

# Evaluación del proceso de nitrificación y desnitrificación en el tratamiento de aguas residuales utilizando un reactor por carga

*Carmen Cárdenas\*, Tomás Perruolo, Mayra Ojeda, Miguel Chirinos, Suher Yabroudi\*, Lenín Herrera, Luis Vargas y Alberto Trujillo*

*Centro de Investigación del Agua (CIA), Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Apartado 99. Maracaibo, Venezuela.*

Recibido: 29-03-04 Aceptado: 17-03-06

## Resumen

En este estudio se evaluó el uso de un reactor por carga para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Para ello se instaló un reactor a escala piloto con una capacidad de 2000 L, en el cual se sembró una cantidad de lodo activado. Luego de aclimatada la biomasa se fijaron edades de lodo de 10; 7,5 y 5 días respectivamente, se midió la eficiencia del proceso para cada edad del lodo en función de la remoción de materia orgánica: demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO) y de nitrógeno. Se obtuvieron valores de remoción de 98% para la DBO, 87% para la DQO, 71% para el nitrógeno total. El proceso de nitrificación alcanzó un alto grado de eficiencia debido a que la conversión de nitrógeno amoniacal fue completa. La desnitrificación mantuvo una baja eficiencia, atribuido a la alta concentración de nitratos en el efluente del sistema. La edad de lodo de 7,5 días logró obtener una mayor eficiencia de remoción en cuanto a la DBO y DQO, aunque de ser requerida la remoción de nitrógeno como objetivo principal la edad de lodo de 10 días resultaría más conveniente sin disminuir considerablemente los demás parámetros, esta alcanzó el mayor porcentaje de remoción de nitrógeno total (71%).

**Palabras clave:** Aguas residuales domésticas; desnitrificación; nitrificación; reactor por carga.

## Evaluation of the nitrification and de-nitrification process in residual water treatment utilizing a charge reactor

### Abstract

In this study a charge reactor for treatment of residual domestic waters was evaluated. A reactor was installed on a pilot scale with a capacity for 2000 L, in which a quantity of activated sludge was introduced. After acclimatization of the biomass, and of the sludge ages of 10, 7.5 and 5 days respectively, the efficiency of the process was measured for each sludge age in relation to the removal of organic material: Biochemical Demand for Oxygen (BDO), chemical demand for oxygen (CDO), and nitrogen demand. The removal values obtained were 98% for BDO,

\* Autor para la correspondencia. E-mail: hcarden@luz.edu.ve y/o yabroudic@yahoo.com

87% for CDO, and 71% for total nitrogen. The nitrification process reached its highest level of efficiency due to the fact that the conversion of ammoniacal nitrogen was complete. The denitrification had a lower efficiency level, attributed to the high concentration of nitrates in the system effluents. The 7.5 day sludge age obtained the best removal results in relation to BDO and CDO, although when nitrogen removal required as the principal objective, the sludge age of 10 days is more convenient without an appreciable lowering of the other parameters. The highest total nitrogen removal percentage reached was 71%.

**Key words:** Charge (Load) reactor; de-nitrification; nitrification; residual domestic water.

## Introducción

Existen variados métodos de tratamiento de tipo físico, químico y biológico para remover la materia orgánica, nitrógeno y fósforo del agua. La remoción de estas especies en el agua residual es requerida por diferentes agencias reguladoras basadas más que todo en el problema de toxicidad, la demanda de oxígeno y el efecto de eutroficación sobre los cuerpos de agua receptores, volviéndose un problema más agudo para las municipalidades y las industrias por las severas exigencias de las normas de calidad. Para las aguas domésticas e industriales, la amplia gama de requisitos del tratamiento han llevado al desarrollo de numerosas configuraciones de flujo continuo (1, 2).

Sin embargo, a causa de fluctuaciones de flujo y de concentración de las aguas residuales, limitaciones como el clima, altos costos de instalación o en muchos casos por regulaciones en las características del efluente, esos procesos convencionales de flujo continuo no son aplicables en su totalidad (3, 4). Los procesos de lodos activados incluyendo los sistemas de flujo continuos (CFS) y reactores de secuencia por carga (SBR) son sistemas designados para el mismo propósito. Los reactores por carga típicamente ofrecen un ahorro de capital, energía, funcionamiento y mantenimiento eficaz. La tecnología moderna de estos equipos, junto con un mayor entendimiento de los procesos por cargas, ha hecho que el uso de estos reactores haya aumentado ampliamente; son empleados en el tratamiento biológico de aguas servidas, donde los procesos uni-

tarios que intervienen son idénticos a los de un proceso convencional de lodos activados. Si se compara con los tratamientos continuos de agua residual, es un sistema relativamente simple y compacto porque todos los procesos del tratamiento tienen lugar en el mismo reactor (5). Los sistemas SBR permiten el tratamiento de un amplio espectro de compuestos orgánicos, además, con la incorporación de etapas anaerobias-aeróbicas-anóxicas se puede lograr la remoción conjunta de materia orgánica, nitrógeno y fósforo (5). Existen métodos fisicoquímicos y biológicos para la eliminación de nitrógeno del agua; los primeros, en la mayoría de los casos, no resuelven el problema ya que trasladan el contaminante de un ambiente a otro, mientras que los métodos biológicos si eliminan el contaminante, y en condiciones idóneas los productos finales son  $\text{CO}_2$  y  $\text{N}_2$  (6). La asimilación y la nitrificación-desnitrificación son los principales mecanismos para la remoción biológica del nitrógeno, ya que por ser este un nutriente, los microorganismos presentes en el proceso de tratamiento asimilan el nitrógeno amoniacal y lo incorporan a su masa celular. En la nitrificación-desnitrificación, la remoción del nitrógeno se logra por un proceso de conversión en dos pasos; en el primero el amoníaco se oxida biológicamente a nitrato; y en el segundo paso las bacterias desnitrificantes obtienen energía para su crecimiento de la conversión de nitratos en nitrógeno gaseoso, pero requieren una fuente de carbono para la síntesis celular (2, 3, 7, 8).

El objetivo de este trabajo fue utilizar un reactor por carga a escala piloto en el tra-

tamiento avanzado de aguas residuales, evaluando su eficiencia en la remoción de materia orgánica y nutrientes como el nitrógeno.

## Materiales y Métodos

### Diseño experimental

Para la realización de esta investigación se utilizó como sistema de tratamiento de un reactor discontinuo secuencial (SBR) a escala piloto. A continuación, se mencionan las características del reactor y del lodo utilizado, así como también se describe el proceso de tratamiento (Figura 1).

### Características del reactor

El reactor discontinuo secuencial (SBR) o planta piloto usado en este estudio, tiene las siguientes características:

**a. Tanque reactor:** consiste en una cuba cilíndrica de fibra de vidrio de 1,97 m de altura y 1,20 m de diámetro con una capacidad de 2000 L.

**b. Sistema de descarga:** consta de un arreglo de válvulas de bronce tipo bola, dispuestas a diferentes alturas del tanque reactor. Una al 50% y otra al 30% de la altura, con diámetros de 0,0254 m (1") y 0,019 m (3/4") respectivamente, con la finalidad de descargar el agua tratada. Se cuenta con otra válvula de 0,0127 m (1/2") de diámetro en el fondo del tanque, con la función de vaciarlo totalmente de ser necesario.

**c. Sistema de carga:** constituido por un sistema de bombeo que consiste en una bomba centrífuga de 1 HP y una tubería de PVC de 0,0127 m (1/2") de diámetro.

**d. Sistema de aireación:** conformado por un compresor de 2 HP, conectado a un sistema de difusión de aire, que consiste en un arreglo de tuberías de PVC de 0,0127 m (1/2"), perforadas y dispuestas en forma de cruces (Figura 2).

**e. Sistema de mezclado:** consta de un mezclador de acero inoxidable, cuyo eje

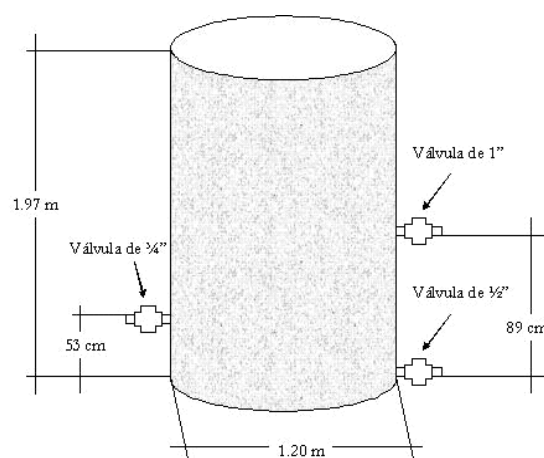


Figura 1. Reactor por carga.

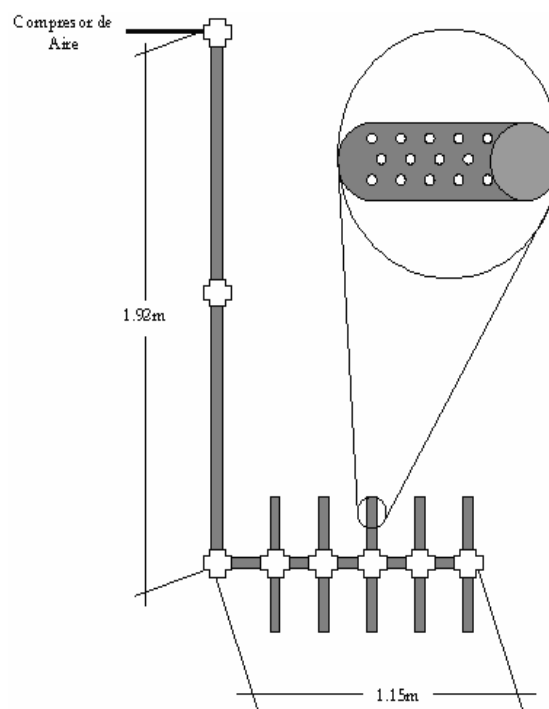


Figura 2. Sistema de aireación.

mide 1 m, y está provisto con una hélice de tres hojas, conectado a un motor bifásico, de 110 V, 0,5 HP y 1350 rpm (Figura 3).

En la Figura 4 se presenta el diagrama completo del reactor por carga instalado.

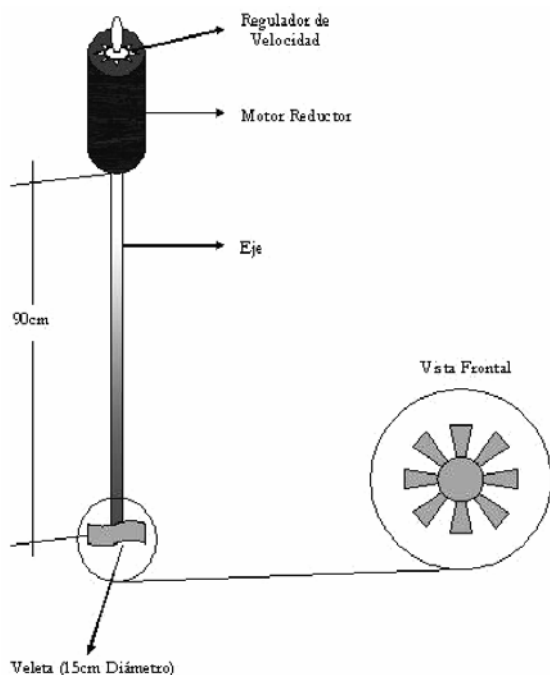


Figura 3. Sistema de mezclado.

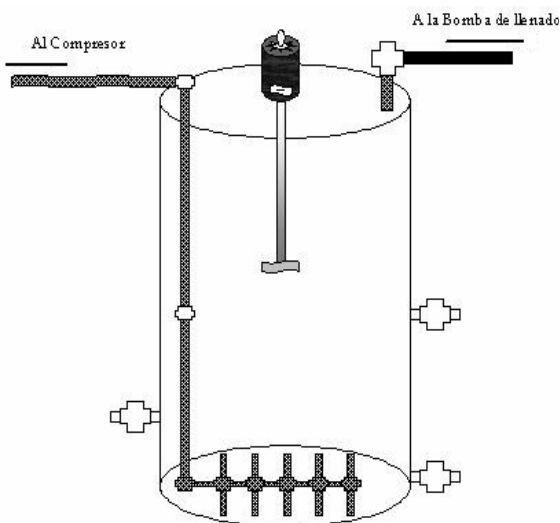


Figura 4. Diagrama del reactor por carga instalado.

### Siembra de lodo

Para esta etapa, se sembró en el reactor un volumen aproximado de lodo de 500 litros, provenientes de una planta de trata-

miento de aguas residuales domésticas ubicada en el municipio Lagunillas, estado Zulia, Venezuela.

Luego de vaciado el lodo en el tanque, se llenó éste hasta su capacidad de 2000 litros con agua residual doméstica proveniente del colector C de la ciudad de Maracaibo, el cual suministra el agua residual cruda al sistema de lagunas de estabilización del Centro de Investigación del Agua de la Universidad del Zulia. A partir de este momento, se comenzó la aireación de la mezcla por periodos de aproximadamente 24 horas, en los cuales se tomaban muestras al principio y final del mismo y mediante la determinación de sólidos suspendidos volátiles (SSV), se estimaba la concentración de los microorganismos en el sistema y la tasa de crecimiento de los mismos mediante la comparación de dichos valores. Una vez aclimatada la masa biológica a las condiciones del agua en estudio, se consideró que los microorganismos estaban capacitados para tratar este tipo de agua.

Se fijaron tres edades de lodo para analizar: 10, 7,5 y 5 días (1). Las pruebas se completaron en tres semanas para cada edad de lodo fijada, tiempo en el cual se analizaron entre 9 y 12 ciclos para cada edad de lodo. El procedimiento experimental constó de 6 etapas: llenado, mezcla anaerobia, aireación, mezcla anóxica, sedimentación y vaciado.

- En la primera etapa se conectó la bomba que realizó el llenado del tanque con el agua residual cruda proveniente del colector C. El llenado se realizaba en aproximadamente 35min.
- La segunda etapa o mezcla, consistió en agitar mecánicamente el contenido del reactor, colocando en funcionamiento el motor de mezclado dispuesto para tal fin. En esta etapa se requería la ausencia total de oxígeno disuelto para favorecer la fase anaerobia. A esta etapa se le asignó una duración de 1 hora.

- En la tercera etapa o aereación, se encendía el compresor de aire, para proporcionar al sistema el oxígeno necesario para que los microorganismos pudiesen degradar la materia orgánica y recuperaran el fósforo liberado en la primera fase y parte del que originalmente estaba presente en el agua residual cruda. La mezcla en esta fase se realizó con el mismo sistema de aereación, ya que éste producía la turbulencia necesaria para producir la mezcla completa del mismo. Tuvo una duración 19 horas y 35 minutos.

- En la cuarta etapa, se detenía de nuevo la aereación, para crear las condiciones anóxicas que permitieran el inicio de la desnitrificación, es decir, que los microorganismos comenzaran a consumir el oxígeno proveniente de los compuestos de nitrógeno (NOx), reduciéndolos hasta  $N_2$  gaseoso el cual sería liberado a la atmósfera. En esta parte del proceso se procedió a retirar el exceso de lodo correspondiente a la edad de lodo fijada. Esta etapa tuvo una duración de 1 hora.

- Para la quinta etapa se desconectaba el motor mezclador con la finalidad de dejar el sistema en reposo para lograr la sedimentación del lodo activado. Esta etapa tuvo una duración de 1 hora.

- En la sexta etapa, luego de haber dejado sedimentar el lodo, se abrían las válvulas dispuestas para dejar salir el sobrenadante o agua tratada del tanque, completando de esta forma todo el ciclo. Esta fase tuvo una duración de 45 min.

En la Figura 5 se presentan las diferentes etapas del proceso.

Para establecer el grado de eficiencia del tratamiento en la remoción de la materia orgánica (DBO y DQO) y de nutrientes (nitrógeno total a través de las mediciones de

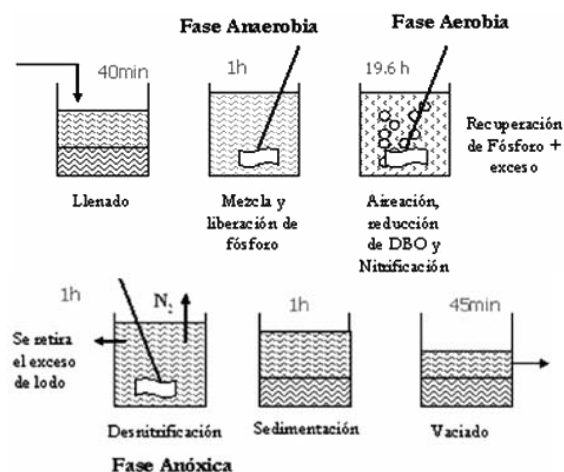


Figura 5. Etapas del proceso en el reactor por carga.

NTK, nitrógeno amoniacal y nitratos), se tomaron muestras a la entrada y salida del sistema, mientras que la medición de SST y SSV se realizó con muestras internas del licor de mezcla y de esta forma obtener un estimado de la concentración de lodo. Cada uno de los análisis se realizaron siguiendo la metodología establecida por el Standard Methods de la APHA (1999) (9).

## Resultados y Discusión

### Demanda Química de Oxígeno (DQO)

En la Tabla 1 se pueden observar los valores máximos, mínimos y promedios de la DQO total en la entrada y salida del sistema para las diferentes edades de lodos analizadas. Los valores medidos de la DQO a la entrada del sistema para las tres edades de lodo se encontraron entre un rango de 404 mg/L y 520 mg/L; a la salida alcanzaron valores promedio de 61 mg/L para la edad de lodo de 10 días, 70 mg/L para la de 7,5 días y 89 mg/L para la de 5 días.

Los porcentajes de remoción son presentados en la Tabla 2, la edad de lodo de 7,5 días alcanzó la mayor remoción (87%) aunque la diferencia con respecto a la remoción obtenida para la edad de lodo de 10 días

Tabla 1  
Valores de DQO (mg/L) a la entrada y salida del sistema

	$\theta_c = 10$ días		$\theta_c = 7,5$ días		$\theta_c = 5$ días	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Promedio	404	61	520	70	475	89
Máximo	656	88	690	97	590	143
Mínimo	272	34	338	27	362	61

Tabla 2  
Porcentajes de remoción de DQO en el sistema

	$\theta_c = 10$ días	$\theta_c = 7,5$ días	$\theta_c = 5$ días
Promedio	85	87	81
Mínimo	77	81	69
Máximo	90	92	88

(85%) es pequeña. Los resultados alcanzados en la remoción de la DQO del sistema son mayores comparados con los registrados por Herrera (33%), García (62%) y Rondón (77%), y en estudios similares (1, 10, 11).

#### **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)**

A la entrada del sistema las tres edades de lodo se encontraron en un rango comprendido entre 146 mg/L y 203 mg/L, en la salida se registraron valores promedio de DBO total de 5 mg/L; 4 mg/L y 8 mg/L para las edades de lodo de 10, 7,5 y 5 días respectivamente (Tabla 3). Los valores de la DBO a la salida para las edades de lodo de 10 y 7,5 días fueron menores a los reportados por estudios realizados por Hamamoto *et al.* (14 mg/L), así mismo dichos valores de DBO medidos a la salida del reactor se encuentran por debajo del valor de 60 mg/L fijado por la Gaceta Oficial de la República de Venezuela (Decreto 883) (12, 13).

Analizando los porcentajes de remoción, se alcanzaron valores comprendidos en un rango entre 94% y 99%, comparables a los reportados por García (62%-81%) y Go-

ronszy *et al.* (una remoción máxima del 98%) (10, 14). El mayor porcentaje de remoción de DBO se logró con la edad de lodo de 7,5 días (98%), aunque la diferencia en la remoción con respecto a las otras 2 edades de lodo son despreciables ya que se obtuvieron remociones de 97% y 96% para los 10 y 5 días respectivamente, estos resultados demuestran el excelente grado de eficiencia de los microorganismos que conforman el licor mezclado para la oxidación de la materia orgánica biodegradable del agua residual tratada, independientemente de la edad de lodo fijada.

#### **Nitrógeno total y amoniacal**

Los valores promedios, máximos y mínimos obtenidos de nitrógeno total Kjeldahl (NTK) a la entrada y salida del sistema son reportados en la Tabla 5.

Para las tres edades de lodo estudiadas se obtuvo un rango promedio entre 49 mg/L y 55 mg/L de NTK, mientras que en la salida los valores promedios registrados fueron de 6 mg/L para la edad de lodo de 10 días, 3 mg/L para la edad de lodo de 7,5 días y 5 mg/L para la edad de 5 días. Estos resulta-

Tabla 3  
Valores de DBO (mg/L) a la entrada y salida del sistema

	$\theta_c = 10$ días		$\theta_c = 7,5$ días		$\theta_c = 5$ días	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Promedio	146	5	203	4	193	8
Máximo	221	8	248	8	257	14
Mínimo	85	0,7	129	3	120	4

Tabla 4  
Porcentajes de remoción de DBO

	$\theta_c = 10$ días	$\theta_c = 7,5$ días	$\theta_c = 5$ días
Promedio	97	98	96
Máximo	99	99	98
Mínimo	94	97	94

Tabla 5  
Valores de NTK (mg/L) a la entrada y salida del sistema

	$\theta_c = 10$ días		$\theta_c = 7,5$ días		$\theta_c = 5$ días	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Promedio	55	6	52	3	49	5
Máximo	65	9	72	4	74	9
Mínimo	39	3	36	0,3	38	4

dos muestran la alta eficiencia del proceso de nitrificación llevado a cabo en la tercera etapa (aireación) del proceso biológico por cargas, en el cual las bacterias nitrificantes transforman casi en su totalidad el NTK ( $\text{NH}_3$  + Nitrógeno Orgánico) a nitritos y nitratos. La edad de lodo es un factor crítico para el establecimiento de una población variable de bacterias nitrificantes (15). Las bacterias nitrificantes crecen y se reproducen lentamente, por ello, edades de lodo altas favorecen la nitrificación, para garantizar la nitrificación completa se requieren edades de lodo entre 12 y 20 días (16), mayores a las empleadas en este estudio. También, parte del nitrógeno pudo ser utilizado por los microorganismos, por asimilación principalmente

de las bacterias heterótrofas (17). A través de la Tabla 6 se puede observar las remociones alcanzando con un valor promedio de 95%, estos resultados son similares a los obtenidos por Hamamoto *et al.* y Goronszy *et al.* quienes alcanzaron porcentajes de remoción de 74% y 92 % respectivamente (12, 14, 18).

Con respecto al nitrógeno amoniacal, se puede observar en la Tabla 7, que la conversión de éste fue prácticamente completa, ya que en el efluente del proceso no se encontraron valores detectables de este elemento. Es importante destacar que el oxígeno es la variable más importante en el proceso de nitrificación, en este estudio se suministró un flujo de aire constante en una eta-

pa de aireación muy larga (19 horas), lo que favoreció el crecimiento de bacterias nitrificantes (17). Se puede observar que los valores de este parámetro a la entrada del sistema se mantuvieron dentro de un rango de 28 mg/L y 43 mg/L, para la salida, por las consideraciones hechas anteriormente, no se encontró nitrógeno amoniacal.

Estos valores de reducción alcanzados, al igual que los obtenidos para el NTK, reflejan el excelente grado de conversión del nitrógeno amoniacal a nitritos y nitratos, y por ende la efectividad de las bacterias nitrificantes que componen el lodo activado utilizado en el proceso.

Con respecto al nitrógeno expresado como nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) se pudo observar en la Tabla 8, que éstos se mantuvieron en niveles muy bajos tanto a la entrada como en la salida del sistema. En efecto, la poca concentración de nitritos a la entrada del sistema se redujo durante el proceso biológico, en muchos casos, a valores nulos a la salida del sistema. Los valores de nitritos se mantuvieron dentro de un rango de 0,022 mg/L y 0,035 mg/L a la entrada del sistema, y entre un rango de 0 mg/L a 0,012 mg/L a la salida del sistema.

En lo referente al nitrógeno expresado como nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) a la entrada del sistema para las tres edades de lodo analizadas el

Tabla 6  
Porcentajes de reducción de NTK del sistema

	$\theta_c = 10$ días	$\theta_c = 7,5$ días	$\theta_c = 5$ días
Promedio	89	95	89
Máximo	93	99	91
Mínimo	85	89	88

Tabla 7  
Valores de Nitrógeno Amoniacal a la entrada y salida del sistema (mg/L)

	$\theta_c = 10$ días		$\theta_c = 7,5$ días		$\theta_c = 5$ días	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Promedio	43	-	42	-	28	-
Máximo	55	-	57	-	45	-
Mínimo	23	-	27	-	18	-

-. No se determinó.

Tabla 8  
Valores de Nitritos a la entrada y salida del sistema (mg/L)

	$\theta_c = 10$ días		$\theta_c = 7,5$ días		$\theta_c = 5$ días	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Promedio	0,022	-	0,032	0,003	0,035	0,012
Máximo	0,031	-	0,046	0,012	0,042	0,022
Mínimo	0,013	-	0,019	0,000	0,031	0,008

-. No se determinó.



valor promedio se mantuvo constante, en aproximadamente 0,2 mg/L, mientras que a la salida del sistema se registraron valores de 10 mg/L para la edad de lodo de 10 días; 17 mg/L para la edad de lodo de 7,5 días y 16,5 mg/L para la edad de lodo de 5 días (Tabla 9), lo que indica que el proceso de desnitrificación no fue eficiente. Los resultados obtenidos muestran como a menor edad de lodo la concentración promedio de nitrato a la salida del sistema fue aumentando ya que al reducirse este, la cantidad de licor de mezcla que se retiraba diariamente era mayor, quedando menor cantidad de bacterias desnitrificantes para convertir el nitrógeno a nitrógeno gaseoso, además el corto tiempo de la etapa anóxica (1h), pudo afectar el proceso (14).

En la Tabla 10 se puede observar que la concentración promedio de nitrógeno total a la entrada del sistema, para las tres edades de lodo analizadas, estuvo dentro de un rango de 49 mg/L y 55 mg/L, mientras que a la salida los valores promedios de nitrógeno total fueron de 16 mg/L para la edad de lodo de 10 días, 20 mg/L para la edad de lodo de 7,5 días y 22 mg/L para la edad de lodo de 5 días.

Es de resaltar que todos los valores de nitrógeno total obtenidos a la salida del sistema para las tres edades de lodo analizadas (Tabla 11), están por debajo del límite máximo permitido en la Gaceta Oficial de Venezuela para vertido de líquidos a cuerpos de agua fijado en 40 mg/L (13). La edad de lodo

Tabla 9  
Valores de Nitratos (mg/L) a la entrada y salida del sistema

	$\theta_c = 10$ días		$\theta_c = 7,5$ días		$\theta_c = 5$ días	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Promedio	0,2	10	0,2	17	0,2	16,5
Mínimo	0,7	10	0,3	30	0,3	28
Máximo	0,1	7	0,1	11	0,1	12

Tabla 10  
Valores de nitrógeno total (mg/L) a la entrada y salida del sistema

	$\theta_c = 10$ días		$\theta_c = 7,5$ días		$\theta_c = 5$ días	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Promedio	55	16	53	20	49	22
Máximo	65	19	72	32	74	37
Mínimo	39	14	36	12	38	16

Tabla 11  
Porcentajes de reducción total de nitrógeno del sistema

	$\theta_c = 10$ días	$\theta_c = 7,5$ días	$\theta_c = 5$ días
Promedio	71	62	55
Máximo	74	69	62
Mínimo	64	56	51

más eficiente en la remoción de nitrógeno total fue la de 10 días alcanzándose un valor promedio de 71%; estos resultados concuerdan con la relación establecida anteriormente entre la edad de lodo, concentración de lodo (SSV) y el porcentaje total de remoción.

### Edad de lodo más eficiente

Para hacer el análisis de la edad de lodo que resultó ser más eficiente en cuanto a los parámetros de remoción de materia orgánica y de nutrientes, se debe analizar la Tabla 12 y la Figura 6, donde se puede observar comparativamente los porcentajes de remoción de dichos parámetros para cada edad de lodo estudiada. Cabe destacar que para las tres edades de lodo, el tratamiento avanzado por cargas resultó ser eficiente en cuanto a la remoción de todos los parámetros analizados, DBO, DQO y nitrógeno, logrando mantener dichos valores a la salida del sistema por debajo de la norma venezolana, lo que garantiza una calidad del efluente apta para descarga en cuerpos de agua. Según lo anterior se puede afirmar entonces, que el proceso es muy versátil en cuanto a las edades de lodo estudiadas pudiéndose elegir la que mejor se adapte a las necesidades impuestas para el tipo de agua residual a tratar.

La edad de lodo de 5 días a pesar de que mantuvo los valores de salida del efluente dentro de los límites impuestos por la legislación venezolana para su descarga a cuerpos de agua, en lo referente a la remoción de materia orgánica y de nutrientes, aunque con menos eficiencia con respecto a las edades de lodo de 10 y 7,5 días; sin embargo con

esta edad de lodo se garantiza un mayor volumen de agua residual tratada, ya que al haber menor cantidad de lodo con respecto a las otras dos edades, el volumen ocupado por el mismo de igual forma será menor.

En general se podría decir que la edad de lodo de 7,5 días fue la más eficiente ya que con ésta se lograron los mayores porcentajes de remoción tanto de DBO y DQO, sin embargo ésta no ofrece la mejor remoción de nitrógeno. De ser requerida como prioridad la eliminación nitrógeno, se debería utilizar la edad de lodo de 10 días, sin que esto signifique una reducción considerable en la remoción de la materia orgánica.

### Etapas de desnitrificación utilizando $N_2$ gaseoso como mecanismo de mezcla

Debido a la relativamente alta concentración de nitratos a la salida del sistema, se

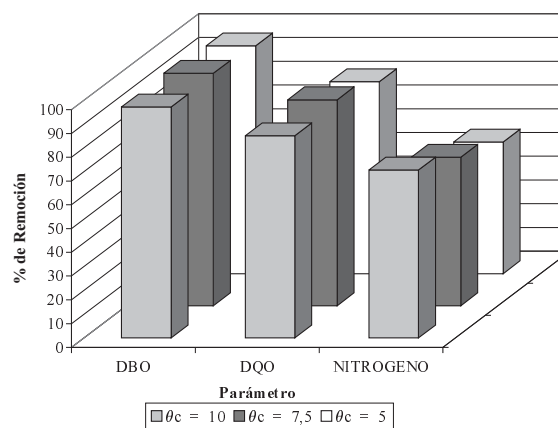


Figura 6. Gráfica comparativa de la remoción de DBO, DQO y Nitrógeno Total para las tres edades analizadas.

Tabla 12

Tabla comparativa de los porcentajes de reducción de los diferentes parámetros medidos para cada edad de lodo analizada

	$\theta_c = 10$ días	$\theta_c = 7,5$ días	$\theta_c = 5$ días
DBO	97	98	96
DQO	85	87	81
Nitrógeno	71	63	55

Tabla 13  
Valores de nitrato, nitrito y oxígeno disuelto obtenidos durante la prueba de mezcla utilizando N<sub>2</sub> gaseoso (mg/L)

	Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	O <sub>2</sub> disuelto
0 min	20	0,102	3,4
20 min	18	0,081	3
40 min	19	0,057	1
60 min	18	0,032	0,6
80 min	16	0,050	0,1
100 min	15	0,047	0
120 min	14	0,057	0

decidió realizar una prueba para analizar a fondo el proceso de desnitrificación o cuarta etapa del proceso.

El ensayo consistió en sustituir el proceso de mezclado de esta parte del proceso bombeando en el tanque un gas inerte, nitrógeno gaseoso, para eliminar cualquier posible efecto aerador que produzca la mezcla mecánica que se utilizó durante el experimento con las tres edades de lodo analizadas. De igual forma se decidió alargar la cuarta etapa (desnitrificación) de 1h a 2h. Los resultados de esta prueba son presentados en la Tabla 13 y en la Figura 7. De dicha Figura se puede observar como durante la primera hora de mezcla, la concentración de oxígeno disuelto en el sistema, pasa de 3 mg/L a 0,6 mg/L, lo que significa un consumo de oxígeno por parte de los microorganismos presentes en el sistema de 82% del oxígeno disuelto en el agua, y el otro 18% restante es consumido en un poco más de los siguientes 20 minutos.

Por otra parte, durante los primeros 60 minutos hubo una reducción de los nitratos de un 8,7%, pasando de 20 mg/L a 18 mg/L, pero la mayor disminución se presentó a partir de la segunda hora, donde se alcanzó un 21% de remoción pasando de 18 mg/L a 14 mg/L. Estos resultados indican por una parte que el tiempo de una hora que se le dio a la cuarta etapa o etapa de desnitrificación

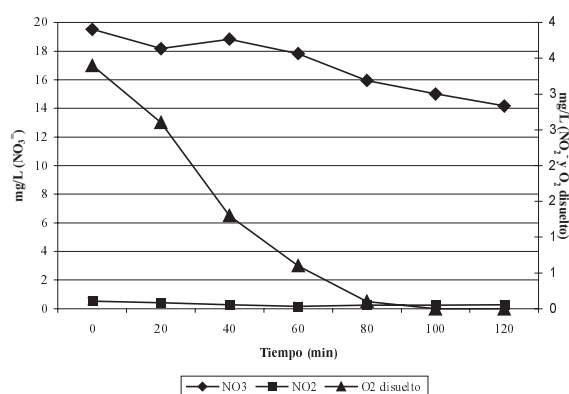


Figura 7. Prueba de fase de mezcla con N<sub>2</sub> gaseoso.

fue muy bajo, pudiéndose entonces elevarlo a 2 horas o más, para incrementar así la eficiencia del mismo; así mismo existe la posibilidad de que la mezcla mecánica utilizada en el sistema en la segunda y cuarta etapa, pudiera haber introducido al mismo aire, precisamente en las etapas donde se requería la ausencia total de oxígeno disuelto, inhibiendo así procesos fundamentales como la desnitrificación, en los cuales se alcanzaron valores de remoción relativamente bajos. También pudo influir, que el largo período de la etapa de aireación diera lugar a un efluente nitrificado con bajo contenido de materia carbonácea (7).

## Conclusiones

La biomasa generada en el sistema mostró ser de fácil adaptabilidad lográndose estabilizar rápidamente para las diferentes edades de lodo utilizadas. Por otra parte los resultados alcanzados en el sistema de tratamiento donde se dan las etapas anaerobias-aerobias-anóxicas usando un reactor por carga muestra ser efectivo en la remoción de la materia orgánica y nutrientes. Los niveles de reducción de nitrógeno amoniacal reflejan la alta eficiencia mostrada por las bacterias en el proceso de nitrificación, sin embargo, la elevada concentración de nitratos a la salida del sistema, indica la gran sensibilidad del proceso de desnitrificación a variables como las concentraciones de oxígeno disuelto debido a un largo período de aereación, duración de la etapa anaerobia, poco contenido de materia orgánica y tiempo de mezclado de la fase anóxica. El sistema mostró ser excelente en la remoción de todos los parámetros para las tres edades de lodo analizadas, cumpliendo con la Normativa Venezolana para descarga a cuerpos de agua. Si se considera como variable principal el volumen de agua a tratar, la edad de lodo de 5 días resultaría más conveniente. Los resultados obtenidos demuestran que el uso de un reactor por carga (BSR) resulta ser una alternativa eficiente, económica y flexible en el tratamiento de aguas residuales, siendo posible su instalación en comunidades donde el uso de plantas convencionales resulta costoso.

## Referencias Bibliográficas

- HERRERA M. Estudio del uso de reactores de carga en el tratamiento del efluente de una Industria Química (Tesis de MSc), La Universidad del Zulia, Maracaibo (Venezuela), pp. 35-60, 1987.
- METCALF & EDDY. **Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, vertido y reutilización**, Volumen I, Editorial McGraw-Hill, México (México), pp.1153-1213, 1996.
- RONZANO E., DAPENA J. **Tratamiento Biológico de las Aguas Residuales**, Ediciones Díaz de Santos S.A, Madrid (España), pp. 120-145, 1995.
- WINKLER M. **Tratamiento Biológico de Aguas de Desecho**, Editorial Limusa, México (México), pp. 50-74, 1994.
- HVALA N., ZEC M., ROS M., STRMCNIK S. **Water Environment Research** 73(2):146-154, 2001.
- CERVANTES F., PÉREZ J., GÓMEZ J. **Revista Latinoamericana de Microbiología** 42(1):73-82, 2000.
- CRISTES R., TCHOBANOGLOUS G. **Tratamiento Biológico de Aguas Residuales en pequeñas comunidades**, Editorial McGraw-Hill, Bogotá (Colombia), pp. 345-469, 2000.
- ABREU L., ESTRADA S. Sequencing Batch Reactors: An Efficient Alternative to Wastewater. <http://www.esb.ucp.pt/~bungah/actslud/envsysb.htm>. 2001.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for examination of water and wastewater**, Vigésima Edición, New York (USA), 1999.
- GARCÍA S. Reactor de carga como sistema de tratamiento para efluentes industriales de difícil tratabilidad (Tesis de MSc), La Universidad del Zulia, Maracaibo (Venezuela), pp. 24-66, 1987.
- RONDÓN O. Sistemas de Tratamiento de las aguas de las fosas de perforación de Campo Boscán (Tesis de MSc), La Universidad del Zulia, Maracaibo (Venezuela), pp. 28-44, 1990.
- HAMAMOTO Y., TABATA S., OKUBO Y. **Water Science and Technology** 35(1):145-152, 1997.
- Gaceta Oficial de la República de Venezuela**. N° 5021, Decreto 883. Caracas 18 de Diciembre de 1995.
- GORONSZY C., DEMOULIN G., NEWLAND M. **Water Science and Technology** 34(1-2):487-491, 1996.

- 
15. LOUZEIRO N., MAVINIC D., OLDHAM W., MEISEN A., GARDNER I. **Water Research** 36(1):2721-2732, 2002.
  16. ROMERO J. **Tratamiento de Aguas Residuales**, Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia, pp. 187-277, 2000.
  17. DANGCONG P., BERNET N., DELGENES J., MOLETTA R. **Water Environment Research** 72(2):195-200, 2000.
  18. SAZAKI K., YAMAMOTO Y. **Water Science and Technology** 34(1-2):111-118, 1996.