

# XIV CONGRESO BOLIVARIANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL Region 3

## XV Congreso Nacional de AEISA

*"Sostenibilidad, vulnerabilidad y cambio climático"*

La Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Confiere el presente certificado a:

*GERMAN CUEVAS RODRIGUEZ*

Por su participación como **CONFERENCISTA** en el XIV CONGRESO BOLIVARIANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL y XV CONGRESO NACIONAL DE AEISA realizado en la ciudad de Cuenca del 23 al 25 de noviembre de 2011.

• Ing. RAFAEL DAUTANT  
PRESIDENTE DE AIDIS

• Ing. VICENTE GONZÁLEZ BORJA  
PRESIDENTE DE AIDIS REGION 3  
PRESIDENTE DE AEISA

• Ing. DANIEL RUILOVA  
COORDINADOR ACADÉMICO



# BIOREACTORES CON MEMBRANAS (BRM): EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO Y REUSO DE LAS AGUAS RESIDUALES URBANAS

## MEMBRANES BIOREACTOR: AN ASSESSMENT OF TECHNOLOGY FOR TREATMENT AND REUSE OF URBAN WASTEWATER

### \*Germán Cuevas Rodríguez

Doctor en Ingeniería Ambiental por la Universidad de Cantabria, España. Maestría en Ingeniería Ambiental, DEPI-UNAM, México e Ingeniero Bioquímico por el Instituto Tecnológico de Culiacán, México. Diplomado en Propiedad Intelectual, Universidad de Guanajuato. Las áreas de interés son el tratamiento biológico y reuso de aguas residuales, así como gestión integral de residuos sólidos.



### Julio Alberto Ávila Arias

Universidad de Guanajuato

### Marco A. Silva Robles

Universidad de Guanajuato

### Bernal Martínez Arodí

Universidad de Guanajuato

### Elcia Margaret Souza Brito

Universidad de Guanajuato

### Sergio Antonio Silva Muñoz

Universidad de Guanajuato

\*Dirección de contacto: Departamento de Ingeniería Civil, División Ingenierías, Campus Guanajuato de la Universidad de Guanajuato, Av. Juárez # 77, C. P. 36000, Guanajuato, Gto. Tel:(473)1020100 Ext. 2292. \*e-mail: german28@quijote.ugto.mx.

## RESUMEN

Los RBM (Reactores Biológicos con Membranas) es una tecnología que su aplicación se ha extendido para el tratamiento y reuso de aguas residuales urbanas e industriales, debido a que los efluentes que se obtienen después del tratamiento son de muy alta calidad. Esta tecnología es una modificación del proceso de lodos activados convencional, en la que se combinan los procesos biológicos y membranas de filtración (micro y ultrafiltración) en una sola unidad de tratamiento. Algunas de las ventajas que presenta este sistema son la alta calidad del efluente, la baja producción de lodos, el desarrollo de plantas más compactas. Sin embargo, un RBM también presenta desventajas como el bioensuciamiento y alto costo de las membranas, requerimiento de energía entre otros. Sin embargo su aplicación como sistema de tratamiento es una alternativa para el tratamiento de aguas residuales en lugares donde los espacios son pequeños y donde se requieren efluentes con alta calidad para su reutilización. El objetivo de esta investigación fue evaluar dos RBM con biopelículas a nivel laboratorio para el tratamiento de aguas residuales urbanas. Los resultados muestran que es posible alcanzar altos porcentajes de eliminación de materia orgánica (DQO), fósforo, nitrógeno y microorganismos patógenos. Esto permite alcanzar un efluente con calidad que pudiera ser reutilizado en algunas actividades que requieran este recurso. Se concluyó que los RBM son una buena opción como sistema para el tratamiento de aguas de las aguas residuales urbanas donde se requieran efluentes de alta calidad.

## INTRODUCCIÓN

1652200



Actualmente, el diseño y construcción de reactores biológicos para tratamiento de aguas residuales, está orientado al desarrollo de sistemas compactos, modulares y que proporcionen un efluente con calidad para ser reutilizado. En los últimos años la tecnología ha dado un gran avance, ya que actualmente se ofrecen en el mercado los reactores biológicos con membranas (RBM) o mejor conocido MBR por sus siglas en inglés (Membrane Biological Reactor). Esta tecnología combina los tratamientos biológicos con los procesos de separación con membranas. Una de las principales ventajas de este tipo de sistemas es que no es necesario la implementación de un sedimentador para llevar a cabo la separación de la biomasa, operación necesaria en los sistemas convencionales, ya que en los RBM los sólidos en suspensión y microorganismos responsables de la biodegradación son separados del agua tratada mediante una unidad de filtración equipada con membranas porosas.

Las principales ventajas que presentan los RBMs sobre los procesos convencionales utilizados para el tratamiento de aguas residuales son: la capacidad para retener toda la biomasa en el sistema, lo que permite acumular altas concentraciones de la misma dentro del sistema. Estas altas concentraciones de biomasa hacen que el proceso pueda ser más compacto y tratar una mayor carga orgánica. Adicionalmente, las membranas aportan ventajas importantes como son: degradación de compuestos orgánicos recalcitrantes, mejora en la eficiencia de desinfección, altas tasas de nitrificación, reducción del espacio de construcción ya que la clarificación, filtración y desinfección del efluente se da en una sola unidad, baja producción de lodos (Cicek, et al., 1998b; Cote et al., 1997; Ghyoot, et al., 2000; Gander et al., 2000; Rosenberger, et al. 2002).

Actualmente se pueden encontrar en el mercado RBM con módulos con membranas colocadas en la parte exterior de biorreactor y RBM con módulos sumergidos dentro del biorreactor. Con ambas configuraciones se obtienen caudales de buena calidad, ya que logra eliminar eficientemente DQO, DBO, SST, Coliformes y macronutrientes (N y P); sin embargo, las eficiencias de eliminación de cada uno de los parámetros está en función de varios factores como son: la concentración y tipo de biomasa en el reactor, la relación de transformación específica de los microorganismos, la forma de operación del sistema (mezcla y retrolavado de las membranas), el tipo de membranas y la configuración del módulo, la hidrodinámica manejada en el sistema, el tiempo de retención hidráulico, entre otros.

Por otro lado, existen algunos aspectos importantes en los cuales se han enfocado mucho las recientes investigaciones como son el taponamiento de los poros de las membranas, disminuir los costos de operación y mantenimiento del sistema, incrementar el tiempo de vida útil de las membranas y por último, bajar su precio. Estos dos últimos ya empiezan a solucionarse debido a que ya se están fabricando membranas de bajo costo y larga duración. Sin embargo, el ensuciamiento de los poros de las membranas (fenómeno que se presenta cuando se depositan materiales coloidales, biomasa, materia orgánica e inorgánica, en la superficie y en el interior de los poros de la membrana) sigue siendo el mayor obstáculo en la aplicación de los biorreactores con membrana, debido a que genera una disminución del caudal permeado y un incremento en la resistencia de las membranas. Esto ocasiona una disminución en la productividad de los RBM debido a que los costos de operación y



mantenimiento se incrementan por causa de los frecuentes lavados que hay que aplicar a las membranas y el reemplazo continuo de las mismas.

Tratando de encontrar algunas propuestas para disminuir estos problemas de taponamiento en los RBM, algunas compañías han desarrollado diferentes procesos para el tratamiento de aguas residuales donde incluyen a los RBMs como la parte principal de la planta de tratamiento. Entre estas tecnologías tenemos RBM convencionales con biomasa en suspensión, RBM híbridos donde se combinan procesos de biomasa en suspensión con procesos con biopelículas, entre otros. Se ha visto que este tipo de sistemas funciona y pueden ser una opción viable para el tratamiento de las aguas residuales; por lo que tenemos aun varios retos por resolver, cuál es la mejor tecnologías de RBM que nos permite disminuir el problema de taponamiento y obtener mejor calidad del agua. *dedicadas al tratamiento de agua*  
*sin embargo faltaría hacer una investigación?*

Tomando en consideración esos aspectos, en esta investigación se planteó como objetivo evaluar el funcionamiento a nivel laboratorio de dos RBM con biopelículas alimentados con aguas residuales urbanas.

## METODOLOGÍA

Esta investigación se llevó a cabo en dos etapas; en la primera etapa se evaluó el funcionamiento de un RBM discontinuo (Batch) con biopelículas y en la segunda etapa se evaluó el funcionamiento un RBM con biopelículas ~~pero operado de manera continua.~~

### Unidades experimentales:

#### ***RBM discontinuo***

El RBM utilizado en esta etapa experimental estuvo constituido de biorreactor aerobio con volumen de 29 L. La membrana fue de microfiltración, montada en un marco de acrílico con una superficie total de 200 cm<sup>2</sup> y colocada en una base de PVC. El medio de soporte móvil estuvo constituido de 5000 cubos de polipropileno de con un área superficial de cada uno de 6 cm<sup>2</sup>. En esquema del biorreactor con los medios de soporte y las membranas se puede observar en la figura 1.

El sistema se operó de manera discontinua con ciclos de 8 horas. Cada ciclo estuvo constituido de las siguientes fases: llenado, reacción anaerobia, reacción aerobia, filtración. Durante la etapa anaerobia el sistema se mezcló por medio de un agitador mecánico. En la etapa aerobia el aire se suministró a través de un difusor de burbuja fina. La succión de permeado al final de cada ciclo se filtró a través de una bomba peristáltica. Un retrolavado con agua filtrada se realizó a las membranas diariamente. Esto con la finalidad de llevar a cabo un mejor funcionamiento de las membranas. La alimentación se llevó a cabo con aguas residuales crudas generadas por la población de Silao, ubicada en el estado mexicano de Guanajuato. Las características del agua son típicas de las aguas residuales domésticas.



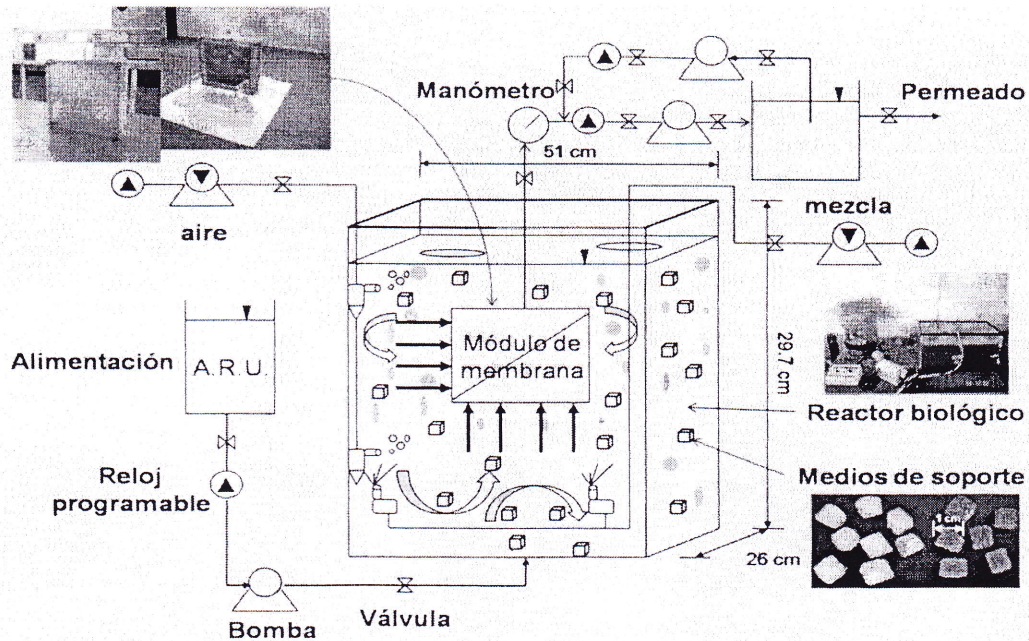


Figura 1. Sistema con un RBM con biopelícula operado de manera discontinua.

Tabla 1. Condiciones de operación manejadas en el RBM discontinuo.

Parámetro	unidad	Valor
Carga orgánica	Kg DQO /Kg <sup>-1</sup> SST *d	0.1
TRC	d	54
Área de filtración	m <sup>2</sup>	0.02
Caudal de aire	m <sup>3</sup> /h	0.6
TRH	h	24
Llenado	h	0.6
Tiempo de reacción anaerobio	h	10.5
Tiempo de reacción aerobio	h	11.4
Tiempo de filtrado	h	2.5

### **RBM continuo:**

El RBM utilizado en esta etapa experimental estuvo constituido de biorreactor aerobio con volumen de 29 L el cual está equipado con una membrana sumergida de geometría plana, medio de soporte móvil (figura 2). La membrana fue de microfiltración, montada en un marco de acrílico con una superficie total de 200 cm<sup>2</sup> y colocada en una base de PVC. El medio de soporte móvil estuvo constituido de 5000 unidades de medio *Kaldnes*® fabricado en polietileno de alta densidad, diámetro de 10 mm y grosor de 7 mm en forma de cilindro, con una superficie protegida de 500 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> y superficie total de 800 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. El aire se suministra al reactor por medio de un compresor de 1.5 hp y se distribuye utilizando un difusor de burbuja fina instalado al fondo del reactor y debajo de la membrana. Para asegurar la eliminación de nutrientes se utilizó una recirculación interna



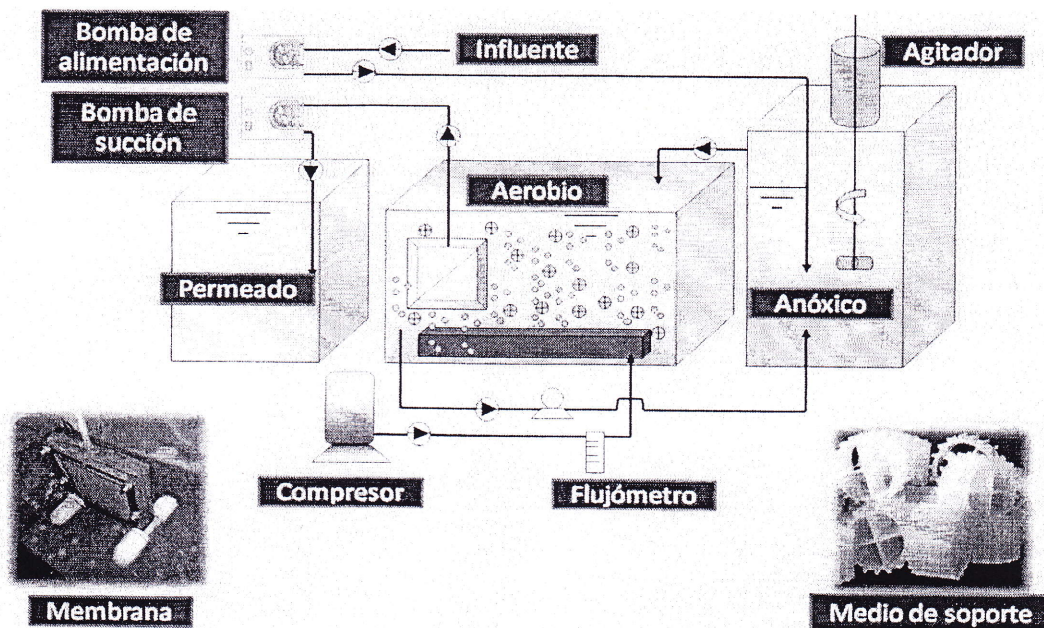
desde el reactor aerobio al reactor anóxico para favorecer la desnitrificación de los efluentes nitrificados. La fuerza impulsora para el proceso de filtración en la membrana fue generada por una bomba peristáltica operando en continuo. El reactor se operó por 118 días alimentando agua residual. En la tabla 2 se muestran las condiciones de operación manejadas en el sistema.

**Tabla 2.** Condiciones de operación manejadas en el RBM continuo.

Parámetro	unidad	Valor
Carga orgánica	Kg DQO /Kg <sup>-1</sup> SST *d	0.11
TRC	d	118
TRH	h	63
Área de filtración	m <sup>2</sup>	0.02
Caudal permeado	L/m <sup>2</sup> *h	35.5
Caudal de aire	m <sup>3</sup> /h	0.6

### Determinaciones analíticas

En ambas etapas se realizaron las determinaciones analíticas fueron realizadas con base en los métodos normalizados para el análisis de aguas potable y aguas residuales [APHA, AWWA, WPCF, 1998) y los métodos de Hach [Hach, 1997]. Los parámetros analizados fueron DQO<sub>S</sub> y DQO<sub>T</sub>, P-PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, SST y SSV, pH, Temperatura y Oxígeno Disuelto.



**Figura 2.** Sistema con un RBM con biopelícula operado en continuo.

### RESULTADOS:

Los principales resultados obtenidos en las evaluaciones del funcionamiento de los RBM, se muestran por separado para cada una de las experimentaciones.



## **RBM con biopelículas operado de forma discontinua.**

### *Eliminación de DQO*

En la tabla se puede presenta de manera concentrada las concentraciones de DQO soluble y total detectadas en el influente y efluente de RBM. Se pudo observar que durante la experimentación existió una alta variabilidad en la concentración de DQO soluble en el agua residual cruda. La concentración de DQO<sub>S</sub> media detectada en influente durante este tiempo fue de 584 mg/L. Como ya se comentó anteriormente, estos cambios son comunes cuando se trabaja con aguas residuales reales, en las cuales las concentraciones de la materia orgánica cambian de acuerdo a las descargas a la alcantarilla, valores un poco más grandes fueron detectados para la DQO<sub>T</sub> (838 mg/L). Respecto a la calidad del efluente se puede observar que la DQO<sub>S</sub> en el permeado fue de 79 mg/L equivalente a un 86% de eliminación, mientras que para la DQO<sub>T</sub> esta concentración fue de 94 mg/L con un porcentaje de eliminación del 89% (ver tabla 3). Como se puede observar, la introducción de medios de soporte y membranas si mejora la eliminación de DQO con respecto de un sistema convencional. Esto posiblemente se deba a que la introducción del medio de soporte y el módulo de membranas permiten mantener una mayor concentración biomasa en el reactor, favoreciendo la eliminación la materia orgánica. Sin embargo hay que señalar, que estas concentraciones de DQO<sub>S</sub> encontradas todavía son altos comparados a los que se obtienen en otros procesos, por lo que es necesario seguir investigando para mejorar los porcentajes de eliminación.

**Tabla 3.** Concentraciones de DQO detectadas en el MBR discontinuo.

Parámetro	Días de operación	DQO Influyente (mg/L)				DQO Efluente (mg/L)				% Rem
		Máx	Min	Med	$\sigma$	Máx	Min	Med	$\sigma$	
DQO soluble	54	735	458	584	$\pm 89$	99	67	79	$\pm 9.6$	86
DQO total	54	1032	675	838	$\pm 123$	129	73	94	$\pm 16$	89

### *Nitrificación*

Durante la etapa experimental llevada a cabo en el RBM discontinuo se pudo observar que durante las etapas de llenado y al final de la fase anaerobia existió prácticamente una desnitrificación total de los nitratos presentes dentro del reactor (tanto los presentes en el agua cruda, 1.65 mg/L, como los del agua remanente dentro del reactor). Sin embargo, se puede observar un incremento de la concentración en el efluente; detectándose una concentración media de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> de 3.1 mg/L (Tabla 4). Como se puede ver la introducción de la membrana filtrante permiten retener a la biomasa mayor tiempo dentro del biorreactor, lo cual permite una mayor concentración de bacterias nitrificantes en el sistema y por lo tanto el fenómeno de la nitrificación estuvo presente durante toda la experimentación. Con esto es posible concluir que la introducción de un módulo de filtración dentro del reactor incrementa la tasa de nitrificación.



**Tabla 4.** Concentración y porcentajes de remoción del  $\text{N-NO}_3^-$  en el MBR discontinuo.

Parámetro	Días de operación	$\text{N-NO}_3^-$ Influyente (mg/L)				$\text{N-NO}_3^-$ Efluente (mg/L)			
		Máx	Min	Med	$\sigma$	Máx	Min	Med	$\sigma$
$\text{N-NO}_3^-$	54	3.2	1	1.65	$\pm 0.5$	6.5	1.7	3.1	$\pm 1.2$

#### *Eliminación de fósforo*

Durante este tiempo que se operó el RBM de manera discontinua se pudo detectar una concentración media en el influente de 29.1 mg/L mientras que en el permeado, al final del ciclo de tratamiento, la concentración media detectada en el permeado fue de 0.96 mg/L, lo cual equivale a un 96.7% de eliminación. Se puede observar que durante este periodo experimental, la concentración en el efluente se mantuvo más estable que un proceso convencional. Esto quizás se debió a que al introducir el módulo de membranas, la biomasa queda retenida dentro del biorreactor, lo cual favorece la eliminación de este nutriente. Por lo cual, se puede concluir que el diseño de los biorreactores discontinuos donde se combina biomasa en suspensión, medios de soporte móviles para la fijación de biopelículas y membranas de filtración favorecen la eliminación del fósforo presente en las aguas residuales.

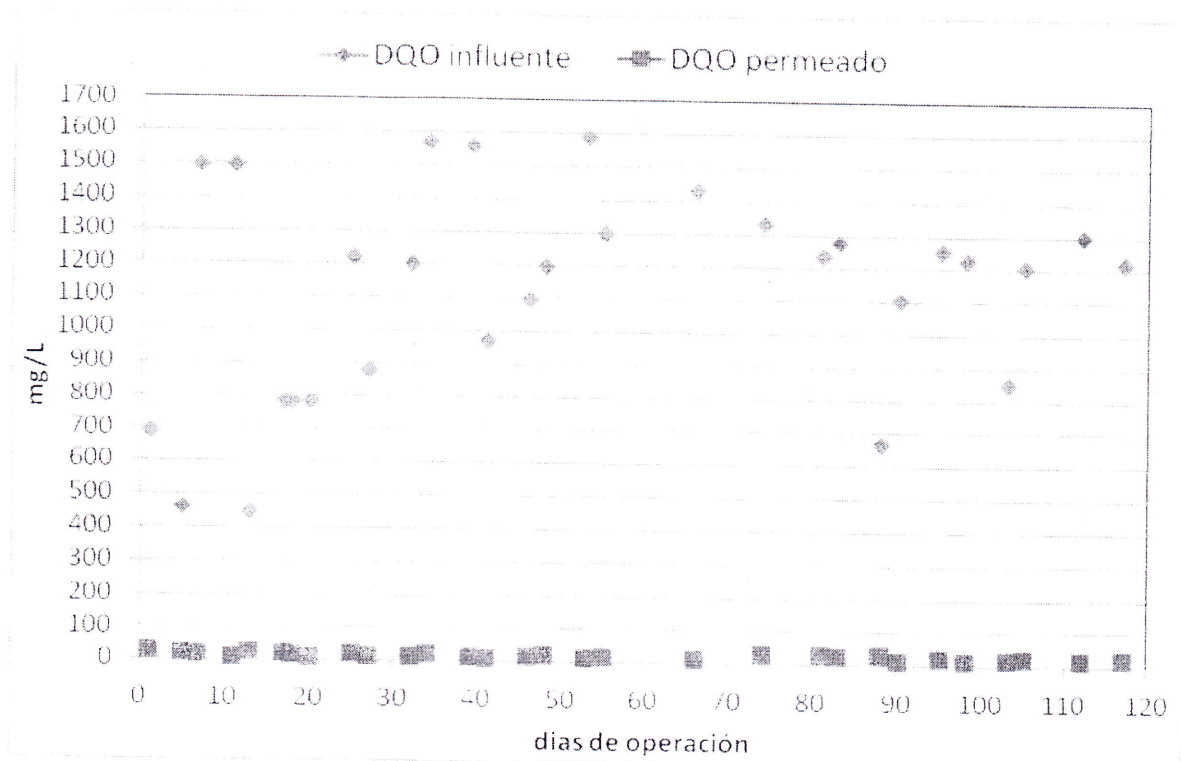
**Tabla 5.** Concentración y porcentajes de remoción del  $\text{P-PO}_4^{3-}$  en el MBR.

Parámetro	Días de operación	$\text{P-PO}_4^{3-}$ Influyente (mg/L)				$\text{P-PO}_4^{3-}$ Efluente (mg/L)				% Rem
		Máx	Min	Med	$\sigma$	Máx	Min	Med	$\sigma$	
$\text{P-PO}_4^{3-}$	54	39.3	21.5	29.1	$\pm 4.9$	2.2	0	0.96	$\pm 0.7$	96.7

#### ***RBM con biopelículas operado de manera continua,***

##### *Eliminación de $\text{DQO}_T$*

Uno de los parámetros más importante en la evaluación de un sistema biológico es la DQO. Durante toda la experimentación y sin importar la carga orgánica aplicada al sistema, la concentración de  $\text{DQO}_T$  medida en el efluente fue siempre menor que 35 mg/L. En la figura 3 se observa que la concentración promedio en la alimentación fue de 1123 mg/L de  $\text{DQO}_T$ , mientras que en el permeado la concentración promedio detectada fue de solo 22 mg/L. El porcentaje de eliminación fue de 98.1 % mayor al alcanzado por sistemas convencionales de lodos activados y muy cercano al alcanzado por Kraume and Bracklow (2005) y a sistemas comerciales (Kubota y Zenon, Adham and DeCarolis, 2004). Es importante mencionar que la membrana de filtración utilizada en la experimentación fue de bajo costo comparada con una membrana comercial y se logró obtener eficiencias de eliminación cercanos a los alcanzados por estos últimos.



**Figura 3.** Comportamiento de la DQO en el RBM continuo.

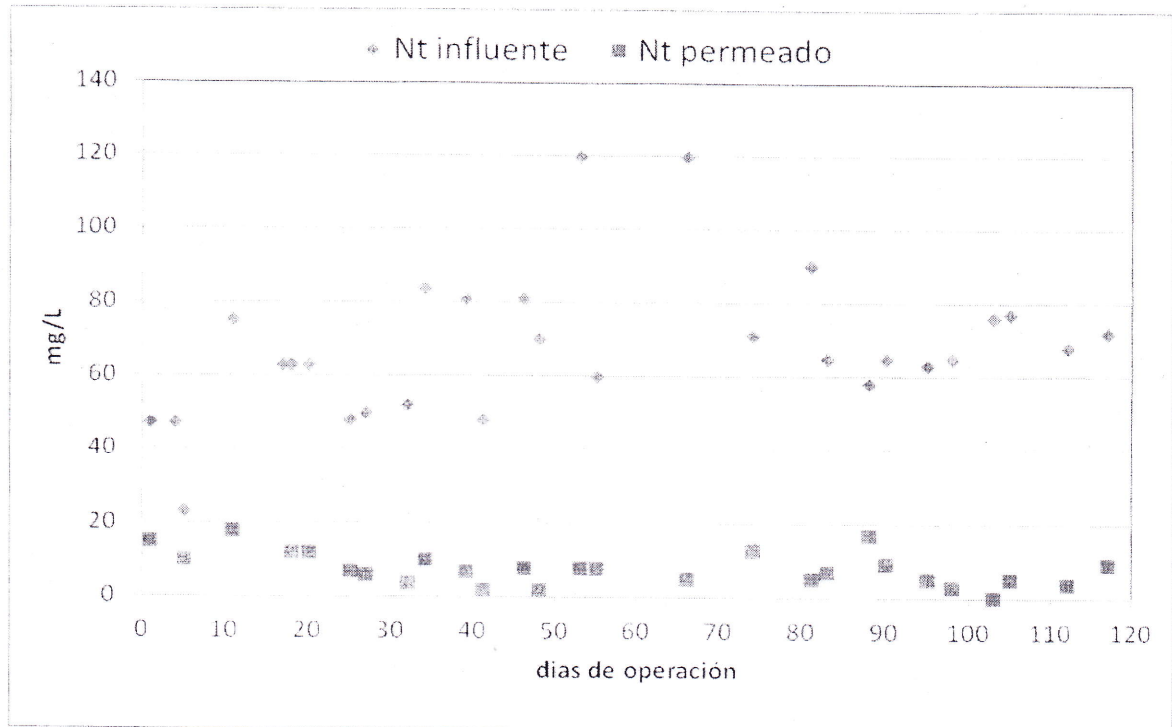
### *Eliminación de Nitrógeno Total*

La medición de la remoción de nitrógeno fue uno de los parámetros claves en la evaluación del sistema durante toda la experimentación. En la figura 4 se muestra la concentración detectada de nitrógeno total en influente y efluente junto con el porcentaje de eliminación alcanzado. Como se muestra en esta figura, la concentración promedio en el influente fue de 71 mgN<sub>T</sub>/L, mientras que en permeado, la concentración promedio fue de 7 mgN<sub>T</sub>/L con lo que se alcanzó una eficiencia de remoción del 90.1%, muy cercana a la reportada por otros autores como MUNLV (2003).

### *Nitrificación*

El nitrógeno en el influente se detectó forma de nitrógeno amoniacal con una concentración promedio de 40 mgNH<sub>4</sub>/L. En el permeado la concentración promedio fue 2 mg NH<sub>4</sub>/L. Esto significa que una fracción del amonio fue nitrificado, el cual fue llevado por la diversidad de biomasa presente en el sistema, la cual fue favorecida por los grandes tiempos de retención celular (> 100 d) manejados en el sistema, así como por las altas concentraciones de oxígeno disuelto manejadas en el medio (2 - 3.5 mg/L), evitando ser este último parámetro, un factor limitante en el proceso. En la tabla 6 se presentan las concentraciones de nitratos.





**Figura 4.** Comportamiento de Nitrógeno Total en el RBM continuo.

#### *Desnitrificación*

Los nitratos son un indicador del proceso de nitrificación. Si el proceso de desnitrificación se lleva a cabo, los nitratos son llevados hasta nitrógeno gaseoso ( $N_2$ ). La concentración de nitratos promedio que se detectaron durante toda la experimentación en el permeado fue de  $1.2 \text{ mgNO}_3/\text{L}$ . Como podemos observar esta concentración es baja comparada con la concentración de nitrógeno amoniacal detectada en el influente y permeado del sistema. Esto demuestra que mucho de los nitratos generados en la etapa aerobia, fueron desnitrificados en el tanque anóxico colocado al inicio del sistema y donde se recirculaba el efluente nitrificado.

#### Eliminación de Fósforo

Las concentraciones promedio detectadas durante la experimentación fueron de  $29 \text{ mg/L}$  en el agua residual cruda y  $10.4 \text{ mg/L}$  en el permeado, lo cual representa un porcentaje de remoción del 63.8 %. Este porcentaje es inferior al alcanzado en RBM convencionales. Seguramente la configuración del reactor y las condiciones de operación manejadas en el sistema, no favorecieron la eliminación de este macronutriente (P). Esto nos lleva a concluir que para poder llevar a cabo la eliminación de fósforo en un RBM continuo es necesario incluir un reactor anaerobio al inicio del proceso donde se recircule el licor mezcla del RBM, con la finalidad de lograr una prefermentación de la materia orgánica y una excreción del fósforo por medio de los acumuladores de fósforo. De esta manera, los porcentajes de eliminación de nutrientes serían favorecidos en una planta para tratamiento de aguas residuales con RBM que operan de manera continua.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación, muestran que los reactores biológicos con membranas (RBM) son una tecnología con la que es posible llevar a cabo de manera eficiente el tratamiento de las aguas residuales.

La combinación de procesos de biomasa en suspensión y biopelículas soportadas sobre medios móviles en los RBM incrementan los porcentajes de eliminación de nitrógeno, ya sea operando al sistema de manera continua o discontinua.

Por lo que se concluye que los RBM son una tecnología que puede ser implementada cuando se piensa en el tratamiento y reuso de las aguas residuales tratadas.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al CONCYTEG por el apoyo económico para la realización del proyecto. Convenio No. 09-16-K662-089 y al CONACYT por el apoyo financiero para los estudiantes participantes en estos proyectos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Adham., S and DeCarolis, J. (2004). Optimization of various MBR systems for water reclamation-Phase III Final technical report. The City of San Diego Water Department. USA. April 2002 to April 2004.
- APHA. (1998). Standar methods for the examination of water and wastewater. Clesceri, L. American Public Health Association, USA.
- Cicek, N., H. Winnen, M.T. Suidan, B.E. Wrenn, V. Urbain and J. Manem. (1998b) Effectiveness of the membrane bioreactor in the biodegradation of high molecular weight compounds. *Water Research* 32(5): 1553-1563.
- Cote, P., H. Buisson, C. Pound and G. Arakaki (1997). Immersed membrane activated sludge for the reuse of municipal wastewater. *Desalination* 113 (2-3): 189-196.
- Gander, M.A., Jefferson, B. and Judd, S.J. (2000) Membrane bioreactors for use in small wastewater treatment plants; membrane materials and effluent quality. *Wat. Sci. Technol.* 41(1): 205-211.
- Ghyoot, W., and Verstraete, W. (2000) Reduced sludge production in two stage membrane assisted bioreactor. *Wat. Res.* 34: 205-215.
- HACH. (2005). DR5000 Spectrophotometer PROCEDURES MANUAL. 2ª ed. Hach Company. U.S.A.
- Kraume, M., Bracklow, U., Vocks, M., and Drews, A. (2005). Nutrient removal in MBRs for municipal wastewater treatment. *Wat. Sci. Tech.* 51 (2005), 391-402
- MUNLV. (2003). Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) Waste Water Treatment with Membrane Technology.
- Rosenberger, S., U. Kruger, R. Witzig, W. Manz, U. Szewzyk and M. Kraume. (2002) Performance of a bioreactor with submerged membranes for aerobic treatment of municipal waste water. *Water Research* 36(2): 413-420.