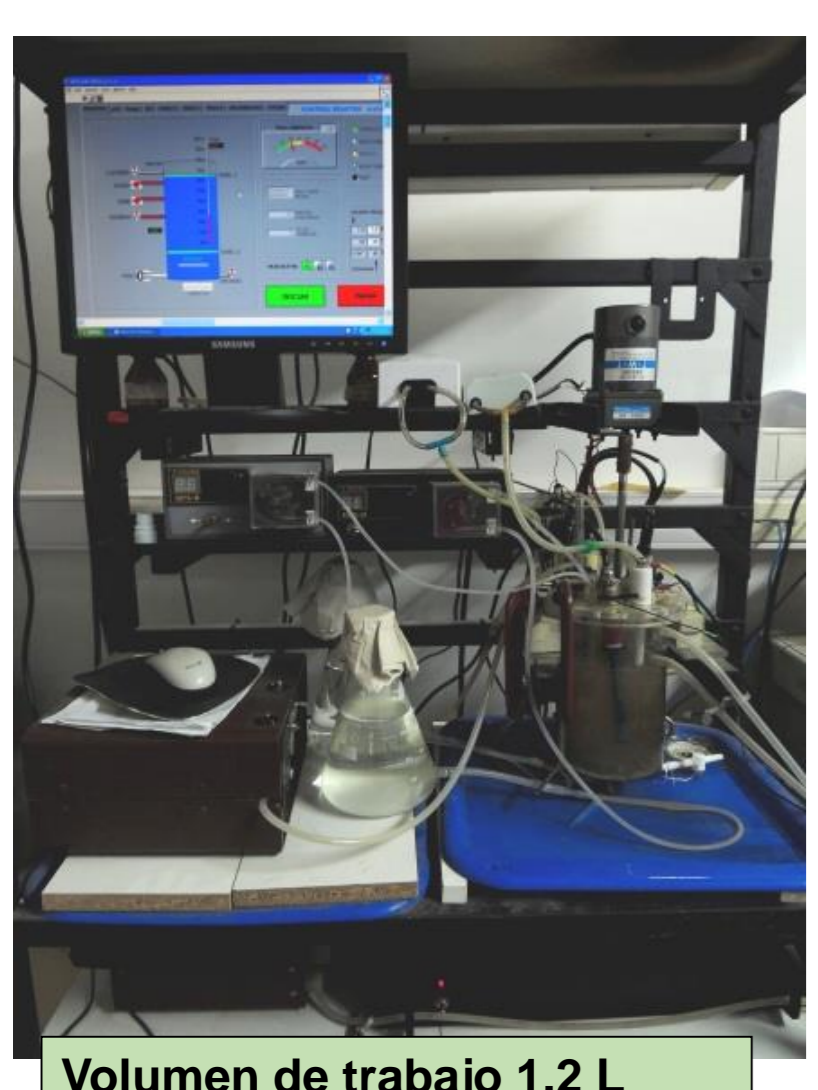
En el presente estudio se evaluaron los procesos de remoción de N y eficiencia de dos reactores discontinuos secuenciales (SBR): i) SBR con floculos de lodos activados LA (SBR anóxico/aeróbico, SBR_{LA}) y ii) SBR con gránulos aeróbicos GA (SBR aeróbico, SBR_{GA}). Se propuso un modelo de difusión de O₂ para evaluar los perfiles de O₂ en los agregados microbianos. Para una relación DQO:N= 100:10, se predijo biomasa completamente aeróbica para todos los floculos en SBR_{LA} y para el 82% de los gránulos en SBR_{GA}. En SBR_{LA}, la nitrificación fue seguida por desnitrificación aeróbica (DA), logrando eliminación de 67% de N inorgánico (Ni). En SBR_{GA}, la nitrificación-desnitrificación simultánea (NDS) fue 55% y la eliminación de Ni=51%. Para SBR_{GA}, DQO:N= 100:15, 80% de los gránulos desarrollaron zonas anóxicas internas; predominó la desnitrificación anóxica permitiendo el tratamiento de una mayor carga de N con similar remoción de Ni. Estos sistemas sin control de O₂ son más fáciles de operar.

INTRODUCCIÓN

La nitrificación-desnitrificación simultánea (NDS) ocurre en un mismo reactor aeróbico, requiriendo la coexistencia de zonas aeróbicas y anóxicas dentro del lodo floculento (Meng y col., 2013). Los floculos grandes y gránulos aeróbicos suelen presentar una capa superficial aeróbica, en la cual tiene lugar la nitrificación. En zona anóxica interna puede ocurrir desnitrificación. La NDS es operativa en gránulos grandes (Nanchaiah y col., 2018); sin embargo, también puede ocurrir en floculos/gránulos pequeños siempre que la concentración de oxígeno disuelto (OD) sea óptima (<1.0 mgO₂/L) (Third y col., 2003). La desnitrificación aeróbica (DA) es un proceso ventajoso pues no requiere control de aireación. La alternancia de condiciones anaeróbicas y aeróbicas puede conducir al crecimiento de desnitrificantes aeróbicos, muchos de ellos pueden nitrificar y son denominados nitrificantes heterótrofos-desnitrificantes aeróbicos NHDA (Lei y col., 2019). El objetivo general del presente estudio fue evaluar los procesos de remoción de N y la eficiencia de reactores discontinuos secuenciales (SBR) basados en: (i) floculos de lodos activados (LA) y (ii) gránulos aeróbicos (GA). Los objetivos específicos fueron: (i) Evaluar las capacidades nitrificantes y desnitrificantes de los sistemas mediante balances de masa de N; (ii) proponer un modelo de difusión de O₂ para determinar los perfiles de oxígeno en floculos de LA y en GA; (iii) Determinar los procesos biológicos potenciales de remoción de N en cada sistema a partir de las simulaciones del modelo de difusión propuesto y los resultados experimentales.

MATERIALES Y MÉTODOS

SBR de LODOS ACTIVADOS



SBR Anóxico/Aeróbico

Efluente Sintético

CH ₃ COONa	
(NH ₄) ₂ SO ₄	DQO:N
KH ₂ PO ₄	100:10
K ₂ HPO ₄	100:7.5

Ciclo = 12 hs

Fase anóxica: 3.66 h, Agitación 100 rpm
Fase aeróbica: 7.33 h, Agitación 100 rpm,
OD=5.5 mgO₂/L
Sedimentación biomasa: 50 min.
pH= 7.5 ± 0.1, T= 25 ± 0.1°C,
TRC= 10 días, TRH= 43.6 h.

Volumen de trabajo 1.2 L

Biomasa: Sólidos suspendidos totales (SST) Índice de sedimentabilidad volumétrica (ISV)

DQO: Kit comercial HACH, método 8000 Sustrato orgánico como DQO soluble (DQOs)
NH₄⁺-N: Método de Nessler (mét. HACH N° 8038)
NO₃⁻-N: Reducción por cadmio (mét. HACH N° 8039)
NO₂⁻-N: método sulfato ferroso (mét. HACH N°8153)

Tamaño de floculos de LA: Análisis de imágenes (Image-Pro Plus 6.0)
Tamaño de GA: Equipo Mastersizer E20003

Velocidad de consumo de oxígeno: Respirometría cerrada (OUR, mg O₂/L.h)


Carbohidratos totales (CT): Método de Antrona: Glucógeno (mg glucosa/L) se expresó como DQO.
Factores de conversión: 27 g/C-mol Glu y 1 mol O₂/C-mol Glu

Detección de gránulos intracelulares de PHA: Tinción Sudan Black

○ Cuantificación de PHA

LA: Coeficiente estequiométrico Y_{PHB/Acetato} = 0.52 C-mol PHB/C-mol Ac para condición anóxica.
GA: Extracción PHA (Cloroformo, 60°C, refugio 3 h), precipitación/purificación (Etanol, 4°C). Abs_{UV}(235 nm)
PHB (DQO): Factores conversión: 21.5 g PHB/C-mol PHB, 1.125 mol O₂/C-mol PHB.

SBR GRANULAR AEROBICO



Efluente Sintético

CH ₃ COONa	
(NH ₄) ₂ SO ₄	DQO:N
KH ₂ PO ₄	100:10
K ₂ HPO ₄	100:15

GRANULACION

- Reactor altura/diámetro= 9.2
- Velocidad aire superficial ascendente= 1.9 cm/seg
- Sedimentación biomasa= 5 min

Ciclo = 24 hs

F. aeróbica 23.9 h, OD=7.5 mgO₂/L, pH= 7.5 ± 0.1,
T= 18 ± 2°C, TRC= 20 días, TRH= 2 días

Volumen de trabajo 4,6 L

Remoción de amonio

$$\Delta(NH_3-N) = \Delta(NH_3-N)_X + \Delta(NH_3-N)_N$$

$\Delta(NH_3-N)_N$ = N amoniacal oxidado por nitrificantes (mg N/L)
 $\Delta(NH_3-N)_X$ = N amoniacal crecimiento heterótrofo (mg N/L)

Desnitrificación

Gas N (N_G, mg N/L):

$$N_G = \Delta(NH_3-N) - \Delta(NO_2-N) - \Delta(NH_3-N)_X$$

$\Delta(NO_2-N)$ = N oxidado mediante nitrificación (mg N/L)
 $\Delta(NO_2-N) = \Delta(NO_2-N) + \Delta(NO_3-N)$

Nitrificación-desnitrificación simultánea (NDS)

$$\% NDS = \left(\frac{\Delta(NH_3-N)_N - \Delta(NO_2-N)}{\Delta(NH_3-N)_N} \right) 100$$

Remoción de amoniacal %

$$\% NH_3-N_R = \left(\frac{(NH_3-N)_O - (NH_3-N)_F}{(NH_3-N)_O} \right) 100$$

(NH₃-N)_O y (NH₃-N)_F = N amoniacal (mg NH₃-N/L) al inicio y final de ciclo

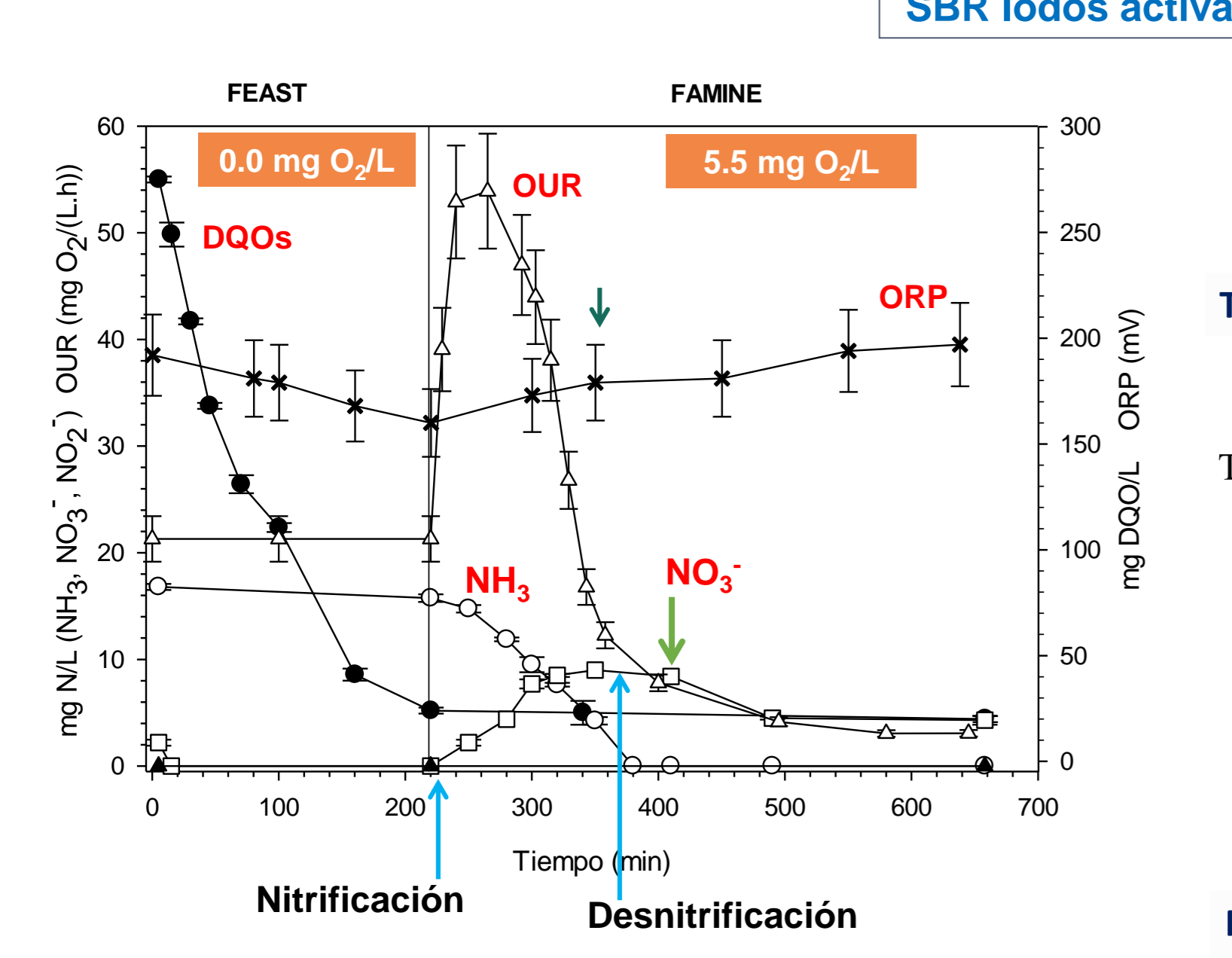
Remoción de N inorgánico (Ni) %

$$\% Ni_R = \left(\frac{Ni_O - Ni_F}{Ni_O} \right) 100$$

Ni_O y Ni_F = N inorgánico (mg N/L) al inicio y final del ciclo
(Ni = NH₃-N + NO₂-N + NO₃-N)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

SBR lodos activados (SBR_{LA})



Fase "Feast" (Anóxica)

Consumo acetato → Acumulación PHB

Tasa de transferencia de O₂ (TTO)

$$k_L a = 2.63/h \text{ (25°C, 100 rpm)}$$

$$TTO = \frac{dCOD}{dt} = k_L a (COD^* - COD) \rightarrow 21.3 \text{ mg O}_2/L.h$$

$dCOD/dt = TTO - OUR$

$dCOD/dt = 0$ → $OUR = 21.3 \text{ mg O}_2/L.h$

Fase "Famine" (Aeróbica)

Nitrificación
Degradación PHB → Crecimiento heterótrofo

NDS

Nitrificación > Desnitrificación
Acumulación de nitrato

Modelo de difusión de oxígeno

Modelo de estado estacionario de difusión de O₂ para floculos de LA y GA para determinar los perfiles de oxígeno.

Se aplicó la segunda ley de Fick asumiendo:

- geometría esférica (radio= R) para floculos y gránulos en reactores de estado estacionario,
- consumo microbiano de O₂ (q_{O₂}, mg O₂/cm³.h), orden cero

Condiciones de contorno:

- Condición de simetría en el centro (r=0) del floculo y del gránulo:
- Concentración O₂ en sup. del floculo y del gránulo (C_s) es la misma de la solución "bulk":

$$C_s = C_b$$

en r = R (interfase líquido-partícula)

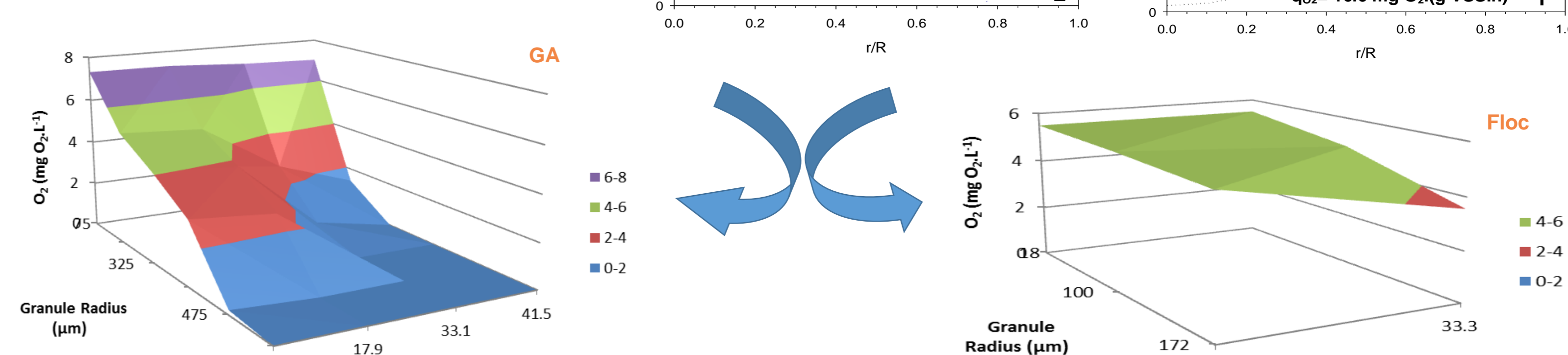
C_b = conc. O₂ en la sup. de partícula

5.5 × 10⁻³ mg O₂/cm³ (SBR_{LA})
7.5 × 10⁻³ mg O₂/cm³ (SBR_{GA})

$$DO_2 \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dC}{dr} \right) = q_{O_2} \rightarrow DO_2 \left(\frac{d^2C}{dr^2} + \frac{dC}{dr} \right) = q_{O_2}$$

$$\rightarrow C = C_b - \frac{q_{O_2}(R^2 - r^2)}{6 DO_2}$$

D_{O₂} = coeficiente de difusión de oxígeno (m²/s) D_{O₂} = 1.1863 × 10⁻⁹ m²/s.
r = coordenada dentro de la partícula (floculo o gránulo, mm)
C = concentración de oxígeno (mg O₂/cm³).



CONCLUSIONES

- SBR Lodo Activado (SBR_{LA}): etapa anóxica inicial favorece la acumulación de PHB. PHB puede actuar como poder reductor en la desnitrificación en etapa aeróbica final con floculos completamente aeróbicos.
 - SBR granular aeróbico (SBR_{GA}): gránulos grandes y alta actividad respiratoria específica conducen al desarrollo de grandes zonas anóxicas.
- Desarrollo de zonas anóxicas favorece la desnitrificación anóxica permitiendo el tratamiento de una alta carga de N (DQO/N= 100:15) con eliminación de N inorgánico de 50%.
 - SBR_{LA} logró mayor remoción de Ni (67%) que SBR_{GA} (51,6%) con igual relación DQO:N (100:10).

REFERENCIAS

- Lei X, Jia Y, Chen Y, Hu Y (2019) Simultaneous nitrification and denitrification without nitrite accumulation by a novel isolated *Ochrobactrum anthropic* LJ81. *Bioresour Technol* 272:442–450.
- Meng F, Wang Y, Huang LN, Li J, Jiang F, Li S y col. (2013) A novel nonwoven hybrid bioreactor (NWHBR) for enhancing simultaneous nitrification and denitrification. *Biotechnol Bioeng* 110:1903–1912.
- Nanchaiah YV, Reddy GKK (2018) Aerobic granular sludge technology: mechanisms of granulation and biotechnological applications. *Bioresour. Technol.* 247:1128–1143.
- Third KA, Burnett N, Cord-Ruwisch R. (2003). Simultaneous nitrification and denitrification using stored substrate (PHB) as the electron donor in an SBR. *Biotechnol Bioeng* 83:706–720.