

Comparación experimental de SBR e IFAS-MBBR para remoción de nitrógeno en aguas residuales de complejo logístico

Experimental comparison of SBR and IFAS-MBBR systems for nitrogen removal in logistics park wastewater

Pablo Alberto Quevedo Castillo¹ , Adan Pocasangre Collazos¹ 

¹Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Dirección para recibir correspondencia: pablo.quevedo@ecotec.com.gt

Recibido: 22/09/2025 Revisión: 14/11/2025 Aceptado: 02/12/2025

Resumen

El tratamiento de aguas residuales especiales de complejos logísticos presenta desafíos técnicos por altas concentraciones de nitrógeno y baja relación carbono/nitrógeno (C/N), condiciones que limitan procesos biológicos convencionales. Este estudio comparó un reactor biológico secuencial (SBR, Sequencing Batch Reactor) y un sistema híbrido IFAS-MBBR (Integrated Fixed-Film Activated Sludge–Moving Bed Biofilm Reactor) para evaluar su eficiencia en la remoción de nitrógeno. Se determinó cuál configuración presentó mayor eficiencia y estabilidad operativa para la remoción de nitrógeno total bajo condiciones reales de baja relación C/N. Ambos sistemas operaron a escala piloto con agua residual real posterior al pretratamiento de un complejo logístico, a 20 L/día e inoculados con lodo activado de la planta existente; el SBR se configuró con SRT de diseño de 30 días y aireación cíclica, y el IFAS-MBBR con SRT de diseño de 25 días y aireación intermitente. Durante la fase estable se realizaron 24 eventos de muestreo. El SBR presentó mayor eficiencia promedio de remoción de nitrógeno total ($45.5 \pm 17\%$) que el IFAS-MBBR ($31.7 \pm 20\%$), con diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$). Bajo las condiciones evaluadas, los resultados sugirieron que el SBR puede ser preferible en aplicaciones piloto o de pequeña escala con baja disponibilidad relativa de carbono. El escalamiento económico, energético y ambiental se interpretó como aproximación conceptual preliminar, no como diseño ejecutivo ni validación a escala real.

Palabras clave: aguas residuales especiales, nitrificación, desnitrificación, biomasa adherida, reactor biológico secuencial, tratamiento biológico.

Abstract

Special wastewater treatment from logistics complexes presented technical challenges due to high nitrogen concentrations and a low carbon-to-nitrogen (C/N) ratio, conditions that limited conventional biological processes. This study compared a sequencing batch reactor (SBR) and a hybrid IFAS-MBBR system (Integrated Fixed-Film Activated Sludge–Moving Bed Biofilm Reactor) to evaluate nitrogen removal efficiency. It was determined which configuration showed greater efficiency and operational stability for total nitrogen removal under real low C/N ratio conditions. Both systems were operated at pilot scale using real wastewater collected after pretreatment from a logistics complex, at 20 L/day, and were inoculated with activated sludge from the existing treatment plant; the SBR was configured with a design SRT of 30 days and cyclic aeration, and the IFAS-MBBR with a design SRT of 25 days and intermittent aeration. During the stable phase, 24 sampling events were conducted. The SBR showed higher average total nitrogen removal efficiency ($45.5 \pm 17\%$) than the IFAS-MBBR ($31.7 \pm 20\%$), with statistically significant differences ($p \leq 0.05$). Under the evaluated conditions, the results suggested that the SBR may be preferable for pilot-scale or small-scale applications with low relative carbon availability. The economic, energy, and environmental scale-up was interpreted as a preliminary conceptual approximation, not as an executive design or direct full-scale validation.

Key words: special wastewater, nitrification, denitrification, attached biomass, sequencing batch reactor, biological treatment.



Introducción

El tratamiento de aguas residuales constituye un desafío técnico y ambiental de creciente relevancia, particularmente en el caso de las aguas residuales especiales, cuya composición difiere significativamente de las aguas residuales ordinarias. En Guatemala, este tipo de descargas se regula mediante el Acuerdo Gubernativo 236-2006, el cual establece límites máximos permisibles para distintos parámetros de vertido y reconoce la necesidad de aplicar tratamientos acordes con la naturaleza del efluente. Dentro de esta categoría, las aguas residuales generadas en complejos logísticos presentan características particulares, entre las que destacan una elevada carga de compuestos nitrogenados, baja relación carbono/nitrógeno (C/N) y variabilidad hidráulica y orgánica asociada a las actividades propias de este tipo de instalaciones.

En estos complejos, una parte importante del efluente proviene de descargas sanitarias con alta proporción de orina y escasa presencia de materia orgánica fácilmente biodegradable, debido a la limitada ocurrencia de procesos domésticos como lavado de ropa o preparación de alimentos. A ello se suman aportes ocasionales de cargas orgánicas e hidráulicas derivados de la limpieza de superficies, mantenimiento de áreas operativas o manejo de derrames. Esta combinación genera condiciones desfavorables para la remoción biológica de nitrógeno, especialmente cuando la baja relación C/N limita la disponibilidad de carbono para los procesos de desnitrificación.

La remoción biológica de nitrógeno ha sido ampliamente estudiada debido a la necesidad de cumplir con normativas ambientales cada vez más estrictas y de minimizar el impacto de los vertidos sobre los cuerpos receptores. En este contexto, las tecnologías de lodos activados han evolucionado hacia configuraciones avanzadas capaces de integrar procesos de nitrificación y desnitrificación de manera más eficiente, incluso bajo condiciones de baja disponibilidad de carbono o cargas variables características de efluentes industriales.

Entre estas configuraciones, los reactores biológicos secuenciales por lotes (SBR) se caracterizan por su flexibilidad operativa, al permitir el control de las fases de llenado, reacción, sedimentación y descarga dentro de un mismo reactor. Esta característica facilita la alternancia de condiciones aeróbicas y anóxicas

necesarias para los procesos de nitrificación y desnitrificación. En reactores SBR multietapa, Kargi y Uygur (2003) observaron que la carga de nutrientes influye en la eficiencia de remoción, lo que resalta la importancia del control operativo de las fases de reacción. Benavides-Sánchez et al. (2021) compararon, mediante modelación, reactores SBR y procesos continuos de lodos activados para tratamiento biológico, mostrando que el desempeño de estos sistemas depende de variables operativas como SRT, TRH, número de ciclos y recirculación interna. En este sentido, Khan (2024) evaluó la remoción de nutrientes en un SBR tipo columna con nitrificación y desnitrificación simultáneas, reportando eficiencias de 88–98 %, lo que sugiere el potencial de esta configuración bajo condiciones controladas de operación. De manera complementaria, Tran et al. (2023) reportaron que el control estratégico de las fases operativas en reactores SBR puede incrementar la eficiencia de remoción de nitrógeno hasta en 80 %.

Por otra parte, los sistemas híbridos que combinan biomasa suspendida y biomasa adherida, como los sistemas IFAS-MBBR, han ganado interés debido a su capacidad para aumentar la retención de biomasa especializada y mejorar la estabilidad del proceso frente a variaciones de carga. Zhao et al. (2018) evaluaron la incorporación de medios plásticos en un sistema SBR a escala piloto, evidenciando mejoras en los procesos de nitrificación que alcanzan una eficiencia en eliminación de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ de hasta 96 %. Asimismo, Dolatshah et al. (2024) desarrollaron y modelaron un sistema IFAS para el tratamiento de aguas residuales industriales, reportando remociones de nitrógeno total superiores a 77 % bajo condiciones óptimas de operación.

Estudios recientes también han profundizado en el análisis microbiológico de sistemas con biomasa adherida. Liang et al. (2022), mediante análisis metagenómicos, documentaron mejoras de 10.86 % en la remoción de nitrógeno y menor producción de lodos en procesos IFAS a gran escala, atribuidas a cambios en la estructura de la comunidad microbiana y a la retención de biomasa especializada asociada a los medios de soporte. Aunque el presente estudio no incorporó análisis microbiológico, este antecedente resulta relevante porque relaciona la configuración IFAS con mecanismos biológicos que pueden influir en la remoción de nitrógeno. De manera complementaria, Phanwilai et al. (2020) compararon el desempeño de

sistemas IFAS y MBBR en plantas de tratamiento a escala real, reportando diferencias en las eficiencias de remoción de nitrógeno de 64 % y 77 %, respectivamente, asociadas a la configuración de cada sistema. Asimismo, Puig et al. (2004) demostraron que estrategias operativas como la alimentación escalonada en reactores SBR pueden favorecer la desnitrificación, alcanzando concentraciones de nitrógeno en el efluente inferiores a 15 mg N/L, al mejorar el aprovechamiento del carbono biodegradable disponible.

En conjunto, estos antecedentes evidencian el potencial de los sistemas SBR, IFAS y MBBR para la remoción de nitrógeno; sin embargo, sus resultados responden a configuraciones, escalas y condiciones operativas distintas. Algunas investigaciones se desarrollaron bajo condiciones controladas, con estrategias de operación optimizadas, mayor disponibilidad de carbono biodegradable o configuraciones con mayor desarrollo de biomasa adherida. Por ello, sus eficiencias no son directamente extrapolables a efluentes reales de complejos logísticos, donde la baja relación C/N, la variabilidad del afluente y las restricciones propias de sistemas compactos pueden limitar el desempeño biológico.

El problema de investigación se centra en la falta de evidencia experimental local que compare, bajo condiciones reales de operación, el desempeño de sistemas SBR e IFAS-MBBR para remover nitrógeno en aguas residuales especiales de baja relación C/N generadas en complejos logísticos. Esta brecha limita la selección tecnológica, ya que obliga a extrapolar información obtenida en otros contextos, con diferentes configuraciones, escalas, cargas y condiciones operativas.

Se planteó como hipótesis de trabajo que, bajo condiciones de baja relación C/N y operación a escala piloto con afluente real pretratado, existirían diferencias en la eficiencia de remoción de nitrógeno total entre los sistemas SBR e IFAS-MBBR. En particular, se consideró que la flexibilidad operativa del sistema SBR podría favorecer un mayor desempeño relativo, debido al control secuencial de fases aeróbicas y anóxicas dentro de un mismo reactor.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo comparar experimentalmente el desempeño de dos tecnologías biológicas avanzadas, un reactor secuencial por lotes (SBR) y un sistema híbrido IFAS-

MBBR, para la remoción de nitrógeno en aguas residuales especiales de baja relación C/N generadas en un complejo logístico, mediante su operación paralela a escala piloto utilizando efluente real posterior al pretratamiento existente.

Este estudio constituye uno de los primeros análisis experimentales realizados en Guatemala sobre la remoción biológica de nitrógeno en aguas residuales especiales provenientes de complejos logísticos, aportando evidencia técnica local que contribuye a la comprensión del comportamiento de estas tecnologías bajo condiciones reales de operación y a la toma de decisiones en la selección de sistemas de tratamiento para este tipo de efluentes.

Adicionalmente, a partir de los resultados obtenidos en la operación piloto, se realizó un análisis conceptual de escalamiento con fines académicos, orientado a explorar implicaciones técnicas, económicas y ambientales preliminares de ambas tecnologías en escenarios de mayor capacidad, sin constituir diseño ejecutivo ni validación directa a escala real.

Materiales y método

Enfoque metodológico

La investigación se desarrolló bajo un enfoque experimental con alcance comparativo, orientado a evaluar el desempeño de dos tecnologías biológicas para la remoción de nitrógeno en aguas residuales especiales con baja relación carbono/nitrógeno (C/N). El estudio se realizó mediante la operación paralela de dos sistemas piloto: un reactor secuencial por lotes (SBR) y un sistema híbrido de lodos activados con biomasa adherida tipo IFAS-MBBR.

Ambos reactores fueron alimentados simultáneamente con el mismo afluente real con el fin de asegurar condiciones comparables de operación y permitir una evaluación directa del desempeño de cada tecnología.

Las condiciones operativas iniciales se establecieron a partir del predimensionamiento de los sistemas piloto, criterios de operación biológica y la fase de estabilización previa al monitoreo. El SRT, el régimen de aireación, el TRH y el intervalo de oxígeno disuelto se definieron como condiciones de diseño piloto orientadas a favorecer la nitrificación y la desnitrificación bajo baja disponibilidad relativa de carbono. Durante el arranque y estabilización se

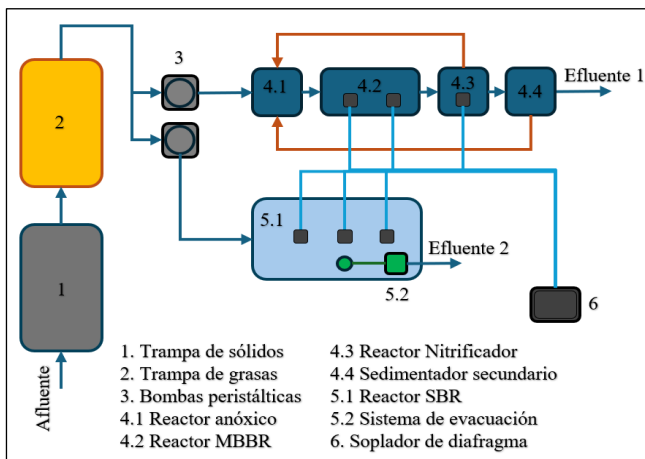
realizaron ajustes operativos para alcanzar condiciones estables de funcionamiento antes de iniciar la fase de muestreo.

El diseño experimental consideró un reactor piloto por cada tecnología evaluada. Por tanto, la comparación se basó en la operación paralela de dos trenes piloto únicos bajo condiciones hidráulicas comparables. Los 24 eventos de muestreo realizados durante la fase de operación estable se interpretaron como réplicas temporales de monitoreo y no como réplicas físicas independientes de cada tecnología. Esta condición se considera relevante para la interpretación de los resultados estadísticos, por lo que las diferencias observadas deben entenderse bajo el alcance experimental del estudio piloto.

Sistema experimental

El sistema experimental consistió en dos reactores piloto con una capacidad de operación de 20 L/día cada uno. La alimentación se realizó mediante bombas peristálticas independientes, utilizando agua residual real proveniente de un complejo logístico (ver figura 1).

Figura 1. Esquema del sistema piloto utilizado para la operación paralela de los sistemas SBR e IFAS-MBBR



El afluente correspondió al efluente posterior al pretratamiento existente en la instalación, el cual incluía trampa de sólidos gruesos y trampa de grasas. Esta corriente se seleccionó con el fin de evaluar el comportamiento de los sistemas biológicos bajo condiciones representativas de operación real.

Ambos reactores fueron inoculados con lodo activado proveniente de la planta de tratamiento

existente en el complejo, con el objetivo de asegurar la presencia de una comunidad microbiana previamente adaptada a las características del efluente (ver figuras 2 y 3).

Figura 2. Sistema piloto IFAS-MBBR



Figura 3. Sistema piloto SBR



Reactor secuencial por lotes (SBR)

El reactor secuencial por lotes operó mediante 3 ciclos de 8 horas al día, que integraron en una misma unidad las fases de llenado, reacción, sedimentación y descarga. Durante la fase de reacción se controlaron condiciones aeróbicas y anóxicas con el fin de favorecer los procesos de nitrificación y desnitrificación.

Los ciclos operativos del SBR fueron definidos desde el diseño conceptual inicial. Durante la etapa experimental se ajustó la estrategia de alimentación del agua residual pretratada durante la fase anóxica, con el objetivo de favorecer el aprovechamiento del carbono biodegradable disponible y mejorar las condiciones para la desnitrificación. El sistema SBR operó como

reactor de biomasa suspendida y no incorporó medio portador.

Sistema IFAS-MBBR

El sistema IFAS-MBBR consistió en un reactor biológico que combinó biomasa suspendida con biomasa adherida sobre medios plásticos móviles, proporcionando superficie para el desarrollo de biomasa adherida.

El medio plástico móvil se instaló únicamente en el reactor MBBR. El carrier presentó una superficie específica de 3,000 m²/m³; el área instalada fue de 0.60 m², equivalente a 0.20 L de medio y a una fracción de llenado de 1.43 % v/v respecto al volumen del reactor. Aunque la fracción volumétrica de carrier fue baja, el área instalada se verificó mediante el criterio de carga superficial sobre el medio. Con una carga de referencia de 5.6 g DBO/d aplicada al MBBR, equivalente a 280 mg/L a 20 L/d, se estimó una carga superficial de 9.33 g DBO/m²·d. Este valor se utilizó como criterio de predimensionamiento y no como medición directa de la carga removida por la biopelícula.

El reactor nitrificador posterior operó como etapa aerobia complementaria sin medio soporte.

La aireación se operó mediante ciclos de 45 min en funcionamiento y 15 min de pausa, con el propósito de favorecer el movimiento de los medios plásticos, mantener una adecuada transferencia de oxígeno y favorecer alternancia operativa entre condiciones aeróbicas y de menor oxigenación.

De forma complementaria, se establecieron recirculaciones internas y externas continuas hacia el reactor anóxico, provenientes respectivamente del reactor de nitrificación y del sedimentador secundario, con el objetivo de incrementar la disponibilidad de nitratos para los procesos de desnitrificación.

Estas condiciones operativas se diseñaron para favorecer la remoción biológica de nitrógeno, considerando la posible formación de gradientes de oxígeno en la biomasa adherida bajo la configuración piloto evaluada.

Operación del sistema

Ambos reactores operaron en paralelo durante el período experimental bajo condiciones similares de alimentación y carga hidráulica, con una capacidad de

operación de 20 L/día por reactor. Las condiciones operativas principales se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones operativas de diseño

Parámetro	SBR	IFAS-MBBR
TRH (h)	43.2	28.8*
SRT (d)	30	25
OD (mg/L)	1 – 2	1 – 2
Ciclos	3 (8 horas)	Continuo
Aireación	6 horas por ciclo	45 min de operación / 15 min de pausa
Recirculación	No aplica	4Q in / 0.5Q ext
Volumen Útil (L)	36	24

Una vez alcanzadas condiciones de operación estables, se inició la fase de monitoreo con el objetivo de evaluar el desempeño de ambos sistemas frente a las variaciones propias del efluente.

Muestreo y análisis de laboratorio

Durante la fase de operación estable se realizaron 24 eventos de muestreo por sistema, interpretados como réplicas temporales de monitoreo y no como réplicas físicas independientes.

El muestreo fue sistemático durante el período experimental de 3 meses y se efectuó en puntos de entrada y salida de cada reactor (ver figura 4), con el fin de evaluar la eficiencia de remoción y la variabilidad del desempeño frente al afluente real. Este número de eventos se consideró adecuado para la comparación estadística planteada, aunque no tuvo como alcance capturar toda la variabilidad estacional o la totalidad de actividades internas del complejo logístico.

Los parámetros analizados incluyeron:

- Nitrógeno total (parámetro principal de estudio)
- Nitratos [NO₃⁻] (parámetro de control operativo)
- Nitritos [NO₂⁻] (parámetro de control operativo)
- Demanda química de oxígeno [DQO] (parámetro de control operativo)

Figura 4. Control, seguimiento y muestreo



Las determinaciones analíticas se realizaron mediante métodos estándar para el análisis de aguas residuales.

Tabla 2. Parámetros analizados, método analítico y frecuencia de muestreo

Parámetro	Tipo de Parámetro	Método Analítico	Frecuencia de Análisis
Nitrógeno Total	Variable principal de estudio	HACH Method 10071	3 veces por semana
Nitritos	Parámetro de Control	Tiras reactivas	3 veces por semana
Nitratos	Parámetro de control	Tiras reactivas	3 veces por semana
DQO	Parámetro de control	HACH Method 8000	Inicial posterior a estabilización y semanal en último mes

El nitrógeno total se seleccionó como variable principal de respuesta por su carácter integrador de las distintas formas nitrogenadas. Las mediciones de NO_2^- -N y NO_3^- -N mediante tiras reactivas se emplearon como indicadores operativos semicuantitativos para verificar la presencia de especies oxidadas de nitrógeno durante la operación piloto.

No se midieron directamente NH_4^+ -N ni NTK durante la fase estable; por tanto, el estudio no tuvo como alcance cerrar un balance completo de especies nitrogenadas ni cuantificar la fracción exacta del

nitrógeno total efluente asociada a formas amoniacales u orgánicas. En consecuencia, las inferencias sobre nitrificación y desnitrificación se interpretaron de forma diagnóstica, con base en NT, NO_2^- -N, NO_3^- -N y DQO, y no como una especiación completa del nitrógeno.

Las variables complementarias se utilizaron para interpretar el comportamiento general del proceso biológico. La DQO se midió inicialmente después de la estabilización como parámetro de referencia y posteriormente de forma semanal durante el último mes como parámetro de control operativo; por ello, su interpretación se empleó para contextualizar la disponibilidad relativa de materia orgánica, sin constituir una serie continua equivalente al monitoreo de nitrógeno total. Variables como pH, alcalinidad, temperatura, biomasa suspendida, biomasa adherida y fraccionamiento de la DQO no fueron monitoreadas sistemáticamente durante todos los eventos de muestreo. Por tanto, la interpretación de los mecanismos de nitrificación y desnitrificación se basó en indicadores globales de desempeño y no en un balance cinético detallado.

Análisis de datos

Los resultados obtenidos fueron evaluados mediante estadística descriptiva, calculando valores promedio, desviaciones estándar y rangos para cada parámetro analizado.

Posteriormente, se aplicaron análisis estadísticos inferenciales con el fin de determinar la existencia de diferencias significativas entre ambos sistemas. La normalidad de los datos se evaluó mediante la prueba de Shapiro-Wilk, mientras que la comparación entre grupos se realizó utilizando el método no paramétrico de Mann-Whitney y la prueba t de Student.

El procesamiento de datos, cálculos generales y el análisis estadístico descriptivo e inferencial se realizaron utilizando Microsoft Excel.

Análisis conceptual de escalamiento

Con el objetivo de indagar las implicaciones potenciales de los resultados experimentales a escalas mayores de tratamiento, se realizó un análisis conceptual de escalamiento basado en los resultados obtenidos en la operación piloto. Este análisis se desarrolló con fines académicos y exploratorios, considerando indicadores técnicos, económicos,

energéticos y ambientales comúnmente utilizados en el diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales.

A partir del desempeño observado en los sistemas piloto, se estimaron indicadores de referencia tales como CAPEX específico, OPEX específico, área de ocupación, consumo energético específico y huella de carbono por kilogramo de nitrógeno total removido. Estos valores se utilizaron únicamente como una aproximación conceptual para comparar el comportamiento potencial de ambas tecnologías bajo escenarios de mayor escala, sin constituir parámetros definitivos de diseño ejecutivo a escala real.

El escalamiento se desarrolló mediante un enfoque empírico-conceptual basado en el desempeño experimental observado. Para cada sistema se estimó el rendimiento aparente de remoción de nitrógeno, utilizando las concentraciones representativas de nitrógeno total y la DQO medida como referencia de carga orgánica, mediante un balance global simplificado. Este rendimiento se empleó como parámetro de referencia para predimensionar conceptualmente sistemas SBR e IFAS-MBBR en caudales de 10 a 300 m³/d, manteniendo condiciones representativas del afluente evaluado y una concentración objetivo de efluente asociada al valor de referencia establecido en el Acuerdo Gubernativo 236-2006, artículo 21. A partir de los volúmenes obtenidos se estimaron obra civil, equipos, potencia instalada, consumo energético, CAPEX, OPEX, área de ocupación y huella de carbono.

Los resultados se expresaron como indicadores normalizados y se interpretaron como valores relativos preliminares, sin constituir presupuesto ejecutivo, diseño definitivo ni validación directa a escala real.

Resultados

Variación temporal de nitrógeno total

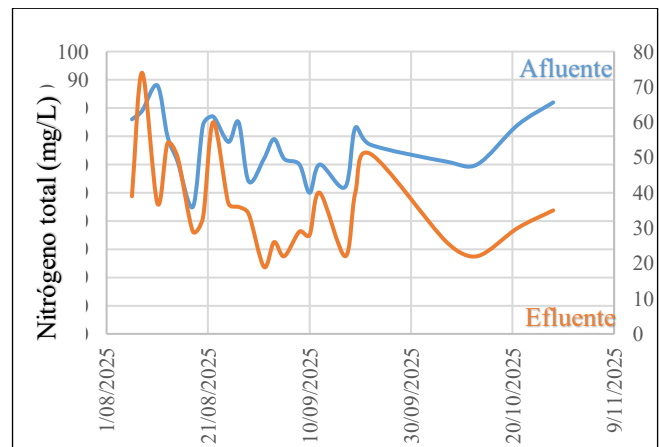
Durante el período experimental se registraron 24 eventos de muestreo, lo que permitió evaluar el comportamiento temporal de la concentración de nitrógeno total en los reactores SBR e IFAS-MBBR.

Las concentraciones de nitrógeno total en el afluente mostraron variaciones asociadas a las fluctuaciones características del efluente generado en el complejo logístico. Estas variaciones permitieron evaluar el

desempeño de ambos sistemas bajo condiciones de carga variable.

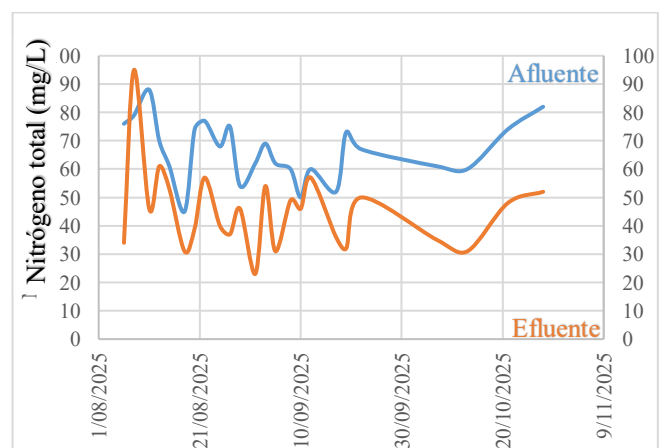
Este análisis permitió evaluar la respuesta de cada reactor frente a los cambios de concentración del afluente. La Figura 5 muestra la evolución de las concentraciones de nitrógeno total en el afluente y efluente del reactor SBR durante los eventos de muestreo.

Figura 5. Variación temporal de la concentración de nitrógeno total en el reactor SBR



La Figura 6 presenta el comportamiento temporal de las concentraciones de nitrógeno total en el sistema IFAS-MBBR durante el mismo período de evaluación.

Figura 6. Variación temporal de la concentración de nitrógeno total en el sistema IFAS-MBBR

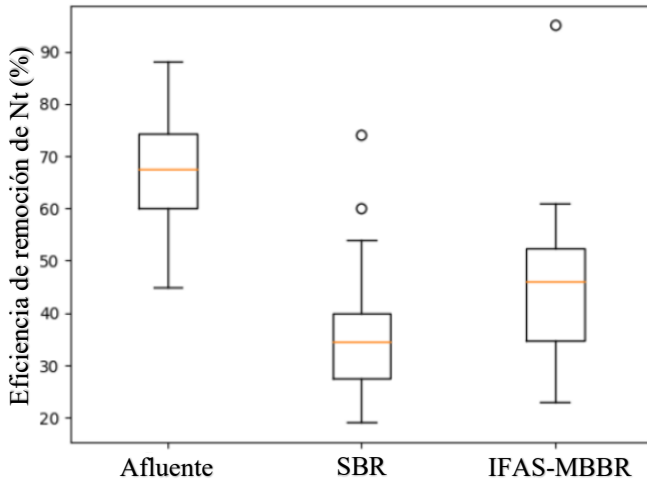


Distribución de concentraciones de nitrógeno total

Con el fin de analizar la distribución de las concentraciones de nitrógeno total en los sistemas evaluados, se elaboraron diagramas de caja (*boxplot*)

que permiten visualizar la dispersión de los datos y las diferencias entre afluente y efluentes (ver figura 7).

Figura 7. Distribución de concentraciones de nitrógeno total en afluente, efluente SBR y efluente IFAS-MBBR

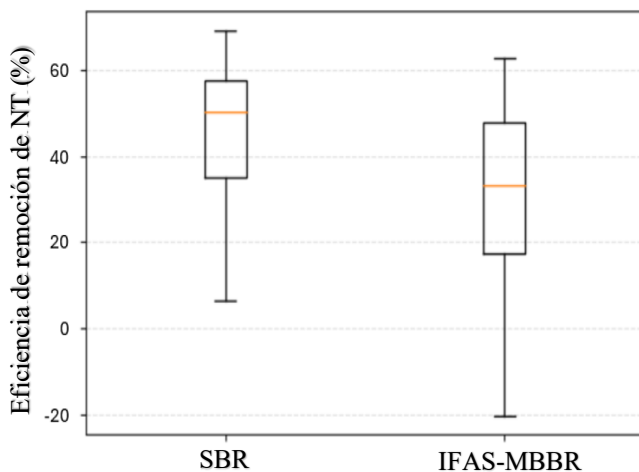


Los resultados muestran una reducción general de las concentraciones de nitrógeno total en ambos sistemas, consistente con el efecto del tratamiento biológico.

Eficiencia de remoción de nitrógeno total

La eficiencia de remoción de nitrógeno total se calculó para cada evento de muestreo utilizando las concentraciones de entrada y salida de los reactores (ver figura 8).

Figura 8. Distribución de la eficiencia de remoción de nitrógeno total en los sistemas SBR e IFAS-MBBR



Los resultados descriptivos mostraron diferencias en el desempeño de ambas tecnologías, con mayor eficiencia promedio en el sistema SBR (tabla 3).

Tabla 3. Estadísticos descriptivos de la eficiencia de remoción de nitrógeno total

Sistema	Promedio (%)	Desviación Estándar (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)
SBR	45.5	17	18	69.4
IFAS-MBBR	31.7	20	5	62.9

De forma complementaria, se estimó la tasa volumétrica aparente de remoción de nitrógeno total a partir del caudal aplicado, la diferencia entre la concentración promedio de NT en el afluente y efluente, y el volumen útil de cada reactor. Bajo este enfoque, el sistema SBR presentó una tasa aparente de 16.8 mg N/L·d, equivalente a 16.8 g N/m³·d, mientras que el sistema IFAS-MBBR presentó una tasa aparente de 17.9 mg N/L·d, equivalente a 17.9 g N/m³·d. Estos valores deben interpretarse como indicadores operativos normalizados por volumen de reactor y no como tasas cinéticas específicas, debido a que no se contó con mediciones sistemáticas de biomasa suspendida y adherida para normalizar la remoción respecto a la biomasa activa.

Como parámetro complementario, la DQO se utilizó para contextualizar la disponibilidad relativa de materia orgánica durante la operación estable. En los cinco eventos con medición de DQO, el afluente presentó un promedio de 424 ± 105 mg/L, con un rango de 291 a 542 mg/L. La relación DQO/NT, empleada como aproximación operativa de la disponibilidad relativa de carbono frente a la carga nitrogenada, presentó un promedio de 6.6 ± 1.9, con valores entre 4.8 y 9.0. En estos eventos, el SBR mostró una remoción promedio de DQO de 84.0 ± 7.0 %, mientras que el IFAS-MBBR presentó 56.2 ± 15.3 %.

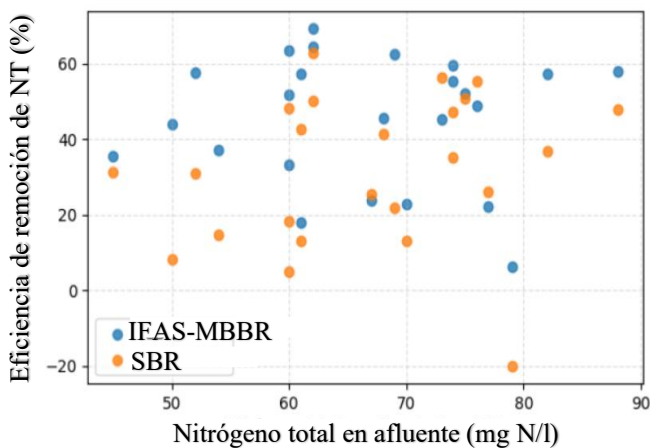
Las mediciones semicuantitativas de NO₂⁻ y NO₃⁻ indicaron ausencia de estas especies en el afluente durante los eventos reportados. En los efluentes se observaron concentraciones de NO₂⁻ entre 0 y 3 mg/L en el IFAS-MBBR y entre 0.3 y 3 mg/L en el SBR. Para NO₃⁻, los rangos observados fueron de 0 a 20 mg/L en el IFAS-MBBR y de 1 a 50 mg/L en el SBR. La presencia de especies oxidadas en los efluentes se interpretó como un indicador operativo consistente con

transformaciones asociadas a nitrificación durante la operación piloto.

Relación entre concentración de entrada y eficiencia de remoción

Para evaluar la posible influencia de la concentración de nitrógeno total en el afluente sobre la eficiencia del proceso, se analizó la relación entre ambos parámetros (ver figura 9). Este análisis permitió identificar la variabilidad del desempeño de los reactores frente a las fluctuaciones en la carga de nitrógeno.

Figura 9. Relación entre la concentración de nitrógeno total en el afluente y la eficiencia de remoción en los sistemas evaluados



Análisis estadístico

Con el objetivo de evaluar la existencia de diferencias significativas entre los sistemas SBR e IFAS-MBBR, se aplicaron pruebas estadísticas a las variables concentración de nitrógeno total en el efluente (NT_{ef}) y eficiencia de remoción de nitrógeno total (η NT).

La normalidad de los datos fue evaluada mediante la prueba de Shapiro–Wilk. Los resultados indicaron que la variable NT en el efluente no presentó distribución normal en ninguno de los sistemas (SBR: $W = 0.907$, $p = 0.030$; IFAS-MBBR: $W = 0.872$, $p = 0.006$). En contraste, la eficiencia de remoción de nitrógeno mostró una distribución compatible con normalidad en ambos sistemas (SBR: $W = 0.928$, $p = 0.087$; IFAS-MBBR: $W = 0.959$, $p = 0.413$).

Con base en estos resultados, la comparación entre sistemas se realizó mediante la prueba no paramétrica

de Mann–Whitney U para la variable NT_{ef} y la prueba t de Student para muestras independientes para la eficiencia de remoción de nitrógeno.

Los resultados indicaron diferencias estadísticamente significativas entre ambos sistemas ($p \leq 0.05$). Para NT_{ef}, la prueba de Mann–Whitney indicó $U = 180.0$ ($p = 0.041$), mientras que para la eficiencia de remoción de nitrógeno la prueba t de Student presentó $t = 2.31$ ($p = 0.026$) según se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados de las pruebas estadísticas aplicadas al desempeño de los sistemas SBR e IFAS-MBBR

Variable	Prueba	Estadístico	Valor p
NT efluente (mg N/L)	Mann-Whitney U	180.0	0.041
Eficiencia de remoción de NT (%)	t de Student	2.31	0.026

Aunque las pruebas estadísticas indicaron diferencias entre los sistemas evaluados, los resultados deben interpretarse considerando que el diseño experimental incluyó un reactor piloto por tecnología y réplicas temporales durante la fase estable. El análisis estadístico permitió comparar el comportamiento temporal de ambos sistemas bajo las condiciones evaluadas, pero no sustituye un diseño con réplicas físicas independientes.

Por tanto, la significancia observada debe entenderse como evidencia comparativa bajo las condiciones específicas de operación piloto, afluente real pretratado y régimen de control aplicado en este estudio.

Discusión de resultados

Desempeño comparativo de los sistemas biológicos

Los resultados obtenidos indicaron diferencias en el desempeño de los sistemas SBR e IFAS-MBBR para la remoción de nitrógeno total bajo condiciones de baja relación carbono/nitrógeno (C/N). El sistema SBR presentó una eficiencia promedio de remoción de nitrógeno total de $45.5 \pm 17\%$, mientras que el sistema IFAS-MBBR alcanzó una eficiencia promedio de $31.7 \pm 20\%$, con diferencias estadísticamente significativas entre ambos sistemas.

Estos resultados sugieren un mayor desempeño del sistema SBR bajo las condiciones experimentales

evaluadas, particularmente en un contexto de baja disponibilidad de carbono biodegradable.

Estas diferencias pueden atribuirse, en parte, a las características operativas de cada tecnología. En los reactores SBR, la alternancia controlada entre fases aeróbicas y anóxicas dentro de un mismo reactor permite establecer condiciones favorables para los procesos de nitrificación y desnitrificación. En este estudio, los ciclos operativos se definieron desde el diseño conceptual inicial, mientras que la estrategia de alimentación del agua residual pretratada durante la fase anóxica permitió favorecer el aprovechamiento del carbono biodegradable disponible para la desnitrificación.

Resultados similares han sido reportados por Tran et al. (2023), quienes documentaron eficiencias de remoción de nitrógeno total de hasta 80 % mediante la optimización de la secuencia operativa en reactores SBR. De manera similar, Khan (2024) reportó eficiencias de desnitrificación simultánea de 88–98 % en sistemas SBR bajo condiciones controladas, lo que evidencia el potencial de esta tecnología cuando se optimizan las condiciones de operación. No obstante, las eficiencias obtenidas en el presente estudio fueron menores que las reportadas por dichos autores. Esta diferencia puede estar asociada a las características del afluente real pretratado, la baja disponibilidad relativa de carbono y la variabilidad propia de las cargas generadas en el complejo logístico.

Aunque el sistema IFAS-MBBR presentó una menor eficiencia promedio de remoción en comparación con el SBR, su desempeño debe interpretarse considerando la configuración piloto evaluada. La incorporación de medios plásticos permitió disponer de superficie para el desarrollo de biomasa adherida; sin embargo, la fracción de llenado fue de 1.43 % v/v, por lo que la contribución relativa de la biopelícula pudo ser limitada frente a configuraciones con mayor área disponible. Aunque la fracción volumétrica fue baja, el área instalada se verificó mediante una carga superficial estimada de 9.33 g DBO/m²·d, utilizada como criterio de predimensionamiento. El uso de cargas superficiales referidas al área del medio portador es consistente con estudios MBBR/IFAS que analizan el desempeño del proceso en función de la carga orgánica aplicada, la biomasa adherida desarrollada sobre medios móviles y

variables operativas como HRT, SRT, OD y fracción de llenado de carrier (Aygün et al., 2008; Khudhair et al., 2023).

Por tanto, los resultados corresponden a una configuración IFAS-MBBR piloto con baja fracción de medio portador y no deben extrapolarse directamente a sistemas optimizados con mayores porcentajes de llenado o mayor desarrollo de biomasa adherida.

En sistemas IFAS-MBBR, la coexistencia de biomasa suspendida y adherida puede favorecer la formación de gradientes de oxígeno dentro de la biopelícula, lo que permitiría la ocurrencia simultánea de procesos de nitrificación y desnitrificación en diferentes microzonas del biofilm. Este fenómeno ha sido documentado en estudios sobre sistemas híbridos IFAS; sin embargo, en el presente estudio no se realizó caracterización microbiológica ni medición directa de microzonas dentro de la biopelícula, por lo que esta interpretación se mantiene como explicación conceptual.

En este sentido, Liang et al. (2022) reportaron mejoras significativas en la eficiencia de remoción de nitrógeno en sistemas IFAS a gran escala, atribuyendo este comportamiento a la mayor capacidad de retención de biomasa nitrificante en los medios plásticos. De forma similar, Dolatshah et al. (2024) documentaron remociones de nitrógeno total de hasta 77 % en sistemas IFAS optimizados mediante simulación, destacando el potencial de esta tecnología para aplicaciones industriales.

Asimismo, Phanwilai et al. (2020) compararon sistemas IFAS y MBBR a escala real, reportando eficiencias de remoción de nitrógeno total de 64 % y 77 %, respectivamente. Estos antecedentes muestran el potencial de la biomasa adherida en configuraciones IFAS y MBBR; sin embargo, su desempeño depende de la configuración específica, el porcentaje de medio portador, la disponibilidad de carbono, el control de oxígeno y la escala de operación. De manera complementaria, Gu et al. (2022) evaluaron un sistema piloto A/O-IFAS con carriers de polietileno para mejorar la remoción de nitrógeno en agua residual municipal, observando incrementos en la capacidad de tratamiento y en la abundancia de bacterias nitrificantes asociadas al medio soporte. Este antecedente refuerza que el desempeño de configuraciones IFAS depende del tipo y cantidad de medio portador, del desarrollo de

biomasa adherida y de las condiciones operativas aplicadas.

Influencia de la relación carbono/nitrógeno

Uno de los factores que probablemente influyó en el desempeño observado en ambos sistemas fue la baja relación carbono/nitrógeno del efluente evaluado. La desnitrificación heterotrófica requiere carbono orgánico disponible como fuente de electrones, por lo que condiciones de baja relación C/N pueden limitar la conversión de nitratos a nitrógeno gaseoso y, en algunos casos, requerir fuentes externas de carbono para mejorar la eficiencia del proceso (Fu et al., 2022).

En este estudio, la relación DQO/NT se utilizó como aproximación operativa de la disponibilidad relativa de carbono frente a la carga nitrogenada. Aunque la DQO no equivale directamente al carbono biodegradable ni sustituye la medición de DBO₅, los valores observados permitieron contextualizar la limitación del proceso de desnitrificación. Bajo estas condiciones, el mayor desempeño del SBR puede asociarse con su capacidad operativa para aprovechar fases anóxicas y aeróbicas secuenciales, favoreciendo el uso del carbono disponible.

Las mediciones semicuantitativas de NO₂⁻ y NO₃⁻ indicaron presencia de especies oxidadas de nitrógeno en los efluentes, lo cual fue consistente con transformaciones asociadas a nitrificación. Sin embargo, al no medirse directamente NH₄⁺-N ni NTK, no fue posible cuantificar la fracción exacta del nitrógeno total que fue nitrificada ni diferenciar cuánto del NT remanente correspondió a formas amoniacales u orgánicas. Por ello, la interpretación sobre nitrificación y desnitrificación se mantuvo con carácter diagnóstico y no como un balance completo de especies nitrogenadas.

En sistemas SBR, esta limitación puede mitigarse parcialmente mediante el control de las fases de reacción y la estrategia de alimentación, lo que puede favorecer el uso del carbono disponible durante los períodos anóxicos. Puig et al. (2004) demostraron que estrategias de alimentación escalonada en reactores SBR pueden favorecer la desnitrificación bajo condiciones de baja disponibilidad de carbono. Además, en escenarios con limitación marcada de carbono, la dosificación controlada de una fuente externa puede constituir una alternativa para mejorar la

desnitrificación, como ha sido documentado en reactores SBR operados con etanol como fuente de carbono (Puig et al., 2007).

En el caso del sistema IFAS-MBBR, aunque la biomasa adherida puede favorecer la retención de microorganismos especializados, la limitada disponibilidad de carbono biodegradable puede restringir la tasa de desnitrificación, particularmente cuando el proceso depende principalmente de la desnitrificación heterotrófica.

Implicaciones para la selección tecnológica

Los resultados obtenidos sugieren que ambas tecnologías presentan ventajas bajo condiciones específicas de operación. El sistema SBR mostró una mayor eficiencia promedio de remoción de nitrógeno bajo las condiciones evaluadas, lo cual puede atribuirse a su mayor flexibilidad operativa para controlar las fases del proceso biológico.

La mayor variabilidad observada en el sistema IFAS-MBBR sugiere una mayor sensibilidad a las condiciones operativas y a la disponibilidad de carbono biodegradable bajo las condiciones evaluadas, lo cual puede influir en la estabilidad del proceso de desnitrificación.

Estos resultados resaltan la importancia de considerar las características del efluente, la estabilidad operativa, la flexibilidad del proceso y las condiciones específicas de operación al momento de seleccionar la tecnología de tratamiento más adecuada para aguas residuales especiales generadas en complejos logísticos.

Asimismo, el estudio aporta evidencia experimental generada bajo condiciones reales de operación, lo cual contribuye a reducir la brecha de conocimiento existente sobre el tratamiento biológico de aguas residuales especiales en contextos similares al evaluado.

Los resultados experimentales obtenidos en esta investigación permiten no solo comparar el desempeño de ambas tecnologías a escala piloto, sino también explorar sus posibles implicaciones en escenarios de mayor escala de tratamiento. En este contexto, se desarrolló un análisis conceptual de escalamiento orientado a evaluar indicadores técnicos, económicos, energéticos y ambientales derivados del desempeño

observado en los sistemas experimentales, como apoyo a la selección tecnológica preliminar en condiciones de baja relación C/N.

Implicaciones para el escalamiento conceptual de sistemas de tratamiento

A partir de los resultados obtenidos en la operación piloto, se realizó un análisis conceptual de escalamiento con el propósito de explorar el comportamiento potencial de las tecnologías evaluadas en escenarios de mayor capacidad de tratamiento. Este ejercicio tuvo un enfoque académico y exploratorio, orientado a apoyar la reflexión técnica sobre la selección de tecnologías más allá de la escala piloto, sin sustituir los estudios de diseño detallado requeridos para aplicaciones reales.

La Tabla 5 resume los indicadores medidos en planta piloto y los indicadores proyectados mediante el análisis conceptual de escalamiento, utilizados como referencia comparativa para la selección tecnológica bajo distintos escenarios de aplicación.

Tabla 5. Indicadores técnicos, económicos, energéticos y ambientales derivados del análisis conceptual de escalamiento

Bloques de desarrollo	Indicador	SBR	IFAS-MBBR
Indicadores Medidos y provenientes de planta piloto	Remoción de NT (%)	45.5 ± 17.0	31.7 ± 20.0
	Remoción de DQO (%)	84.0 ± 6.7	56.2 ± 14.7
	Rendimiento aparente Y_n /DBO (kg N/kg DBO)	0.109	0.087
	Estabilidad operativa	Alta	Media
Indicadores proyectados provenientes de escalamiento teórico	CAPEX específico	Mejor < 50 m ³ /d	Mejor > 50 m ³ /d
	OPEX específico	Mejor > 70 m ³ /d	Mejor < 70 m ³ /d
	Área específica	Mejor < 50 m ³ /d	Mejor > 50 m ³ /d
	Consumo energético específico (kWh/kg NT)	2.0 – 2.9	2.1 – 3.0
	Costo operativo (USD/kg NT)	10.25 – 11.54	11.28 – 12.18
	Huella de carbono (kg CO ₂ /kg NT)	5.4 – 6.0	5.0 – 5.5

Nota. Los indicadores técnicos corresponden a resultados medidos en planta piloto. Los indicadores económicos, energéticos y ambientales se obtuvieron mediante escalamiento conceptual a partir del desempeño experimental. Se utilizó un tipo de cambio de Q7.80/USD.

El análisis consideró indicadores comúnmente utilizados en el diseño y evaluación de sistemas de tratamiento de aguas residuales, incluyendo inversión específica (CAPEX), costo operativo específico (OPEX), área de ocupación, consumo energético por kilogramo de nitrógeno removido y huella de carbono asociada al proceso. Por tanto, los indicadores proyectados deben interpretarse como referencias comparativas preliminares y no como valores definitivos de diseño o presupuesto.

Este enfoque es consistente con estudios recientes que integran el desempeño de sistemas MBBR e IFAS con evaluación ambiental de ciclo de vida para apoyar decisiones de ampliación o mejora de plantas de tratamiento. Awad et al. (2024) mostraron que la comparación entre tecnologías con biomasa adherida puede fortalecerse al incorporar indicadores de desempeño, energía e impactos ambientales, además de la eficiencia de remoción.

Los resultados obtenidos muestran que ambas tecnologías presentan ventajas bajo diferentes rangos de caudal y condiciones operativas. Mientras que los sistemas SBR pueden ofrecer ventajas en términos de flexibilidad operativa y eficiencia en escalas menores, los sistemas IFAS-MBBR pueden presentar ventajas asociadas a su compacidad, retención potencial de biomasa y reducción del volumen requerido en aplicaciones de mayor escala, siempre que el diseño incorpore suficiente área de medio portador y condiciones adecuadas de operación.

En este sentido, el análisis de escalamiento permite complementar los resultados experimentales obtenidos en la planta piloto, proporcionando un marco de referencia preliminar para la selección tecnológica en sistemas de tratamiento de aguas residuales especiales generadas en complejos logísticos.

Conclusiones

El presente estudio permitió comparar experimentalmente el desempeño de dos tecnologías biológicas de tratamiento de aguas residuales, el reactor secuencial por lotes (SBR) y el sistema híbrido IFAS-MBBR, para la remoción de nitrógeno en aguas residuales especiales con baja relación carbono/nitrógeno (C/N) provenientes de un complejo logístico. La operación paralela de ambos sistemas a escala piloto, utilizando el mismo afluente real

pretratado y condiciones hidráulicas comparables, permitió evaluar directamente las diferencias en su comportamiento frente a las variaciones propias del efluente.

Los resultados indicaron que, bajo las condiciones evaluadas, el SBR presentó mayor eficiencia promedio de remoción de nitrógeno total ($45.5 \pm 17\%$) que el IFAS-MBBR ($31.7 \pm 20\%$). Este desempeño puede asociarse con su flexibilidad operativa para alternar condiciones aeróbicas y anóxicas, así como con la alimentación de agua residual pretratada durante la fase anóxica, lo que pudo favorecer el aprovechamiento del carbono disponible para la desnitrificación.

La baja disponibilidad relativa de carbono, interpretada mediante la relación DQO/NT como aproximación operativa, condicionó el desempeño global de ambos sistemas, especialmente en procesos dependientes de desnitrificación heterotrófica. Sin embargo, al no medirse directamente $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ni NTK, no fue posible diferenciar cuantitativamente la contribución relativa de una posible nitrificación incompleta y una desnitrificación limitada; por ello, la interpretación de los mecanismos de remoción se mantiene con carácter diagnóstico.

El sistema IFAS-MBBR mostró mayor variabilidad en la eficiencia de remoción. Aunque los medios plásticos proporcionaron superficie para biomasa adherida, la baja fracción de llenado utilizada (1.43 % v/v) pudo limitar la contribución relativa de la biopelícula frente a configuraciones con mayor área disponible. El área instalada se verificó mediante una carga superficial estimada de $9.33 \text{ g DBO/m}^2\cdot\text{d}$; no obstante, los resultados no deben extrapolarse directamente a sistemas IFAS-MBBR optimizados con mayor porcentaje de medio portador o mayor desarrollo de biomasa adherida.

El análisis conceptual de escalamiento identificó implicaciones preliminares para la selección de tecnologías en sistemas compactos de tratamiento de aguas residuales especiales. Bajo los supuestos evaluados, el SBR mostró ventajas asociadas con eficiencia de remoción y flexibilidad operativa en aplicaciones de menor escala, mientras que el IFAS-MBBR se identificó como alternativa de interés cuando la compactidad, la retención potencial de biomasa y la operación continua adquieren mayor relevancia,

siempre que se incorpore suficiente área de medio portador y condiciones adecuadas de operación.

Los indicadores proyectados mostraron consumos energéticos específicos de 2.0–2.9 kWh/kg NT para SBR y 2.1–3.0 kWh/kg NT para IFAS-MBBR; costos operativos de 10.25–11.54 USD/kg NT y 11.28–12.18 USD/kg NT, respectivamente; y huellas de carbono de 5.4–6.0 kg $\text{CO}_2/\text{kg NT}$ y 5.0–5.5 kg $\text{CO}_2/\text{kg NT}$. Estos indicadores proporcionan criterios comparativos útiles para prefactibilidad, pero deben interpretarse como aproximaciones conceptuales, no como parámetros definitivos de diseño ejecutivo, presupuesto final o validación directa a escala real.

Agradecimientos

El autor expresa su agradecimiento a la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, especialmente a su asesor M.Sc. Ing. Adan Ernesto Pocasangre y sus evaluadores M.Sc. Ing. Julián Duarte Jiménez y Ph.D Ing. Felix Alan Douglas Aguilar Carrera por el acompañamiento académico brindado durante el desarrollo de esta investigación.

De igual forma, se agradece a ECOTEC, S.A., por el apoyo formativo, técnico y logístico para la implementación, operación y monitoreo del sistema piloto utilizado en este estudio. El desarrollo de esta investigación fue posible gracias al acceso a infraestructura operativa y al apoyo del equipo técnico Ing. Rocío Esmeralda Rangel Robles involucrada en las actividades de muestreo y seguimiento del sistema experimental.

Financiamiento

Este trabajo fue financiado con recursos propios del autor.

Conflicto de interés

El autor declara no tener ningún tipo de conflicto de interés que pudiera haber influido en esta investigación.

Como citar este documento

Quevedo Castillo, P.A. & Pocasangre Collazos, A.E. (2025). Comparación experimental de SBR e IFAS-MBBR para remoción de nitrógeno en aguas residuales de complejo logístico. *Agua, Saneamiento & Ambiente.*, 20(1), 1–15.

<https://doi.org/10.36829/08ASA.v20i1.2127>

Consentimiento informado

No aplica.

Contribuciones de autor

Conceptualización de la investigación, diseño experimental, trabajo de campo, procesamiento y análisis de datos, elaboración de figuras y tablas, redacción del manuscrito: P.A.Q.C.

Asesoría académica, revisión metodológica, supervisión del análisis de resultados y revisión crítica del manuscrito: A.E.P.C.

Referencias

- Awad, H., Mossad, M., Mahanna, H., Foad, M., El-Badawy, A., & Gar Alalm, M. (2024). Performance and life cycle assessment of moving-bed biofilm and integrated fixed-film reactors to upgrade activated sludge systems. *Journal of Cleaner Production*, 449, 141624. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141624>
- Aygun, A., Nas, B., & Berkay, A. (2008). Influence of high organic loading rates on COD removal and sludge production in moving bed biofilm reactor. *Environmental Engineering Science*, 25(9), 1311–1316. <https://doi.org/10.1089/ees.2007.0071>
- Benavides-Sánchez, J., Vuono, M., & Dionisi, D. (2021). Model-based comparison of sequencing batch reactors and continuous-flow activated sludge processes for biological wastewater treatment. *Computers & Chemical Engineering*, 144, 107127. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107127>
- Dolatshah, M., Asadi, A., Gholami, F., & Nazari, S. (2024). Development and modeling of an integrated fixed-film activated sludge (IFAS) system for simultaneous nitrogen and carbon removal from an industrial estate wastewater. *Biotechnology Reports*, 41, e00831. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2024.e00831>
- Fu, X., Hou, R., Yang, P., Qian, S., Feng, Z., Chen, Z., Wang, F., Yuan, R., Chen, H., & Zhou, B. (2022). Application of external carbon source in heterotrophic denitrification of domestic sewage: A review. *Science of the Total Environment*, 817, 153061. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153061>
- Gu, S., Liu, L., Zhuang, X., Qiu, J., & Zhou, Z. (2022). Enhanced nitrogen removal in a pilot-scale anoxic/aerobic (A/O) process coupling PE carrier and nitrifying bacteria PE carrier: Performance and microbial shift. *Sustainability*, 14(12), 7193. <https://doi.org/10.3390/su14127193>
- Kargi, F., & Uygur, A. (2003). Nutrient loading rate effects on nutrient removal in a five-step sequencing batch reactor. *Process Biochemistry*, 39(4), 507–512. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(03\)00135-3](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(03)00135-3)
- Khan, N. A., Singh, S., Ramamurthy, P. C., & Aljundi, I. H. (2024). Exploring nutrient removal mechanisms in column-type SBR with simultaneous nitrification and denitrification. *Journal of Environmental Management*, 349, 119485. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119485>
- Khudhair, D. N., Hosseinzadeh, M., Zwain, H. M., Siadatmousavi, S. M., Majdi, A., & Mojiri, A. (2023). Upgrading the MBBR process to reduce excess sludge production in activated sludge system treating sewage. *Water*, 15(3), 408. <https://doi.org/10.3390/w15030408>
- Liang, Z., Yi, J., Gu, Q., & Dai, X. (2022). Metagenomics reveals a modified large-scale IFAS process with enhanced nitrogen removal and reduced sludge production. *Science of the Total Environment*, 841, 156666. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156666>
- Phanwilai, S., Kangwannarakul, N., Noophan, P., Kasahara, T., Terada, A., Munakata-Marr, J., & Figueroa, L. A. (2020). Nitrogen removal efficiencies and microbial communities in full-scale IFAS and MBBR municipal wastewater treatment plants at high COD:N ratio. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 14, 115. <https://doi.org/10.1007/s11783-020-1374-2>
- Puig, S., Vives, M. T., Corominas, L., Balaguer, M. D., & Colprim, J. (2004). Wastewater nitrogen removal in SBRs applying a step-feed strategy: from lab-scale to pilot-plant operation. *Water*

Science & Technology, 50(10), 89–96.

<https://doi.org/10.2166/wst.2004.0617>

Puig, S., Coma, M., van Loosdrecht, M. C. M., Colprim, J., & Balaguer, M. D. (2007). Biological nutrient removal in a sequencing batch reactor using ethanol as carbon source. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 82(10), 898–904.

<https://doi.org/10.1002/jctb.1754>

Tran, H. Q., Gogina, E., Makisha, N., Gulshin, I., & Makisha, E. (2023). Improving nitrogen removal efficiency in SBR reactors by controlling operational phases. *Applied Sciences*, 13(19), 10906.

<https://doi.org/10.3390/app131910906>

Zhao, R., Zhao, H., Dimassimo, R., & Xu, G. (2018). Pilot scale study of sequencing batch reactor (SBR) retrofit with integrated fixed film activated sludge (IFAS): nitrogen removal and design considerations. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 4(4), 569–581.

<https://doi.org/10.1039/C7EW00337D>