

# Evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales

TC1318.1

## **Informe final**

SUBCOORDINACIÓN DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

**Elaboró:**  
**Petia Mijaylova Nacheva**

Diciembre de 2013

México, 2013

F.C0.4.40.02

## Resumen ejecutivo

El objetivo de este proyecto fue realizar la evaluación a escala real de tres prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales. La instalación experimental consistió de tres reactores, uno fue el BIOSTAR-IMTA convencional y dos fueron modificaciones de este con zonas anóxicas y aerobias en diferentes configuraciones. En uno de los reactores modificados la zona anóxica estaba debajo de la aerobia y en el otro reactor estaba ubicada en la zona periférica externa a la zona aerobia. El montaje de los reactores y su operación se realizó en el territorio de la PTAR Texcal en Jiutepec, Mor. En el caso de los dos modelos con zonas anóxicas se evaluó la posibilidad de desviación de una fracción del influente hacia la zona anóxica. En los tres reactores se evaluó el efecto del porcentaje de recirculación del efluente, así como de la velocidad de rotación del eje central. La carga orgánica fue entre 9.2 y 33 g DQO/(m<sup>2</sup>.d). El diseño experimental fue de cuadrados latinos, tres variables en dos niveles y una repetición, siete períodos experimentales en total. Los resultados del estudio indicaron que la implementación de una zona anóxica permite aumentar la remoción del nitrógeno total. Los mejores resultados se obtuvieron en el reactor en el cual la zona anóxica fue ubicada en la zona periférica, lográndose remociones de N-NH<sub>4</sub> mayores de 93% y remociones de nitrógeno total mayores de 86%. Adicionalmente, la implementación de una zona anóxica permitió obtener remociones de DQO del agua en 4-7% mayores comparadas con las determinadas en el BIOSTAR original. Se obtuvieron efluentes con una DBO<sub>5</sub> menor de 5 mg/L. De los tres parámetros de operación estudiados en este proyecto, la recirculación del efluente tuvo el mayor efecto sobre la remoción del nitrógeno. La evaluación de los reactores durante casi un año demostró la ventaja de los nuevos modelos y la posibilidad de su aplicación en sistemas para reúso urbano e industrial del agua regenerada (NOM-003-SEMARNAT-1997), recarga de acuíferos, descarga a cuerpos receptores con requerimientos estrictos con respecto al contenido de nitrógeno (ríos con criterio de protección de la vida acuática, embalses con uso público-urbano y estuarios, de acuerdo con la clasificación de la NOM-001-SEMARNAT-1996).

## Índice

Cap.	Título	Pag.
1	Introducción y objetivos	1
2	Metodología	1
2.1	Instalación experimental para realizar el estudio	1
2.2	Evaluación del proceso en los tres reactores	11
	2.2.1 Fases experimentales, parámetros de operación y seguimiento del proceso	12
	2.3.2 Análisis físico-químicos	13
3	Resultados	16
3.1	Remoción de materia orgánica medida como DQO	16
3.2	Remoción de materia orgánica medida como DBO	27
3.3	Remoción de nitrógeno amoniacal	32
3.4	Remoción de nitrógeno total Kjeldahl	41
3.5	Nitritos, nitratos y alcalinidad en los reactores R1, R2 y R3	51
3.6	Remoción de nitrógeno total	64
3.7	Remoción de fósforo total	75
3.8	Remoción de sólidos suspendidos totales	84
4	Conclusiones y principales resultados	94

## Índice de tablas

No..	Título	Pag.
2.1	Volúmenes de las diferentes zonas de cada reactor, TRH y cargas hidráulicas en las zonas de sedimentación.	12
2.2	Parámetros de operación y fases experimentales.	13
2.3	Parámetros físico-químicos, puntos y frecuencia de muestreo.	14
2.4	Técnicas de análisis para la determinación de los parámetros.	15
3.1.1	Valores de la DQO en el influente y los efluentes de R1, R2 y R3.	12
3.1.2	Cargas orgánicas COV y COS en los tres reactores en las diferentes fases experimentales.	19
3.1.3	Remociones de DQO en los reactores R1, R2 y R3.	20
3.1.4	Promedios de la DQO en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2.	25
3.1.5	Promedios de la DQO en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3.	26
3.1.6	Cantidad de DQO removida y porcentaje de contribución de cada zona del R2.	26
3.1.7	Cantidad de DQO removida y porcentaje de contribución de cada zona del R3.	27
3.2.1	Valores de la DBO en el influente y los efluentes de R1, R2 y R3.	29
3.2.2	Remociones de DBO en los reactores R1, R2 y R3.	31
3.3.1	Valores de la concentración del N-NH <sub>4</sub> en el influente y los efluentes de R1, R2 y R3.	34
3.3.2	Cargas de N-NH <sub>4</sub> en los tres reactores en las diferentes fases experimentales.	35
3.3.3	Remociones promedio de N-NH <sub>4</sub> en los reactores R1, R2 y R3.	36
3.3.4	Concentraciones de N-NH <sub>4</sub> en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2.	39
3.3.5	Concentraciones de N-NH <sub>4</sub> en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3.	40
3.3.6	Cantidad removida de N-NH <sub>4</sub> y porcentaje de contribución de cada zona del R2.	40
3.3.7	Cantidad removida de N-NH <sub>4</sub> y porcentaje de contribución de cada zona del R3.	41
3.4.1	Valores de la concentración del NTK en el influente y los efluentes de R1, R2 y R3.	44
3.4.2	Cargas de NTK en los tres reactores en las diferentes fases experimentales.	44
3.4.3	Remociones promedio de NTK en los reactores R1, R2 y R3.	45
3.4.4	Concentraciones de NTK en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2.	49
3.4.5	Concentraciones de NTK en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3.	49
3.4.6	Cantidad removida de NTK y porcentaje de contribución de cada zona del R2.	50
3.4.7	Cantidad removida de NTK y porcentaje de contribución de cada zona del R3.	50
3.5.1	Concentraciones promedio de los nitritos determinados en el influente y los efluentes de R1, R2 y R3 durante las diferentes fases experimentales.	53
3.5.2	Concentraciones promedio de los nitratos determinados en el influente y los	54

México, 2013

No..	Título	Pag.
	efluentes de R1, R2 y R3 durante las diferentes fases experimentales.	
3.5.3	Concentraciones de nitritos (mg/L) en los diferentes puntos de muestreo de los reactores R2 y R3.	57
3.5.4	Concentraciones de nitratos (mg/L) en los diferentes puntos de muestreo de los reactores R2 y R3.	58
3.5.5	Cantidades de nitritos y nitratos formadas y removidas por zona en los reactores R2 y R3.	58
3.5.6	Promedios de las alcalinidades totales determinadas en el influente y efluente del reactor R1.	62
3.5.7	Promedios de las alcalinidades totales determinadas en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2.	62
3.5.8	Promedios de las alcalinidades totales determinadas en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3.	63
3.6.1	Valores de la concentración del NT en el influente y los efluentes de R1, R2 y R3.	67
3.6.2	Remociones promedio de NT en los reactores R1, R2 y R3.	68
3.6.3	Concentraciones de NT en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2.	72
3.6.4	Concentraciones de NT en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3.	73
3.6.5	Cantidad removida de NT y porcentaje de contribución de cada zona del R2.	73
3.6.6	Cantidad removida de NT y porcentaje de contribución de cada zona del R3.	74
3.7.1	Valores de la concentración del PT en el influente y los efluentes de R1, R2 y R3.	78
3.7.2	Remociones promedio de PT en los reactores R1, R2 y R3.	79
3.7.3	Concentraciones de PT en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2.	82
3.7.4	Concentraciones de PT en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3.	82
3.7.5	Cantidad removida de PT y porcentaje de contribución de cada zona del R2.	83
3.7.6	Cantidad removida de PT y porcentaje de contribución de cada zona del R3.	83
3.8.1	Valores promedio de la concentración de SST en el influente y en los efluentes de R1, R2 y R3.	86
3.8.2	Remociones promedio de los SST en los reactores R1, R2 y R3.	87
3.8.3	Concentraciones de SST en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2.	92
3.8.4	Concentraciones de SST en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3.	93
3.8.5	Cantidad removida de SST y porcentaje de contribución de cada zona del R2.	93
3.8.6	Cantidad removida de SST y porcentaje de contribución de cada zona del R3.	93

## Índice de figuras

No..	Título	Pag.
2.1	Arreglo general del sistema experimental.	2
2.2	Vista del conjunto de los tres reactores en la PTAR Texcal.	3
2.3	Esquema del reactor BIOSTAR original (reactor R1).	4
2.4	Vistas del reactor R1.	5
2.5	Esquema del reactor con una zona aerobia y una zona anóxica ubicada debajo de la aerobia (reactor R2).	6
2.6	Fotografías del reactor R2.	7
2.7	Esquema del reactor con una zona aerobia y una zona anóxica ubicada en la zona periférica del reactor (reactor R3).	8
2.8	Fotografías del reactor R3.	10
2.9	Cinta de polietileno de baja densidad.	11
3.1.1	Variación de la DQO en el influente y efluente del reactor R1.	16
3.1.2	Variación de la DQO en el influente y efluente del reactor R2.	17
3.1.3	Variación de la DQO en el influente y efluente del reactor R3.	17
3.1.4	Variación de la COV durante la evaluación de los tres reactores.	18
3.1.5	Variación de la COS durante la evaluación de los tres reactores.	18
3.1.6	Remociones de materia orgánica medida como DQO para los 3 reactores del sistema experimental.	20
3.1.7	Comparación de las remociones promedio de DQO obtenidos en los 3 reactores del sistema experimental durante las diferentes fases experimentales.	21
3.1.8	Variación de los valores de DQO en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.	24
3.1.9	Variación de los valores de DQO en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.	25
3.2.1	Variación de la DBO en el influente y efluente del reactor R1.	28
3.2.2	Variación de la DBO en el influente y efluente del reactor R2.	28
3.2.3	Variación de la DBO en el influente y efluente del reactor R3.	29
3.2.4	Remociones de materia orgánica medida como DBO para los 3 reactores del sistema experimental.	30
3.2.5	Comparación de las remociones promedio de DBO obtenidos en los 3 reactores del sistema experimental durante las diferentes fases experimentales.	31
3.3.1	Variación de las concentraciones del N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> en el influente y efluente del reactor R1.	33
3.3.2	Variación de las concentraciones del N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> en el influente y efluente del reactor R2.	33
3.3.3	Variación de las concentraciones del N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> en el influente y efluente del reactor R3.	34
3.3.4	Remoción del N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> para los reactores R1, R2 y R3.	35
3.3.5	Variación de la concentración del N-NH <sub>4</sub> en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.	38
3.3.6	Variación de la concentración del N-NH <sub>4</sub> en los diferentes puntos de	39

No..	Título	Pag.
	muestreo del reactor R3: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.	
3.4.1	Variación de las concentraciones del NTK en el influente y efluente del reactor R1.	42
3.4.2	Variación de las concentraciones del NTK en el influente y efluente del reactor R2.	43
3.4.3	Variación de las concentraciones del NTK en el influente y efluente del reactor R3.	43
3.4.4	Remoción del NTK para los reactores R1, R2 y R3.	45
3.4.5	Variación de la concentración del NTK en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.	48
3.4.6	Variación de la concentración del NTK en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.	48
3.5.1	Concentración de nitritos en los efluentes de los reactores R1, R2 y R3.	52
3.5.2	Concentración de nitratos en los efluentes de los reactores R1, R2 y R3.	53
3.5.3	Variación de la concentración de los nitritos en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.	55
3.5.4	Variación de la concentración de los nitritos en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.	56
3.5.5	Variación de la concentración de los nitratos en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.	56
3.5.6	Variación de la concentración de los nitratos en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.	57
3.5.7	Variación de las alcalinidades en el influente y en los efluentes de los reactores R1, R2 y R3.	59
3.5.8	Variación de las alcalinidades en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.	60
3.5.9	Variación de las alcalinidades en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.	60
3.6.1	Variación de las concentraciones del NT en el influente y efluente del reactor R1.	65
3.6.2	Variación de las concentraciones del NT en el influente y efluente del reactor R2.	66
3.6.3	Variación de las concentraciones del NT en el influente y efluente del reactor R3.	66
3.6.4	Remoción del NT para los reactores R1, R2 y R3.	67
3.6.5	Comparación de las remociones promedio de NT obtenidos en los tres reactores del sistema experimental durante las diferentes fases experimentales.	68
3.6.6	Variación de la concentración del NT en los diferentes puntos de muestreo	71

No..	Título	Pag.
	del reactor R2: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.	
3.6.7	Variación de la concentración del NT en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.	72
3.7.1	Variación de las concentraciones del PT en el influente y efluente del reactor R1.	76
3.7.2	Variación de las concentraciones del PT en el influente y efluente del reactor R2.	77
3.7.3	Variación de las concentraciones del PT en el influente y efluente del reactor R3.	77
3.7.4	Remoción del PT para los reactores R1, R2 y R3.	78
3.7.5	Comparación de las remociones promedio de PT obtenidos en los tres reactores del sistema experimental durante las diferentes fases experimentales.	79
3.7.6	Variación de la concentración del PT en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.	81
3.7.7	Variación de la concentración del PT en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.	81
3.8.1	Variación de las concentraciones de los SST en el influente y efluente del reactor R1.	85
3.8.2	Variación de las concentraciones de los SST en el influente y efluente del reactor R2.	85
3.8.3	Variación de las concentraciones de los SST en el influente y efluente del reactor R3.	86
3.8.4	Remoción de SST en los reactores R1, R2 y R3.	87
3.8.5	Comparación de las remociones promedio de SST obtenidos en los tres reactores del sistema experimental durante las diferentes fases experimentales.	88
3.8.6	Variación de las concentraciones de SST en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.	91
3.8.7	Variación de las concentraciones de SST en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.	92

## NOMENCLATURA

BOA	Bacterias Oxidantes de Amonio
BON	Bacterias Oxidantes de Nitrito
COD	Carbono orgánico disuelto
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DNA	Ácido desoxirribonucleico
DQO	Demanda química de oxígeno
EPA	Environmental Protection Agency
EPS	Exopolímeros
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
N <sub>2</sub>	Nitrógeno gas
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Nitrógeno amoniacal
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Nitrógeno de nitritos
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitrógeno de nitratos
NT	Nitrógeno total
NTK	Nitrógeno total Kjeldahl
OD	Oxígeno disuelto
pH	Potencial de hidrógeno
POR	Potencial de óxido reducción
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales
PT	Fósforo total
SDT	Sólidos disueltos totales
SST	Sólidos suspendidos totales
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
TRC	Tiempo de retención celular
TRH	Tiempo de residencia hidráulica

## 1. Introducción y objetivos

En el año 2012 se realizó el proyecto TC1206.1 "Reactor con biomasa inmovilizada (BIOSTAR): alternativa para remoción biológica del nitrógeno" en el cual se propusieron dos modificaciones de la tecnología BIOSTAR-IMTA, adicionando al reactor aerobio zonas anóxicas con la finalidad de favorecer el desarrollo de biopelículas especializadas y así mejorar la remoción del nitrógeno total mediante nitrificación seguida por desnitrificación. Se elaboraron tres reactores: uno con un solo lecho y recirculación del efluente (BIOSTAR) y dos con zonas aerobia y anóxica (modificaciones del BIOSTAR). En uno de los reactores modificados la zona anóxica está debajo de la aerobia y en el otro reactor está ubicada en la zona periférica externa a la zona aerobia. Se realizó el dimensionamiento de las zonas anóxicas para proponer las modificaciones planteadas para el reactor BIOSTAR. El montaje de los reactores se realizó en el predio de la PTAR Texcal en Jiutepec, Mor., lugar adecuado para llevar a cabo el trabajo experimental. Se realizó el desarrollo de la biomasa y la evaluación preliminar de los prototipos con una duración de solo dos meses. Para obtener los parámetros óptimos de operación y de diseño del sistema se necesita de una evaluación del proceso en siete fases experimentales aplicando diferentes condiciones de operación, por lo cual se realizó el proyecto actual TC1318.1 "Evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales".

El **objetivo general** del proyecto es:

Realizar la evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales.

### Resultados esperados:

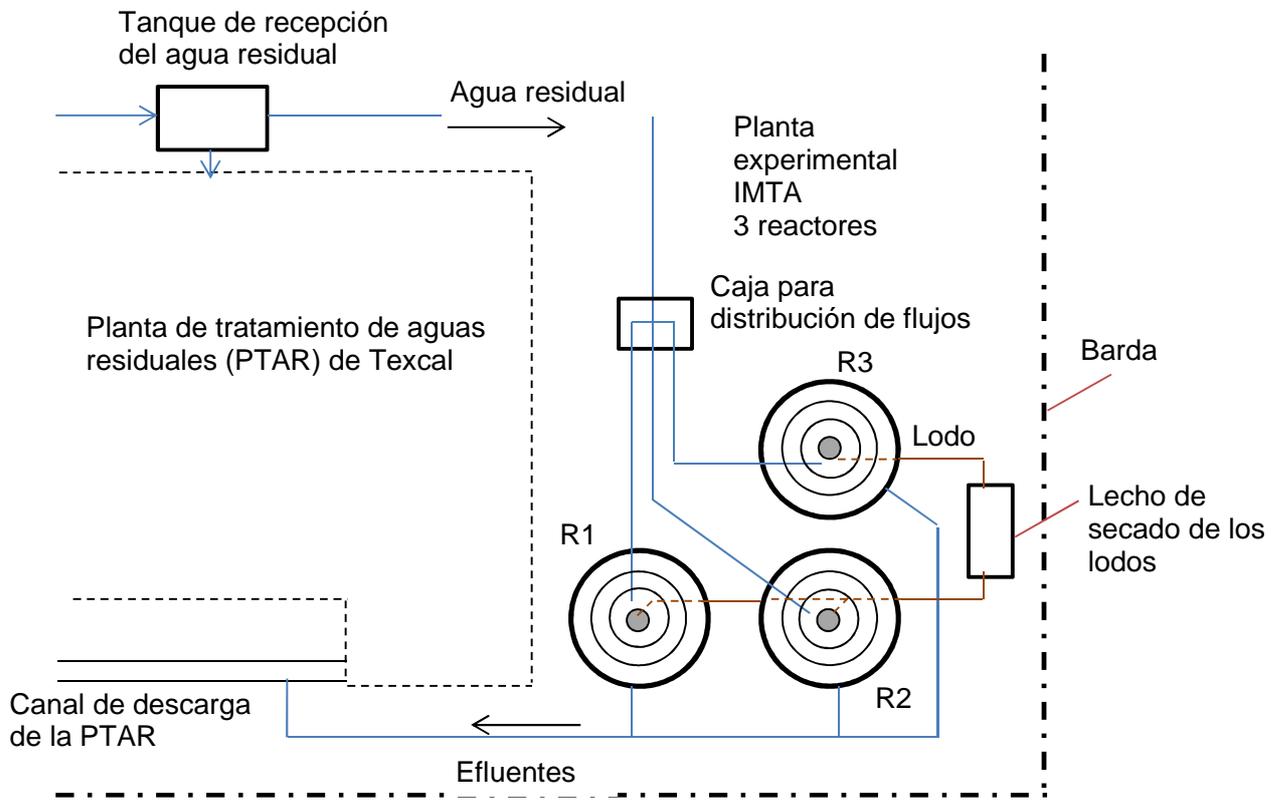
Demostración del funcionamiento y de la efectividad de los prototipos elaborados a escala real y presentación de la solicitud de modelo de utilidad.

## 2. Metodología

### 2.1 Instalación experimental para realizar el estudio

La instalación experimental consiste de tres reactores: uno con una sola zona aerobia (BIOSTAR) y dos con zonas aerobia y anóxica. La creación de dos zonas en el reactor se realizó con la finalidad de favorecer los procesos de nitrificación y desnitrificación y aumentar la remoción del nitrógeno total mediante el desarrollo de biopelículas especializadas. En uno de los reactores la zona anóxica está debajo de la aerobia y en el otro reactor está ubicada en la zona periférica externa a la zona aerobia.

Como ya se mencionó, el dimensionamiento, la elaboración de los reactores y su instalación en el territorio de la PTAR Texcal en Jiutepec, Mor., se realizaron en el proyecto TC1206.1. El arreglo general del sistema experimental se presenta en la Figura 2.1.



**Figura 2.1 Arreglo general del sistema experimental.**

Como se puede observar en la Figura 2.1 el agua residual del Texcal entra en un tanque de recepción del cual se introduce a la PTAR del Texcal. En este tanque se sumergió una bomba que transfería el agua residual a los tres reactores experimentales (R1, R2 y R3) regulándose el flujo mediante válvulas las cuales estaban instaladas en la caja para la distribución de los flujos. El agua pasaba por los reactores y los efluentes se recolectaban dirigiéndolos mediante una tubería hacia el canal de descarga de la PTAR del Texcal. Los lodos extraídos de los tres reactores se descargaban y secaban en un lecho de secado. En la Figura 2.2 se presenta una vista general del conjunto de los tres reactores experimentales instalados en la PTAR del Texcal. Cada reactor cuenta con un soplador de aire y con una caja en la cual están ubicados los controladores de los motores, así como con una estructura metálica que permite tener acceso a la superficie del reactor y realizar labores de muestreo, limpieza y mantenimiento.



**Figura 2.2 Vista del conjunto de los tres reactores en la PTAR Texcal.**

En la Figura 2.3 se presenta el esquema del reactor BIOSTAR que en este estudio se denomina R1. En su interior tiene un cilindro metálico el cual delimita una zona central donde se realiza el proceso de biodegradación (biofiltro) y una zona periférica donde se realiza el proceso de sedimentación de los sólidos suspendidos. La base inferior tiene forma cónica para la acumulación de biomasa suspendida (zona de acumulación del lodo). Esto permite que en un solo reactor se tenga el biofiltro y el sedimentador juntos. El biofiltro es de tipo lecho sumergido aireado, flujo continuo descendente, empacado con cinta de polietileno de fabricación propia denominada CRP (cinta reforzada de polietileno). En la parte inferior de la zona central están instalados difusores de piedra porosa, que distribuyen el aire el cual es suministrado por un soplador centrífugo. La cinta está fija a una flecha metálica vertical, la cual gira por medio de un motor y de esta manera se provoca un movimiento circular constante del soporte, el cual mejora la transferencia de masa y oxígeno, y el desprendimiento de la biomasa en exceso.

El agua entra por la parte superior del biofiltro y es distribuida uniformemente sobre la superficie de la zona central a través de distribuidor cilíndrico con perforaciones laterales. El agua pasa a través del lecho cuyo volumen es de  $0.71 \text{ m}^3$ . En la parte inferior del lecho el flujo del agua cambia de dirección hacia la superficie de la zona periférica (zona de sedimentación). El efluente se recolecta desde la parte superior de esta zona. El lodo sedimentado se acumula en la zona inferior de fondo cónico y de allí se realizan extracciones periódicas. El reactor R1 cuenta con un sistema de recirculación del efluente que como se ha demostrado en estudios previos permite aumentar la remoción de nitrógeno amoniacal cuando esto es necesario (Mijaylova y Moeller, 2010). En la Figura 2.4 se presentan vistas generales y de los detalles del reactor R1.

Evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales

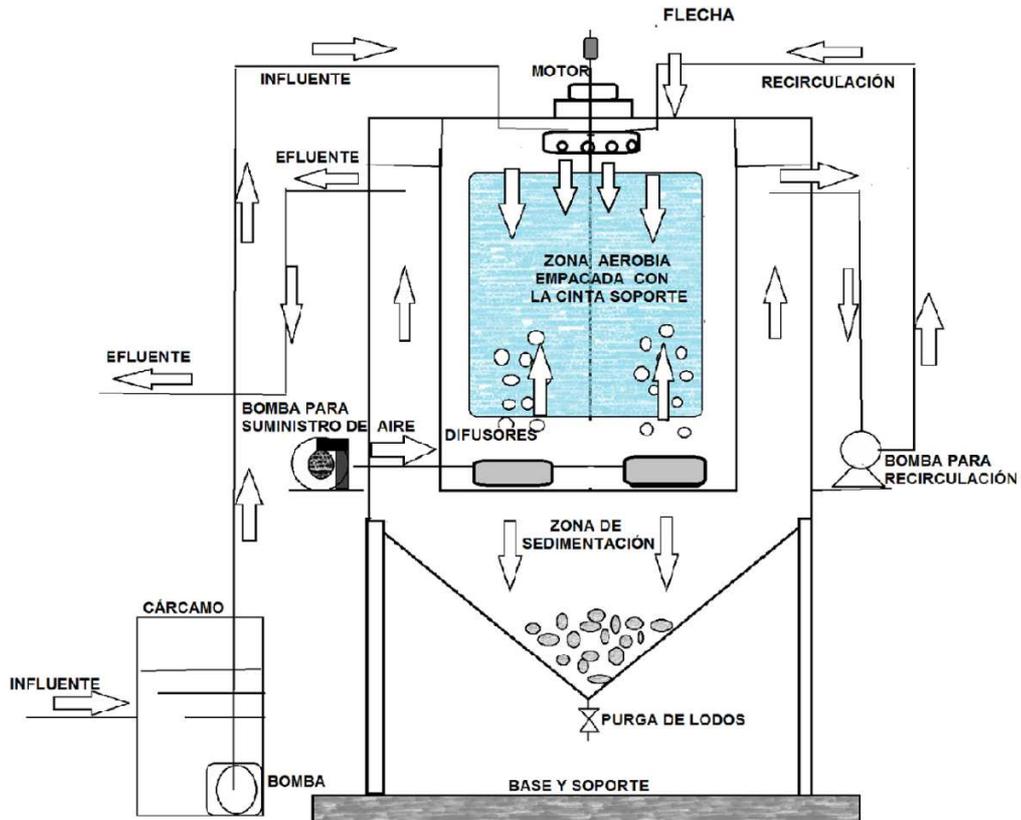


Figura 2.3 Esquema del reactor BIOSTAR original (reactor R1).

Evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales



Figura 2.4 Vistas del reactor R1.

La primera modificación del reactor BIOSTAR convencional, denominada en este estudio como reactor R2, consistió en conservar el diseño del sistema base del cual se parte, pero implementar una zona anóxica debajo de la zona aerobia del lecho empacado. Esto se logró aumentando la altura del lecho empacado e instalando los difusores a una altura igual a la mitad de la altura total del lecho. La parte superior es zona aerobia y la parte inferior zona anóxica. El volumen del lecho de la zona aerobia y del lecho de la zona anóxica son de  $0.55 \text{ m}^3$  cada uno. En la Figura 2.5 se muestra el esquema del reactor R2. La introducción y distribución del influente al reactor R2 es igual que en el R1. La zona periférica del R2 se conserva como zona de sedimentación y la zona inferior cónica es para la acumulación de los lodos generados. Se utilizan el mismo tipo de difusores de aire y de soplador. En el caso de reactor R2 se ha implementado una desviación del tubo de alimentación del influente que se dirige hacia la zona anóxica con el objetivo de evaluar la necesidad de un suministro parcial de agua residual hasta esta zona para usar la materia orgánica que esta tiene como fuente de carbono para las bacterias desnitrificantes. El reactor R2 cuenta también con un sistema de recirculación del efluente.

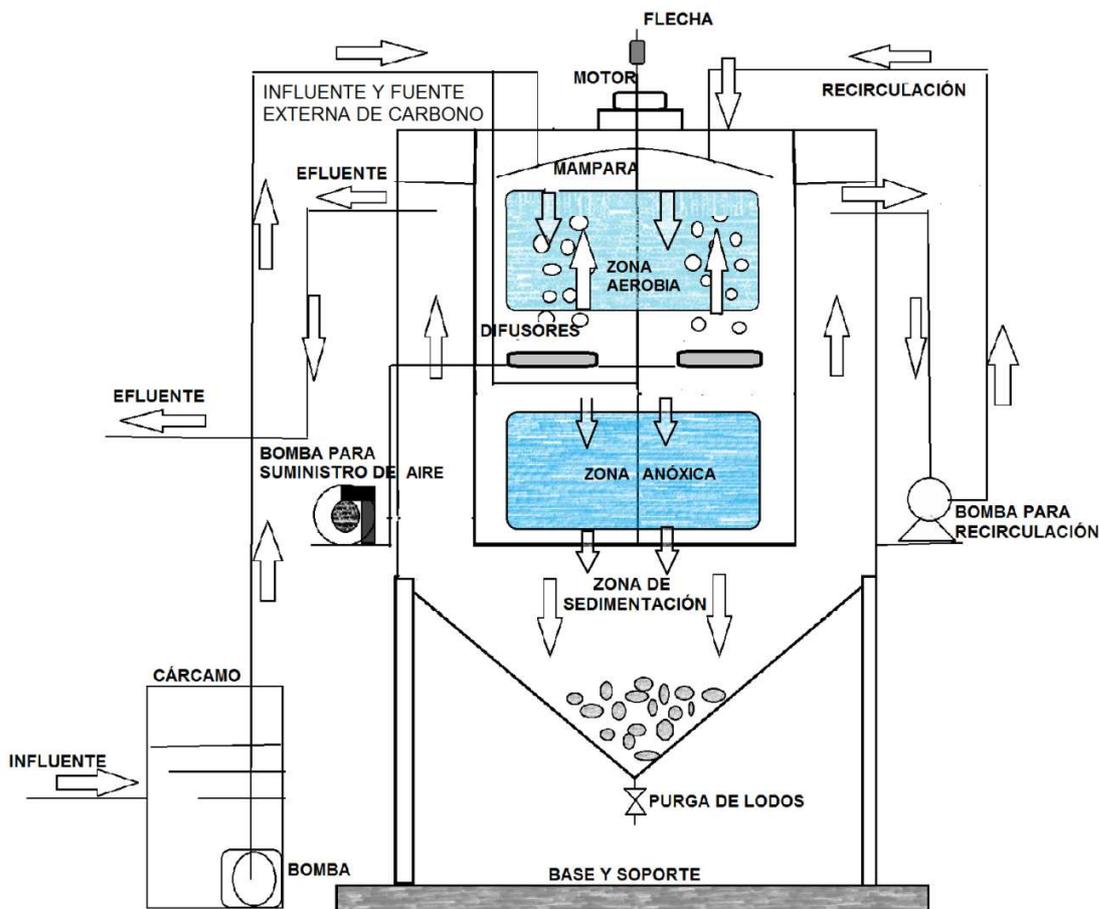


Figura 2.5. Esquema del reactor con una zona aerobia y una zona anóxica ubicada debajo de la aerobia (reactor R2).

En la Figura 2.6 se presentan fotografías generales del reactor R2 y de los detalles del sistema, tales como: las líneas de alimentación (una que introduce el agua al distribuidor central con orificios circulares para su vertimiento sobre la parte superior del lecho aerobio, y otra que permite introducir diferentes proporciones del agua cruda hasta dos puntos ubicados al nivel superior del lecho anóxico), la caja del motor que hace girar la flecha vertical y el lecho, tubos y válvulas de muestreo a diferentes alturas del lecho, zona cónica inferior para la acumulación del lodo, la válvula y el tubo para su extracción periódica, el lecho de secado del lodo extraído, el tubo de recirculación de una parte del efluente, la superficie de la zona periférica de sedimentación y el tubo de extracción del efluente, la caseta metálica donde están ubicados el soplador y el centro de control de motores.



Figura 2.6. Fotografías del reactor R2.

La segunda opción de modificación consistió en conservar el diseño estructural del sistema base del cual se parte, pero implementar una zona anóxica en la zona periférica donde antes se llevaba a cabo la sedimentación. Este reactor se denomina R3 y su esquema se presenta en la Figura 2.7. La zona periférica se empacó con cinta de polietileno insertada sobre dos ejes circulares metálicos ubicados a una distancia de 27 y de 81 cm desde el fondo del cilindro central.

La alimentación del agua se realiza en la parte superior del biofiltro central, el agua pasa a través del lecho empacado central de forma descendente, posteriormente cambia de dirección y pasa de forma ascendente a través de la zona anóxica periférica empacada con cinta de polietileno. El volumen del lecho de la zona aerobia es de  $0.71 \text{ m}^3$ . El volumen del lecho en la zona anóxica fue inicialmente de  $1.3 \text{ m}^3$ , después se extrajo la mitad (la cinta insertada sobre el eje circular superior) y durante la evaluación realizada en este proyecto el volumen del lecho en la zona anóxica fue de  $0.67 \text{ m}^3$ .

El efluente se recolecta desde la parte superior de la zona anóxica. Los difusores se instalaron en el fondo de la zona central aerobia, igual que en el caso de R1. Parte de la biomasa desprendida se sedimenta en la zona debajo del empaque, se acumula en la zona cónica inferior de donde se extrae periódicamente. Parte de los flóculos penetran en la zona empacada periférica (zona anóxica) y se depositan sobre la cinta. Esta materia puede ser utilizada como fuente de carbono por las bacterias desnitrificantes, pero también puede provocar saturación del lecho. La evaluación de estos fenómenos es uno de los objetivos de la investigación. En el caso de R3, igual que en R2 se puede hacer una desviación de una parte del influente hasta la entrada a la zona anóxica para evaluar la necesidad de un suministro parcial de agua residual hasta esta zona con la finalidad de usar la materia orgánica que esta tiene como fuente de carbono para las bacterias desnitrificantes. El reactor R3 cuenta también con un sistema de recirculación del efluente. En la Figura 2.8 se presentan fotografías generales del reactor R3 y de los detalles del sistema.

Evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales

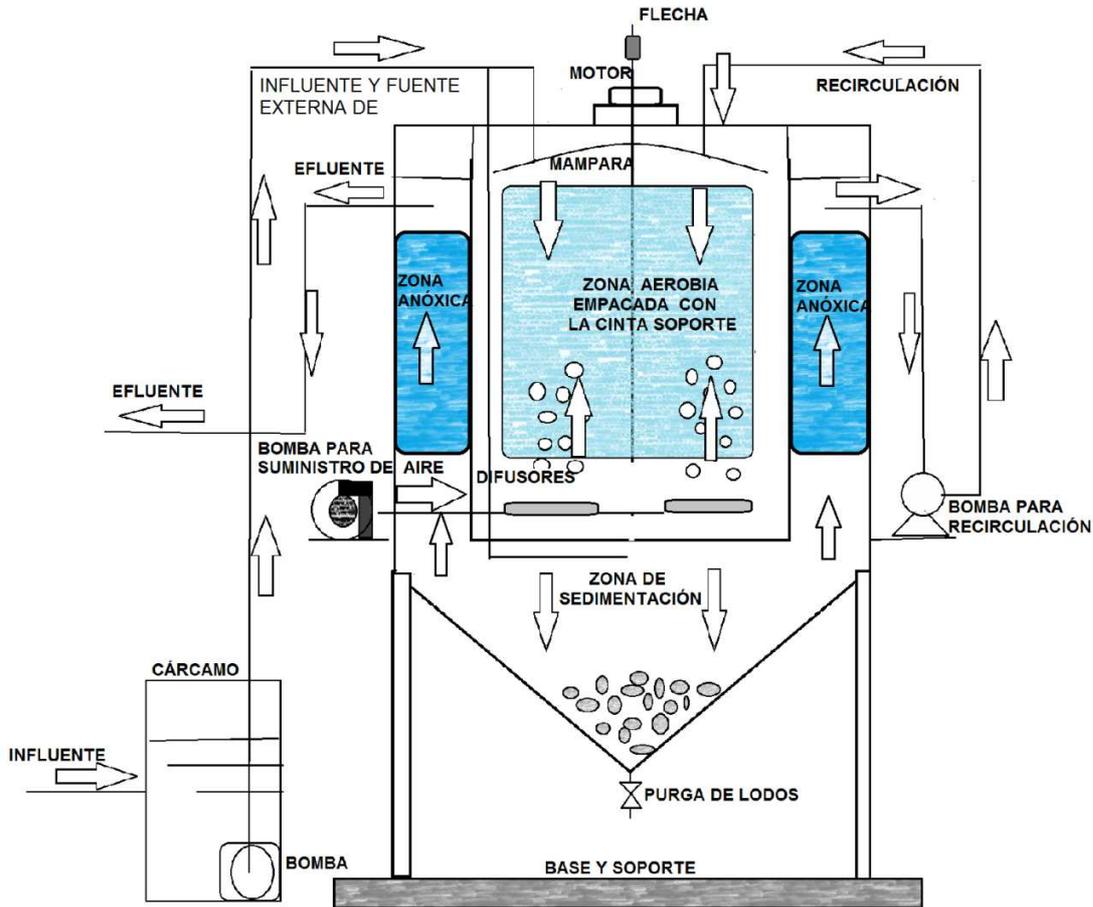


Figura 2.7. Esquema del reactor con una zona aerobia y una zona anóxica ubicada en la zona periférica del reactor (reactor R3).

Evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales



**Figura 2.8. Fotografías del reactor R3.**

El medio de soporte de la biomasa en los tres reactores es una cinta de polietileno de baja densidad que ya se ha utilizado en otros proyectos como medio de soporte, obteniendo muy buenos resultados. Para elaborar el empaque de la zona central la cinta es cortada y fijada a una flecha metálica vertical, la cual gira por medio de un motor y de esta manera se provoca un movimiento circular constante del soporte, el cual mejora la transferencia de masa y oxígeno, y el desprendimiento de la biomasa en exceso.

Las características de la cinta de polietileno de baja densidad son las siguientes:

- La cinta es de polietileno de baja densidad estabilizada con rayos UV.
- Porcentaje de porosidad mayor del 98%.
- Sus dimensiones son de 3 cm de ancho y un espesor de 0.85 mm.

- La cinta de polietileno esta reforzada con 2 cordones de alta densidad a lo largo de toda la cinta.

En la Figura 2.9 se presenta una fotografía de la cinta y del empaque utilizado en los reactores del sistema experimental. Con base en la longitud de la cinta utilizada para la elaboración del lecho y su ancho se determinó el área biodisponible y el área específica del lecho la cual fue de  $1,098 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . En evaluaciones anteriores ya se había determinado el porcentaje de espacios vacíos del lecho el cual es mayor del 98%.



**Figura 2.9. Cinta de polietileno de baja densidad.**

## 2.2 Evaluación del proceso en los tres reactores

Como ya se mencionó, en el año 2012 y como resultado del proyecto TC1206.1 "Reactor con biomasa inmovilizada (BIOSTAR): alternativa para remoción biológica del nitrógeno", se elaboró el sistema experimental con los tres reactores R1, R2 y R3, se instalaron en la PTAR Texcal en Jiutepec, Mor., se arrancaron y se operaron durante dos meses para desarrollar la biomasa y estabilizar el proceso. No se realizó una inoculación especial esperando que la biopelícula se desarrollara usando los microorganismos presentes en el agua residual. Durante el período de desarrollo de la biopelícula se dio seguimiento al proceso determinando en el influente y en los efluentes de los tres reactores los siguientes parámetros de la calidad del agua: SST, SSV, DBO, DQO, N-NH<sub>4</sub>, NTK, N-NO<sub>2</sub>, N-NO<sub>3</sub>, Ptotal. En el reactor se medían: oxígeno disuelto (OD), pH, temperatura, formación de la biopelícula (observaciones microscópicas). La frecuencia de muestreo fue de 2 veces por semana. Durante la etapa de desarrollo de la biopelícula no se realizaba recirculación del efluente. La COS varió entre  $10$  y  $30 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  y los TRH en la zona aerobia de los reactores varió entre  $0.3$  y  $1.0 \text{ h}$ .

En este proyecto se realizó la evaluación del proceso en siete fases experimentales aplicando diferentes condiciones de operación.

### 2.2.1 Fases experimentales, parámetros de operación y seguimiento del proceso

Principales variables del proceso son la carga orgánica, el tiempo de residencia hidráulica (TRH) y la recirculación del efluente. La concentración de la materia orgánica en el agua residual determina la carga orgánica en el reactor biológico. Su variación en el tiempo provoca variación de la carga orgánica en los reactores. Esta variación fue evaluada durante todo el período experimental. Se determinaron tanto la carga orgánica volumétrica (COV), como la carga orgánica superficial (COS), la cual es la más frecuentemente utilizada para sistemas con biopelículas. La carga orgánica varió entre 9.2 y 33 gDQO·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup> durante el período experimental de este proyecto, con un promedio de 14 gDQO·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>. El caudal se mantuvo fijo, el caudal a cada reactor fue de 0.2 L·s<sup>-1</sup>. El TRH en cada zona depende del volumen de las zonas en cada reactor. En la Tabla 2.1 se presentan los volúmenes de las diferentes zonas de cada reactor, los TRH y las cargas hidráulicas en las zonas de sedimentación.

**Tabla 2.1. Volúmenes de las diferentes zonas de cada reactor, TRH y cargas hidráulicas en las zonas de sedimentación.**

	R1	R2	R3
Volumen de la zona aerobia, m <sup>3</sup>	0.71	0.55	0.71
Volumen de la zona anóxica, m <sup>3</sup>	-	0.55	0.67
Volumen de la zona de sedimentación, m <sup>3</sup>	1.33	2.3	0.65
TRH en la zona aerobia, h	1.0	0.8	1.0
TRH en la zona anóxica	-	0.8	0.9
TRH en la zona de sedimentación, h	1.8	3.2	0.9
A sedimentación, m <sup>2</sup>	1.5	1.5	1.5
Carga hidráulica en la zona de sedimentación, m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	11.6	11.6	11.6

Nota: Los parámetros TRH y la carga hidráulica están calculados sin recirculación del efluente. En el caso de operación con una recirculación (Qr/Q) de 100%, el valor del TRH se reduce a la mitad del indicado y la carga hidráulica en la zona de sedimentación aumenta dos veces más del valor indicado.

El objetivo de este estudio fue determinar el efecto de los siguientes parámetros de operación (variables): porcentaje de recirculación del efluente, velocidad de rotación del eje central, desviación de una fracción del influente hacia la zona anóxica. Se aplicó un diseño experimental de cuadrados latinos, tres variables en dos niveles y una repetición, siete períodos experimentales en total. Los valores de los parámetros en cada fase experimental se presentan en la Tabla 2.1. Durante el mes de enero del año en curso se realizaba continuamente la operación de los tres reactores determinando los principales parámetros físico-químicos en el influente y en los efluentes. La operación se seguía en las condiciones de operación establecidas en el proyecto

anterior, los cuales se utilizaron para la evaluación del proceso en la primera fase experimental del proyecto actual (Tabla 2.2, mes de febrero).

**Tabla 2.2. Parámetros de operación y fases experimentales.**

PARÁMETRO	FASES EXPERIMENTALES						
	1	2	3	4	5	6	7
Recirculación (Qr/Q), %	100	100	100	100	0	0	100
Rotación del lecho, rpm	7	7	14	14	7	14	14
Porcentaje del influente a zona anóxica, %*	0	20	0	20	0	20	0
Mes	Feb.	Marzo	Abril	Mayo y Jun.	Julio	Agosto	Sept.

Nota: \*- Solo R2 y R3.

Otro parámetro importante para el proceso biológico es el tiempo de retención celular (TRC), el cual depende de varios factores: carga orgánica, tasa de crecimiento de la biomasa, tasa de decaimiento, características del agua, biodegradabilidad de la materia orgánica. El cálculo del TRC se realizó con base en el parámetro SSV. Para la determinación del TRC se medía el volumen del lodo extraído desde la zona de acumulación de lodos y la concentración de SSV en este lodo. También se determinó la cantidad de biomasa en el reactor usando el parámetro SV (en base seca). Durante la evaluación se pretendía comparar el funcionamiento de los tres reactores bajo condiciones similares de operación: el influente y la variación de su composición fue la misma, las cargas orgánicas en las zonas aerobias fueron similares, el sistema de aireación y la cantidad de aire suministrado fueron similares, las condiciones ambientales fueron las mismas en los tres reactores.

### 2.3.2 Análisis físico-químicos

El seguimiento del proceso se realizó con los siguientes parámetros: SST, SSV, DBO, DQO, N-NH<sub>4</sub>, NTK, N-NO<sub>2</sub>, N-NO<sub>3</sub>, Ptotal. Estos parámetros se determinaron en muestras del influente y de los tres efluentes de los reactores. En los reactores R2 y R3, con la finalidad de esclarecer las transformaciones que suceden en cada zona, se incluyeron dos puntos de muestreo adicionales, el fondo de la zona aerobia y la salida de la zona anóxica. La frecuencia de muestreo fue de 2 veces por semana. En los tres reactores se midieron diariamente: OD, pH y temperatura. Cada semana se realizaba extracción de lodos desde los fondos de los reactores, se determinaba el volumen del lodo extraído, así como los SST y SSV en este lodo. En la Tabla 2.3 se presentan los parámetros físico-químicos, los puntos de muestreo y la frecuencia para su determinación. Al final de cada fase experimental se determinaba la cantidad de la biomasa en las diferentes zonas de los reactores. En la Tabla 2.4 se presentan las técnicas utilizadas para medir cada parámetro físico-químico y biológico.

**Tabla 2.3. Parámetros físico-químicos, puntos y frecuencia de muestreo.**

PARÁMETROS	UNIDADES	FRECUENCIA	PUNTOS DE MUESTREO				
			INFLUENTE	ZONA AEROBIA	EFLUENTE DE LA ZONA AEROBIA	ZONA ANÓXICA	EFLUENTE
SST	mg·L <sup>-1</sup>	2 veces por semana	X				X
SSV			X				X
DBO			X		X		X
DQO			X		X		X
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>			X		X		X
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>			X		X		X
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>			X		X		X
NTK			X		X		X
PT			X		X		X
Alcalinidad			mgCaCO <sub>3</sub> /L		X		X
Temperatura	°C	Diario	X				X
pH	N/A		X	X		X	X
OD	mg·L <sup>-1</sup>		X			X	

**Tabla 2.4. Técnicas de análisis para la determinación de los parámetros.**

PARÁMETRO	TÉCNICA ANALÍTICA
SST	Método gravimétrico de acuerdo a la NMX-AA-34 y Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, No. 2540 (2001).
SSV	Método Gravimétrico de acuerdo a la NMX-AA-34 y Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, No. 2540 (2001).
DBO <sub>5</sub>	DBO en 5 días de acuerdo a la NMX-AA-028 y Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, No. 5210 (2001).
DQO	Espectrofotometría de acuerdo a la NMX-AA-30 y Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, No. 5220 (2001).
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Espectrofotometría HACH 8038, Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, No. 4500 (2001) y de acuerdo a la NMX-AA-026.
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Espectrofotometría de acuerdo y la NMX-AA-099.
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Espectrofotometría de acuerdo a la NMX-AA-079.
NT y NTK	Espectrofotometría HACH 10072, Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 4500 (2001) y de acuerdo a la NMX-AA-026.
PT	Espectrofotometría de acuerdo a la NMX-AA-029.
Alcalinidad total	De acuerdo a la NMX-AA-036
Temperatura	Medición directa de acuerdo a la NMX-AA-007
pH	Medición directa de acuerdo a la NMX-AA-008
OD	Medición directa de acuerdo a la NMX-AA-012
POR	Medición directa con electrodo.
Cantidad de biomasa, medida como SST y SSV	Técnica descrita por Gutiérrez (2009) modificada con base en los resultados obtenidos en esta investigación.
Cuantificación de Nitrosomonas	Standard Methods for Examination of Water and Wastewater No. 9245 (2008).
Cuantificación de Nitrobacter	Standard Methods for Examination of Water and Wastewater No. 9245 (2008).
Cuantificación de Desnitrificantes	Técnica reportada en Britton y Greeson (1987).
Grosor de biopelícula	Técnica desarrollada en esta investigación. Uso de microscopio

### 3. Resultados

#### 3.1 Remoción de materia orgánica medida como DQO

En las Figuras 3.1.1, 3.1.2 y 3.1.3 se presentan los resultados de la determinación de la DQO en los influentes y efluentes de los reactores R1, R2 y R3 respectivamente durante todo el período de operación, desde el arranque, hasta el final de este estudio. La evaluación correspondiente a este proyecto empezó el día 152 desde el arranque (1 de febrero de 2013), sin embargo los reactores se operaron durante el mes de enero y el día 10 de enero de 2013, transcurridos 130 días desde el arranque, se identificó claramente el proceso de nitrificación en los tres reactores, por lo cual la evaluación de la fase experimental 1 tuvo una duración mayor de 30 días, desde el día 130 hasta el día 178. La fase experimental 2 abarcó los días 180-206, la fase 3 los días 211-241, la fase 4 los días 244-299, la fase 5 los días 302-331, la fase 6 los días 333-361, la fase 7 los días 366-389. En las figuras se indican los períodos de las siete fases experimentales.

La variación de la DQO en el influente fue desde 324 hasta 740 mg L<sup>-1</sup> durante el período de evaluación, con un promedio de 487±67 mg L<sup>-1</sup>. Los promedios de la DQO en el influente y en los efluentes se presentan en la Tabla 3.1.1 para cada fase experimental. La variación de la DQO a lo largo del experimento definió las cargas orgánicas que realmente fueron aplicadas en cada reactor y en cada fase experimental. En las Figuras 3.1.4 y 3.1.5 se presentan las variaciones de las cargas orgánicas COV y COS aplicadas a las zonas aerobias de los tres reactores durante la evaluación y en la Tabla 3.1.2 se presentan las cargas promedio. Es importante tomar en consideración la variación de las cargas orgánicas en cada fase experimental en la interpretación de los resultados obtenidos en las diferentes fases.

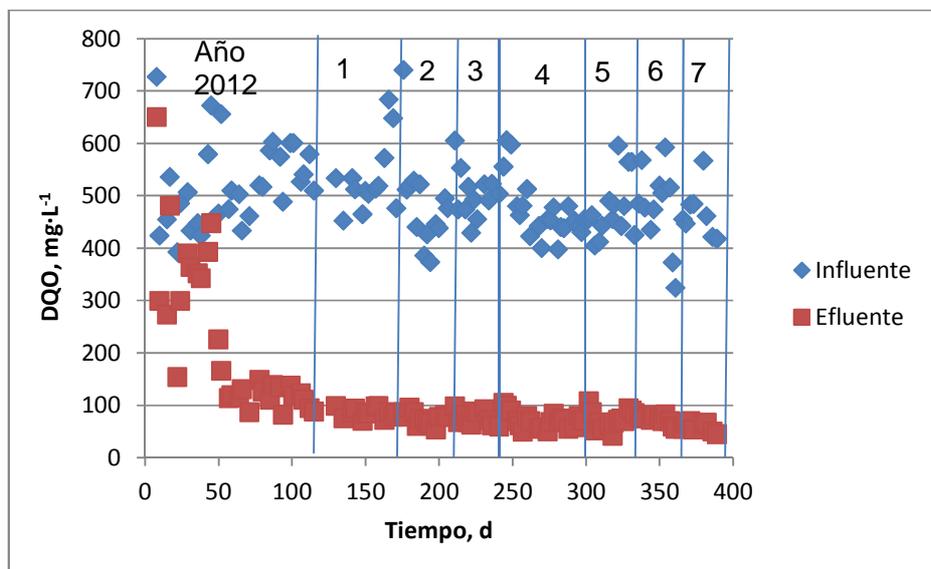


Figura 3.1.1. Variación de la DQO en el influente y efluente del reactor R1.

Evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales

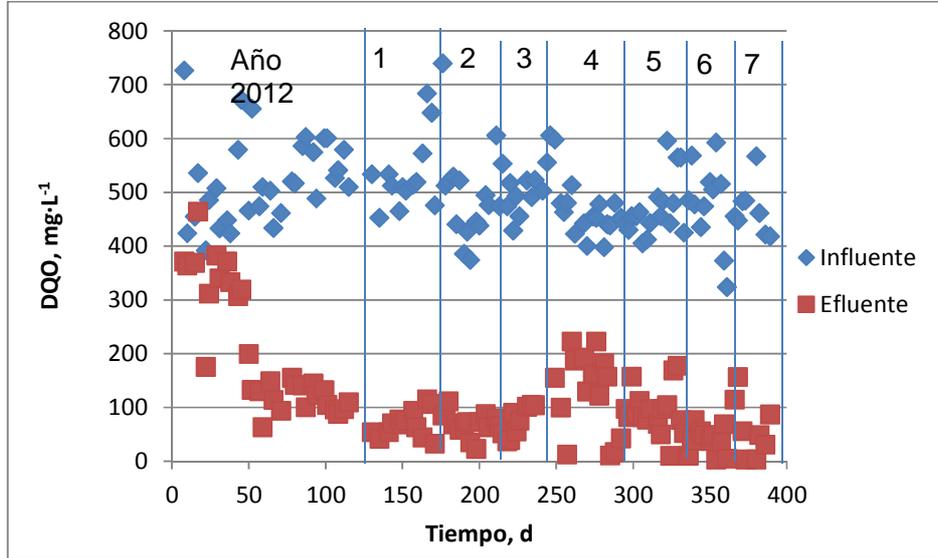


Figura 3.1.2. Variación de la DQO en el influente y efluente del reactor R2.

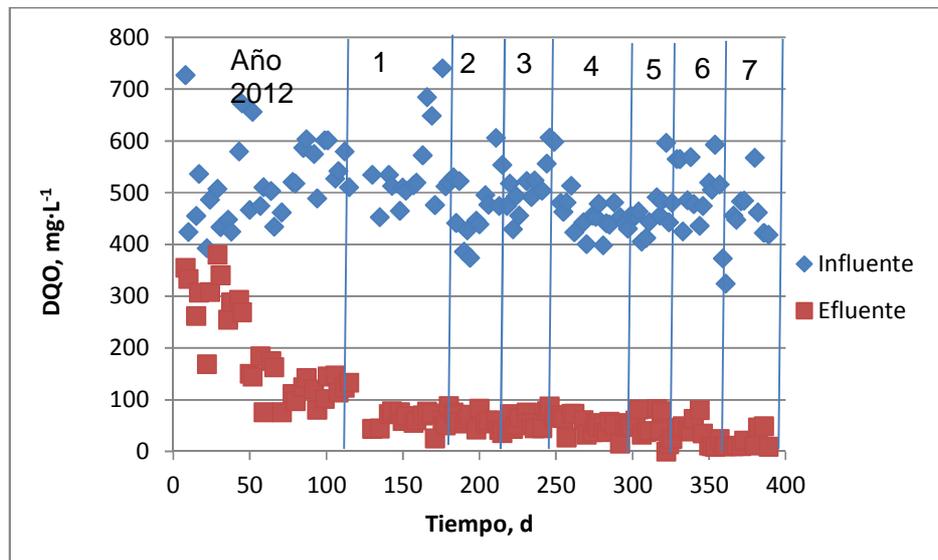


Figura 3.1.3. Variación de la DQO en el influente y efluente del reactor R3.

Evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales

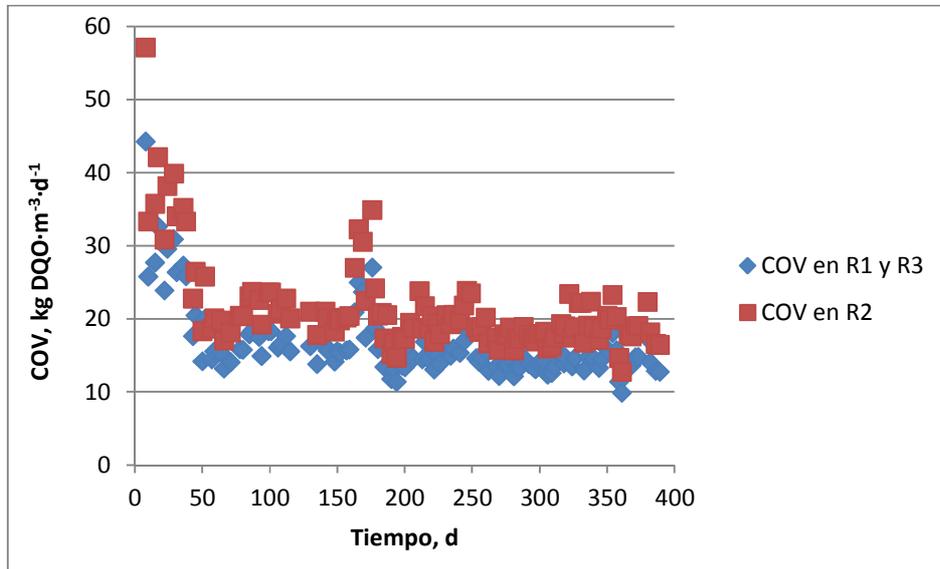


Figura 3.1.4. Variación de la COV durante la evaluación de los tres reactores.

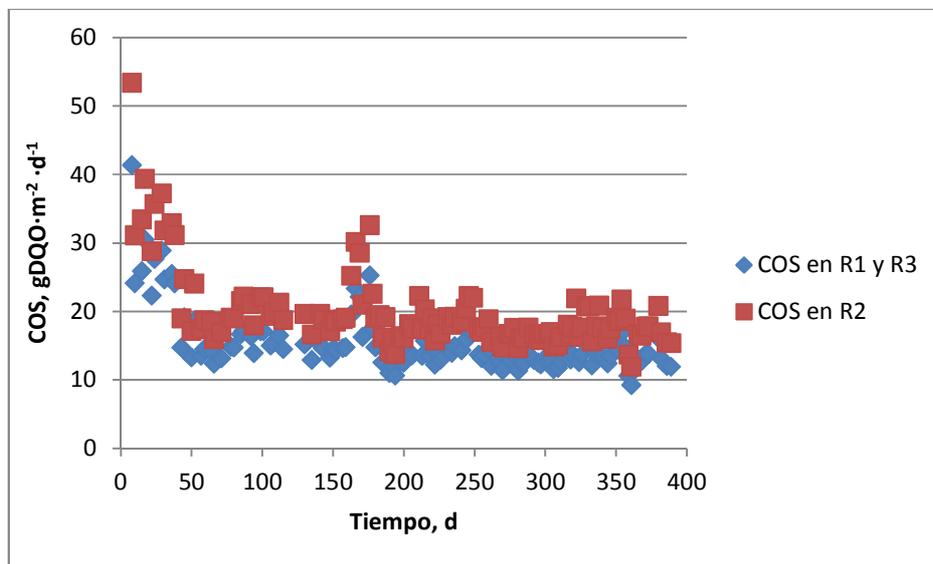


Figura 3.1.5. Variación de la COS durante la evaluación de los tres reactores.

**Tabla 3.1.1 Valores de la DQO en el influente y los efluentes de R1, R2 y R3.**

Días	Fase experimental	Influente	Efluente de		
			R1	R2	R3
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	545±83	85±9	71±24	61±15
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	459±54	74±12	66±24	65±14
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	503±46	77±13	73±25	52±13
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	471±56	71±15	126±65	54±18
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	481±59	73±19	93±44	44±25
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	475±77	74±9	40±24	31±24
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	467±47	59±9	62±54	21±17

**Tabla 3.1.2 Cargas orgánicas COV y COS en los tres reactores en las diferentes fases experimentales.**

Días	Fase experimental	COV, kg·m <sup>-3</sup> ·d <sup>-1</sup>		COS, g·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup>	
		R1 y R3	R2	R1 y R3	R2
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	18.1±4.1	23.3±5.3	16.9±3.9	21.8±5.0
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	14.0±1.6	18.0±2.1	13.1±1.5	16.9±2.0
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	15.3±1.4	19.8±1.8	14.3±1.3	18.5±1.7
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	14.3±1.7	18.5±2.2	13.4±1.6	17.3±2.1
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	14.6±1.8	18.9±2.3	13.7±1.7	17.7±2.2
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	14.4±2.3	18.6±3.0	13.5±2.2	17.4±2.8
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	14.2±1.4	18.3±1.9	13.3±1.3	17.1±1.7

En la Figura 3.1.6 se presentan las remociones de DQO en los tres reactores durante todo el período experimental. En la Tabla 3.1.3 se resumen las remociones en los tres reactores para las diferentes fases experimentales. Una comparación de las remociones de DQO se presenta en la Figura 3.1.7.

Evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales

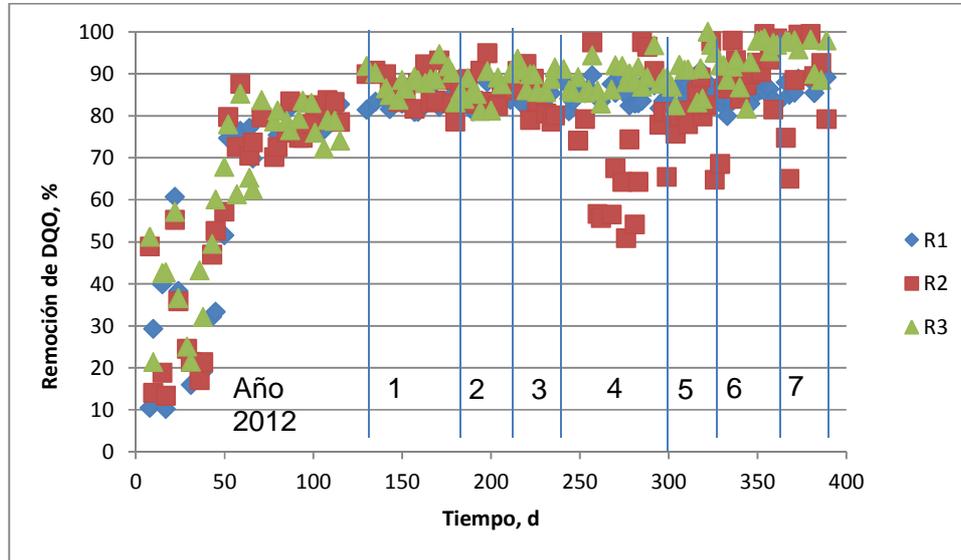


Figura 3.1.6. Remociones de materia orgánica medida como DQO para los 3 reactores del sistema experimental.

Tabla 3.1.3 Remociones de DQO en los reactores R1, R2 y R3.

Días	Fase experimental	Remoción de DQO, %		
		R1	R2	R3
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	84.0±2.6	87.0±3.7	88.8±2.8
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	83.8±2.1	85.7±4.5	85.7±3.2
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	84.7±2.4	85.3±5.3	89.5±2.5
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	84.9±2.4	72.2±14.6	88.7±3.3
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	84.9±3.6	80.8±8.5	90.6±5.3
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	84.3±2.0	91.3±5.7	93.2±5.3
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	87.3±1.7	86.1±12.2	95.4±3.9

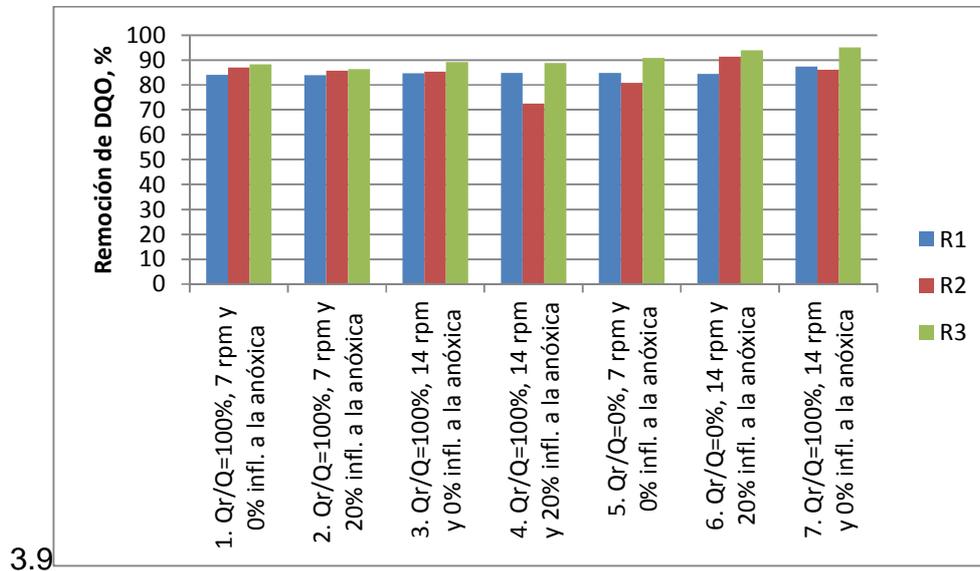


Figura 3.1.7. Comparación de las remociones promedio de DQO obtenidos en los 3 reactores del sistema experimental durante las diferentes fases experimentales.

Analizando el desempeño del reactor R1 (BIOSTAR original) se observa que no hubo un efecto estadísticamente significativo de las variaciones de la recirculación y la rotación del lecho sobre el porcentaje de remoción de la DQO. Tampoco fue significativo el efecto de la carga orgánica en el intervalo evaluado. El promedio de COS fue el más alto en fase 1 de  $16.9 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  y el promedio de COS más bajo fue en fase 2 de  $13.1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ , en las dos fases se obtuvo una remoción promedio de 84%. El efecto de la carga orgánica es mayor en el valor de la DQO en el efluente, por ejemplo la DQO promedio en la fase 1 fue de  $85 \text{ mg L}^{-1}$  y en la fase 2 de  $74 \text{ mg L}^{-1}$ . Durante las fases 3, 4 y 7 el reactor R1 se operó con la misma recirculación de 100% y con una rotación del lecho de 14 rpm, también fueron similares las cargas orgánicas. Las remociones de DQO durante fase 3 y 4 fueron iguales, de 85%, en la fase 7 se determinó un promedio de 87%, ligeramente mayor que los anteriores, lo cual se puede atribuir a una mayor estabilidad del proceso. Estos resultados confirman la conclusión derivada de estudios previos que cuando el objetivo del tratamiento de las aguas residuales es remover básicamente la materia orgánica el BIOSTAR puede ser operado sin recirculación del efluente. En este estudio se demostró que el incremento de la rotación del lecho de 7 a 14 rpm no mejora significativamente la remoción de la DQO.

El reactor R2 presentó un buen desempeño durante la primera fase experimental, se logró una remoción promedio de la DQO de 87% a pesar de que la carga orgánica promedio en la zona aerobia de este reactor fue de  $21.8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  en un 29% mayor que en el resto de los reactores y la más alta de todo el período de evaluación. En la Fase 2 la remoción de DQO permaneció alta, con un promedio de 86%. Durante esta fase un 20% del agua residual influente al reactor se introducía a la zona anóxica; esta acción reduce la carga orgánica en la zona aerobia y aumenta la carga orgánica en la zona anóxica, favoreciendo el desarrollo de la biomasa en esta última. La rotación del lecho se mantuvo igual que en la Fase 1. Desde la última semana de la fase 1 se estaba

observando un aumento de la turbiedad al extraer las muestras desde el fondo de la zona anóxica; este fenómeno fue más fuerte durante la segunda fase, frecuentemente se extraían muchos flóculos pequeños. Esto indicaba un aumento de la cantidad de biomasa en la zona anóxica. Estos fenómenos no influyeron sobre la remoción de la DQO en el reactor, esta permaneció en promedio similar a la obtenida en la Fase 1. Durante la Fase 3 se aumentó la rotación del lecho a 14 rpm y se paró la inyección de agua cruda a la zona anóxica. La remoción de DQO empezó a aumentar hasta 90% durante la primera semana, sin embargo durante el resto del período de esta fase hubo dos ocasiones de fallas en la bomba de aire cuya reparación dejaba el reactor sin aire por lapsos de 7 horas y esto causó disminuciones puntuales de la remoción de DQO. Como resultado la remoción promedio de la DQO para fase 3 se conservó similar a la obtenida en la fase 2 pero con una mayor desviación estándar de los resultados. Durante la fase 4 se conservó la rotación de lecho de 14 rpm pero se inyectó otra vez agua cruda a la zona anóxica. Los problemas con la aireación seguían y durante dos semanas presentaban problemas y afectación del proceso de biodegradación en la zona aerobia del reactor hasta que se realizó el cambio de la bomba en la tercera semana de este período. Muestras del medio de soporte tomadas de diferentes profundidades de la zona aerobia mostraron cambios del aspecto de la biomasa típicos para biopelículas anaerobias y anóxicas. Una vez hecho el cambio de la bomba de aire y para recuperar el proceso se decidió extender el período de operación en esta fase experimental. A partir del día 278 empezó el incremento de la remoción, alcanzando otra vez valores mayores de 80%, pero el promedio de la remoción obtenido en esta fase fue bajo, de 73%. Este resultado no podría ser comparado con los resultados obtenidos en el resto de los reactores, ni para comparar el desempeño de R2 de fase 4 con el resto de las fases experimentales. Durante la fase 5 se procedió a parar la recirculación en todos los reactores, se bajó otra vez a 7 rpm la rotación de los lechos; en los reactores R2 y R3 no se inyectaba agua cruda a la zona anóxica. El paro de la recirculación no frenó el proceso de recuperación del reactor R2, la remoción de DQO aumentó. El promedio de la remoción de DQO para esta fase se calculó de 81%, menor que la obtenida durante las primeras tres fases experimentales. En la fase 6 se aumentó la rotación del lecho y se trabajó con inyección de agua cruda a la zona anóxica. Exploraciones del lecho indicaron que en la zona anóxica se había acumulado mucha biomasa. A pesar de que no había colmatación del lecho, las muestras extraídas desde el fondo del lecho anóxico tenían muchos sólidos, frecuentemente se tapaba el tubo de muestreo. Se supuso que como resultado de la falla de la bomba de aireación y la afectación de la biomasa, una gran cantidad de biomasa aerobia se había desprendido de la zona aerobia y retenido en la zona anóxica, por lo cual con la ayuda de mangueras se realizó un lavado del exceso de esta zona. La evaluación del proceso durante la fase 6 indicó una mejora significativa, el promedio de la remoción de DQO fue de 91%, mayor que los determinados para las primeras tres fases. La fase 7 es una repetición de las condiciones de operación de la fase 3. La remoción promedio fue de 86%, similar a la determinada en la fase 3. Sin embargo, esta remoción fue en 5% menor que la obtenida en la fase anterior. Cabe mencionar que en fase 7 no se realizó la limpieza del lecho anóxico como esto se hizo en la fase anterior y la acumulación de biomasa pudo haber provocado descomposiciones anaerobias en esta zona lo cual afecta la eficiencia de remoción de materia orgánica.

El reactor R3 tuvo el mejor desempeño durante la fase 1, se determinó una remoción promedio de DQO de 89%, en 5% mayor comparada con la obtenida en R1 y en solo 2% mayor que la obtenida en R2. En la Fase 2 la remoción de DQO permaneció alta, con un promedio de 86%, similar a la remoción obtenida en R2 y en 2% mayor que la obtenida en R1. Como ya se mencionó durante esta fase el 20% del agua residual influente al reactor se introducía a la zona anóxica; esta acción reduce la carga orgánica en la zona aerobia y aumenta la carga orgánica en la zona anóxica,

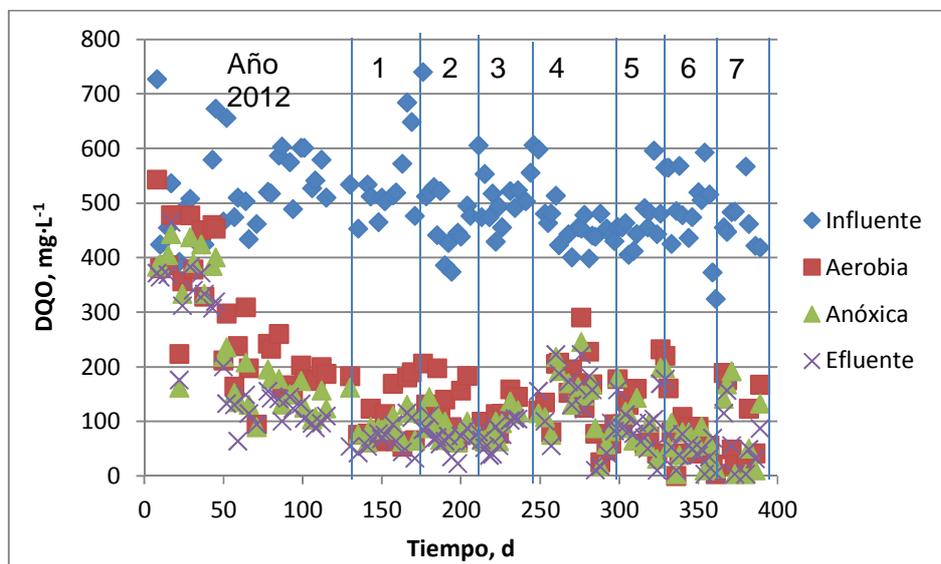
favoreciendo el desarrollo de la biomasa en esta última. La rotación del lecho se mantuvo igual que en la Fase 1. La inyección de agua cruda a la zona anóxica produjo una ligera disminución en 2% de la remoción, esta es estadísticamente insignificante ya que es menor que la desviación estándar y como se puede observar los valores promedio de DQO en el efluente de R3 fueron prácticamente iguales, de 64 y 63 mg L<sup>-1</sup> en Fase 1 y 2 respectivamente. Durante la Fase 3 se aumentó la rotación del lecho a 14 rpm y se paró la inyección de agua cruda a la zona anóxica. El promedio de la remoción de DQO fue de 89%, la DQO promedio fue 54 mg L<sup>-1</sup>, representando esto una ligera mejora en el desempeño del reactor comparado con la fase anterior. La remoción promedio en el R3 fue en un 4% mayor comparada con la obtenida en R1 y R2. Durante la Fase 4 se conservó la rotación de lecho de 14 rpm pero se inyectó otra vez agua cruda a la zona anóxica. El promedio de la remoción de DQO en R3 fue de 89%, igual que en la fase anterior, lo cual demostró que la inyección de agua cruda en la zona anóxica no afecta la remoción de DQO del reactor. La remoción promedio de DQO en R3 fue en 4% mayor que la obtenida en R1. No se puede hacer la comparación con el R2 ya que en esta fase es cuando se presentaron los problemas con la aeración en R2. Durante la Fase 5 se procedió a parar la recirculación en todos los reactores, se bajó otra vez a 7 rpm la rotación de los lechos; en los reactores R2 y R3 no se inyectaba agua cruda a la zona anóxica. La remoción promedio de DQO en R3 fue de 91%. Esto demuestra claramente que la falta de recirculación y la disminución de la rotación del lecho a 7 rpm no afectan la remoción de la DQO en el reactor. Durante la Fase 5 la remoción promedio de DQO fue en un 6% mayor que en el R1. El proceso de degradación en R2 todavía no se había recuperado completamente después de la falla del sistema de aeración ocurrida en la fase anterior, por lo cual no se hace la comparación con el desempeño de R2. En la Fase 6 se aumentó la rotación del lecho y se trabajó con inyección de agua cruda a la zona anóxica. La remoción promedio de DQO en R3 se determinó de 94%, lo cual confirma que la inyección de agua cruda a la zona anóxica no afecta la remoción de DQO. El aumento del promedio de la remoción en 3% comparado con el obtenido en la fase anterior se puede atribuir a una mejor transferencia de masa en la zona aerobia por la mayor velocidad de rotación del lecho. En esta fase el promedio de la remoción en R3 fue en 10% mayor que en R1 y en un 3% mayor que R2. La Fase 7 es una repetición de las condiciones de operación de la Fase 3. La remoción promedio de DQO en R3 fue de 95%, en 6% mayor que en la Fase 3. Comparado con las remociones promedio obtenidos durante Fase 7 en el resto de los reactores, la remoción en R3 fue en 8% mayor que en R1 y en 9% mayor que en R2.

La comparación de las remociones promedio de DQO en todas las fases indicaron que R3 tenía mayor remoción que R1, la diferencia fue en promedio de 5%, variando desde 2 (fase 2) hasta 10% (fase 6). Exceptuando las fases problemáticas de R2 (4 y 5), las remociones de DQO en R2 también fueron ligeramente mayores que las obtenidas en R1, la diferencia fue en promedio de 2%. Lo anterior indica que la implementación de una zona anóxica adicional a la aerobia en el reactor permite incrementar la remoción de DQO, siendo el incremento alrededor de 4 %. Este incremento se puede atribuir a la biomasa adicional acumulada en la zona anóxica.

Los resultados del seguimiento de los valores de DQO en muestras tomadas de los puntos después de la zona aerobia y anóxica en los reactores R2 y R3 se presentan en las Figuras 3.1.8 y 3.1.9 respectivamente. Se observa claramente que la mayor cantidad de DQO es removida en las zonas aerobias de los dos reactores. Los promedios y desviaciones estándar de los valores de DQO para cada uno de los períodos experimentales se presentan en las Tablas 3.1.4 y 3.1.5. Se observa que los promedios de DQO en los efluentes de la zona anóxica son muy similares a los

determinados en los efluentes de la zona de sedimentación. El cálculo de las cantidades de DQO removidas en cada zona de los reactores y el porcentaje de contribución de cada zona en la cantidad total de DQO removida se presenta en las Tablas 3.1.6 y 3.1.7.

En las Tablas 3.1.6 y 3.1.7 se observa que durante las primeras dos fases de evaluación la remoción de DQO en las zonas aerobias fue de 86-90% de la totalidad de DQO removida en el reactor R2 y de 91-93% en R3, es decir la mayor cantidad de materia orgánica se remueve en la zona aerobia de los reactores. El porcentaje de remoción en las zonas aerobias se incrementó ligeramente en las fases posteriores (llegando hasta 95-97% de la totalidad) lo cual se puede explicar con el desarrollo de una mayor cantidad de biomasa en el lecho aerobio. Las cantidades de DQO removidas en la zona aerobia del reactor R2 fueron ligeramente menores (en 20-69 mg/L) comparadas con las cantidades determinadas en la zona aerobia de R3, lo cual se explica con el menor volumen del lecho empacado (0.55 y 0.71 m<sup>3</sup> respectivamente) y por ende menor cantidad de biomasa. La aportación de las zonas anóxicas en la totalidad de la DQO removida fue de 0-8% en R2 y de 3-5% en R3. Los porcentajes de aportación más altos se presentaron en las primeras tres fases en R3 y en las siguientes cuatro fases fueron de 3%. En R2 no se observó este fenómeno, las aportaciones fueron variables en el tiempo, dentro del intervalo 0-8%. Las aportaciones de las zonas de sedimentación fueron de 2-5% en R2 y de 1-4% en R3. Las aportaciones de la zona de sedimentación disminuyeron en el tiempo en R3, durante las primeras dos fases fueron de 4%, después disminuyeron a 2% y en la última fase se determinó una aportación de solo 1%. Una disminución en el tiempo no se observó en el reactor R2.



**Figura 3.1.8 Variación de los valores de DQO en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.**

Evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales

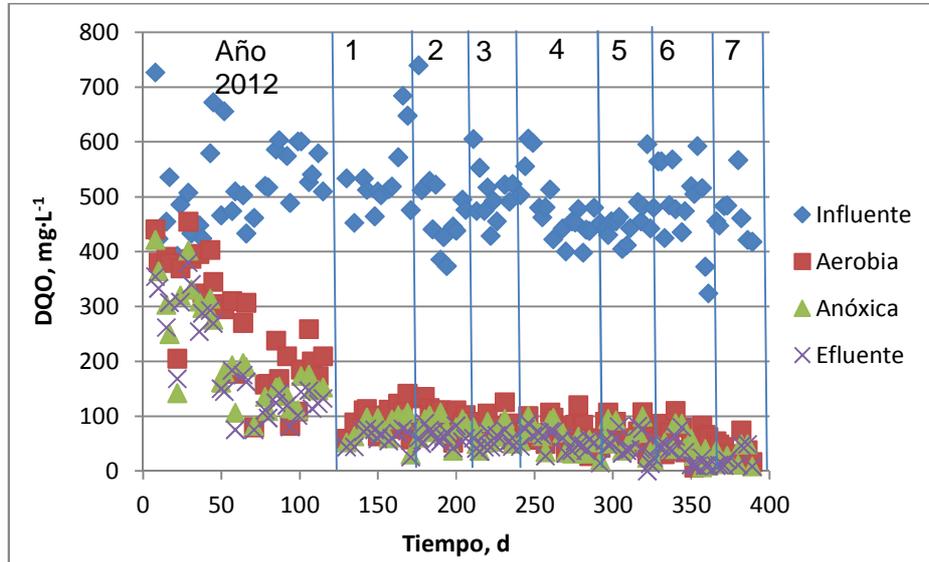


Figura 3.1.9 Variación de los valores de DQO en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.

Tabla 3.1.4. Promedios de la DQO en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2.

Días	Período	DQO (mg L <sup>-1</sup> ) en R2			
		Influente	Aerobia	Anóxica	Efluente
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	545±83	117±55	94±27	71±24
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	459±54	122±44	89±24	66±24
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	503±46	104±34	89±26	73±25
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	471±56	142±70	133±59	126±65
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	481±59	126±63	101±55	93±44
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	475±77	53±35	50±32	40±24
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	467±47	98±74	87±79	62±54

**Tabla 3.1.5. Promedios de la DQO en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3.**

Días	Período	DQO (mg L <sup>-1</sup> ) en R3			
		Influyente	Aerobia	Anóxica	Efluente
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	545±83	97±26	78±22	61±15
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	459±54	100±22	81±19	65±14
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	503±46	81±19	63±18	52±13
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	471±56	73±25	60±24	54±18
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	481±59	66±24	51±26	44±25
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	475±77	58±28	43±25	31±24
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	467±47	41±19	26±17	21±17

**Tabla 3.1.6. Cantidad de DQO removida y porcentaje de contribución de cada zona del R2.**

Días	DQO removida, mg L <sup>-1</sup>				Porcentaje de contribución al total de DQO removida		
	Aerobia	Anóxica	Sedi-mentación	Total	Aerobia	Anóxica	Sedi-mentación
130- 178	428	23	23	474	90	5	5
180- 206	337	33	23	393	86	8	6
211- 241	400	15	16	430	93	3	4
244- 299	329	9	7	344	95	2	2
302- 331	355	26	8	388	91	7	2
333- 361	422	2	11	435	97	0	2
366- 389	370	10	25	405	91	3	6

**Tabla 3.1.7. Cantidad de DQO removida y porcentaje de contribución de cada zona del R3.**

Días	DQO removida, mg L <sup>-1</sup>				Porcentaje de contribución al total de DQO removida		
	Aerobia	Anóxica	Sedi- mentación	Total	Aerobia	Anóxica	Sedi- mentación
130- 178	448	19	17	484	93	4	4
180- 206	359	19	16	394	91	5	4
211- 241	422	18	11	451	94	4	2
244- 299	398	13	7	417	95	3	2
302- 331	416	14	7	437	95	3	2
333- 361	417	14	12	443	94	3	3
366- 389	426	15	6	446	96	3	1

### 3.2 Remoción de materia orgánica medida como DBO

En las Figuras 3.2.1, 3.2.2 y 3.2.3 se presentan los resultados de la determinación de la DBO en los influentes y efluentes de los reactores R1, R2 y R3 respectivamente durante todo el período de operación, desde el arranque, hasta el final de este estudio. Durante la evaluación realizada en este proyecto la variación de la DBO en el influente fue desde 210 hasta 442 mg L<sup>-1</sup>, con un promedio de 292±40 mg L<sup>-1</sup>. La relación promedio de DBO/DQO en el agua residual influente a los reactores se calcula de 0.60±0.04. Los promedios de la DBO en el influente y en los efluentes se presentan en la Tabla 3.2.1 para cada fase experimental.

Cabe mencionar que la NOM-001-SEMARNAT-1996 referente a descargas de aguas residuales a cuerpos receptores de diferente tipo, marca el límite máximo permisible (LMP) para la DBO de 30 mg L<sup>-1</sup> como promedio mensual para la categoría C, la cual es la más estricta. De los resultados presentados en la Tabla 3.2.1 se observa que este LMP se cumple con el reactor R1 en todas las fases experimentales. Los valores más bajos de DBO en el efluente, menores de 20 mg L<sup>-1</sup> se obtuvieron en la fase 3, 4 y 7, operando con Qr/Q=100% y con una velocidad de rotación del lecho de 14 rpm. La NOM-003-SEMARNAT-1997 establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reutilizan en servicios al público. Para servicios al público con contacto indirecto u ocasional se establece un LMP para la DBO de 30 mg L<sup>-1</sup> y para servicios al público con contacto directo se establece un LMP para la DBO de 30 mg L<sup>-1</sup>. Los resultados de la Tabla 3.2.1 indican que con el reactor R1 (BIOSTAR original) se pueden alcanzar estos LMP, trabajando con recirculación para el caso de contacto directo y sin recirculación para el caso de contacto indirecto u ocasional.

Evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales

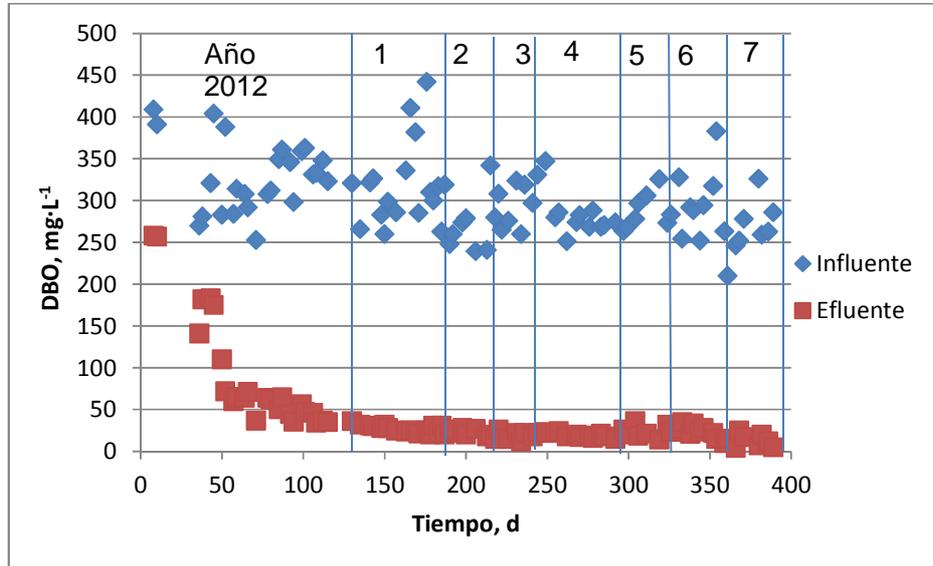


Figura 3.2.1. Variación de la DBO en el influente y efluente del reactor R1.

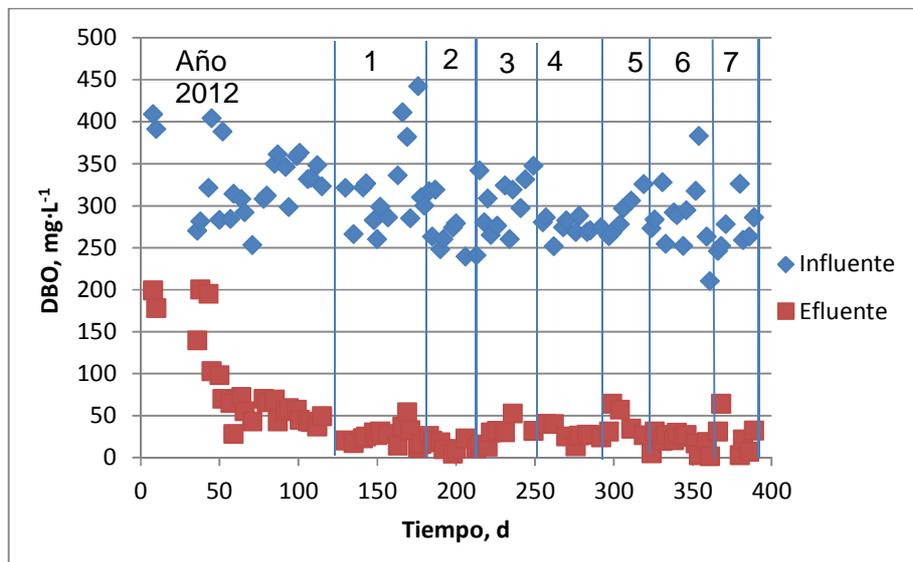


Figura 3.2.2. Variación de la DBO en el influente y efluente del reactor R2.

Evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales

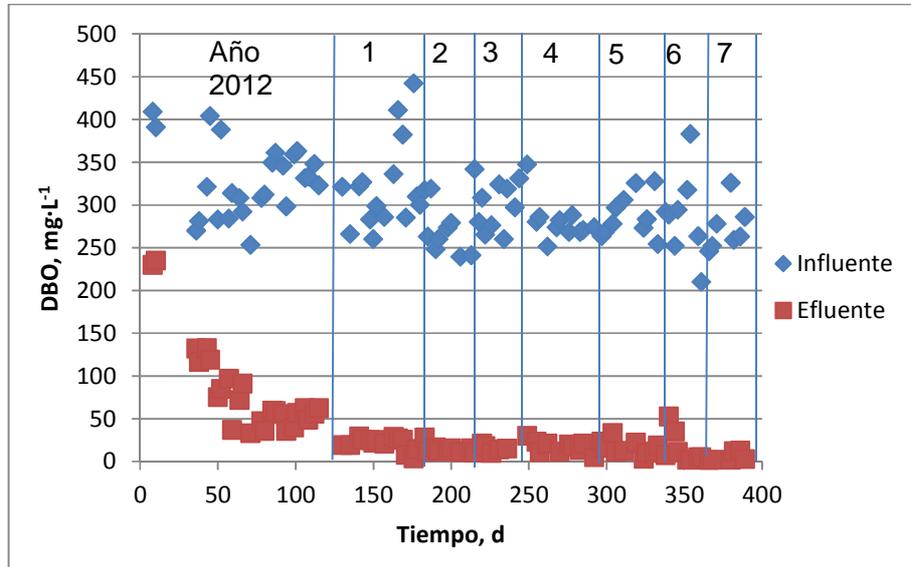


Figura 3.2.3. Variación de la DBO en el influente y efluente del reactor R3.

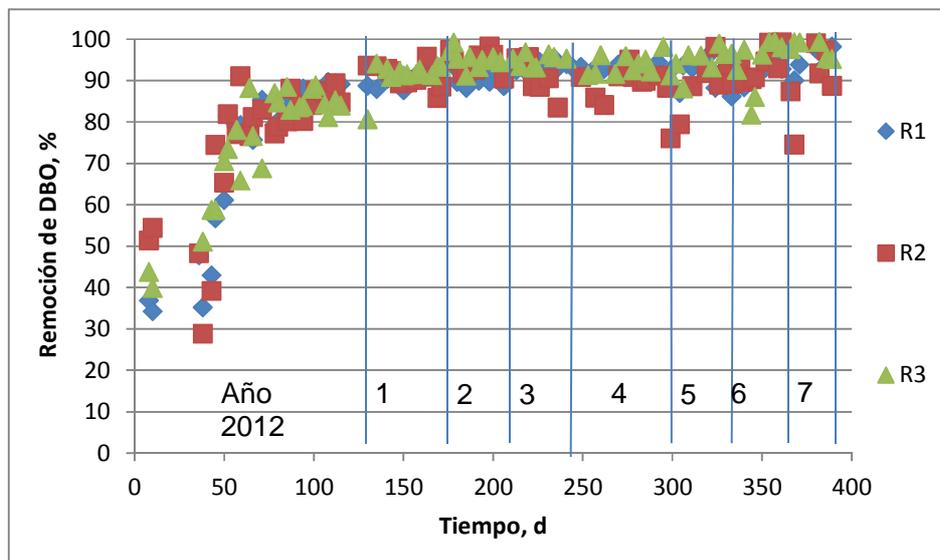
Tabla 3.2.1 Valores de la DBO en el influente y los efluentes de R1, R2 y R3.

Días	Fase experimental	Influente	Efluente de		
			R1	R2	R3
130- 178	1. $Q_r/Q=100\%$ , 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	323±54	27±4	26±11	21±8
180- 206	2. $Q_r/Q=100\%$ , 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	278±29	25±4	16±8	15±6
211- 241	3. $Q_r/Q=100\%$ , 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	291±32	18±4	26±15	15±4
244- 299	4. $Q_r/Q=100\%$ , 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	282±26	20±3	32±13	18±7
302- 331	5. $Q_r/Q=0\%$ , 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	299±22	25±8	29±17	15±10
333- 361	6. $Q_r/Q=0\%$ , 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	284±49	23±9	19±10	15±17
366- 389	7. $Q_r/Q=100\%$ , 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	273±27	13±8	26±22	5±5

Al comparar los valores promedio de la DBO en el efluente del reactor R2 se observa que excepto en la fase 2, cuando se presentaron problemas con la aeración, en todos los demás casos se cumple con el LMP más estricto de la NOM-001-SEMARNAT-1996 de  $30 \text{ mg L}^{-1}$ . Los valores más bajos de DBO en el efluente, menores de  $20 \text{ mg L}^{-1}$  se obtuvieron en el R2 solo durante la fase 2 y 6.

Sin embargo, en el R3 los promedios de la DBO en todas las fases experimentales fueron menores de  $20 \text{ mg L}^{-1}$ , cumpliendo así con el LMP establecido en la NOM-003-SEMARNAT-1997 para reuso de las aguas residuales tratadas en servicios al público con contacto directo, además de cumplir con los LMP de la NOM-001-SEMARNAT-1996 para todas las categorías de cuerpos receptores.

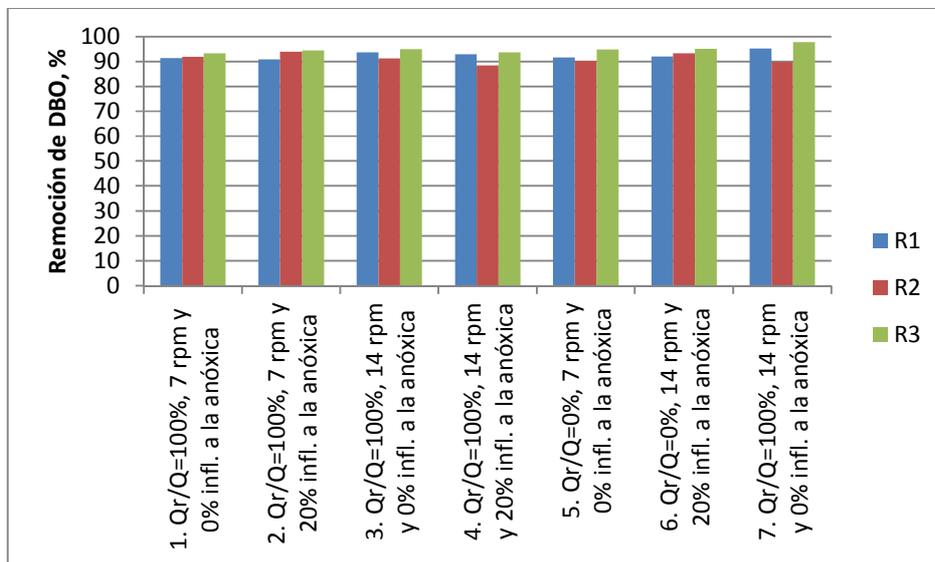
En la Figura 3.2.4 se presentan las remociones de DBO en los tres reactores durante todo el período experimental. En la Tabla 3.2.2 se resumen las remociones en los tres reactores para las diferentes fases experimentales. Una comparación de las remociones de DQO se presenta en la Figura 3.2.5.



**Figura 3.2.4. Remociones de materia orgánica medida como DBO para los 3 reactores del sistema experimental.**

**Tabla 3.2.2 Remociones de DBO en los reactores R1, R2 y R3.**

Días	Fase experimental	Remoción de DBO, %		
		R1	R2	R3
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	91.3±2.2	91.8±3.1	93.4±2.4
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	90.8±2.0	94.0±2.9	94.4±1.6
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	93.7±1.1	91.2±4.6	94.9±1.6
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	92.8±1.2	88.5±5.0	93.7±2.3
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	91.6±3.0	90.2±6.3	95.1±3.5
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	91.9±3.3	93.3±3.8	94.3±6.3
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	95.2±3.2	89.8±8.8	97.9±2.0



**Figura 3.2.5. Comparación de las remociones promedio de DBO obtenidos en los 3 reactores del sistema experimental durante las diferentes fases experimentales.**

### 3.3 Remoción de nitrógeno amoniacal

En las Figuras 3.3.1, 3.3.2 y 3.3.3 se presentan las concentraciones del nitrógeno amoniacal en los influentes y efluentes de los reactores R1, R2 y R3 respectivamente durante todo el período de operación, desde el arranque, hasta el final de este estudio. La evaluación correspondiente a este proyecto empezó el día 152 desde el arranque (1 de febrero de 2013), sin embargo los reactores se operaron durante el mes de enero y el día 10 de enero de 2013, transcurridos 130 días desde el arranque, se identificó claramente el proceso de nitrificación en los tres reactores, por lo cual la evaluación de la fase experimental 1 tuvo una duración mayor de 30 días, desde el día 130 hasta el día 178. La fase experimental 2 abarcó los días 180-206, la fase 3 los días 211-241, la fase 4 los días 244-299, la fase 5 los días 302-331, la fase 6 los días 333-361, la fase 7 los días 366-389.

En las figuras se indican los períodos de las siete fases experimentales. La variación de la concentración del  $\text{N-NH}_4$  en el influente fue desde 17 hasta  $54 \text{ mg L}^{-1}$  durante el período de evaluación, con un promedio de  $30.2 \pm 5.9 \text{ mg L}^{-1}$ . Los promedios de la concentración del  $\text{N-NH}_4$  en el influente y en los efluentes se presentan en la Tabla 3.3.1 para cada fase experimental. Se puede observar que la concentración más baja de  $\text{N-NH}_4$  en el reactor R1 se determinó en la Fase 7, de  $2.5 \text{ mg L}^{-1}$ , cuando la  $Q_r/Q=100\%$  y la velocidad de rotación del lecho fue de 14 rpm. Cabe mencionar que en las Fases 3, 4 y 6 se aplicaron las mismas condiciones en el reactor pero las concentraciones en el efluente fueron ligeramente mayores, de 3.3, 2.8 y  $3.4 \text{ mg L}^{-1}$ . Esto se puede atribuir al incremento de las bacterias nitrificantes en el consorcio microbiano en el reactor. La concentración promedio del  $\text{N-NH}_4$  fue ligeramente mayor en la Fase 6 en la cual se eliminó la recirculación (de  $3.4 \text{ mg L}^{-1}$ ), comparada con la determinada en la Fase 7 con 100% de recirculación (de  $2.5 \text{ mg L}^{-1}$ ). El incremento de la velocidad de rotación de 7 a 14 rpm (de fase 2 a fase 3) causó la obtención de una menor concentración de  $\text{N-NH}_4$  en el efluente, los promedios disminuyeron de 4.4 a  $3.3 \text{ mg L}^{-1}$  respectivamente. Comparando los resultados de las fases 4 y 5, sin recirculación, se observa que el cambio de la velocidad de rotación del lecho no influyó significativamente sobre la concentración promedio del  $\text{N-NH}_4$ , estos fueron de 3.5 y  $3.4 \text{ mg L}^{-1}$  en las fases 4 y 5 respectivamente.

Las concentraciones promedio obtenidas en el reactor R3 fueron menores que las determinadas en los reactores R1 y R2. La zona aerobia de R3 y R1 son iguales, por lo que la mayor remoción se atribuye a un consumo adicional por la biomasa en la zona anóxica de R3. En el caso de R2, su zona aerobia es de menor volumen comparada con las zonas en R1 y R3, lo cual explica las mayores concentraciones de  $\text{N-NH}_4$  determinadas en su efluente.

La variación de la concentración del  $\text{N-NH}_4$  a lo largo del experimento definió las cargas de  $\text{N-NH}_4$  aplicadas en cada reactor y en cada fase experimental. Las cargas de  $\text{N-NH}_4$  aplicadas en los reactores durante las diferentes fases del experimento se presentan en la Tabla 3.3.2.

Evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales

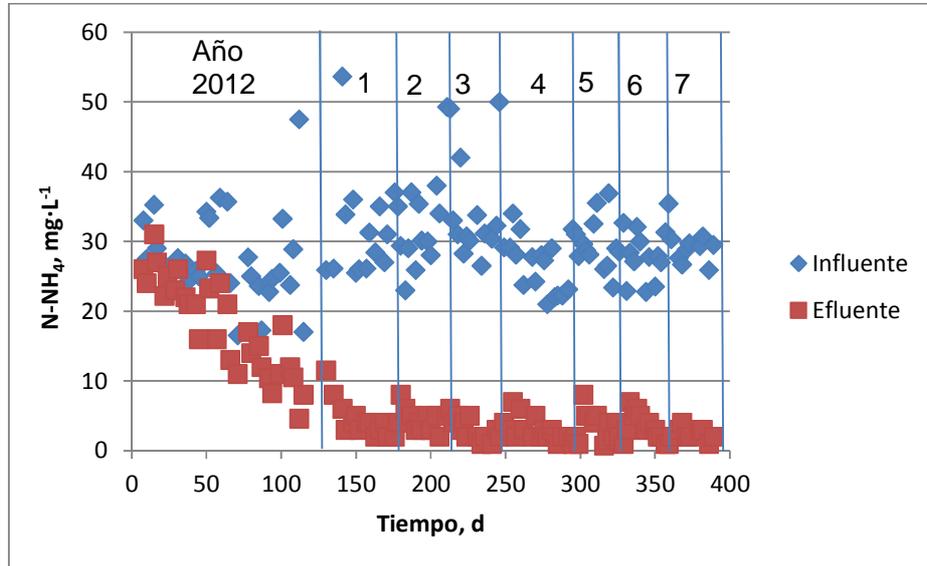


Figura 3.3.1. Variación de las concentraciones del  $\text{N-NH}_4^+$  en el influente y efluente del reactor R1.

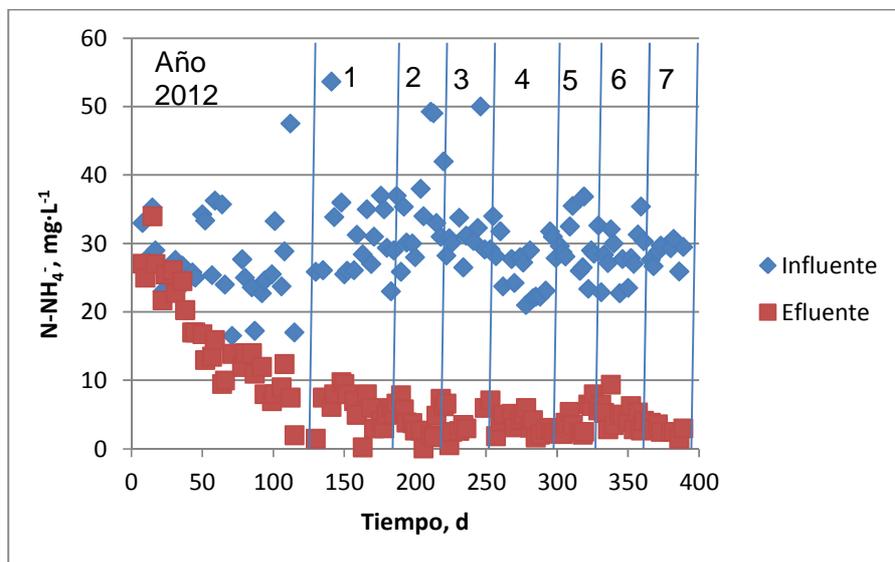


Figura 3.3.2. Variación de las concentraciones del  $\text{N-NH}_4^+$  en el influente y efluente del reactor R2.

Evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales

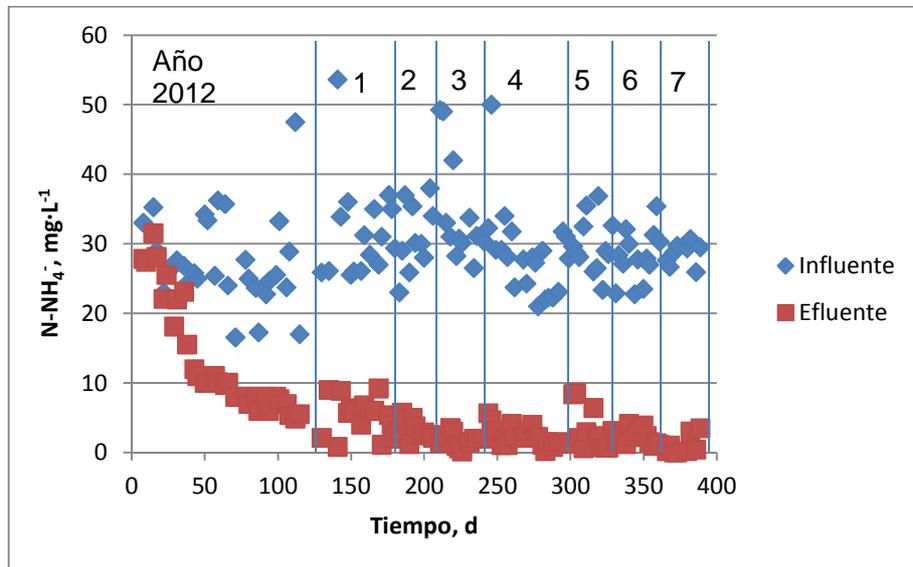


Figura 3.3.3. Variación de las concentraciones del  $\text{N-NH}_4^+$  en el influente y efluente del reactor R3.

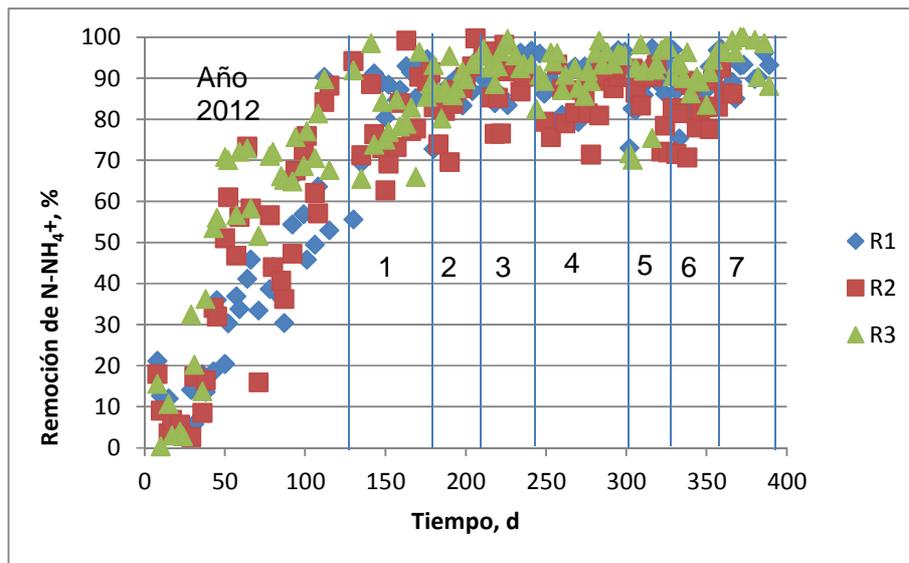
Tabla 3.3.1 Valores de la concentración del  $\text{N-NH}_4$  en el influente y los efluentes de R1, R2 y R3.

Días	Fase experimental	Influente	Efluente de		
			R1	R2	R3
130- 178	1. $Q_r/Q=100\%$ , 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	$31.9 \pm 7.3$	$4.4 \pm 2.5$	$5.8 \pm 2.9$	$5.4 \pm 2.6$
180- 206	2. $Q_r/Q=100\%$ , 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	$30.9 \pm 4.7$	$4.4 \pm 1.7$	$4.5 \pm 2.2$	$3.2 \pm 1.4$
211- 241	3. $Q_r/Q=100\%$ , 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	$34.6 \pm 7.8$	$3.3 \pm 1.7$	$3.7 \pm 2.2$	$1.8 \pm 1.0$
244- 299	4. $Q_r/Q=100\%$ , 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	$28.4 \pm 6.3$	$2.8 \pm 1.6$	$3.8 \pm 1.6$	$2.2 \pm 1.4$
302- 331	5. $Q_r/Q=0\%$ , 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	$29.2 \pm 4.2$	$3.5 \pm 2.1$	$4.4 \pm 2.0$	$3.1 \pm 2.8$
333- 361	6. $Q_r/Q=0\%$ , 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	$28.6 \pm 3.5$	$3.4 \pm 2.0$	$4.7 \pm 1.9$	$2.2 \pm 1.1$
366- 389	7. $Q_r/Q=100\%$ , 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	$28.5 \pm 1.6$	$2.5 \pm 0.9$	$2.8 \pm 0.7$	$1.0 \pm 1.4$

**Tabla 3.3.2 Cargas de N-NH<sub>4</sub> en los tres reactores en las diferentes fases experimentales.**

Días	Fase experimental	Reactores R1 y R3		Reactor R2	
		kg NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> N- m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup>	g N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	kg NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> N- m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup>	g N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	1.05±0.25	0.98±0.24	1.35±0.33	1.26±0.31
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	0.94±0.14	0.88±0.13	1.21±0.18	1.13±0.17
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	1.05±0.24	0.98±0.22	1.36±0.31	1.27±0.29
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	0.86±0.19	0.81±0.18	1.11±0.25	1.04±0.23
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	0.89±0.13	0.83±0.12	1.15±0.17	1.07±0.16
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	0.87±0.11	0.81±0.10	1.12±0.14	1.05±0.13
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	0.87±0.05	0.81±0.05	1.12±0.06	1.05±0.06

En la Figura 3.3.4 se presenta la variación de la remoción del nitrógeno amoniacal en los tres reactores durante la evaluación. Se observa que cuando empezó esta evaluación, los reactores ya habían alcanzado remociones mayores de 65%. En la Tabla 3.3.3 se presentan los promedios de las remociones para cada fase experimental en los tres reactores.



**Figura 3.3.4. Remoción del N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> para los reactores R1, R2 y R3.**

**Tabla 3.3.3 Remociones promedio de N-NH<sub>4</sub> en los reactores R1, R2 y R3.**

Días	Fase experimental	Remoción de N-NH <sub>4</sub> , %		
		R1	R2	R3
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	85.4±10.3	81.2±10.6	81.8±9.8
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	85.5±6.6	84.8±8.4	89.5±4.5
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	90.5±4.7	88.7±7.4	94.6±3.0
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	90.2±5.1	85.4±6.4	92.3±4.2
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	88.2±6.7	84.2±8.2	89.3±10.0
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	87.8±6.8	83.5±6.2	92.1±4.3
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	91.2±3.4	90.2±2.6	96.5±4.7

En congruencia con lo comentado referente a las concentraciones del nitrógeno amoniacal en el efluente del reactor R1, la mayor remoción en este reactor se determinó en la Fase 7, de 91.2%, cuando la Qr/Q=100% y la velocidad de rotación del lecho fue de 14 rpm. En las Fases 3, 4 y 7 se aplicaron las mismas condiciones en el reactor pero las remociones fueron ligeramente menores en las Fases 3 y 4, de 90.5 y 90.2 respectivamente. Esto se puede atribuir al incremento paulatino de las bacterias nitrificantes en el consorcio microbiano en el reactor en el transcurso del tiempo. La remoción promedio del N-NH<sub>4</sub> fue ligeramente menor en la Fase 6 en la cual no hubo recirculación (de 87.8%), comparada con la determinada en la Fase 7 con 100% de recirculación (de 91.2%). El incremento de la velocidad de rotación de 7 a 14 rpm (de fase 2 a fase 3) causó un incremento de la remoción promedio, de 85.5 a 90.5% respectivamente. Comparando los resultados de las fases 4 y 5, sin recirculación, se observa que el cambio de la velocidad de rotación del lecho no influyó significativamente sobre la remoción del N-NH<sub>4</sub>, las remociones promedio fueron de 90.2 y 88.2% en las fases 4 y 5 respectivamente.

Las remociones promedio de N-NH<sub>4</sub> obtenidas en el reactor R3 fueron mayores que las determinadas en los reactores R1 y R2. Las zonas aerobias de R3 y R1 son iguales, por lo que la mayor remoción se atribuye a un consumo adicional por la biomasa en la zona anóxica de R3. En el caso de R2, su zona aerobia es de menor volumen comparada con las zonas en R1 y R3, lo cual explica las menores remociones de N-NH<sub>4</sub> determinadas en este reactor.

Las condiciones de operación en R2 y R3 fueron iguales durante las fases 3 y 7, pero se observa que las remociones promedio del N-NH<sub>4</sub> fueron en 1% mayores durante la fase 7 en ambos reactores. Un incremento en 1% se observó y en R1. Esto se puede atribuir al incremento paulatino de las bacterias nitrificantes en el consorcio microbiano en las zonas aerobias de los reactores con el transcurso del tiempo. Es probablemente debido a esto que las remociones en R2 y R3 fueron mayores durante la Fase 2 en la cual se inyectó 20% del influente a la zona anóxica comparadas con las obtenidas en la Fase 1 cuando no se inyectaba agua residual cruda a la zona

anóxica (las demás condiciones fueron iguales en fases 1 y 2). En las Fases 3 y 4 se observó que la inyección de agua cruda en la zona anóxica provocó disminución de la remoción del  $\text{N-NH}_4$  en R2 y R3, completamente contrario a lo observado anteriormente. La disminución fue en un 4% en R2 y en 3% en R3; más fuerte fue el efecto en R2. Sin embargo, en la Fase 3 ya se tenían remociones de  $\text{N-NH}_4$  altas, de 89 y 95% en R2 y R3 respectivamente, mientras que en la Fase 1 las remociones promedio de  $\text{N-NH}_4$  fueron menores, de 81 y 82% en R2 y R3 respectivamente. Comparando las Fases 5 y 6, se observa que la introducción de agua residual a la zona anóxica provocó una disminución de la remoción de  $\text{N-NH}_4$  de solo 1% en R2, pero en R3 hubo aumento de la remoción en casi 3%. La diferencia entre los efectos en 3 y 4 y en 5 y 6 es que en el último caso hubo un incremento de la velocidad de rotación del lecho que pudo haber contrarrestado una mayor reducción de la remoción del  $\text{N-NH}_4$ . Resumiendo, se puede afirmar que la inyección del 20% del influente al reactor a la zona anóxica puede disminuir la remoción del  $\text{N-NH}_4$  en 1-4%.

El efecto de la recirculación del efluente sobre la remoción del  $\text{N-NH}_4$  fue ya demostrado en estudios previos. En este estudio al comparar la Fase 4 y 6 en R1 se observa que la remoción fue en 2.4% mayor con la recirculación de 100% comparado con la fase sin recirculación. La recirculación permitió obtener en 1.9 % mayores remociones del  $\text{N-NH}_4$  y en R2. Sin embargo, en R3 no se observó una diferencia significativa entre las remociones con y sin recirculación.

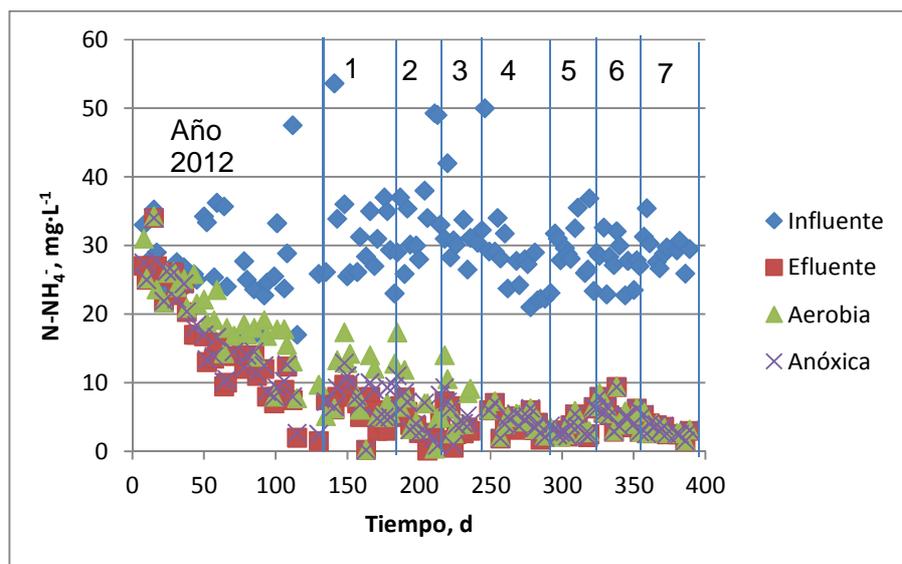
El efecto de la rotación del lecho se puede observar comparando las Fases 2 y 4 en las cuales se tenían velocidades de 7 y 14 rpm respectivamente, las demás condiciones de operación fueron iguales. La remoción del  $\text{N-NH}_4$  es mayor a la mayor velocidad rotacional, en un 0.6% en R2 y en un 2.8% en R3. Se evitará la comparación de las Fases 1 y 3 que indica un mayor efecto del aumento de la velocidad rotacional ya que, como se comentó, en la Fase 1 los reactores R2 y R3 todavía no habían llegado a remociones promedio de 84-85%. Resumiendo el incremento de la velocidad rotacional de 7 a 14 rpm permite aumentar la remoción del  $\text{N-NH}_4$  en 0.6-2.8%.

En el reactor R2 el efecto del aumento de la rotación del lecho de 7 a 14 rpm sobre la remoción del  $\text{N-NH}_4$  (aumento en 0.6%) fue menor que el efecto de la recirculación del efluente (aumento en 1.9%). El efecto de la inyección de agua cruda en la zona anóxica de este reactor provocó una disminución de la remoción del  $\text{N-NH}_4$  en 4%, mucho más grande que los anteriores.

En el reactor R3 el efecto del aumento de la rotación del lecho de 7 a 14 rpm sobre la remoción del  $\text{N-NH}_4$  (aumento en 2.8%) fue mayor que el efecto de la recirculación del efluente (aumento en 0.2%). El efecto de la inyección de agua cruda en la zona anóxica de este reactor provocó una disminución de la remoción del  $\text{N-NH}_4$  en 3%, es decir este efecto negativo es similar en magnitud que el efecto positivo del incremento de la rotación de 7 a 14 rpm.

Los resultados del seguimiento de la concentración del  $\text{N-NH}_4$  en muestras tomadas de los puntos después de la zona aerobia y anóxica en los reactores R2 y R3 se presentan en las Figuras 3.3.5 y 3.3.6 respectivamente. Se observa que es mayor la remoción del  $\text{N-NH}_4$  en la zona aerobia de los reactores; en la zona anóxica y de sedimentación la remoción es muy pequeña. Los promedios y desviaciones estándar de la concentración del  $\text{N-NH}_4$  para cada uno de los períodos experimentales se presentan en las Tablas 3.3.4 y 3.3.5. Se observa que las concentraciones del  $\text{N-NH}_4$  en los efluentes de la zona anóxica y de la zona de sedimentación son prácticamente iguales. El cálculo de las cantidades de  $\text{N-NH}_4$  removidas en cada zona de los reactores y el porcentaje de contribución de cada zona en la cantidad total de  $\text{N-NH}_4$  removido se presenta en las Tablas 3.3.6 y 3.3.7.

En las Tablas 3.3.6 y 3.3.7 se observa que durante las primeras dos fases de evaluación la remoción del  $N-NH_4$  en las zonas aerobias fue de 87% de la totalidad del  $N-NH_4$  removido en el reactor R2 y de 85-91% en R3, es decir la mayor cantidad de  $N-NH_4$  se remueve en la zona aerobia de los reactores. El porcentaje de remoción en las zonas aerobias se incrementó en las fases posteriores lo cual se explica con el desarrollo de una mayor cantidad de bacterias nitrificantes. Las cantidades de  $N-NH_4$  removido en el reactor R2 fueron siempre menores comparadas con las cantidades determinadas en R3, lo cual se explica con el menor volumen del lecho empacado en su zona aerobia y por ende menor cantidad de bacterias nitrificantes. A partir de la tercera fase de evaluación (día 211 desde el arranque) los porcentajes de aportación de las zonas aerobias en la remoción de  $N-NH_4$  en los dos reactores aumentaron, alcanzando hasta 98-99%. La aportación de las zonas anóxicas en la remoción de  $N-NH_4$  fue muy baja en los dos reactores y disminuyó en el transcurso del tiempo de evaluación hasta solo 1%. El  $N-NH_4$  no se remueve por sedimentación, las pequeñas cantidades de  $N-NH_4$  removido que se determinaron (desde 0.1 hasta 1 mg/L) se pueden atribuir a una pequeña desorción del amoníaco.



**Figura 3.3.5 Variación de la concentración del  $N-NH_4$  en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.**

Evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales

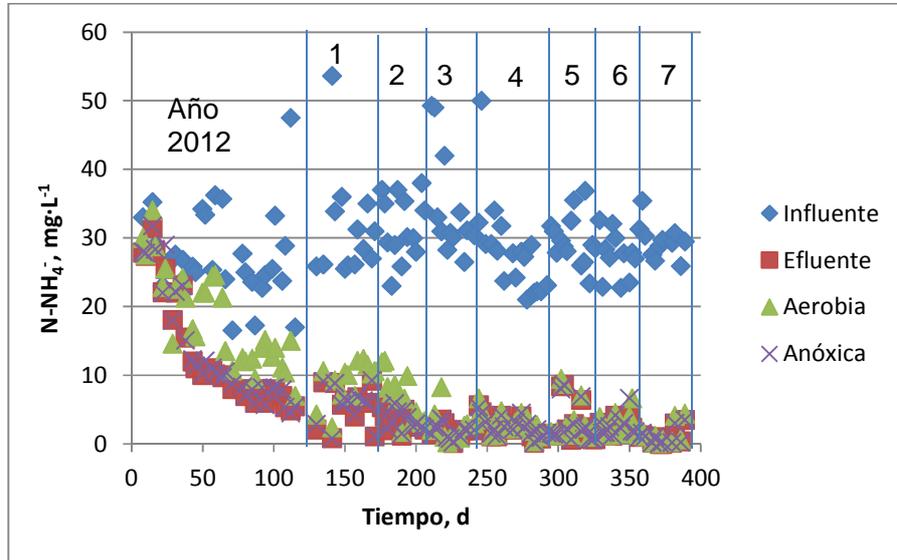


Figura 3.3.6. Variación de la concentración del  $N-NH_4$  en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.

Tabla 3.3.4. Concentraciones de  $N-NH_4$  en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2.

Días	Período	$N-NH_4$ ( $mg\ L^{-1}$ ) en R2			
		Influente	Aerobia	Anóxica	Efluente
130- 178	1. $Q_r/Q=100\%$ , 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	$31.9\pm 7.3$	$9.1\pm 4.7$	$7.5\pm 3.3$	$5.8\pm 2.9$
180- 206	2. $Q_r/Q=100\%$ , 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	$30.9\pm 4.7$	$7.9\pm 4.4$	$6.1\pm 2.9$	$4.5\pm 2.2$
211- 241	3. $Q_r/Q=100\%$ , 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	$34.6\pm 7.8$	$6.3\pm 3.9$	$4.7\pm 2.8$	$3.7\pm 2.2$
244- 299	4. $Q_r/Q=100\%$ , 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	$28.4\pm 6.3$	$4.3\pm 1.5$	$4.1\pm 1.5$	$3.8\pm 1.6$
302- 331	5. $Q_r/Q=0\%$ , 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	$29.2\pm 4.2$	$4.8\pm 2.0$	$4.5\pm 2.0$	$4.4\pm 2.0$
333- 361	6. $Q_r/Q=0\%$ , 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	$28.6\pm 3.5$	$4.9\pm 1.9$	$4.7\pm 1.9$	$4.7\pm 1.9$
366- 389	7. $Q_r/Q=100\%$ , 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	$28.5\pm 1.6$	$3.0\pm 0.7$	$2.9\pm 0.8$	$2.8\pm 0.7$

**Tabla 3.3.5. Concentraciones de N-NH<sub>4</sub> en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3.**

Días	Período	N-NH <sub>4</sub> (mg L <sup>-1</sup> ) en R3			
		Influyente	Aerobia	Anóxica	Efluente
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	31.9±7.3	9.5±3.0	5.6±2.6	5.4±2.6
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	30.9±4.7	5.8±2.7	3.3±1.4	3.2±1.4
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	34.6±7.8	2.4±2.2	1.9±1.0	1.8±1.0
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	28.4±6.3	2.6±1.5	2.4±1.3	2.2±1.4
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	29.2±4.2	3.6±2.9	3.1±2.8	3.1±2.8
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	28.6±3.5	2.5±1.7	2.4±1.6	2.2±1.1
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	28.5±1.6	1.5±1.8	1.1±1.4	1.0±1.4

**Tabla 3.3.6. Cantidad removida de N-NH<sub>4</sub> y porcentaje de contribución de cada zona del R2.**

Días	N-NH <sub>4</sub> removido, mg L <sup>-1</sup>				Porcentaje de contribución al total removido del N-NH <sub>4</sub>		
	Aerobia	Anóxica	Sedi- mentación	Total	Aerobia	Anóxica	Sedi- mentación
130- 178	22.8	1.6	1.7	26.1	87	6	7
180- 206	23.0	1.8	1.6	26.4	87	7	6
211- 241	28.3	1.6	1.0	30.9	92	5	3
244- 299	24.1	0.2	0.3	24.5	98	1	1
302- 331	24.5	0.3	0	24.8	99	1	0
333- 361	23.7	0.2	0	23.9	99	1	0
366- 389	25.6	0.1	0.1	25.7	99	0	0

**Tabla 3.3.7. Cantidad removida de N-NH<sub>4</sub> y porcentaje de contribución de cada zona del R3.**

Días	N-NH <sub>4</sub> removido, mg L <sup>-1</sup>				Porcentaje de contribución al total removido del N-NH <sub>4</sub>		
	Aerobia	Anóxica	Sedi- mentación	Total	Aerobia	Anóxica	Sedi- mentación
130- 178	22.4	3.9	0.2	26.4	85	15	1
180- 206	25.1	2.5	0.1	27.7	91	9	0
211- 241	32.2	0.5	0.0	32.8	98	2	0
244- 299	25.7	0.2	0.2	26.2	98	1	1
302- 331	25.6	0.5	0.0	26.1	98	2	0
333- 361	26.1	0.1	0.2	26.4	99	0	1
366- 389	27.1	0.4	0.0	27.5	98	1	0

### 3.4 Remoción de nitrógeno total Kjeldahl

En las Figuras 3.4.1, 3.4.2 y 3.4.3 se presentan las concentraciones del nitrógeno total Kjeldahl (NTK) en los influentes y efluentes de los reactores R1, R2 y R3 respectivamente durante todo el período de operación, desde el arranque, hasta el final de este estudio. Como ya se mencionó, la evaluación correspondiente a este proyecto empezó el día 152 desde el arranque (1 de febrero de 2013), sin embargo los reactores se operaron durante el mes de enero y el día 10 de enero de 2013, transcurridos 130 días desde el arranque, se identificó claramente el proceso de nitrificación en los tres reactores, por lo cual la evaluación de la fase experimental 1 tuvo una duración mayor de 30 días, desde el día 130 hasta el día 178. La fase experimental 2 abarcó los días 180-206, la fase 3 los días 211-241, la fase 4 los días 244-299, la fase 5 los días 302-331, la fase 6 los días 333-361, la fase 7 los días 366-389.

En las figuras se indican los períodos de las siete fases experimentales. La variación de la concentración del NTK en el influente fue desde 31 hasta 74 mg L<sup>-1</sup> durante el período de evaluación, con un promedio de 44.6±7.0 mg L<sup>-1</sup>. Los promedios de la concentración del NTK en el influente y en los efluentes se presentan en la Tabla 3.4.1 para cada fase experimental.

Se puede observar que la concentración más baja de NTK en el reactor R1 se determinó en la Fase 7, de 5.8 mg L<sup>-1</sup>, cuando la Q<sub>r</sub>/Q=100% y la velocidad de rotación del lecho fue de 14 rpm. En esta Fase 7 también se obtuvo la concentración más baja de N-NH<sub>4</sub>. En las Fases 3 y 4 en el reactor R1 se aplicaron las mismas condiciones de operación que en la Fase 7 pero las concentraciones en el efluente fueron ligeramente mayores, de 8.2 y 6.7 mg L<sup>-1</sup>. Esto se puede atribuir al incremento de las bacterias nitrificantes en el consorcio microbiano en el transcurso del tiempo. La concentración promedio del NTK fue ligeramente mayor en la Fase 6 en la cual se eliminó la recirculación (de 6.7 mg L<sup>-1</sup>), comparada con la determinada en la Fase 7 con 100% de recirculación (de 5.8 mg L<sup>-1</sup>). El incremento de la velocidad de rotación de 7 a 14 rpm (de fase 2 a fase 3) causó la obtención de una menor concentración de NTK en el efluente, los promedios disminuyeron de 9.6 a 8.2 mg L<sup>-1</sup> respectivamente. Comparando los resultados de las fases 4 y 5, sin recirculación, se observa que el cambio de la velocidad de rotación del lecho también influyó

sobre la concentración promedio del NTK, los promedios fueron de 6.7 y 9.8 mg L<sup>-1</sup> en las fases 4 y 5 respectivamente.

Las concentraciones promedio obtenidas en el reactor R3 fueron menores que las determinadas en los reactores R1 y R2. La zona aerobia de R3 y R1 son iguales, por lo que la mayor remoción se atribuye a un consumo adicional por la biomasa en la zona anóxica de R3. En el caso de R2, su zona aerobia es de menor volumen comparada con las zonas en R1 y R3, lo cual explica las mayores concentraciones de NTK determinadas en su efluente.

La variación de la concentración del NTK a lo largo del experimento definió las cargas de NTK aplicadas en cada reactor y en cada fase experimental. Las cargas de NTK aplicadas en los reactores durante las diferentes fases del experimento se presentan en la Tabla 3.4.2. Comparando con las cargas del N-NH<sub>4</sub>, se observa que la carga de N-NH<sub>4</sub> representa en promedio un 68% de la carga de NTK. Es decir, el agua residual utilizada para la evaluación contenía Norg que en promedio representaba un 32% del NTK.

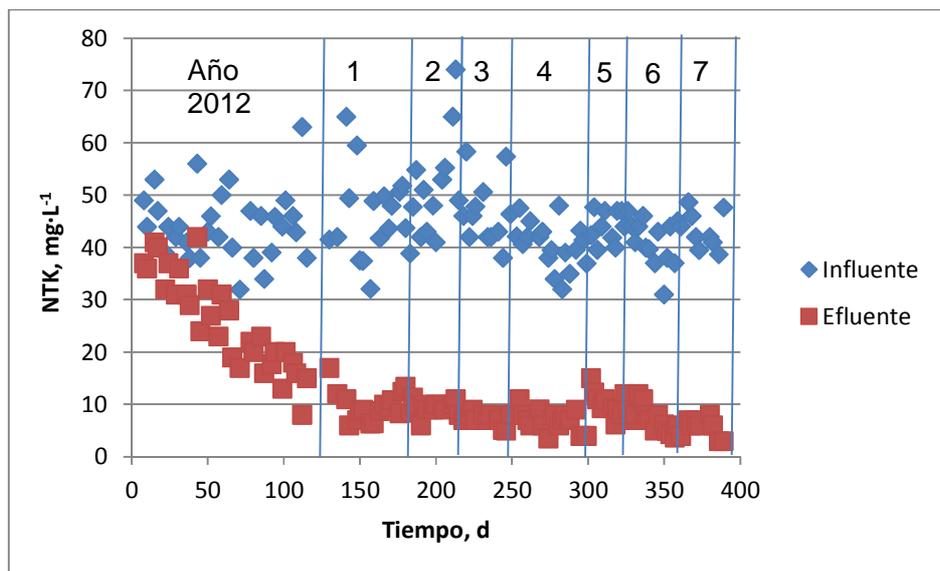


Figura 3.4.1. Variación de las concentraciones del NTK en el influente y efluente del reactor R1.

Evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales

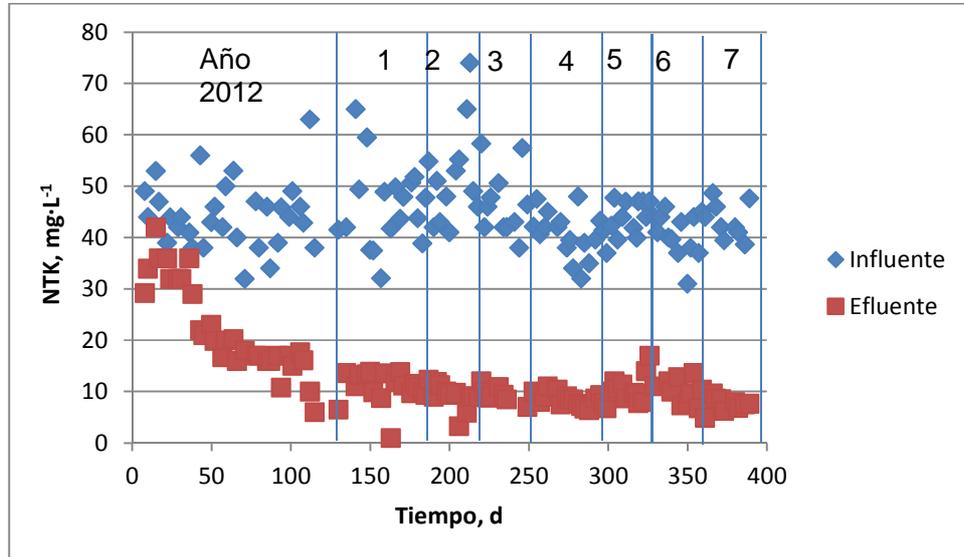


Figura 3.4.2. Variación de las concentraciones del NTK en el influente y efluente del reactor R2.

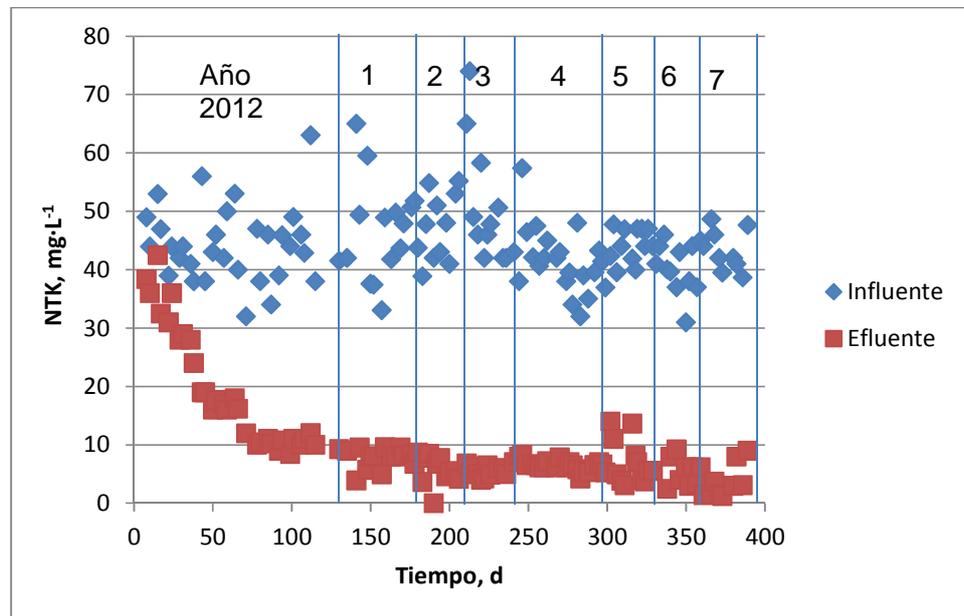


Figura 3.4.3. Variación de las concentraciones del NTK en el influente y efluente del reactor R3.

**Tabla 3.4.1 Valores de la concentración del NTK en el influente y los efluentes de R1, R2 y R3.**

Días	Fase experimental	Influente	Efluente de		
			R1	R2	R3
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	46.6±8.6	9.5±2.9	10.9±3.5	7.8±1.7
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	47.1±5.8	9.6±1.8	9.7±2.4	5.7±2.6
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	50.5±10.2	8.2±1.3	9.2±1.5	5.6±1.0
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	41.5±5.6	6.7±2.0	8.3±1.3	6.4±1.0
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	44.0±3.0	9.8±2.4	10.8±2.6	7.0±3.9
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	40.7±4.4	6.7±2.7	9.5±2.8	5.0±2.5
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	43.2±3.8	5.8±1.8	7.9±1.1	3.9±3.0

**Tabla 3.4.2 Cargas de NTK en los tres reactores en las diferentes fases experimentales.**

Días	Fase experimental	Reactores R1 y R3		Reactor R2	
		kg N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup>	g N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	kg N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup>	g N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	1.53±0.32	1.43±0.30	1.98±0.41	1.85±0.38
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	1.43±0.18	1.34±0.16	1.85±0.23	1.73±0.21
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	1.54±0.31	1.44±0.29	1.98±0.40	1.85±0.37
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	1.26±0.17	1.18±0.16	1.63±0.22	1.52±0.20
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	1.34±0.09	1.25±0.08	1.73±0.11	1.62±0.11
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	1.24±0.13	1.16±0.13	1.60±0.17	1.49±0.16
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	1.31±0.11	1.23±0.11	1.70±0.15	1.58±0.14

En la Figura 3.4.4 se presenta la variación de la remoción del NTK en los tres reactores durante la evaluación. Se observa que cuando empezó esta evaluación, los reactores ya habían alcanzado

remociones mayores de 65%. En la Tabla 3.4.3 se presentan los promedios de las remociones para cada fase experimental en los tres reactores.

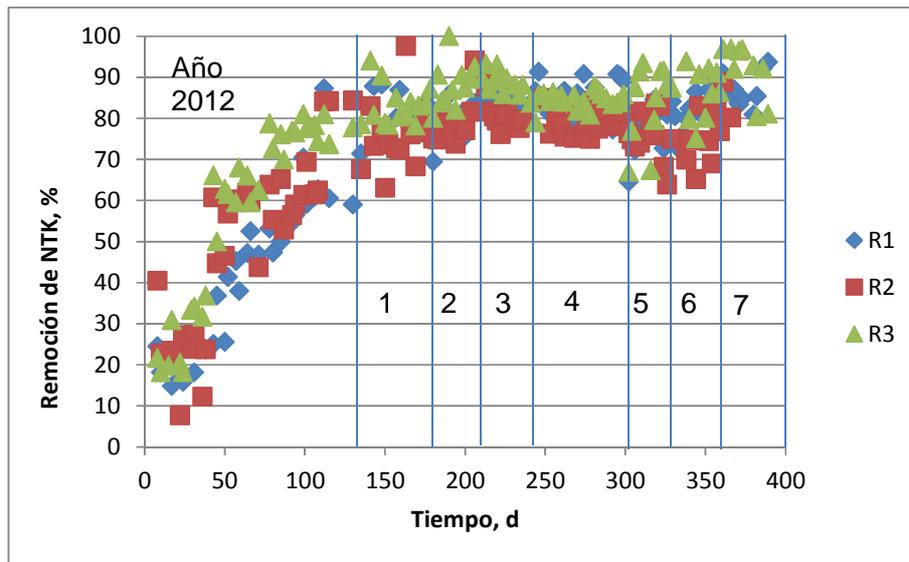


Figura 3.4.4. Remoción del NTK para los reactores R1, R2 y R3.

Tabla 3.4.3 Remociones promedio de NTK en los reactores R1, R2 y R3.

Días	Fase experimental	Remoción de NTK, %		
		R1	R2	R3
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	78.9±7.30	76.3±8.2	82.7±4.8
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	79.4±4.46	79.0±5.5	88.0±5.5
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	83.6±1.90	81.3±4.4	88.6±2.8
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	83.6±5.11	79.4±3.2	84.4±2.1
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	77.8±5.68	75.5±5.7	83.9±9.2
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	83.7±5.83	75.9±7.1	87.2±7.0
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	86.6±4.32	81.8±1.8	91.1±6.7

Como se puede observar en la Tabla 3.4.3, la mayor remoción en el reactor R1, de 86.6%, se determinó en la Fase 7, cuando la  $Q_r/Q=100\%$  y la velocidad de rotación del lecho fue de 14 rpm. Cabe mencionar que en esta fase se determinó la mayor remoción de  $N-NH_4$ .

En las Fases 3 y 4 se aplicaron las mismas condiciones en el reactor como en la Fase 7. Las remociones obtenidas en las Fases 3 y 4 fueron muy similares, de 83.6%. La mayor remoción determinada en la Fase 7 se puede explicar con un incremento paulatino de las bacterias nitrificantes en el consorcio microbiano en el reactor en el transcurso del tiempo.

La remoción promedio del NTK fue en un 3% menor en la Fase 6 en la cual no hubo recirculación (de 83.7%), comparada con la determinada en la Fase 7 con 100% de recirculación (de 86.6%). El incremento de la velocidad de rotación de 7 a 14 rpm (de fase 2 a fase 3) causó un incremento de la remoción promedio, de 79.4 a 83.6% respectivamente.

Comparando los resultados de la Fase 4 (con recirculación y 14 rpm) con los de Fase 5 (sin recirculación y 7rpm), se observa una disminución en un 5.8%, las remociones promedio fueron de 83.6 y 77.8 en las fases 4 y 5 respectivamente.

Las remociones promedio del NTK obtenidas en el reactor R3 fueron mayores que las determinadas en los reactores R1 y R2. Las zonas aerobias de R3 y R1 son iguales, por lo que la mayor remoción se atribuye a un consumo adicional de N por la biomasa en la zona anóxica de R3. En el caso de R2, su zona aerobia es de menor volumen comparada con las zonas en R1 y R3, lo cual explica las menores remociones de NTK determinadas en este reactor.

Las condiciones de operación en R2 y R3 fueron iguales durante las fases 3 y 7. Se observa que las remociones promedio de NT fueron similares en R2, de 81.3 y 81.8% en fase 3 y 7 respectivamente. En R3 la remoción determinada en Fase 7 fue de 91.1%, en 2.5% mayor que la remoción en Fase 3 (de 88.6%). Esto se puede atribuir al incremento paulatino de las bacterias nitrificantes en el consorcio microbiano en las zonas aerobias de los reactores con el transcurso del tiempo. Es probablemente debido a esto que las remociones en R2 y R3 fueron mayores durante la Fase 2 en la cual se inyectó 20% del influente a la zona anóxica comparadas con las obtenidas en la Fase 1 cuando no se inyectaba agua residual cruda a la zona anóxica (las demás condiciones fueron iguales en fases 1 y 2).

En las Fases 3 y 4 se observó que la inyección de agua cruda en la zona anóxica provocó disminución de la remoción del NTK en R2 y R3, completamente contrario a lo observado anteriormente. La disminución fue en 1.9% en R2 y en 4.2% en R3; más fuerte fue el efecto en R3. Para el caso de la remoción de  $N-NH_4$ , se observó también una disminución de la remoción, pero el efecto fue más fuerte en R2. Cabe mencionar que en la Fase 3 ya se tenían remociones de NTK altas, de 81 y 89% en R2 y R3 respectivamente, mientras que en la Fase 1 las remociones promedio de NTK fueron menores, de 76 y 83% en R2 y R3 respectivamente.

Comparando las Fases 5 y 6, se observa que la introducción de agua residual a la zona anóxica no provocó disminución de la remoción de NTK en R2 y R3, es más hubo un aumento de la remoción el cual fue en 0.4% en R2 y en un 3.3% en R3. La diferencia entre los efectos en 3 y 4 y en 5 y 6 es que en el último caso hubo un incremento de la velocidad de rotación del lecho que pudo haber contrarrestado una reducción de la remoción del NTK. Resumiendo, se puede afirmar que la

inyección del 20% del influente al reactor a la zona anóxica puede disminuir la remoción del NTK en 1.9-4.2%.

El efecto de la recirculación del efluente sobre la remoción del NTK fue ya demostrado en estudios previos. En este estudio al comparar la Fase 4 y 6 se observa que en R2 la remoción fue en 3.5% mayor con la recirculación de 100% comparado con la fase sin recirculación. En R3 no se observó este efecto.

El efecto de la rotación del lecho se puede observar comparando las Fases 2 y 4 en las cuales se tenían velocidades de 7 y 14 rpm respectivamente, las demás condiciones de operación fueron iguales. En el reactor R2 la remoción promedio del NTK en la Fase 4 (14 rpm) fue en un 0.4% mayor que la determinada en la Fase 2 (7 rpm). En R3 hubo una disminución de la remoción en Fase 4 (14 rpm), lo cual se puede atribuir a desprendimiento de partículas de biomasa del lecho periférico, ya que la remoción de N-NH<sub>4</sub> determinada en la Fase 4 (14 rpm) fue mayor que la obtenida en Fase 2 (7 rpm), sin embargo con el NTK sucedió al revés. Se evitará la comparación de las Fases 1 y 3 que indica un mayor efecto del aumento de la velocidad rotacional ya que, como se comentó, en la Fase 1 los reactores R2 y R3 todavía no habían llegado a altas remociones de NTK. Resumiendo el incremento de la velocidad rotacional de 7 a 14 rpm no influyó significativamente sobre la remoción del NTK.

En el reactor R2 el efecto del aumento de la rotación del lecho de 7 a 14 rpm sobre la remoción del NTK (aumento en 0.4%) fue menor que el efecto de la recirculación del efluente (aumento en 3.5%). El efecto de la inyección de agua cruda en la zona anóxica de este reactor provocó una disminución de la remoción del NTK en 1.9%.

En el reactor R3 no se observó efecto del aumento de la rotación del lecho de 7 a 14 rpm, ni de la recirculación sobre la remoción del NTK. La inyección de agua cruda en la zona anóxica de este reactor provocó una disminución de la remoción del NTK en 4.2%.

Los resultados del seguimiento de la concentración del NTK en muestras tomadas de los puntos después de la zona aerobia y anóxica en los reactores R2 y R3 se presentan en las Figuras 3.4.5 y 3.4.6 respectivamente. Se observa que es mayor la remoción del NTK en la zona aerobia de los reactores comparada con la de la zona anóxica y que es muy pequeña la contribución de la zona de sedimentación. Los promedios y desviaciones estándar de la concentración del NTK para cada uno de los períodos experimentales se presentan en las Tablas 3.4.4 y 3.4.5. Se observa que en el reactor R3 las concentraciones del NTK en los efluentes de la zona anóxica y de la zona de sedimentación son muy similares. En el reactor R2 la diferencia es más grande. El cálculo de las cantidades de NTK removidas en cada zona de los reactores y el porcentaje de contribución de cada zona en la cantidad total de NTK removido se presenta en las Tablas 3.4.6 y 3.4.7.

Evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales

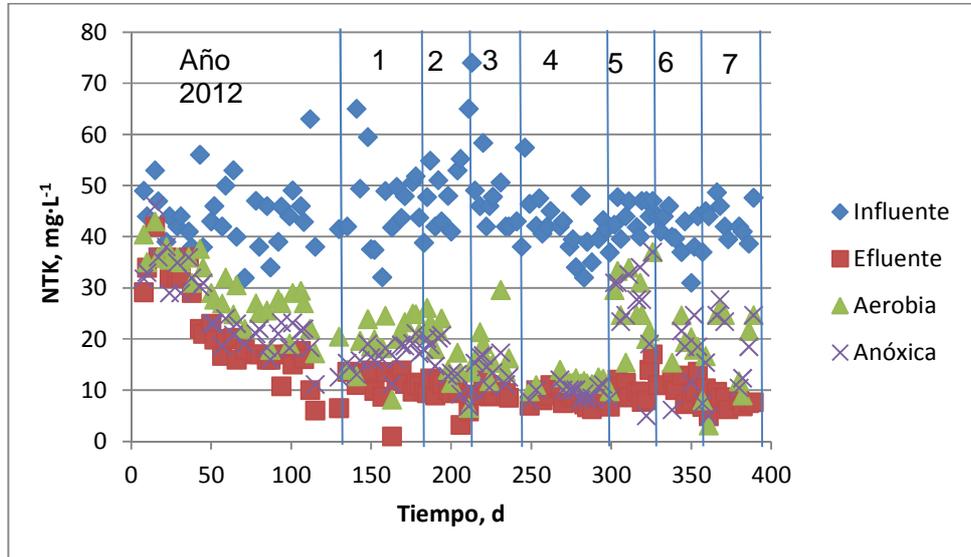


Figura 3.4.5 Variación de la concentración del NTK en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.

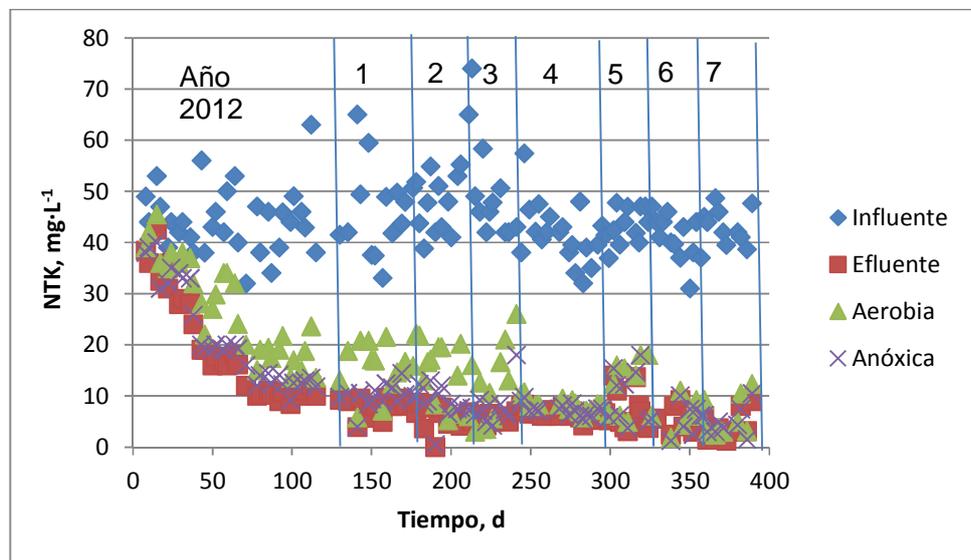


Figura 3.4.6. Variación de la concentración del NTK en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.

**Tabla 3.4.4. Concentraciones de NTK en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2.**

Días	Período	NTK (mg L <sup>-1</sup> ) en R2			
		Influyente	Aerobia	Anóxica	Efluente
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	46.6±8.6	19.6±4.9	16.5±2.8	10.9±3.5
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	47.1±5.8	19.2±4.7	16.2±3.8	9.7±2.4
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	50.5±10.2	16.2±5.8	13.2±3.3	9.2±1.5
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	41.5±5.6	11.6±1.1	9.6±1.2	8.3±1.3
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	44.0±2.9	26.9±6.6	26.6±8.8	10.8±2.6
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	40.7±4.4	16.0±6.6	14.3±7.1	9.5±2.8
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	43.2±3.8	20.3±7.0	20.2±6.7	7.9±1.1

**Tabla 3.4.5. Concentraciones de NTK en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3.**

Días	Período	NTK (mg L <sup>-1</sup> ) en R3			
		Influyente	Aerobia	Anóxica	Efluente
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	46.6±8.6	15.9±4.9	10.0±2.3	7.8±1.7
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	47.1±5.8	14.9±5.8	8.7±3.5	5.7±2.6
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	50.5±10.2	11.5±7.5	7.9±3.5	5.6±1.0
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	41.5±5.6	8.2±1.3	7.2±1.1	6.4±1.0
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	44.0±2.9	12.3±5.3	10.3±5.3	7.0±3.9
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	40.7±4.4	6.5±3.1	5.3±2.8	5.0±2.5
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	43.2±3.8	5.7±3.0	5.0±3.0	3.9±3.0

**Tabla 3.4.6. Cantidad removida de NTK y porcentaje de contribución de cada zona del R2.**

Días	NTK removido, mg L <sup>-1</sup>				Porcentaje de contribución al total removido del NTK		
	Aerobia	Anóxica	Sedi-mentación	Total	Aerobia	Anóxica	Sedi-mentación
130- 178	27.0	3.2	5.6	35.7	75	9	16
180- 206	27.9	3.0	6.5	37.4	75	8	17
211- 241	34.2	3.1	3.9	41.2	83	7	10
244- 299	29.8	2.0	1.3	33.2	90	6	4
302- 331	17.2	0.2	15.8	33.2	52	1	48
333- 361	24.7	1.7	4.7	31.2	79	5	15
366- 389	22.9	0.1	12.4	35.3	65	0	35

**Tabla 3.4.7. Cantidad removida de NTK y porcentaje de contribución de cada zona del R3.**

Días	NTK removido, mg L <sup>-1</sup>				Porcentaje de contribución al total removido del NTK		
	Aerobia	Anóxica	Sedi-mentación	Total	Aerobia	Anóxica	Sedi-mentación
130- 178	30.7	5.9	2.2	38.8	79	15	6
180- 206	32.4	6.0	3.0	41.5	78	14	7
211- 241	39.0	3.6	2.3	44.9	87	8	5
244- 299	33.3	0.9	0.8	35.0	95	3	2
302- 331	31.7	2.0	3.3	37.0	86	5	9
333- 361	34.2	1.2	0.3	35.7	96	3	1
366- 389	37.5	0.7	1.2	39.3	95	2	3

En las Tablas 3.4.6 y 3.4.7 se observa que durante las primeras dos fases de evaluación la remoción del NTK en las zonas aerobias fue de 75% del total removido en R2 y de 78-79% del total removido en R3. La zona anóxica en estas fases aportaba 8-9% en R2 y 15-14% en R3. La zona de sedimentación aportaba 16-17% en R2 y 6-7% en R3. Estas diferencias se deben a la configuración de los reactores, particularmente a la ubicación de la zona anóxica. En el caso de R2 la zona anóxica está localizada debajo de la aerobia y la zona periférica es enteramente para la sedimentación de los sólidos suspendidos que en su mayor parte están constituidos por partículas de la biomasa desprendida del lecho, por lo cual contienen nitrógeno. Es por esto la mayor contribución de la zona de sedimentación de R2 a la remoción total del NTK. En el caso de R3 la zona anóxica está ocupa parte de la zona periférica. En el lecho anóxico se atrapan partículas de la biomasa desprendida de la zona aerobia, por lo cual en la zona de sedimentación que está ubicada encima de la zona anóxica hay muy pocas partículas por remover. A partir de la Fase 3 la aportación de la zona anóxica en R2 disminuyó conservándose similar la aportación de la zona aerobia y aumentando la aportación de la zona de sedimentación. En el R3 a partir de la Fase 3

aumentó la aportación de la zona aerobia en la remoción del NTK llegando hasta 96%, simultáneamente disminuyó la aportación de la zona anóxica conservándose similar la aportación de la zona de sedimentación.

Las cantidades de NTK removidos en la zona aerobia del reactor R2 fueron siempre menores comparadas con las cantidades removidas en la zona aerobia de R3, lo cual se explica con el menor volumen del lecho empacado en su zona aerobia y por ende menor cantidad de bacterias nitrificantes. Igual sucede con las cantidades removidas en las zonas anóxicas. Solo en la zona de sedimentación de R2 se removían mayores cantidades de NTK. Sin embargo, debido a que la aportación de las zonas de sedimentación en la remoción total del NTK es relativamente pequeña, este hecho no representó un beneficio para la remoción de NTK en R2. Finalmente las cantidades totales de NTK removido en R3 fueron mayores que las determinadas en R2.

### 3.5 Nitritos, nitratos y alcalinidad en los reactores R1, R2 y R3

En las Figura 3.5.1 y 3.5.2 se presentan las concentraciones de los nitritos y nitratos determinados en los efluentes de los tres reactores durante todo el período de operación. Como ya se mencionó, la evaluación correspondiente a este proyecto empezó el día 152 desde el arranque (1 de febrero de 2013), sin embargo los reactores se operaron durante el mes de enero y el día 10 de enero de 2013, transcurridos 130 días desde el arranque, se identificó claramente el proceso de nitrificación en los tres reactores, por lo cual la evaluación de la fase experimental 1 tuvo una duración mayor de 30 días, desde el día 130 hasta el día 178. La fase experimental 2 abarcó los días 180-206, la fase 3 los días 211-241, la fase 4 los días 244-299, la fase 5 los días 302-331, la fase 6 los días 333-361, la fase 7 los días 366-389.

En las Figura 3.5.1 y 3.5.2 se observa que a partir del día 130, inicio de esta evaluación, ya había nitritos y nitratos en los efluentes de los reactores. En las figuras se indican los períodos de las siete fases experimentales. Es marcadamente mayor la concentración de los nitritos y nitratos en el efluente del reactor R1, en este reactor no hay zona de desnitrificación. Se observa que la concentración de nitritos en este reactor disminuyó paulatinamente en el transcurso del tiempo y después del día 250 desde el arranque los nitritos fueron menores de 1 mg/L y los nitratos en el efluente alcanzaron hasta 7 mg/L. Durante el período días 250-380 los nitratos variaron entre 1.7 hasta 7.8 mg/L, dependiendo de las condiciones de operación.

En los efluentes de los reactores con zonas de desnitrificación, R2 y R3, se determinaban nitratos hasta 2 mg/L hasta el día 220, después las concentraciones de los nitratos disminuyeron y se mantuvieron menores de 1 mg/L hasta el final de la evaluación. Esto significa que durante las primeras tres fases de la evaluación el proceso de nitrificación-desnitrificación todavía no estaba completamente estabilizado.

Los promedios de las concentraciones de los nitritos y los nitratos en el influente y en los efluentes de los tres reactores durante las diferentes fases experimentales se presentan en las Tablas 3.5.1 y 3.5.2. Se observa que en el agua residual influente a los reactores se detectó presencia de nitritos y nitratos en pequeñas concentraciones. Durante el período de evaluación (días 130-389) la concentración promedio de los nitritos fue de  $0.07 \pm 0.05$  mg/L y de los nitratos fue de  $0.25 \pm 0.28$

mg/L. En las aguas residuales crudas generalmente no hay nitritos y nitratos por las condiciones sépticas en las que éstas están. Su presencia en un agua residual se puede explicar con descargas puntuales agro-industriales. Cabe mencionar que la mayor parte del tiempo los nitritos estuvieron por debajo de 0.1 mg/L, pero los días 190-210 y 290-305 se determinaron nitratos de hasta 0.3 mg/L. Los nitratos estuvieron por debajo de 0.5 mg/L la mayor parte del tiempo y en los mismos períodos anteriormente mencionados se presentaron concentraciones de hasta 1.5 y 1.0 respectivamente. Esto confirma la suposición de la proveniencia de los nitritos y nitratos de descargas agro-industriales.

Comparando las concentraciones de los nitritos en los efluentes de los tres reactores se determinaron las siguientes concentraciones promedio para todo el período de evaluación: de  $0.62 \pm 0.67$  mg/L en R1,  $0.21 \pm 0.33$  mg/L en R2 y de  $0.32 \pm 0.46$  mg/L en R3. Se observa la similitud de las concentraciones en R2 y R3, mientras que la concentración de los nitritos en R1 fue casi tres veces más alta. Los promedios de los nitratos en los efluentes fueron:  $5.13 \pm 1.83$  mg/L en R1,  $0.42 \pm 0.45$  mg/L en R2 y  $0.40 \pm 0.39$  mg/L en R3. Otra vez se observa la similitud en las concentraciones de nitratos en los efluentes de R2 y R3. Los nitratos en el efluente de R1 fueron más de 12 veces mayores que los promedios de los nitratos en los efluentes de R2 y R3.

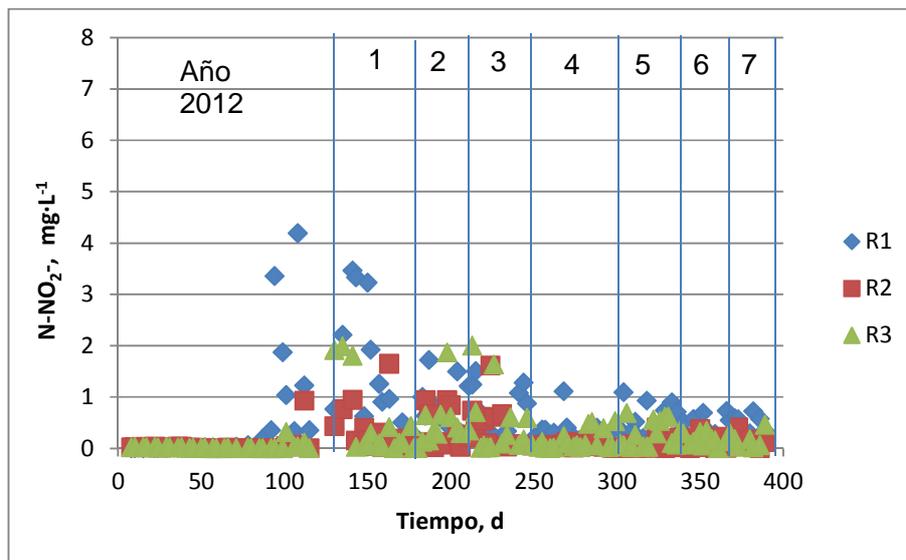


Figura 3.5.1. Concentración de nitritos en los efluentes de los reactores R1, R2 y R3.

Evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales

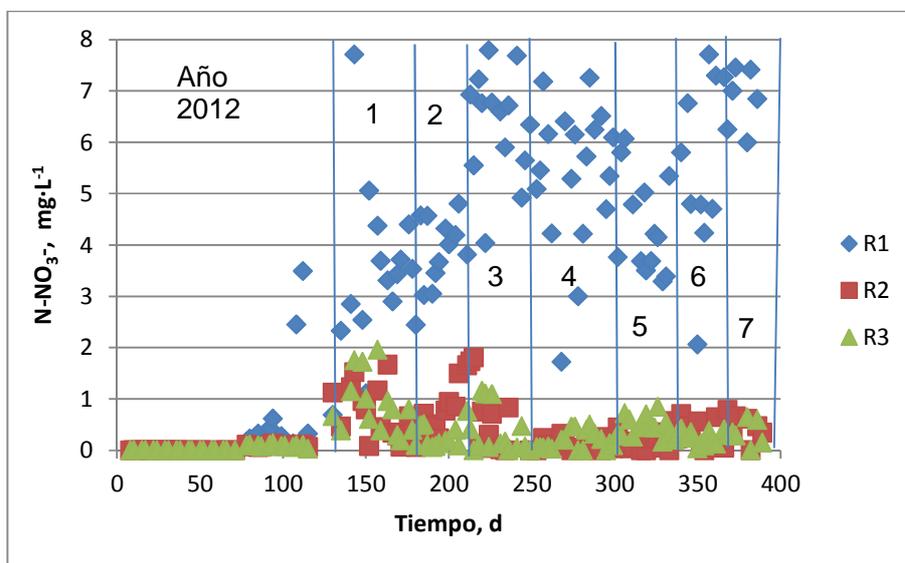


Figura 3.5.2. Concentración de nitratos en los efluentes de los reactores R1, R2 y R3.

Tabla 3.5.1 Concentraciones promedio de los nitritos determinados en el influente y los efluentes de R1, R2 y R3 durante las diferentes fases experimentales.

Días	Fase experimental	Influente	Efluente de		
			R1	R2	R3
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	0.07±0.05	1.31±1.22	0.34±0.46	0.49±0.74
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	0.08±0.06	0.72±0.52	0.37±0.39	0.49±0.51
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	0.06±0.02	0.59±0.52	0.51±0.44	0.48±0.67
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	0.07±0.06	0.35±0.34	0.06±0.05	0.17±0.20
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	0.09±0.08	0.42±0.32	0.05±0.11	0.29±0.27
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	0.03±0.03	0.40±0.27	0.11±0.12	0.17±0.12
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	0.07±0.04	0.54±0.16	0.12±0.13	0.17±0.15

**Tabla 3.5.2 Concentraciones promedio de los nitratos determinados en el influente y los efluentes de R1, R2 y R3 durante las diferentes fases experimentales.**

Días	Fase experimental	Influente	Efluente de		
			R1	R2	R3
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	0.53±0.52	3.44±1.66	0.75±0.51	0.87±0.56
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	0.19±0.09	3.83±0.76	0.58±0.44	0.22±0.17
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	0.22±0.12	6.31±1.28	0.73±0.71	0.42±0.47
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	0.12±0.13	5.41±1.33	0.11±0.10	0.18±0.18
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	0.31±0.24	4.57±1.39	0.17±0.15	0.49±0.20
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	0.20±0.14	6.03±2.19	0.33±0.27	0.24±0.12
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	0.17±0.14	7.16±0.94	0.41±0.28	0.34±0.21

En la Tabla 3.5.1 se observa que los nitritos en el efluente de R1 fueron altos durante las primeras dos fases y después del día 206 disminuyeron. Los nitratos fueron de 3.44±1.66 mg/L durante la Fase 1 y de 3.83±0.76 mg/L durante la Fase 2 y después del día 206 aumentaron, siendo de 6.31±1.28 mg/L durante la Fase 3. Después, en las siguientes fases experimentales se mantuvieron similares a las obtenidas en la Fase 3. Esto significa que en las zonas aerobias de los reactores el proceso de nitrificación se estabilizó hasta el final de la segunda fase experimental. Por lo anterior la concentración mayor de nitratos que se obtuvo en Fase 3 comparada con Fase 2 no se podría atribuir al incremento de la velocidad de rotación del lecho, podría ser debida al aumento de la cantidad de bacterias nitrificantes en el lecho del reactor. Comparando los nitratos promedio en el efluente de R1 de las Fases 3 y 4 se observa una diferencia de 1 mg/L cuando en ambas fases en R1 se operaba con Qr/Q=100% y 14 rpm. Esta diferencia es menor de la desviación estándar calculado y se puede considerar que no es estadísticamente significativa. Comparando los nitratos promedio en el efluente de R1 de las Fases 4 y 5 se observa una concentración menor en la Fase 5 cuando se aplicó Qr/Q=0% y 7 rpm, pero en solo 1 mg/L, es decir la diferencia no es estadísticamente significativa, por lo cual no se puede decir que la eliminación de la recirculación y la disminución de la velocidad de rotación del lecho provoca disminución de la concentración de nitratos. Una situación sucede en la comparación de las Fases 5 y 6. Finalmente se observa que en la última Fase 7 (días 366- 389) en la cual se operó otra vez con Qr/Q=100% y 14 rpm, igual que en las Fases 3 y 4, la concentración promedio fue de 7.16±0.94 mg/L. Esta concentración es en 1 mg/L mayor que la de Fase 3 y en 2 mg/L mayor que la de Fase 4. Todo lo anterior indica que la concentración de nitratos en las zonas aerobia dependen más de la maduración del proceso (incremento de la densidad de bacterias nitrificantes en el lecho) que de la recirculación del efluente o de la rotación del lecho en el intervalo 7-14 rpm.

Los resultados del seguimiento de las concentraciones de los nitritos y nitratos en muestras tomadas de los puntos después de la zona aerobia y anóxica en los reactores R2 y R3 se

presentan en las Figuras 3.5.3, 3.5.4, 3.5.6 y 3.5.7. Se observa que la mayor cantidad de nitritos y nitratos se determinan en la salida de las zonas aerobias. El objetivo de las zonas anóxicas es reducir los nitratos, por lo cual las concentraciones en la salida de estas zonas son menores.

Los promedios y desviaciones estándar de las concentraciones de nitritos y nitratos para los últimos dos períodos experimentales se presentan en las Tablas 3.5.3 y 3.5.4. Se observa que los promedios de las concentraciones en las salidas de las zonas anóxicas de los reactores R2 y R3 son muy similares a los promedios de las concentraciones en los efluentes finales de la zona de sedimentación. Es decir, en las zonas de sedimentación no suceden transformaciones significativas de los nitritos y nitratos presentes en las salidas de las zonas anóxicas.

En la Tabla 3.5.5 se presenta el cálculo de los nitritos y nitratos formados en las zonas aerobias de R2 y R3, y de los nitritos y nitratos removidos en las zonas anóxicas. Durante el período de evaluación 80-96% de los nitratos y 32-89% de los nitratos formados en la zona aerobia del reactor R3 se removieron en la zona anóxica del reactor. En la zona anóxica de R2 se removieron 60-100% de los nitratos y 40-100% de los nitritos formados en la zona aerobia.

Durante el período de evaluación en el reactor R1 se formaron en promedio 0.55 mg/L de nitritos y 5.01 mg/L de nitratos (5.56 mg/L en total). En la zona aerobia de R2 se formaron 0.43 mg/L de nitritos y 0.81 mg/L de nitratos (1.25 mg/L en total), es decir fue más de 4 veces menor el rendimiento del proceso de nitrificación comparado con el del reactor R1. En la zona aerobia de R3 se formaron 1.04 mg/L de nitritos y 2.54 mg/L de nitratos (3.58 mg/L en total), es decir fue 1.5 veces menor el rendimiento del proceso de nitrificación en la zona aerobia del reactor R3 comparado con el de R1. En el reactor R1 no hay zona anóxica por lo cual no se producía desnitrificación tal como estos sucedía en R2 y R3, por lo cual las concentraciones de los nitritos y nitratos en el efluente del R1 fueron mayores que las determinadas en los efluentes de R2 y R3.

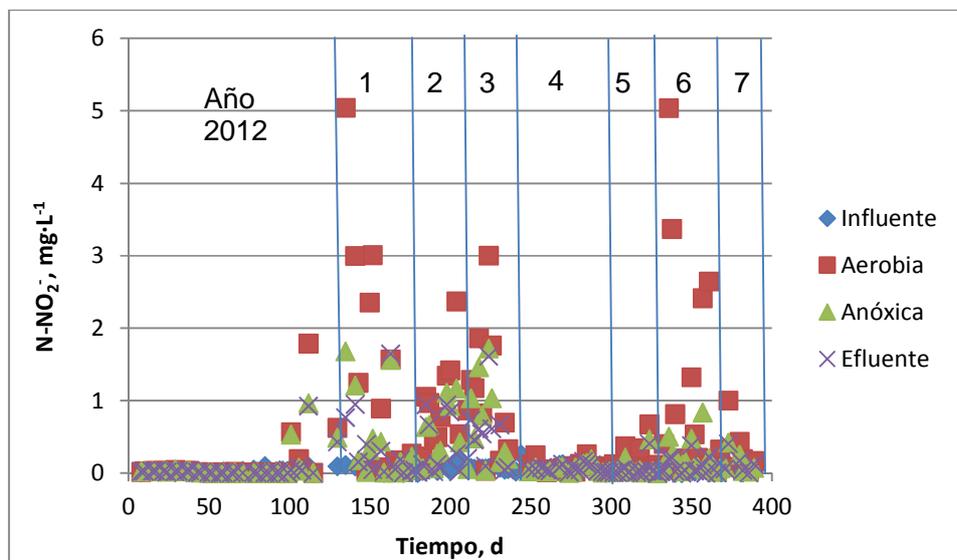


Figura 3.5.3. Variación de la concentración de los nitritos en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.

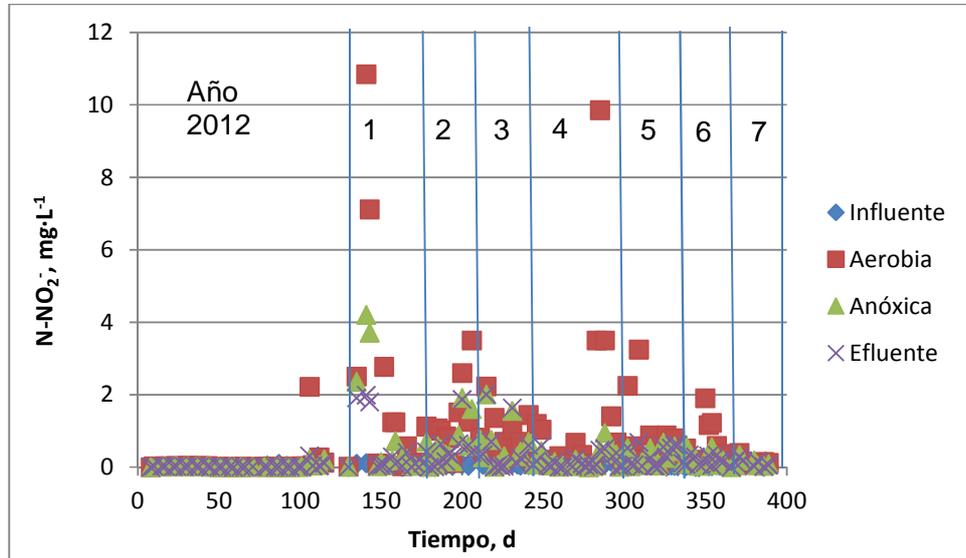


Figura 3.5.4. Variación de la concentración de los nitritos en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.

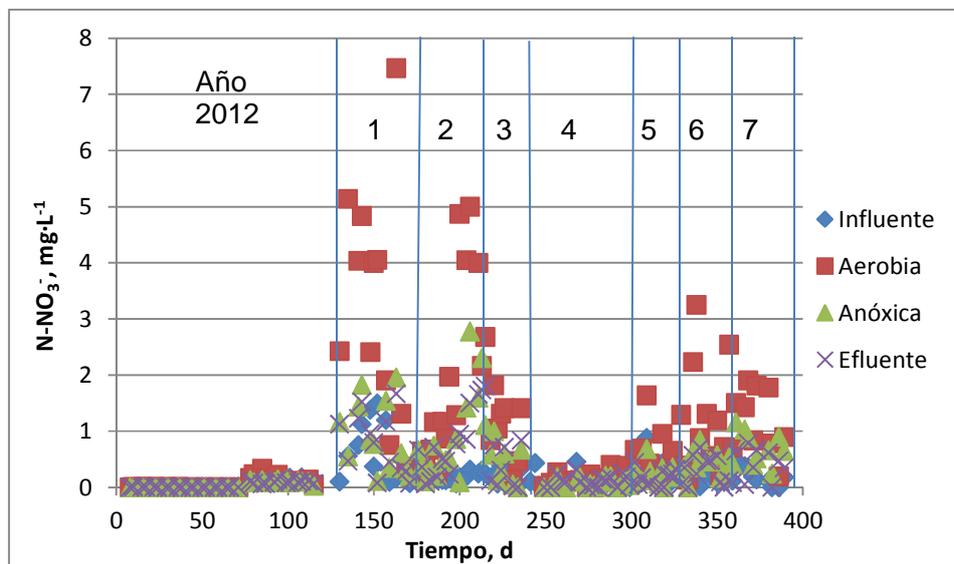


Figura 3.5.5. Variación de la concentración de los nitratos en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.

Evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales

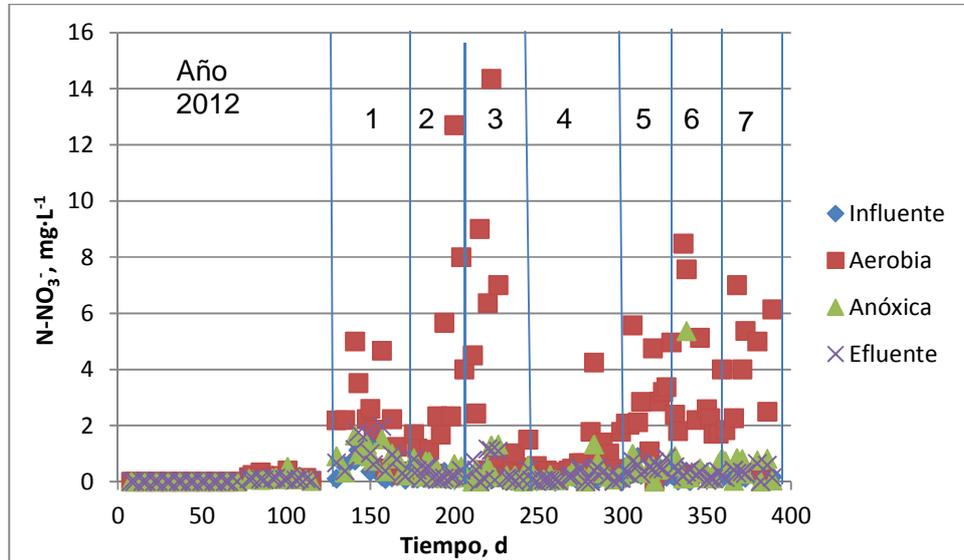


Figura 3.5.6. Variación de la concentración de los nitratos en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.

Tabla 3.5.3. Concentraciones de nitritos (mg/L) en los diferentes puntos de muestreo de los reactores R2 y R3.

Reactor	Días	Influente	Aerobia	Anóxica	Efluente
R2	130- 178	0.07±0.05	1.23±1.50	0.45±0.57	0.34±0.46
	180- 206	0.08±0.06	0.90±0.64	0.52±0.41	0.37±0.39
	211- 241	0.06±0.02	1.09±0.87	0.66±0.59	0.51±0.44
	244- 299	0.07±0.06	0.08±0.07	0.06±0.05	0.06±0.05
	302- 331	0.09±0.08	0.17±0.19	0.08±0.14	0.05±0.11
	333- 361	0.03±0.03	1.42±1.60	0.25±0.24	0.11±0.12
	366- 389	0.07±0.04	0.29±0.32	0.12±0.14	0.12±0.13
R3	130- 178	0.07±0.05	1.87±3.10	0.85±1.40	0.49±0.74
	180- 206	0.08±0.06	1.25±1.00	0.70±0.58	0.49±0.51
	211- 241	0.06±0.02	0.77±0.63	0.55±0.63	0.48±0.67
	244- 299	0.07±0.06	1.24±2.24	0.20±0.25	0.17±0.20
	302- 331	0.09±0.08	0.72±0.80	0.26±0.24	0.29±0.27
	333- 361	0.03±0.03	0.56±0.58	0.24±0.20	0.17±0.12
	366- 389	0.07±0.04	0.19±0.14	0.14±1.11	0.17±0.15

**Tabla 3.5.4. Concentraciones de nitratos (mg/L) en los diferentes puntos de muestreo de los reactores R2 y R3.**

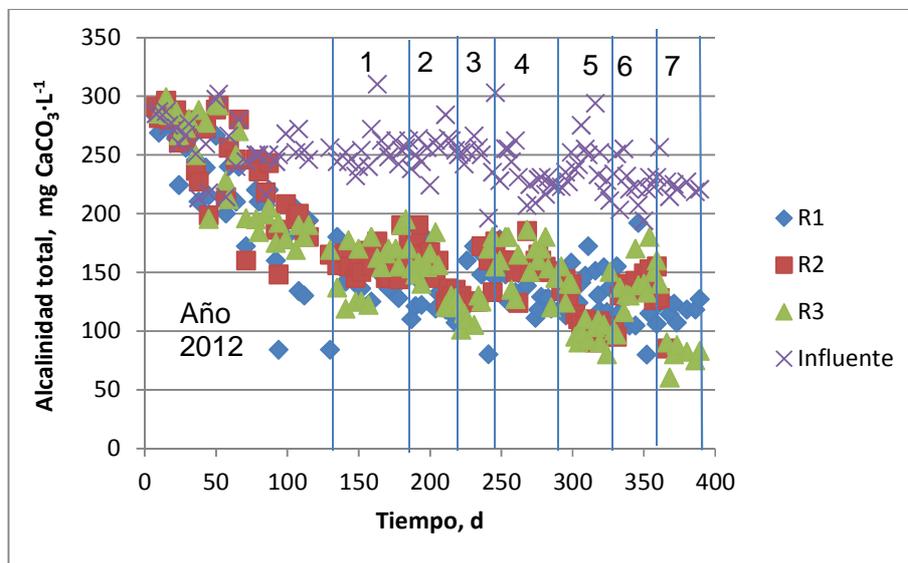
Reactor	Días	Influyente	Aerobia	Anóxica	Efluente
R2	130- 178	0.53±0.52	2.66±2.17	0.85±0.60	0.75±0.51
	180- 206	0.19±0.09	1.97±1.79	0.73±0.78	0.58±0.44
	211- 241	0.22±0.12	1.57±1.08	0.76±0.71	0.73±0.71
	244- 299	0.12±0.13	0.15±0.12	0.08±0.08	0.11±0.10
	302- 331	0.31±0.24	0.67±0.43	0.26±0.18	0.17±0.15
	333- 361	0.20±0.14	1.27±0.96	0.49±0.30	0.33±0.27
	366- 389	0.17±0.14	1.21±0.62	0.66±0.27	0.41±0.28
R3	130- 178	0.53±0.52	2.11±1.42	0.83±0.43	0.87±0.56
	180- 206	0.19±0.09	3.56±3.87	0.36±0.25	0.22±0.17
	211- 241	0.22±0.12	3.90±4.49	0.37±0.47	0.42±0.47
	244- 299	0.12±0.13	0.84±0.94	0.26±0.30	0.18±0.18
	302- 331	0.31±0.24	2.87±1.56	0.54±0.26	0.49±0.20
	333- 361	0.20±0.14	3.29±2.53	0.81±1.46	0.24±0.12
	366- 389	0.17±0.14	4.09±2.22	0.45±0.39	0.34±0.21

**Tabla 3.5.5. Cantidades de nitritos y nitratos formadas y removidas por zona en los reactores R2 y R3.**

Reactor	Días	N-NO <sub>2</sub> , mg/L		N-NO <sub>3</sub> , mg/L	
		Formados en aerobia	Removidos en anóxica	Formados en aerobia	Removidos en anóxica
R2	130- 178	1.16	0.78	2.13	1.81
	180- 206	0.82	0.37	1.79	1.25
	211- 241	1.03	0.43	1.36	0.82
	244- 299	0.01	0.02	0.03	0.07
	302- 331	0.09	0.10	0.36	0.41
	333- 361	1.39	1.17	1.07	0.78
	366- 389	0.21	0.17	1.04	0.54
R3	130- 178	1.80	1.02	1.58	1.29
	180- 206	1.17	0.55	3.37	3.20
	211- 241	0.71	0.23	3.69	3.54
	244- 299	1.17	1.04	0.72	0.58
	302- 331	0.63	0.45	2.55	2.32
	333- 361	0.53	0.32	3.10	2.48
	366- 389	1.24	0.65	2.78	2.58

En la Figura 3.5.7 se presentan los resultados de la alcalinidad total en el influente y en los efluentes de los tres reactores durante todo el período de la operación. Se puede observar que durante el período de la evaluación las alcalinidades en los efluentes en los tres reactores fueron consistentemente menores que la alcalinidad del agua cruda, lo cual significa un consumo de alcalinidad en los procesos en los tres reactores, sin embargo la alcalinidad del agua fue suficiente para el proceso de nitrificación ya que en los efluentes siempre había una alcalinidad remanente mayor de 80 mg/L. En la figura se puede observar también un aumento del consumo de alcalinidad en el transcurso del tiempo lo cual coincide con la observación reportada previamente que con el tiempo se fortaleció el proceso de nitrificación aumentándose su rendimiento.

En los reactores R2 y R3 se determinaban también las alcalinidades en las salidas de las zonas aerobias y anóxicas. Estos resultados se presentan en las Figuras 3.5.8 y 3.5.9. Se observa que las alcalinidades en la salida de la zona anóxica y en el efluente final son muy similares, es decir en la zona de sedimentación no hay cambios significativos en la alcalinidad del agua. Los valores en las salidas de las zonas aerobias son menores que los determinados en las salidas de la zona anóxica. Además en el tiempo disminuye la alcalinidad en la salida de esta zona en ambos reactores R2 y R3, lo cual se atribuye al aumento de las tasas de nitrificación.



**Figura 3.5.7. Variación de las alcalinidades en el influente y en los efluentes de los reactores R1, R2 y R3.**

Evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales

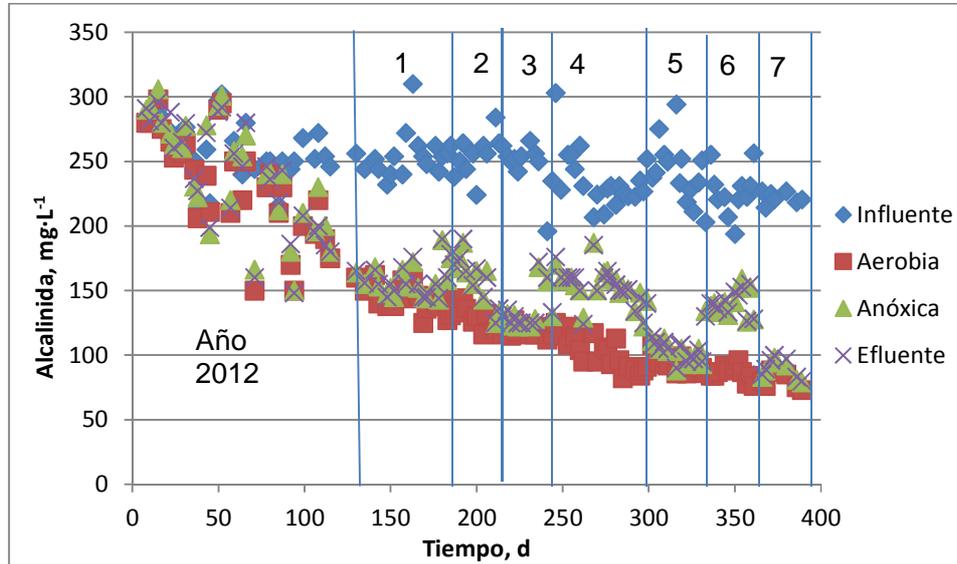


Figura 3.5.8. Variación de las alcalinidades en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.

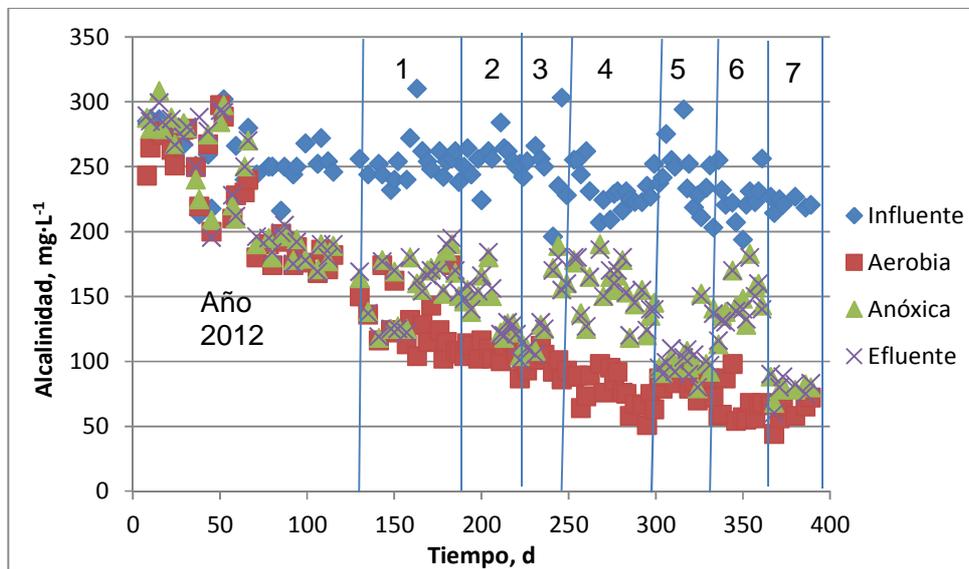


Figura 3.5.9. Variación de las alcalinidades en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.

En la Tabla 3.5.6 se presentan los promedios y las desviaciones estándar de las alcalinidades en el influente y en el efluente del reactor R1. Se observa la disminución de la alcalinidad en todas las fases experimentales en alrededor de 108 mg CaCO<sub>3</sub>/L y no hubo en efecto estadísticamente significativo de las diferentes formas de operación sobre esta disminución, lo cual es en concordancia de lo observado analizando el proceso de nitrificación.

En las Tablas 3.5.7 y 3.5.8 se presentan los promedios de las alcalinidades en el influente y en los efluentes de cada zona de los reactores R2 y R3. Se observa que los promedios de las alcalinidades en la salida de las zonas aerobias de los reactores R2 y R3 son menores comparados con el promedio calculado en el influente, en 109-150 mg CaCO<sub>3</sub>/L para R2 y en 124-160 mg/L para R3. Es ligeramente mayor la disminución en la zona aerobia de R3 comparada con la observada en la zona aerobia de R2. La disminución de la alcalinidad se atribuye al proceso de nitrificación en el cual se consume alcalinidad. Si se relaciona la alcalinidad consumida promedio y la cantidad de N-NH<sub>4</sub> removida promedio en R1, R2 y R3, se obtiene un consumo de alcalinidad de 4.1, 5.1 y 5.4 g de alcalinidad por g de N-NH<sub>4</sub> removido respectivamente. Se observa que este consumo es menor que el teórico de 7 g de alcalinidad por g de N-NH<sub>4</sub> removido (Von, 2007), lo cual se puede atribuir a una desnitrificación que sucede en las biopelículas de la zona aerobia simultáneamente con el proceso de nitrificación.

Analizando los promedios de las alcalinidades en las salidas de las zonas anóxicas en R2 y R3, presentados en las Tablas 3.5.7 y 3.5.8, se observa que estos son ligeramente mayores que las calculadas en las salidas de las zonas aerobias, en 9-53 y en 16-80 mg CaCO<sub>3</sub>/L para los reactores R2 y R3 respectivamente. En las Fases 2, 4 y 6 se aplicó inyección de agua residual cruda a la zona anóxica, el incremento de la alcalinidad en la zona anóxica es de 35 a 53 mg CaCO<sub>3</sub>/L en la zona anóxica de R2 y de 47 a 80 mg CaCO<sub>3</sub>/L en la zona anóxica de R3. En las Fases 1, 3, 5 y 7 no hubo inyección y se observa que el incremento de la alcalinidad en la zona anóxica es menor, de 7 a 13 mg CaCO<sub>3</sub>/L en la zona anóxica de R2 y de 16 a 24 mg CaCO<sub>3</sub>/L en la zona anóxica de R3. La diferencia entre las fases sin y con inyección de agua cruda se atribuye a la introducción de alcalinidad con el agua inyectada a las zonas anóxicas.

Con base en los promedios de los nitratos y nitritos determinados en las salidas de la zona aerobia y la producción teórica de alcalinidad en el proceso de la desnitrificación de 3.57 mg de CaCO<sub>3</sub> por cada mg de nitrato reducido, se calcula una formación de alcalinidad de 1 a 9 mg CaCO<sub>3</sub>/L en la zona anóxica de R2 y de 6 a 13 en la zona anóxica de R3. Los valores reales de las cantidades de alcalinidad formada durante las fases experimentales sin inyección de agua residual cruda a las zonas anóxicas, fueron ligeramente mayores, entre 7 y 13 mg CaCO<sub>3</sub>/L para R2, y entre 16 y 24 mg CaCO<sub>3</sub>/L para R3. Estos valores son muy pequeños comparados con la desviación estándar de la alcalinidad (7-22 mg CaCO<sub>3</sub>/L) por lo cual no se puede hacer una comparación precisa de las producciones de alcalinidad por la desnitrificación en las zonas anóxicas.

**Tabla 3.5.6. Promedios de las alcalinidades totales determinadas en el influente y efluente del reactor R1.**

Días	Período	Alcalinidad total (mg CaCO <sub>3</sub> /L) en R1	
		Influente	Efluente
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	254±19	143±22
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	251±12	139±21
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	253±21	128±28
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	235±21	135±18
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	245±22	137±19
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	225±19	124±28
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	222±5	119±7

**Tabla 3.5.7. Promedios de las alcalinidades totales determinadas en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2.**

Días	Período	Alcalinidad total (mg CaCO <sub>3</sub> /L) en R2			
		Influente	Aerobia	Anóxica	Efluente
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	254±19	145±11	154±9	156±10
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	251±12	133±9	168±14	169±14
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	253±21	120±5	133±15	134±15
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	235±21	102±13	152±15	152±15
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	245±22	94±6	102±7	103±7
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	225±19	86±6	140±10	140±10
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	222±5	81±6	88±8	90±8

**Tabla 3.5.8. Promedios de las alcalinidades totales determinadas en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3.**

Días	Período	Alcalinidad total (mg CaCO <sub>3</sub> /L) en R3			
		Influyente	Aerobia	Anóxica	Efluyente
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	254±19	130±20	154±22	153±22
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	251±12	115±20	162±17	165±18
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	253±21	103±10	123±18	123±18
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	235±21	79±14	155±21	156±20
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	245±22	85±7	101±17	102±17
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	225±19	67±14	147±19	144±18
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	222±5	61±9	79±6	80±10

Un aspecto importante para analizar el proceso de desnitrificación en las zonas anóxicas de los reactores R2 y R3 es la disponibilidad de materia orgánica necesaria para el funcionamiento de las bacterias desnitrificantes. Considerando un requerimiento de 3.71 mg de DQO por g de nitratos y nitritos reducidos, se calcula que en el agua que entra a las zonas anóxicas debe haber alrededor de 18 mg/L de DQO. La DQO promedio en la entrada a las zonas anóxicas fue en promedio de 120 mg/L y 79 mg/L para los reactores R2 y R3 respectivamente, sin embargo no toda la DQO es fácilmente biodegradable. Para evaluar la fracción biodegradable se podrían considerar los promedios de la DBO<sub>5</sub> en las entradas a las zonas anóxicas que fueron de 43 y 34 mg/L para los reactores R2 y R3. Si se asume que la mitad de la DBO<sub>5</sub> representa la materia orgánica fácilmente degradable se podría decir que en la zona anóxica hubo suficiente materia orgánica biodegradable para cubrir la demanda de las bacterias desnitrificantes. Sin embargo, se sabe que la materia orgánica fácilmente degradable en efluentes de procesos biológicos puede ser menor de la mitad de los valores de DBO<sub>5</sub>, por lo cual pudo haber habido un pequeño déficit en la zona de desnitrificación, lo cual se confirma con el hecho de que en los efluentes de las zonas anóxicas se determinaron promedios de nitratos y nitritos entre 0.2 y 1.2 mg/L en R2, y entre 0.9 y 1.4 mg/L en R3, es decir no se redujeron todos los nitratos y nitritos que ingresaron a las zonas anóxicas. Con la inyección de agua residual cruda a las zonas anóxicas se determinaron concentraciones de nitratos y nitritos en el efluente entre 0.2 y 0.9 mg/L en R2 y entre 0.3 y 0.7 mg/L en el R3. Es decir, el efecto de la inyección de agua residual cruda como fuente de materia orgánica fácilmente degradable es muy pequeño, comparado con el efecto negativo que esto causa sobre la concentración de N-NH<sub>4</sub> en el efluente ya que el agua residual también introduce N-NH que no se remueve en la zona anóxica.

### 3.6 Remoción de nitrógeno total

En las Figuras 3.6.1, 3.6.2 y 3.6.3 se presentan las concentraciones del nitrógeno total (NT) en los influentes y efluentes de los reactores R1, R2 y R3 respectivamente durante todo el período de operación, desde el arranque, hasta el final de este estudio. Como ya se mencionó, la evaluación correspondiente a este proyecto empezó el día 152 desde el arranque (1 de febrero de 2013), sin embargo los reactores se operaron durante el mes de enero y el día 10 de enero de 2013, transcurridos 130 días desde el arranque, se identificó claramente el proceso de nitrificación en los tres reactores, por lo cual la evaluación de la fase experimental 1 tuvo una duración mayor de 30 días, desde el día 130 hasta el día 178. La fase experimental 2 abarcó los días 180-206, la fase 3 los días 211-241, la fase 4 los días 244-299, la fase 5 los días 302-331, la fase 6 los días 333-361, la fase 7 los días 366-389.

En las figuras se indican los períodos de las siete fases experimentales. Las concentraciones del NT en el agua residual cruda son similares a las concentraciones del NTK. La variación de la concentración del NT en el influente fue desde 31 hasta 74 mg L<sup>-1</sup> durante el período de evaluación, con un promedio de 44.9±7.1 mg L<sup>-1</sup>.

Los promedios de la concentración del NT en el influente y en los efluentes se presentan en la Tabla 3.6.1 para cada fase experimental. Se puede observar que en el reactor R1 la concentración promedio más baja de NT (de 12.5±2.3 mg/L) se obtuvo en la Fase 4 (Qr/Q=100%, 14 rpm). En las Fases 3, 4 y 7 en el reactor R1 se aplicaron las mismas condiciones de operación (Qr/Q=100%, 14 rpm), sin embargo la concentración promedio del NT obtenida en la Fase 3 fue mayor (de 15.1±1.7 mg/L) que los promedios determinados en Fase 4 (de 12.5±2.3 mg/L) y Fase 7 (de 13.5±1.5 mg/L). La concentración promedio del NT en la Fase 6 (de 13.1±4.0 mg/L) en la cual se eliminó la recirculación y la velocidad de rotación se conservó de 14 rpm, fue muy similar a la obtenida en Fase 7. El incremento de la velocidad de rotación de 7 a 14 rpm (de Fase 2 a Fase 3) no causó una disminución de la concentración promedio del NT en la Fase 3. Sin embargo, al disminuir la rotación de 14 a 7 rpm de Fase 4 a Fase 5 se observó un incremento de la concentración del NT en el efluente, de 12.5±2.3 (Fase 4) a 14.8±3.0 mg/L (Fase 5). En este efecto pudo haber influido ligeramente y el paro de la recirculación en Fase 5. De fase 5 a Fase 6 se incrementó la recirculación de 7 a 14 y disminuyó ligeramente el NT en el efluente, siendo el promedio de NT en Fase 6 de 13.1±4.0 mg/L. En ambas fases, 5 y 6, se trabajó sin recirculación. El cambio de Fase 6 a Fase 7 consistió en aplicar la recirculación en Fase 7 y se puede observar que las concentraciones promedio de NT en el efluente fueron similares, no hubo una mejora en la remoción por la recirculación.

Las concentraciones promedio del NT obtenidas en el efluente del reactor R2 fueron menores que las determinadas en el efluente del R1 y las determinadas en el efluente del R3 fueron menores de las determinadas en los efluentes de los reactores R1 y R2. Comparando los valores promedio de las concentraciones del NT determinados en los efluentes de los tres reactores R1, R2 y R3 con los establecidos para descarga en las NOM-001-SEMARNAT-1996, con todos los reactores se cumplen los límites máximos permisibles (LMP) establecidos para NT para las categorías de cuerpos receptores A y B (40 y 60 mg/L como promedio mensual y promedio diario respectivamente) se ve que los tres reactores permiten cumplir la Norma. El LMP para la categoría C es de 15 y 25 mg/L como promedio mensual y promedio diario respectivamente. Este LMP pudo

ser alcanzado en el reactor R1 en las condiciones de operación durante este estudio y para las concentraciones iniciales de NT del agua residual de  $44.6 \pm 7.0$  mg/L. De la Tabla 3.6.1 se observa que con R2 y R3 se pueden alcanzar LMP más estrictos, de 8-12 mg/L con R2 y de 5-9 mg/L con R3.

En la NOM-003-SEMARNAT-1997 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público no se establecen LMP para NT y PT. Para reúsos industriales es muy frecuente la necesidad de remover el NT para alcanzar LMP más estrictos que los establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Cuando el agua regenerada se usa en recarga de acuíferos, hay una restricción más estrictas del contenido de NT. Por ejemplo, las regulaciones de California restringen el NT a menos de 5 mg/L, de Florida a menos de 10 mg/L. El Decreto Royal 1620/2007 de España establece:  $NT < 10$  mgN/L y  $NO_3 < 25$  mg  $NO_3$ /L. Según NOM-014-CONAGUA-2003 referente a este tema, se establece que se debe cumplir la NOM-127-SSA1-1994 referente a agua potable en la cual se establece que los Nitratos (como N) deben ser menos de 10 mg/L, los Nitritos (como N) menos de 0.05 mg/L y el Nitrógeno amoniacal (como N) debe ser menos de 0.50 mg/L, no se especifica un LMP para NT. El reactor R3 permite cumplir con la restricción de  $NT < 10$  mg/L y  $N-NO_3 < 10$  mg  $NO_3$ /L, pero no alcanzó  $N-NH_4 < 0.5$  mg/L.

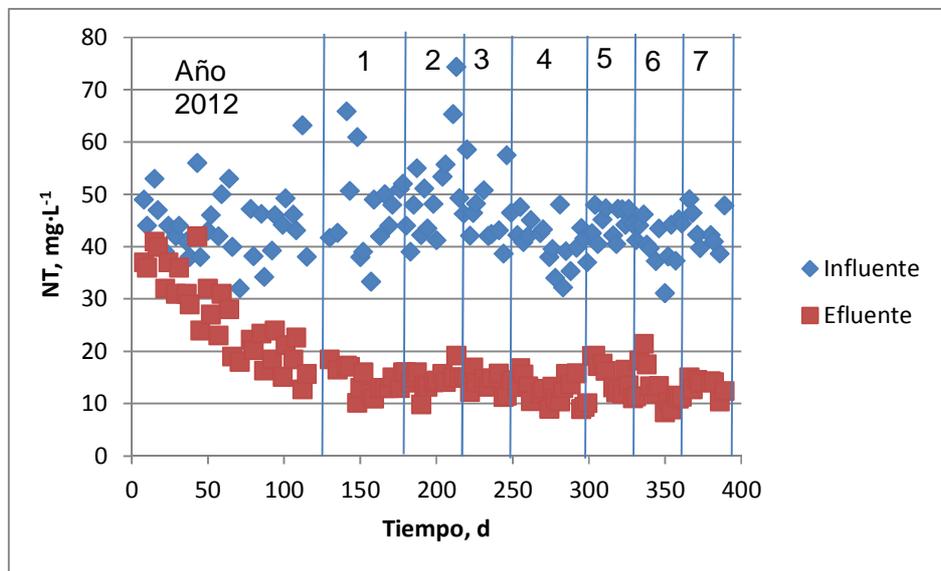


Figura 3.6.1. Variación de las concentraciones del NT en el influente y efluente del reactor R1.

Evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales

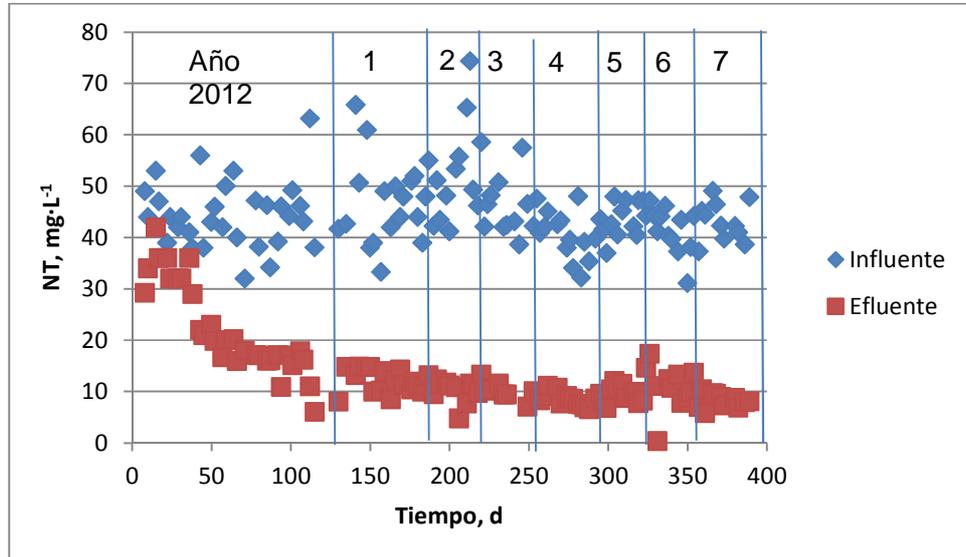


Figura 3.6.2. Variación de las concentraciones del NT en el influente y efluente del reactor R2.

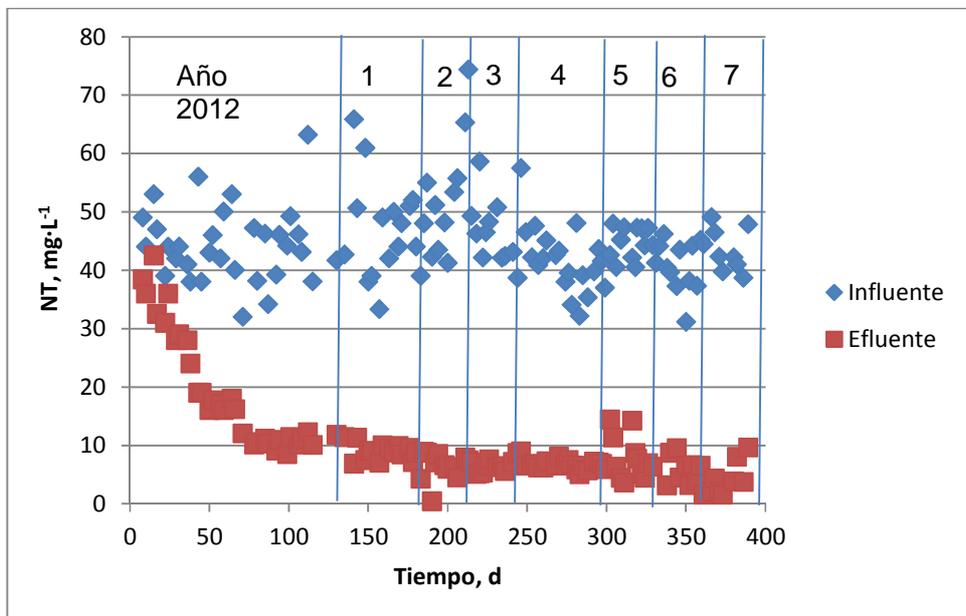
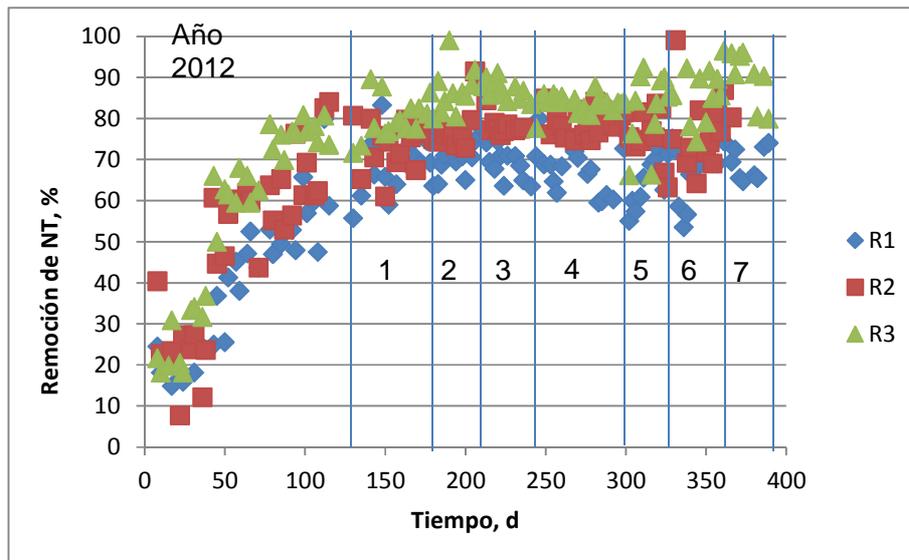


Figura 3.6.3. Variación de las concentraciones del NT en el influente y efluente del reactor R3.

**Tabla 3.6.1 Valores de la concentración del NT en el influente y los efluentes de R1, R2 y R3.**

Días	Fase experimental	Influente	Efluente de		
			R1	R2	R3
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	47.2±8.6	14.3±2.5	12.2±2.4	9.1±1.6
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	47.4±5.8	14.2±1.7	10.7±2.2	6.4±2.6
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	50.8±10.3	15.1±1.7	10.5±1.5	6.5±1.0
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	41.6±5.5	12.5±2.3	8.5±1.3	6.8±0.9
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	44.4±2.8	14.8±3.0	10.2±3.9	7.8±3.7
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	41.0±4.4	13.1±4.0	10.0±2.7	5.4±2.6
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	43.4±3.9	13.5±1.5	8.4±1.0	4.4±2.9

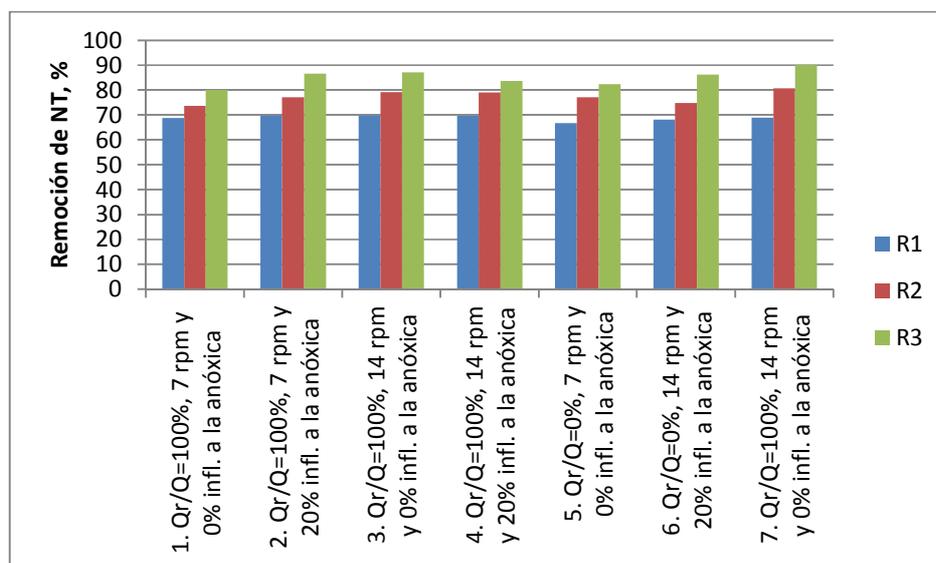
En la Figura 3.6.4 se presenta la variación de la remoción del NT en los tres reactores durante la evaluación. Se observa que cuando empezó esta evaluación, los reactores ya habían alcanzado remociones mayores de 60%. En la Tabla 3.6.2 se presentan los promedios de las remociones para cada fase experimental en los tres reactores. En la Figura 3.6.5 se ilustra comparativamente la remoción promedio de NT obtenida en los tres reactores en las diferentes fases experimentales.



**Figura 3.6.4. Remoción del NT para los reactores R1, R2 y R3.**

**Tabla 3.6.2 Remociones promedio de NT en los reactores R1, R2 y R3.**

Días	Fase experimental	Remoción de NT, %		
		R1	R2	R3
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	68.8±7.3	73.6±5.9	80.0±5.1
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	69.8±4.3	77.1±5.1	86.6±5.5
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	69.7±4.3	79.1±3.8	87.0±2.3
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	69.6±6.7	79.0±3.2	83.6±2.2
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	66.7±6.9	77.1±8.7	82.4±8.9
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	68.1±8.1	74.8±6.9	86.2±7.1
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	68.9±3.9	80.6±1.8	90.0±6.5



**Figura 3.6.5. Comparación de las remociones promedio de NT obtenidos en los tres reactores del sistema experimental durante las diferentes fases experimentales.**

Como se puede observar en la Tabla 3.6.3 y Figura 3.6.5, las remociones promedio de NT en el reactor R1 fueron muy similares en todas las fases experimentales, de 66.7-69.7%, siendo la desviación estándar de 3.9-8.1%. En las Fases 3, 4 y 7 en el reactor R1 se aplicaron las mismas condiciones de operación (Qr/Q=100%, 14 rpm), las remociones promedio el NT obtenidas fueron similares: en la Fase 3 de 69.7±4.3, en Fase 4 de 69.6±6.7 y en Fase 7 de 68.9±3.9. La remoción

promedio del NT en la Fase 6 (de  $68.1 \pm 8.1$ ) en la cual se eliminó la recirculación y la velocidad de rotación se conservó de 14 rpm, fue muy similar a la obtenida en Fase 7. El incremento de la velocidad de rotación de 7 a 14 rpm (de Fase 2 a Fase 3) no causó un aumento de la remoción promedio del NT en la Fase 3. Sin embargo, al disminuir la rotación de 14 a 7 rpm de Fase 4 a Fase 5 se observó una disminución ligera de la remoción promedio del NT, de  $69.6 \pm 6.7$  (Fase 4) a  $66.7 \pm 6.9\%$  (Fase 5). En este efecto pudo haber influido ligeramente y el paro de la recirculación en Fase 5. De Fase 5 a Fase 6 se incrementó la recirculación de 7 a 14 rpm y aumentó ligeramente la remoción del NT, siendo el promedio de la remoción del NT en Fase 6 de  $68.1 \pm 8.1\%$ . En ambas fases, 5 y 6, se trabajó sin recirculación. El cambio de Fase 6 a Fase 7 consistió en aplicar la recirculación en Fase 7 y se puede observar que las remociones promedio en ambas fases fueron similares, no hubo una mejora en la remoción por la recirculación. En forma general se concluye que los cambios de la velocidad de rotación del lecho de 7 a 14 y la recirculación del efluente no provocaron cambios estadísticamente significativos en la remoción del NT en el reactor R1. Cabe mencionar que en estudios previos realizados al reactor R1, la implementación de recirculación sí provocaba un aumento en la remoción del NT. En el estudio actual se tenía una variación alta de la concentración inicial del NTK en el agua residual, la cual causó altas desviaciones estándar de las remociones del NT; estas desviaciones no permitieron observar los efectos de las variables sobre este parámetro de respuesta.

Las remociones promedio del NT obtenidas en el reactor R3 fueron mayores que las determinadas en los reactores R1 y R2. Las zonas aerobias de R3 y R1 son iguales, por lo que la mayor remoción se atribuye al proceso de desnitrificación en la zona anóxica periférica de R3, así como a un consumo adicional de N por la biomasa en la zona anóxica de R3. En el caso de R2, su zona aerobia es de menor volumen comparada con las zonas en R1 y R3, lo cual explica las menores remociones de NT determinadas en este reactor comparadas con las obtenidas en R3. Sin embargo, las remociones de NT en R2 son mayores que las determinadas en R1. Esto se atribuye básicamente al proceso de desnitrificación realizado en la zona anóxica (ubicada debajo de la aerobia) en el reactor R2.

Las condiciones de operación en R2 y R3 fueron iguales durante las fases 3 y 7. Se observa, sin embargo, que en ambos reactores se determinaron remociones ligeramente mayores en la Fase 7 comparadas con las obtenidas en fase 3. Por ejemplo, en R2 las remociones promedio de NT fueron de 79.1 y 80.6% en fase 3 y 7 respectivamente. En R3 la remoción determinada en Fase 7 fue de 90.0%, en 3.0 % mayor que la remoción en Fase 3 (de 87.0%). Esto se puede atribuir al incremento paulatino de las bacterias nitrificantes en el consorcio microbiano en las zonas aerobias de los reactores con el transcurso del tiempo, lo cual mejoró en el tiempo la remoción del NTK en esta zona. La desnitrificación se realizaba básicamente en la zona anóxica de manera que el aumento de la remoción del NTK se convertía en aumento de la remoción de NT.

El desarrollo de la biomasa nitrificante en el tiempo explica y el hecho de que las remociones en R2 y R3 fueron mayores durante la Fase 2 en la cual se inyectó 20% del influente a la zona anóxica comparadas con las obtenidas en la Fase 1 cuando no se inyectaba agua residual cruda a la zona anóxica (las demás condiciones fueron iguales en fases 1 y 2).

En las Fases 3 y 4 se observó que la inyección de agua cruda en la zona anóxica no provocó cambios en la remoción de NT en el reactor R2, pero sí provocó una disminución de la remoción del NT en 3.4% en el reactor R3. Esta disminución es estadísticamente significativa ya que es

mayor que la desviación estándar de los resultados (de 2.3%). Cabe mencionar que en la Fase 3 ya se tenían remociones de NT altas, de 79 y 87% en R2 y R3 respectivamente, mientras que en la Fase 1 las remociones promedio de NT fueron menores, de 74 y 80% en R2 y R3 respectivamente.

Comparando las Fases 5 y 6, se observa que la introducción de agua residual a la zona anóxica provocó una disminución de la remoción del NT muy ligera en un 2% en R2 que no es estadísticamente significativa y un aumento en 3.8% en R3 que tampoco es estadísticamente significativo. La desviación estándar en estas dos fases fue alta, de 6.9-8.9%.

La diferencia entre los efectos en 3 y 4 y en 5 y 6 es que en el último caso hubo un incremento de la velocidad de rotación del lecho que pudo haber contrarrestado una reducción de la remoción del NT. Resumiendo, se puede concluir que la inyección del 20% del influente a las zonas anóxicas de los reactores R2 y R3 no tiene un efecto positivo sobre la remoción del NT en los reactores, inclusive ocasionalmente puede disminuir la remoción del NT.

El efecto de la recirculación del efluente sobre la remoción del NT fue ya demostrado en estudios previos. En este estudio al comparar la Fase 4 y 6 se observa que en R2 la remoción fue en 4.2% mayor con la recirculación de 100% comparado con la fase sin recirculación. En R3 no se observó este efecto, la diferencia no fue estadísticamente significativa.

El efecto de la rotación del lecho se puede observar comparando las Fases 2 y 4 en las cuales se tenían velocidades de 7 y 14 rpm respectivamente, las demás condiciones de operación fueron iguales. En el reactor R2 la remoción promedio del NT en la Fase 4 (14 rpm) fue en un 2.0% mayor que la determinada en la Fase 2 (7 rpm). En R3 fue al revés, la remoción promedio del NT en la Fase 4 (14 rpm) fue en un 3.0% menor que la determinada en la Fase 2 (7 rpm). Las diferencias en ambos casos no son estadísticamente significativas ya que las desviaciones estándar de los resultados fueron de 2.2-5.5%. Se evitará la comparación de las Fases 1 y 3 que indica un mayor efecto del aumento de la velocidad rotacional ya que, como se comentó, en la Fase 1 los reactores R2 y R3 todavía no habían llegado a altas remociones de NT. Resumiendo el incremento de la velocidad rotacional de 7 a 14 rpm no influyó significativamente sobre la remoción del NT.

En resumen, en el reactor R2 el efecto del aumento de la rotación del lecho de 7 a 14 rpm sobre la remoción del NT (aumento en 2.0%) fue menor que el efecto de la recirculación del efluente (aumento en 4.2%). La inyección de agua cruda en la zona anóxica de este reactor no provocó cambios en la remoción del NT.

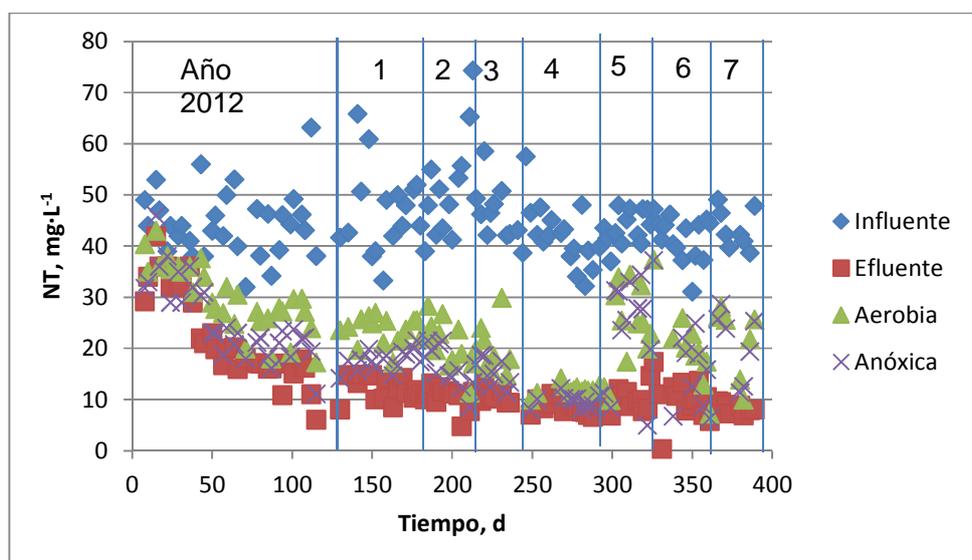
En el reactor R3 no se observó efecto positivo del aumento de la rotación del lecho de 7 a 14 rpm, ni de la recirculación sobre la remoción del NT. La inyección de agua cruda en la zona anóxica de este reactor puede provocar disminución de la remoción del NTK (en un 3.4%).

Como se puede observar en la Figura 3.6.5 la mayor remoción promedio de NT, de 90% fue obtenida en el reactor R3 durante la última fase experimental ( $Q_r/Q=100\%$ , rotación con una velocidad de 14 rpm y sin inyección de agua residual cruda a la zona anóxica). Altas remociones promedio de NT (86-87%) se obtuvieron en las Fases 2, 3 y 6. Remociones entre 80 y 84% se obtuvieron en las Fases 1, 4 y 5.

En R2 la mayor remoción de NT, de 81% se obtuvo también en la última fase experimental. En el resto de las fases experimentales las remociones promedio fueron entre 74 y 79%. Las remociones fueron de 79% en las Fases 3 y 4, en las dos con 100% de recirculación y velocidad de rotación de 14%.

En R1 remociones promedio de NT de 70% se presentaron en Fases 2, 3 y 4, todas con 100% de recirculación y con velocidades de rotación de 7 rpm en Fase 2 y con 14 rpm en las Fases 3 y 4. Remociones promedio de 69% se determinaron en las Fases 1 y 7, con 100% de recirculación en ambas y con velocidades de rotación de 7 y 14 rpm respectivamente. Remociones de 67 y 68% se obtuvieron en las Fases 5 y 6 en las cuales no hubo recirculación y las velocidades de rotación de 7 y 14 rpm respectivamente.

Los resultados del seguimiento de la concentración del NT en muestras tomadas de los puntos después de la zona aerobia y anóxica en los reactores R2 y R3 se presentan en las Figuras 3.6.6 y 3.6.7 respectivamente. Se observa que es mayor la remoción del NT en la zona aerobia de los reactores comparada con la de la zona anóxica y que es muy pequeña la contribución de la zona de sedimentación. Los promedios y desviaciones estándar de la concentración del NTK para cada uno de los períodos experimentales se presentan en las Tablas 3.6.3 y 3.6.4. Se observa que en el reactor R3 las concentraciones del NT en los efluentes de la zona anóxica y de la zona de sedimentación son muy similares. En el reactor R2 la diferencia es más grande. El cálculo de las cantidades de NT removidas en cada zona de los reactores y el porcentaje de contribución de cada zona en la cantidad total de NT removido se presenta en las Tablas 3.6.5 y 3.6.6.



**Figura 3.6.6 Variación de la concentración del NT en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.**

Evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales

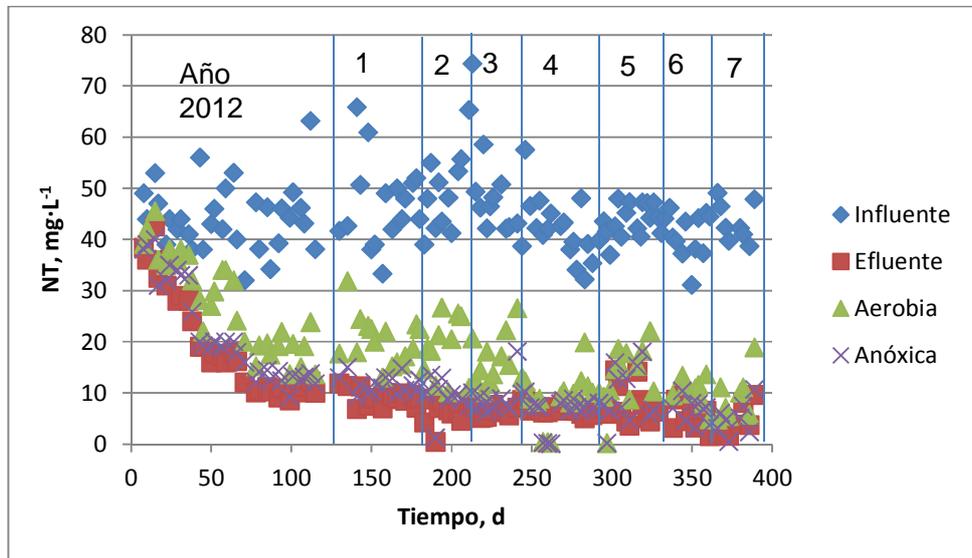


Figura 3.6.7. Variación de la concentración del NT en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.

Tabla 3.6.3. Concentraciones de NT en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2.

Días	Período	NT (mg L <sup>-1</sup> ) en R2			
		Influente	Aerobia	Anóxica	Efluente
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	47.2±8.6	23.5±2.7	17.8±2.0	12.2±2.4
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	47.4±5.8	22.1±3.7	17.4±3.2	10.7±2.2
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	50.8±10.3	18.9±5.0	14.6±3.2	10.5±1.5
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	41.6±5.5	11.9±1.1	9.8±1.2	8.5±1.3
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	44.4±2.8	27.6±6.4	27.0±8.8	10.2±3.9
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	41.0±4.4	18.5±5.6	15.0±6.8	10.0±2.7
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	43.4±3.9	21.6±6.9	21.0±6.8	8.4±1.0

**Tabla 3.6.4. Concentraciones de NT en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3.**

Días	Período	NT (mg L <sup>-1</sup> ) en R3			
		Influyente	Aerobia	Anóxica	Efluente
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	47.2±8.6	19.9±4.8	11.7±1.8	9.1±1.6
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	47.4±5.8	19.5±5.6	9.7±3.3	6.4±2.6
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	50.8±10.3	16.1±5.0	8.8±3.1	6.5±1.0
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	41.6±5.5	8.7±4.8	6.3±3.2	6.8±0.9
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	44.4±2.8	15.6±4.2	11.0±5.0	7.8±3.7
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	41.0±4.4	10.3±2.7	6.5±2.3	5.4±2.6
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	43.4±3.9	9.3±4.7	5.0±3.2	4.4±2.9

**Tabla 3.6.5. Cantidad removida de NT y porcentaje de contribución de cada zona del R2.**

Días	NT removido, mg L <sup>-1</sup>				Porcentaje de contribución al total removido del NTK		
	Aerobia	Anóxica	Sedi-mentación	Total	Aerobia	Anóxica	Sedi-mentación
130- 178	23.7	5.8	5.5	35.0	68	16	16
180- 206	25.3	4.6	6.8	36.7	69	13	18
211- 241	31.8	4.3	4.1	40.3	79	11	10
244- 299	29.8	2.1	1.3	33.2	90	6	4
302- 331	16.8	0.7	16.8	34.2	49	2	49
333- 361	22.4	3.5	5.0	31.0	72	11	16
366- 389	21.8	0.6	12.6	35.0	62	2	36

**Tabla 3.6.6. Cantidad removida de NT y porcentaje de contribución de cada zona del R3.**

Días	NT removido, mg L <sup>-1</sup>				Porcentaje de contribución al total removido del NTK		
	Aerobia	Anóxica	Sedi- mentación	Total	Aerobia	Anóxica	Sedi- mentación
130- 178	27.3	8.2	2.5	38.1	72	22	7
180- 206	27.9	9.7	3.4	41.0	68	24	8
211- 241	34.6	7.3	2.3	44.3	78	17	5
244- 299	33.0	2.4	-0.5	34.9	95	7	-1
302- 331	28.8	4.6	3.2	36.6	79	13	9
333- 361	30.6	3.8	1.1	35.5	86	11	3
366- 389	34.2	4.3	0.6	39.0	87	11	2

En las Tablas 3.6.5 y 3.6.6 se observa que durante las primeras dos fases de evaluación la remoción del NT en las zonas aerobias fue de 68-69% del total removido en R2 y de 68-72 del total removido en R3. La zona anóxica en estas fases aportaba 13-16% en R2 y 22-24% en R3. La zona de sedimentación aportaba 16-18% en R2 y 7-8% en R3. Estas diferencias se deben a la configuración de los reactores, particularmente a la ubicación de la zona anóxica. En el caso de R2 la zona anóxica está localizada debajo de la aerobia y la zona periférica es enteramente para la sedimentación de los sólidos suspendidos que en su mayor parte están constituidos por partículas de la biomasa desprendida del lecho, por lo cual contienen nitrógeno. Es por esto la mayor contribución de la zona de sedimentación de R2 a la remoción total del NTK y de allí a la remoción del NT. En el caso de R3 la zona anóxica está ocupa parte de la zona periférica. En el lecho anóxico se atrapan partículas de la biomasa desprendida de la zona aerobia, por lo cual en la zona de sedimentación que está ubicada encima de la zona anóxica hay muy pocas partículas por remover. A partir de la Fase 3 la aportación de la zona anóxica disminuyó en ambos reactores a porcentajes entre 2 y 11% en R2 y entre 7 y 17% en R3.

En R2 la aportación de la zona aerobia fue alta durante las Fases 3 y 4 (79 y 90% respectivamente). En estas fases la recirculación se mantenía de 100%, la rotación del lecho fue con una velocidad de 14 rpm y en la Fase 4 se inyectó un 20% del caudal del agua residual influente a la zona anóxica, mientras que en la Fase 3 no hubo tal inyección.

Durante la Fase 5 la aportación de la zona aerobia fue de solo 49%, también bajó la aportación de la zona anóxica a 2%, mientras que la aportación de la zona de sedimentación fue de 49%. Esto se debe a fayas en la aireación del reactor sucedidas desde la fase anterior que provocaron anaerobiosis en la zona aerobia, cambios en el consorcio microbiano y desprendimiento de una gran cantidad de biomasa. Esto provocó afectaciones en la nitrificación que se reflejaron en el resultado obtenido durante la Fase 5 cuando ya se habían corregido los problemas de aireación y el proceso empezó a recuperarse, la recuperación de la degradación de materia orgánica fue más rápida, pero la recuperación de la nitrificación fue lenta y se reflejó en el resultado de la Fase 5.

Durante la Fase 6 y 7 la aportación de la zona aerobia en R2 ya fue alta, de 72 y 62% respectivamente. La aportación de la zona anóxica en estas fases fue de 11 y 2% respectivamente y permaneció alta la aportación de la zona de sedimentación, de 16 y 32% respectivamente.

En el R3 a partir de la Fase 3 aumentó la aportación de la zona aerobia en la remoción del NT (con promedios entre 78 y 95%), simultáneamente disminuyó la aportación de la zona anóxica (con promedios entre 7 y 17%) conservándose similar la aportación de la zona de sedimentación (entre 0 y 9%).

Las cantidades de NT removidos en la zona aerobia del reactor R2 fueron siempre menores comparadas con las cantidades removidas en la zona aerobia de R3, lo cual se explica con el menor volumen del lecho empacado en su zona aerobia y por ende menor cantidad de bacterias nitrificantes. Igual sucede con las cantidades removidas en las zonas anóxicas. En la zona de sedimentación de R2 se removían mayores cantidades de NT que en R3. Sin embargo, debido a que la aportación de las zonas de sedimentación en la remoción total del NT es relativamente pequeña, este hecho no representó un beneficio para la remoción de NT en R2. Finalmente las cantidades totales de NT removido en R3 fueron mayores que las determinadas en R2.

### 3.7 Remoción de fósforo total

En las Figuras 3.7.1, 3.7.2 y 3.7.3 se presentan las concentraciones del fósforo total (PT) en los influentes y efluentes de los reactores R1, R2 y R3 respectivamente durante todo el período de operación, desde el arranque, hasta el final de este estudio. Como ya se mencionó, la evaluación correspondiente a este proyecto empezó el día 152 desde el arranque (1 de febrero de 2013), sin embargo los reactores se operaron durante el mes de enero y el día 10 de enero de 2013, transcurridos 130 días desde el arranque, se identificó claramente el proceso de nitrificación en los tres reactores, por lo cual la evaluación de la fase experimental 1 tuvo una duración mayor de 30 días, desde el día 130 hasta el día 178. La fase experimental 2 abarcó los días 180-206, la fase 3 los días 211-241, la fase 4 los días 244-299, la fase 5 los días 302-331, la fase 6 los días 333-361, la fase 7 los días 366-389.

En las figuras se indican los períodos de las siete fases experimentales. La variación de la concentración del PT en el influente fue desde 5.5 hasta 12.1 mg L<sup>-1</sup> durante el período de evaluación, con un promedio de 8.8±1.7 mg L<sup>-1</sup>. Los promedios de la concentración del PT en el influente y en los efluentes se presentan en la Tabla 3.7.1 para cada fase experimental. Se puede observar que las concentraciones del PT en el influente fueron más altas durante las primeras tres fases comparadas con las determinadas en las últimas 4 fases. La variación de las concentraciones estuvo en el intervalo típico de concentraciones de PT en aguas residuales municipales.

Comparando los valores promedio de las concentraciones del PT determinados en los efluentes de los tres reactores R1, R2 y R3 (Tabla 3.7.1) con los límites máximos permisibles (LMP) establecidos para descarga en las NOM-001-SEMARNAT-1996, se observa que con todos los reactores se cumplen los LMP establecidos para PT para las categorías de cuerpos receptores A y B (20 y 30 mg/L como promedio mensual y promedio diario respectivamente). El LMP para la categoría C es de 5 y 10 mg/L como promedio mensual y promedio diario respectivamente. Este

LMP pudo ser alcanzado en los tres reactores en las últimas cuatro fases cuando las concentraciones promedio en el influente fueron de 7.7, 7.2, 7.3 y 8.0 mg/L. Durante la Fase 3, cuando la concentración en el influente fue de 9.8 mg/L, el LMP de 5 mg/L se pudo cumplir solo con el reactor R3. Durante las Fases 1 y 2, a concentraciones de fósforo en el influente de 10.3 y 11.1 mg/L no se pudo cumplir con el LMP de Categoría C con ninguno de los reactores.

En la NOM-003-SEMARNAT-1997 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público no se establecen LMP para NT y PT.

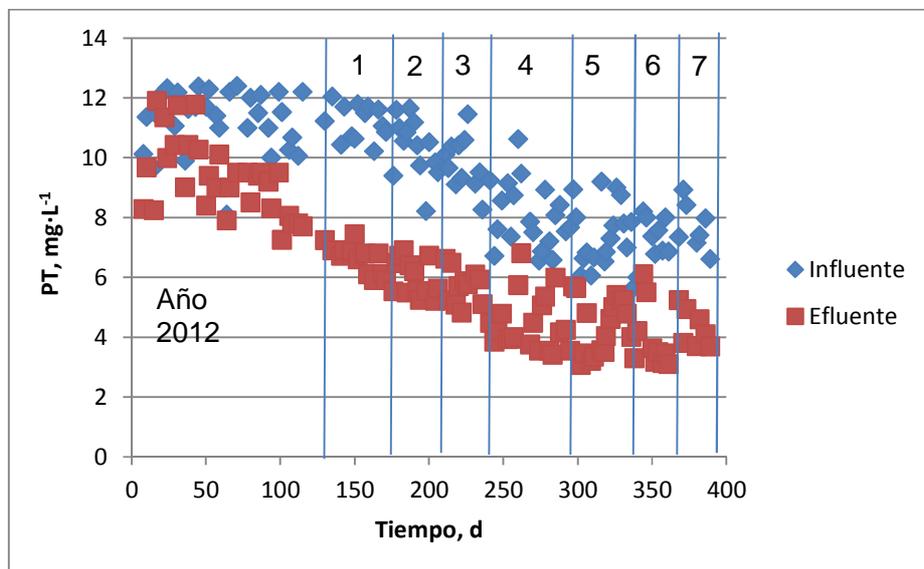


Figura 3.7.1. Variación de las concentraciones del PT en el influente y efluente del reactor R1.

Evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales

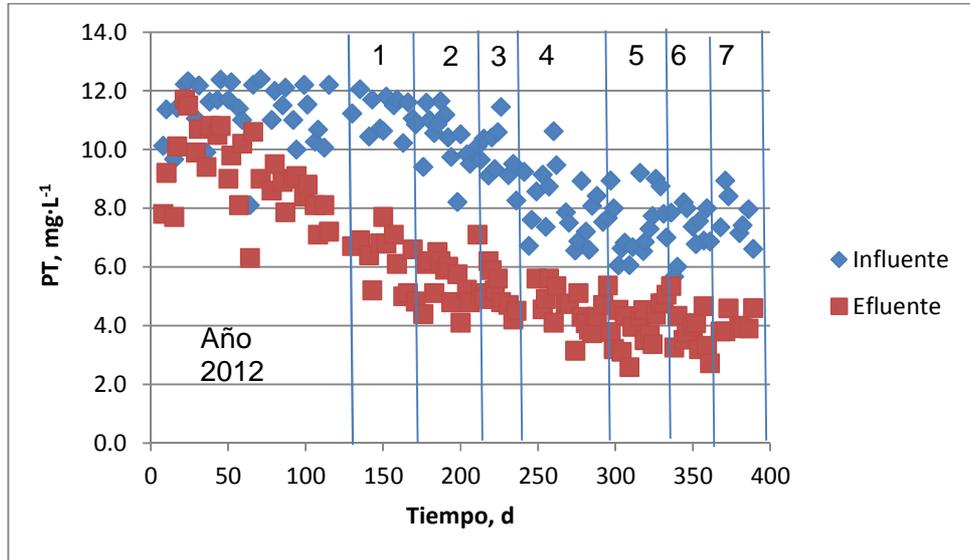


Figura 3.7.2. Variación de las concentraciones del PT en el influente y efluente del reactor R2.

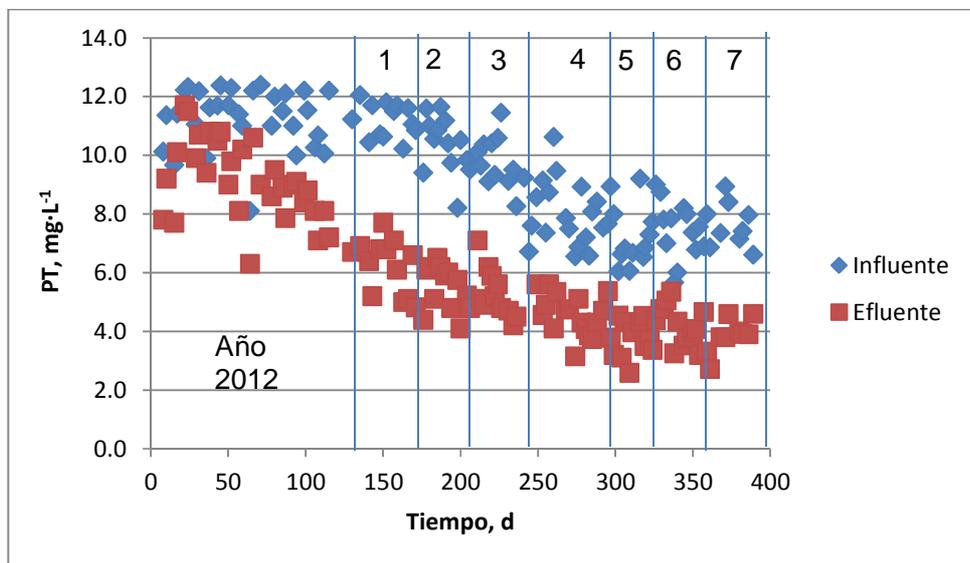
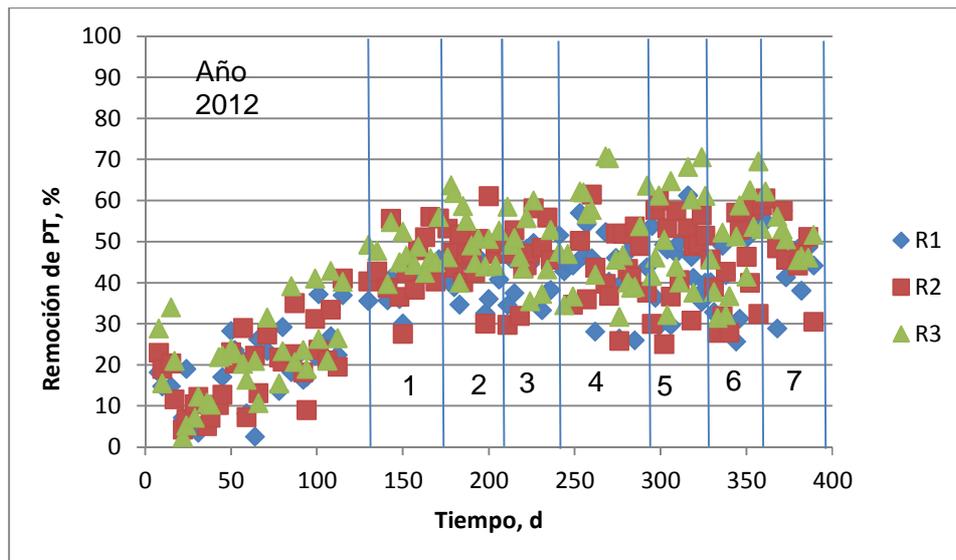


Figura 3.7.3. Variación de las concentraciones del PT en el influente y efluente del reactor R3.

**Tabla 3.7.1 Valores de la concentración del PT en el influente y los efluentes de R1, R2 y R3.**

Días	Fase experimental	Influente	Efluente de		
			R1	R2	R3
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	11.1±0.7	6.6±0.5	6.1±1.0	5.7±0.7
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	10.3±1.0	6.0±0.6	5.5±0.8	5.1±0.7
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	9.8±0.9	5.6±0.7	5.3±0.8	5.0±0.8
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	8.0±1.0	4.6±1.0	4.5±0.7	4.0±0.9
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	7.3±1.1	4.2±0.9	4.0±0.7	3.5±0.9
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	7.2±0.8	4.0±1.0	3.9±0.8	3.5±0.8
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	7.7±0.8	4.3±0.6	4.1±0.4	3.9±0.5

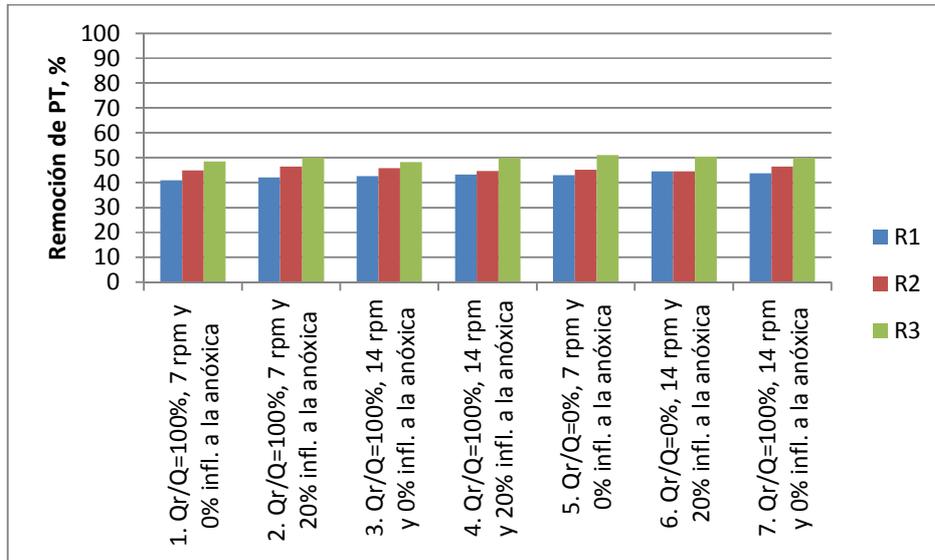
En la Figura 3.7.4 se presenta la variación de la remoción del PT en los tres reactores durante la evaluación. Se observa que cuando empezó esta evaluación, los reactores ya habían alcanzado remociones alrededor de 40%. En la Tabla 3.7.2 se presentan los promedios de las remociones para cada fase experimental en los tres reactores. En la Figura 3.7.5 se ilustra comparativamente la remoción promedio de PT obtenida en los tres reactores en las diferentes fases experimentales.



**Figura 3.7.4. Remoción del PT para los reactores R1, R2 y R3.**

**Tabla 3.7.2 Remociones promedio de PT en los reactores R1, R2 y R3.**

Días	Fase experimental	Remoción de PT, %		
		R1	R2	R3
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	40.9±4.7	44.9±8.4	48.5±6.1
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	42.0±5.7	46.4±7.8	50.1±6.7
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	42.5±6.1	45.8±8.8	48.3±7.8
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	43.2±9.3	44.7±10.3	49.9±11.9
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	42.9±8.5	45.2±10.1	51.0±13.4
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	44.5±11.7	44.6±12.6	50.4±12.4
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	43.8±9.1	46.4±8.3	49.9±4.0



**Figura 3.7.5. Comparación de las remociones promedio de PT obtenidos en los tres reactores del sistema experimental durante las diferentes fases experimentales.**

Como se puede observar en la Tabla 3.7.2 y Figura 3.7.5, las remociones promedio de PT en el reactor R1 fueron muy similares en todas las fases experimentales, de 40.9% en Fase 1 hasta 44.5% en Fase 4, siendo la desviación estándar entre 4.5 y 11.5%. En las Fases 3, 4 y 7 en el reactor R1 se aplicaron las mismas condiciones de operación (Qr/Q=100%, 14 rpm), las remociones promedio el PT obtenidas fueron similares: en la Fase 3 de 42.5±6.1%, en Fase 4 de

43.2±9.3% y en Fase 7 de 43.8±9.1%. La remoción promedio del PT en la Fase 6 (de 44.5±11.7) en la cual se eliminó la recirculación y la velocidad de rotación se conservó de 14 rpm, fue muy similar a la obtenida en Fase 7. El incremento de la velocidad de rotación de 7 a 14 rpm (de Fase 2 a Fase 3) no causó un aumento de la remoción promedio del PT en la Fase 3. Tampoco se observó un cambio al disminuir la rotación de 14 a 7 rpm de Fase 4 a Fase 5. De Fase 5 a Fase 6 se incrementó la recirculación de 7 a 14 rpm y aumentó ligeramente la remoción del PT, pero el aumento no es estadísticamente significativo ya que es mucho menor que las desviaciones estándar de las remociones determinadas en estas dos fases. En ambas fases, 5 y 6, se trabajó sin recirculación. El cambio de Fase 6 a Fase 7 consistió en aplicar la recirculación en Fase 7, se observa que el ligero descenso es en 1%, tampoco es estadísticamente significativo. En forma general se concluye que los cambios de la velocidad de rotación del lecho de 7 a 14 y la recirculación del efluente no provocaron cambios estadísticamente significativos en la remoción del PT en el reactor R1.

Analizando los efectos de las condiciones de operación en las diferentes fases de los reactores R2 y R3 se observa una diferencia entre los promedios de hasta 2%, cuando las desviaciones estándar fueron entre 4 y 13%, lo cual indica que la variación de la recirculación, la velocidad de la rotación del lecho y la inyección del agua en la zona anóxica no tuvieron un efecto significativo sobre la remoción del PT en estos reactores, hecho que se observó también en el reactor R1.

Las remociones promedio del PT calculadas para todo el período de evaluación fueron: de 42.8±8.0% en R1, de 45.3±9.4% en R2 y de 49.7±9.7% en R3. Se observa que la remoción promedio en R3 fue en un 6.9% mayor que la determinada en R1 y en un 4.4% mayor que la determinada en R2. La remoción promedio en R2 fue en un 2.5% mayor que la determinada en R1. El análisis estadístico indica que son estadísticamente significativas solo las diferencias entre R3 y R1 y que los resultados en R2 y R1 no tienen diferencias estadísticamente significativas.

Las zonas aerobias de R3 y R1 son iguales, pero el reactor R3 tiene una zona adicional (anóxica) por lo cual mayor cantidad de biomasa, a lo cual se atribuye la mayor remoción de PT en este reactor. El volumen total de las zonas aerobia y anóxica de R2 es ligeramente mayor comparado con el volumen de la zona aerobia de R2, pero no lo suficientemente más grande para que se reflejara en una diferencia significativa en las remociones de PT en estos reactores. Lo anterior indica que la cantidad de biomasa en los reactores es un factor que influye más sobre la remoción del fósforo que la recirculación del efluente, la velocidad de rotación del lecho o la inyección de agua residual cruda a la zona anóxica.

Los resultados del seguimiento de la concentración del PT en muestras tomadas de los puntos después de la zona aerobia y anóxica en los reactores R2 y R3 se presentan en las Figuras 3.7.6 y 3.7.7 respectivamente. Los promedios y desviaciones estándar de la concentración del PT para cada uno de los períodos experimentales se presentan en las Tablas 3.7.3 y 3.7.4. El cálculo de las cantidades de PT removidas en cada zona de los reactores y el porcentaje de contribución de cada zona en la cantidad total de PT removido se presenta en las Tablas 3.7.5 y 3.7.6.

Evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales

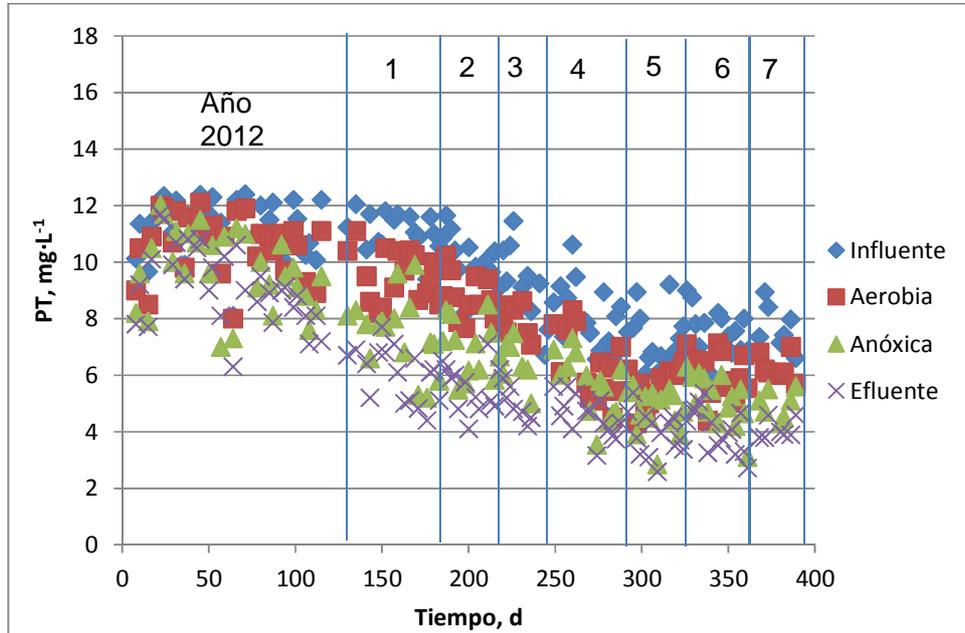


Figura 3.7.6 Variación de la concentración del PT en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.

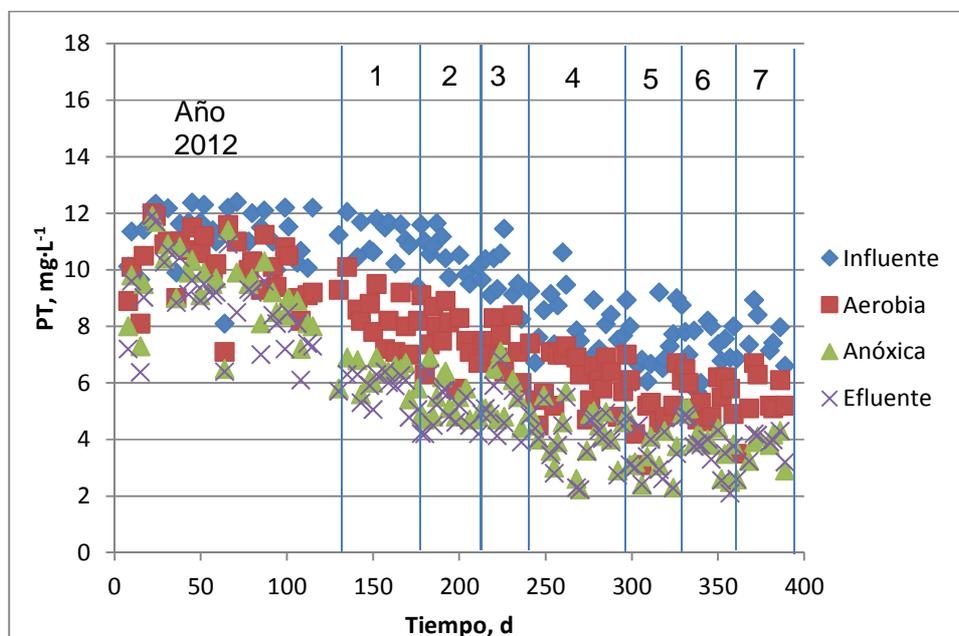


Figura 3.7.7. Variación de la concentración del PT en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.

**Tabla 3.7.3. Concentraciones de PT en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2.**

Días	Período	PT (mg L <sup>-1</sup> ) en R2			
		Influyente	Aerobia	Anóxica	Efluente
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	11.1±0.7	9.6±0.9	7.6±1.3	6.1±1.0
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	10.3±1.0	8.9±0.8	6.8±1.0	5.5±0.8
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	9.8±0.9	8.1±0.7	6.7±1.0	5.3±0.8
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	8.0±1.0	6.1±1.2	5.5±1.1	4.5±0.7
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	7.3±1.1	5.9±0.7	4.9±0.9	4.0±0.7
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	7.2±0.8	5.9±0.8	5.0±0.9	3.9±0.8
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	7.7±0.8	6.3±0.5	5.0±0.5	4.1±0.4

**Tabla 3.7.4. Concentraciones de PT en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3.**

Días	Período	PT (mg L <sup>-1</sup> ) en R3			
		Influyente	Aerobia	Anóxica	Efluente
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	11.1±0.7	8.4±0.9	6.2±0.6	5.7±0.7
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	10.3±1.0	7.6±1.0	5.5±0.8	5.1±0.7
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	9.8±0.9	7.2±0.7	5.3±0.8	5.0±0.8
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	8.0±1.0	6.1±0.9	4.1±1.0	4.0±0.9
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	7.3±1.1	5.2±1.1	3.7±1.0	3.5±0.9
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	7.2±0.8	5.2±0.8	3.7±0.8	3.5±0.8
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	7.7±0.8	5.7±0.7	3.8±0.5	3.9±0.5

**Tabla 3.7.5. Cantidad removida de PT y porcentaje de contribución de cada zona del R2.**

Días	PT removido, mg L <sup>-1</sup>				Porcentaje de contribución al total removido del PT		
	Aerobia	Anóxica	Sedimentación	Total	Aerobia	Anóxica	Sedimentación
130- 178	1.5	1.9	1.5	5.0	31	39	31
180- 206	1.4	2.1	1.3	4.8	29	44	26
211- 241	1.6	1.4	1.4	4.5	36	32	31
244- 299	1.9	0.7	1.0	3.5	53	19	28
302- 331	1.4	1.0	0.9	3.4	42	30	28
333- 361	1.2	0.9	1.1	3.3	38	29	33
366- 389	1.4	1.3	0.9	3.6	39	36	25

**Tabla 3.7.6. Cantidad removida de PT y porcentaje de contribución de cada zona del R3.**

Días	PT removido, mg L <sup>-1</sup>				Porcentaje de contribución al total removido del PT		
	Aerobia	Anóxica	Sedimentación	Total	Aerobia	Anóxica	Sedimentación
130- 178	2.7	2.2	0.5	5.4	50	41	9
180- 206	2.7	2.1	0.4	5.2	52	41	7
211- 241	2.5	1.9	0.3	4.7	54	40	6
244- 299	1.9	2.0	0.1	4.0	48	49	3
302- 331	2.2	1.5	0.1	3.8	57	40	3
333- 361	2.0	1.5	0.2	3.7	54	41	5
366- 389	2.0	1.9	0	3.8	53	49	0

Para el caso del reactor R2 se observa que durante las primeras tres fases experimentales la remoción del PT estaba distribuida equitativamente en las tres zonas, la aerobia, la anóxica y en la de sedimentación. En las siguientes cuatro fases se determinó una mayor aportación de la zona aerobia en la remoción total del PT, entre 38 y 53%, mientras que la aportación de la zona anóxica fue entre 19 y 36%, y de la zona de sedimentación entre 25 y 33%. Es decir fueron similares las aportaciones de las zonas anóxica y de sedimentación.

Para el caso del reactor R3 se observa que más de la mitad de la remoción del PT en el reactor se realiza en la zona aerobia (50-57%). La contribución de la zona anóxica en la remoción del PT es de 40-49%, mientras que la aportación de la zona de sedimentación es muy pequeña, de 6-9% durante las tres primeras fases experimentales y de 0-5% durante el resto del tiempo de evaluación.

### 3.8 Remoción de sólidos suspendidos totales

En las Figuras 3.8.1, 3.8.2 y 3.8.3 se presentan las concentraciones de los SST en los influentes y efluentes de los reactores R1, R2 y R3 respectivamente durante todo el período de operación, desde el arranque, hasta el final de este estudio. Como ya se mencionó, la evaluación correspondiente a este proyecto empezó el día 152 desde el arranque (1 de febrero de 2013), sin embargo los reactores se operaron durante el mes de enero y el día 10 de enero de 2013, transcurridos 130 días desde el arranque, se identificó claramente el proceso de nitrificación en los tres reactores, por lo cual la evaluación de la fase experimental 1 tuvo una duración mayor de 30 días, desde el día 130 hasta el día 178. La fase experimental 2 abarcó los días 180-206, la fase 3 los días 211-241, la fase 4 los días 244-299, la fase 5 los días 302-331, la fase 6 los días 333-361, la fase 7 los días 366-389.

En las figuras se indican los períodos de las siete fases experimentales. La variación de la concentración de los SST en el influente fue desde 80 hasta 467 mg L<sup>-1</sup> durante el período de evaluación, con un promedio de 141±61 mg L<sup>-1</sup>. Los promedios de la concentración de SST en el influente y en los efluentes se presentan en la Tabla 3.8.1 para cada fase experimental. Se puede observar que las concentraciones de los SST en el influente fueron más altas durante las primeras tres fases comparadas con las determinadas en las últimas 4 fases. La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales donde se instaló la instalación experimental no cuenta con un sedimentador primario, solo con un tanque de recepción del cual se tomaba el agua para este estudio a una profundidad tal que permitiera una cierta sedimentación de los sólidos dentro del tanque. A pesar de estas medidas en varias ocasiones entraron a los reactores influentes con altas concentraciones de SST.

Comparando los valores promedio de las concentraciones de los SST determinados en los efluentes de los tres reactores R1, R2 y R3 (Tabla 3.8.1) con los límites máximos permisibles (LMP) establecidos para descarga en las NOM-001-SEMARNAT-1996, se observa que con todos los reactores se cumplen los LMP establecidos para SST para las categorías de cuerpos receptores A, B y C. El LMP para la categoría A es de 150 y 200 mg/L como promedio mensual y promedio diario respectivamente; para B de 75 y 125 respectivamente; para C de 40 y 60 mg/L respectivamente.

En la NOM-003-SEMARNAT-1997 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsan en servicios al público. En esta Norma el LMP para el tipo de reúso “servicios al público con contacto directo” es de 20 mg/L y para “servicios al público con contacto indirecto u ocasional” es de 30 mg/L. Se observa que con los tres reactores se cumplen los LMP establecidos para SST.

Evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales

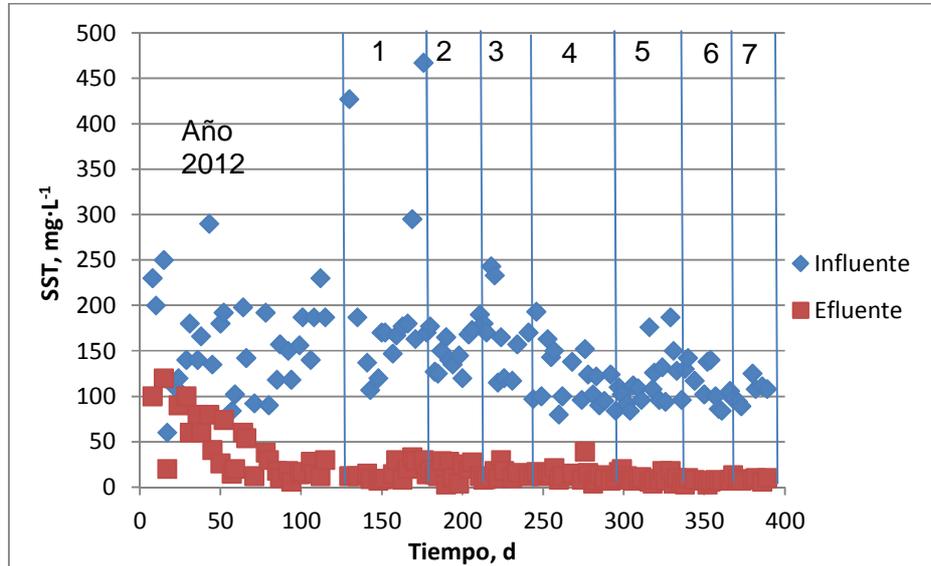


Figura 3.8.1. Variación de las concentraciones de los SST en el influente y efluente del reactor R1.

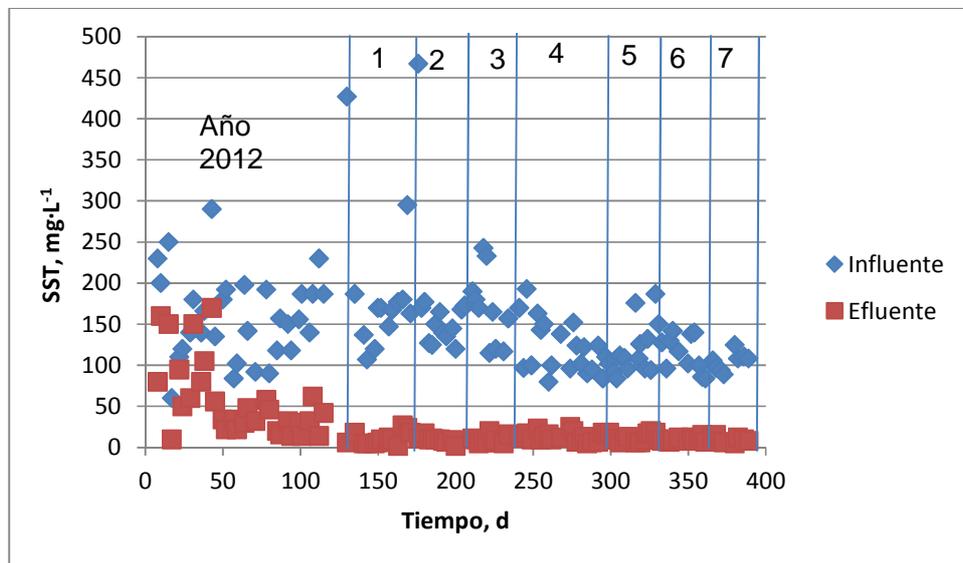


Figura 3.8.2. Variación de las concentraciones de los SST en el influente y efluente del reactor R2.

Evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales

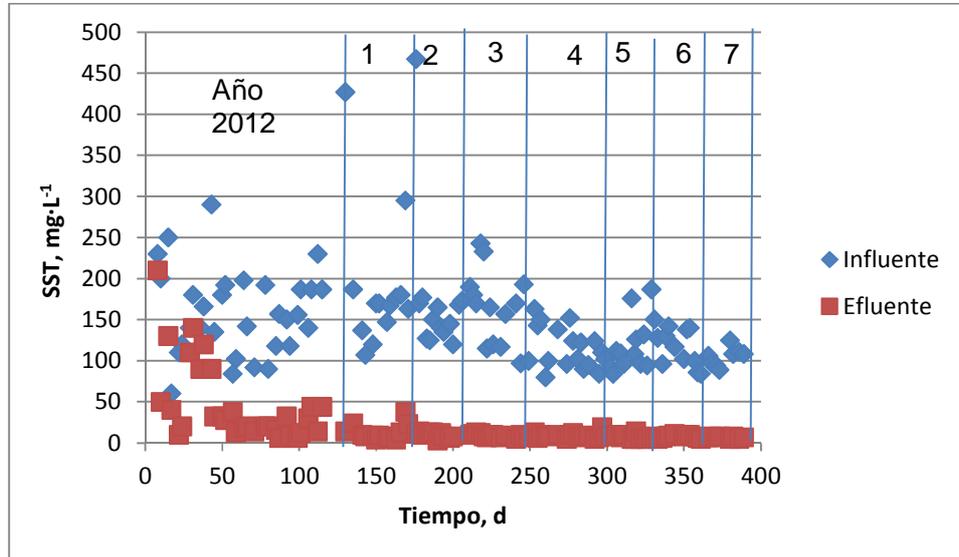


Figura 3.8.3. Variación de las concentraciones de los SST en el influente y efluente del reactor R3.

Tabla 3.8.1 Valores promedio de la concentración de SST en el influente y en los efluentes de R1, R2 y R3.

Días	Fase experimental	Influente	Efluente de		
			R1	R2	R3
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	206±107	17±9	11±7	13±9
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	148±20	17±9	9±4	9±3
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	169±43	14±6	10±5	9±2
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	118±30	14±7	13±6	9±3
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	120±33	9±4	11±5	8±3
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	115±22	7±2	10±2	8±2
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	105±11	9±2	9±3	7±1

En la Figura 3.8.4 se presenta la variación de la remoción de los SST en los tres reactores durante la evaluación. Se observa que cuando empezó esta evaluación, los reactores ya habían alcanzado remociones alrededor entre 76 y 94%. Se observa un ligero ascenso de las remociones durante las Fases 1, 2 y 3. En la Tabla 3.8.2 se presentan los promedios de las remociones para cada fase experimental en los tres reactores. En la Figura 3.8.5 se ilustra comparativamente la remoción promedio de los SST obtenida en los tres reactores en las diferentes fases experimentales.

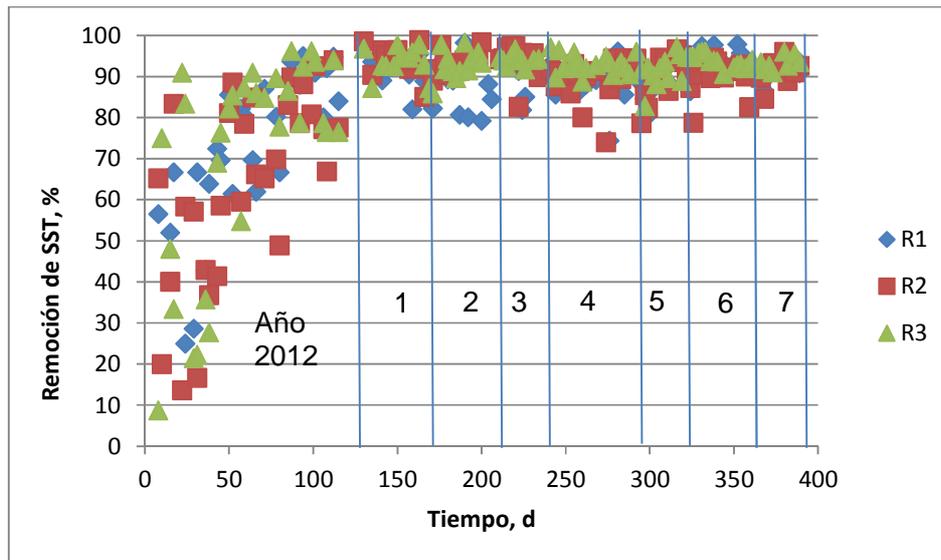
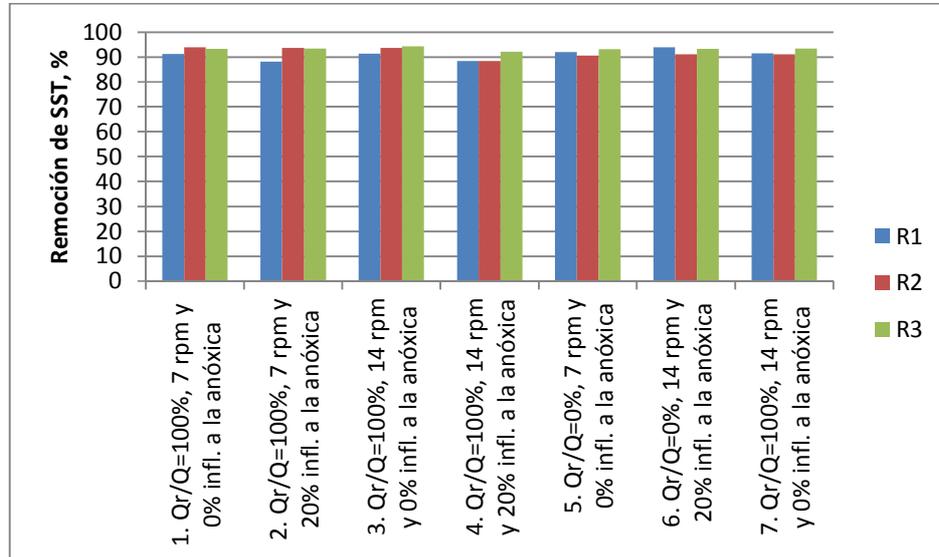


Figura 3.8.4. Remoción de SST en los reactores R1, R2 y R3.

Tabla 3.8.2 Remociones promedio de los SST en los reactores R1, R2 y R3.

Días	Fase experimental	Remoción de SST, %		
		R1	R2	R3
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	91.2±4.5	93.9±3.8	93.2±3.9
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	88.1±6.5	93.6±2.3	93.3±2.7
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	91.3±4.3	93.6±4.4	94.3±1.6
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	88.3±4.9	88.3±5.7	92.1±3.0
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	92.0±3.5	90.6±4.8	93.1±3.0
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	93.9±2.3	91.1±3.3	93.2±1.4
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	91.4±2.4	91.1±3.4	93.3±1.7



**Figura 3.8.5. Comparación de las remociones promedio de SST obtenidos en los tres reactores del sistema experimental durante las diferentes fases experimentales.**

En las Fases 3, 4 y 7 en el reactor R1 se aplicaron las mismas condiciones de operación ( $Q_r/Q=100\%$ , 14 rpm), las remociones promedio de los SST obtenidas fueron: en la Fase 3 de  $91.2 \pm 4.5\%$ , en Fase 4 de  $88.3 \pm 4.9\%$  y en Fase 7 de  $91.4 \pm 2.4\%$  (Tabla 3.8.2 y Figura 3.8.5). El menor valor promedio obtenido en la Fase 4 no es debido a un mal funcionamiento del sistema de separación, sino que a una disminución en la concentración de los SST en el influente. En Fase 3 el promedio de SST en el influente fue de  $169 \pm 43$  mg/L y en Fase 4 de  $118 \pm 30$  mg/L. En las siguientes fases la concentración de SST en el influente se mantuvo alrededor de 118 mg/L y paulatinamente bajó la concentración de SST en el efluente, así en la Fase 7 la remoción fue igual a la calculada en Fase 3.

La remoción promedio de los SST en la Fase 6, en la cual se eliminó la recirculación y la velocidad de rotación se conservó de 14 rpm, fue de  $93.9 \pm 2.3\%$ , el promedio más alto determinado. Al eliminar la recirculación, disminuye la carga hidráulica en la zona de sedimentación y la velocidad descendente del flujo, lo cual permite que flóculos de menor tamaño y peso puedan sedimentar.

En la Fase 1 y 2 se trabajó con  $Q_r/Q=100\%$  y 7 rpm. En la Fase 1 se obtuvo  $91.2 \pm 4.5\%$  de remoción de SST y en la Fase 2 se determinó remoción de  $88.1 \pm 6.5\%$ . El menor valor promedio obtenido en la Fase 2 no es debido a un mal funcionamiento del sistema de separación, sino que a una disminución en la concentración de los SST en el influente. En Fase 1 el promedio de SST en el influente fue de  $206 \pm 107$  mg/L y en Fase 2 de  $148 \pm 20$  mg/L. En ambos casos el efluente tenía  $17 \pm 9$  mg/L de SST. Es decir, no se observa un efecto de la velocidad de rotación del lecho sobre la remoción de los SST, es alto el efecto de la concentración de los SST en el influente sobre la remoción de los SST y el valor promedio de los SST en el efluente. Se determinó que con concentraciones de SST hasta 206 mg/L (promedio de la Fase 1) fue posible obtener SST promedio de 17 mg/L en el efluente, sin embargo la desviación de los resultados es alta de 9 mg/L.

La concentración de SST es mucho menor, de  $9 \pm 4$  mg/L, cuando la concentración de SST en el influente es menor o igual a 120 mg/L. Con base en estos resultados se puede hacer la recomendación de mantener los SST en el influente a los biorreactores debajo de 120 mg/L para asegurar una buena calidad del efluente (con respecto a los SST), sobre todo en casos de reúso del efluente en servicios al público.

Comparando los resultados de las Fases 2 y 3, en las cuales se operó con  $Q_r/Q=100\%$  siendo la velocidad de rotación de 7 rpm (Fase 2) y con  $Q_r/Q=100\%$  siendo la velocidad de rotación de 14 rpm (Fase 3), se observa que la remoción fue de  $88.1 \pm 6.5\%$  en Fase 2 y de  $91.3 \pm 6.1\%$  en Fase 3. Este incremento no se puede atribuir al aumento de la velocidad de rotación ya que en la Fase 3 la concentración de los SST en el influente fue mayor que en la Fase 2 y como ya se observó en las Fases anteriormente analizadas, el efecto de la concentración inicial es muy alto y similar al observado en este caso.

Comparando los resultados de las Fases 4 y 5, en las cuales se operó con  $Q_r/Q=100\%$  siendo la velocidad de rotación de 14 rpm (Fase 4) y con  $Q_r/Q=0\%$  siendo la velocidad de rotación de 7 rpm (Fase 5), se observa que la remoción fue de  $88.3 \pm 4.9\%$  en Fase 4 y de  $92.0 \pm 3.5\%$  en Fase 3. Las concentraciones de los SST en el influente fueron similares. El incremento de Fase 4 a 5 se puede atribuir a que al eliminarse la recirculación disminuyó la velocidad del flujo ascendente en la zona de sedimentación favoreciendo la remoción de partículas de menor tamaño y peso. La alta remoción se conservó en la Fase 6, también sin recirculación y disminuyó de 94% a 91% cuando en Fase 7 se conectó de nuevo la recirculación.

De lo anterior se concluye que los factores que de los parámetros estudiados, la relación de la recirculación sí tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la remoción de los SST en el reactor R1, a diferencia de la velocidad de rotación del lecho que no influye sobre la remoción de los SST. El valor de la remoción dependerá de la concentración de los SST en el influente y para obtener alta calidad del efluente se necesita mantener los SST en el influente a menos de 120 mg/L, aunque con SST en el influente de 200 mg/L todavía se pueden cumplir los LMP normativos de SST en el efluente. La carga hidráulica en la zona de sedimentación seleccionada para el diseño fue de  $11.6 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  sin recirculación y de  $23.2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  con recirculación  $Q_r/Q$  de 100%. En la zona de sedimentación de R1 se tenía un TRH de 1.8h sin recirculación y de 0.9 h con  $Q_r/Q$  de 100%. Los resultados obtenidos indicaron que estas cargas y TRH son adecuados para lograr el cumplimiento de las normas de descarga y reúso referente al LMP más estricto para SST de 20 mg/L, inclusive cuando la concentración de los SST en el influente es de 200 mg/L.

En el reactor R2 durante la Fase 1 ( $Q_r/Q$  de 100%, velocidad de rotación de 7 rpm y sin inyección de agua cruda a la zona anóxica) se obtuvo una remoción de 94%, ligeramente mayor que en R1 (de 91%). Cabe mencionar que en este reactor la zona de sedimentación está diseñada con la misma carga hidráulica (ó velocidad de flujo) que en R1, la única diferencia fue en el TRH el cual es de 3.2 h en el caso de R2, mayor que en R1 (con TRH de 1.8 h). Por lo anterior la diferencia en las remociones de casi 3% en favor de R2 se puede atribuir al mayor TRH en la zona de sedimentación de este reactor. En la Fase 2 se operó con la misma recirculación y rotación del lecho que en la Fase 1, la única diferencia fue que se inyectó un 20% del influente al reactor a la zona anóxica. Se obtuvo la misma remoción de SST que en Fase 1. Esto significa que la inyección del influente en la zona anóxica no influye sobre la remoción de los SST en la zona de sedimentación. En la Fase 3 se siguió manteniendo una recirculación de 100%, pero se aumentó

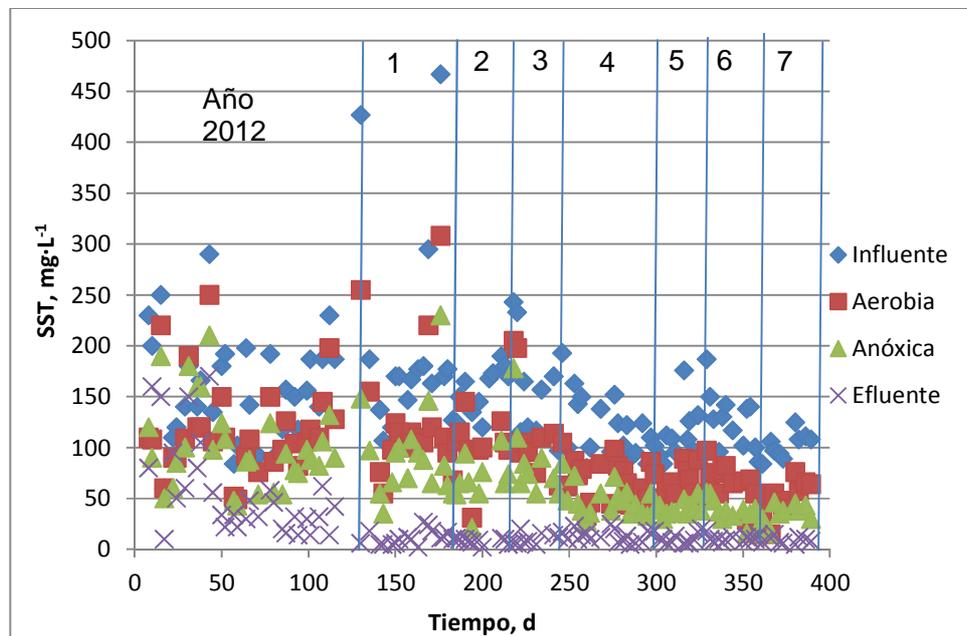
la rotación del lecho y se eliminó la inyección del influente a la zona anóxica. Se conservó la misma remoción de SST. Esto significa que la velocidad de rotación del lecho no influye sobre la remoción de los SST en la zona de sedimentación. En la Fase 4 (recirculación de 100%, rotación con 14 rpm e inyección de 20% del influente a la zona anóxica) la remoción promedio fue de 88%, igual que en el R1. Esta disminución de la remoción, igual que en el caso de R1, se atribuye a la disminución de la concentración de los SST en el influente y no a una afectación del proceso de sedimentación ya que el efluente de R2 tenía una concentración de SST de  $13 \pm 6$  mg/L.

Durante la Fase 5 se paró la recirculación, la velocidad de rotación se disminuyó a 7 rpm y se eliminó la inyección de agua a la zona anóxica. La remoción promedio fue de 91%, aumentó en casi 3% comparada con la anterior y fue muy similar a la obtenida en R1. El aumento se puede atribuir a la disminución de la carga hidráulica en la zona de sedimentación al parar la recirculación. El TRH en la zona de sedimentación de R2 fue de 3.2 h, mayor que en la zona de sedimentación de R1 (de 1.8 h), a pesar de esto la remoción de los SST en ambos reactores fue similar. Esto indica que la variación del TRH en la zona de sedimentación en el intervalo 1.8-3.2 h no tiene un efecto significativo sobre la remoción de los SST y que es más importante el efecto de la carga hidráulica (o velocidad del flujo) en la zona de sedimentación. En la Fase 6 se siguió operando sin recirculación, se aumentó la velocidad de rotación del lecho y se inyectó agua residual a la zona anóxica. Se obtuvo la misma remoción de SST que en la Fase 5. Esto confirma que ambos parámetros, velocidad de rotación e inyección del agua a la zona de sedimentación no influyen sobre la remoción de los SST en la zona de sedimentación. En la Fase 7 se conectó de nuevo la recirculación conservando la rotación con 14 rpm y sin inyección de agua en la zona anóxica. Se obtuvo la misma remoción que en las fases anteriores. No se manifestó el efecto del cambio de la carga hidráulica de  $11.6 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  sin recirculación a  $23.2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  con recirculación  $Q_r/Q$  de 100%, mientras que en R1 hubo una disminución de la remoción. Esta capacidad ligeramente mayor de R2 de resistir los cambios de carga se podrían atribuir al mayor TRH en R2 (de 1.6 h con recirculación) comparado con el TRH en la zona de sedimentación de R1 (de 0.9 h con recirculación). Sin embargo el efecto del TRH en el intervalo 0.9-1.6 h no es muy ligero ya que en la Fase 6 las remociones de SST en R1 y R2 fueron iguales. En congruencia con los resultados de la remoción de SST determinados en R1, los resultados obtenidos en R2 confirman que la rotación del lecho no influye sobre la remoción de SST y que la selección de cargas hidráulicas fue adecuada para lograr una remoción que permita cumplir el LMP más estricto para SST de 20 mg/L, inclusive cuando la concentración de los SST en el influente es de 200 mg/L. También se demostró que el aumento del TRH entre 0.9 y 3.2 h es benéfico para la estabilidad del proceso de sedimentación pero no tiene un efecto significativo sobre las eficiencias de remoción de los SST.

En el reactor R3 que tiene la misma carga hidráulica en la zona de sedimentación que en los demás reactores pero el menor TRH (de 0.45 h con recirculación y de 0.9 h sin recirculación) durante la Fase 1 se obtuvo una remoción de SST similar que en R1 y R2. En las Fases 2 y 3 la remoción de SST en R3 fue igual que en R2 pero mayor que en R1. En las Fases 4, 5 y 7 la remoción de SST fue mayor que las determinadas en R1 y R2. En Fase 6 la remoción fue igual que en R1 y mayor que en R2. Las diferencias en todos los casos no son estadísticamente significativas. Cabe mencionar que en el caso de R3 hay una diferencia estructural muy importante que debe ser considerada en la interpretación de los resultados, es el hecho de que la zona anóxica está ubicada en la parte periférica del reactor y debajo de la zona de sedimentación. Esto favorece la separación de los sólidos suspendidos ya que la zona anóxica actúa como un filtro para las partículas que no logran sedimentar en la zona cónica debajo de la zona activa donde en

realidad se realiza la separación de la mayor parte de los sólidos desprendidos de la zona central aerobia. De esta manera en la zona de sedimentación encima de la anóxica hay muy pocos SST que sedimentan muy fácilmente con las cargas hidráulicas y el TRH aplicadas para el diseño. Durante la operación se observó sin embargo que se requiere de una limpieza periódica (una vez cada 30 días de operación) con un chorro de agua dirigido hacia el fondo del reactor para desprender del lecho periférico parte de los sólidos acumulados en el lecho. Las remociones de SST obtenidos en el R3 con las cargas hidráulicas y TRH aplicados en la zona de sedimentación indican que estos parámetros fueron adecuados para lograr el cumplimiento del LMP más estricto para SST de 20 mg/L, inclusive cuando la concentración de los SST en el influente es de 200 mg/L y la mejor separación de SST comparada con las obtenidas en R1 y R2. Las remociones promedio de los SST calculadas para todo el período de evaluación fueron: de  $90.6 \pm 4.7\%$  en R1, de  $91.4 \pm 9.4\%$  en R2 y de  $93.1 \pm 2.8\%$  en R3.

Los resultados del seguimiento de la concentración de los SST en muestras tomadas de los puntos después de la zona aerobia y anóxica en los reactores R2 y R3 se presentan en las Figuras 3.8.6 y 3.8.7 respectivamente. Los promedios y desviaciones estándar de la concentración de los SST para cada uno de los períodos experimentales se presentan en las Tablas 3.8.3 y 3.8.4. El cálculo de las cantidades de SST removidas en cada zona de los reactores y el porcentaje de contribución de cada zona en la cantidad total de SST removida se presenta en las Tablas 3.8.5 y 3.8.6.



**Figura 3.8.6 Variación de las concentraciones de SST en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.**

Evaluación a escala real de prototipos para remoción simultánea de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales

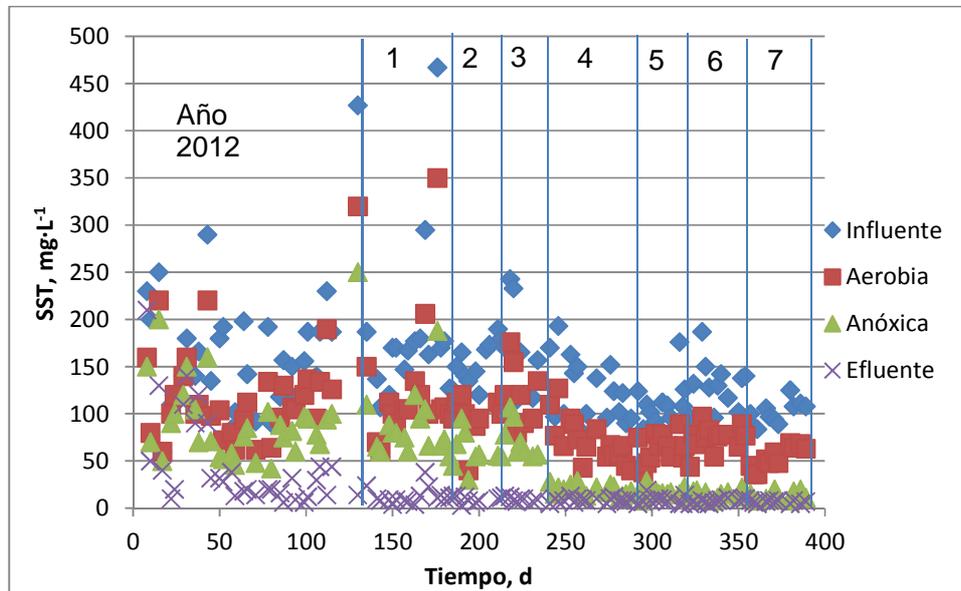


Figura 3.8.7. Variación de las concentraciones de SST en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3: influente, punto de la salida de la zona aerobia, punto de la salida de la zona anóxica, efluente del reactor.

Tabla 3.8.3. Concentraciones de SST en los diferentes puntos de muestreo del reactor R2.

Días	Período	SST ( $\text{mg L}^{-1}$ ) en R2			
		Influente	Aerobia	Anóxica	Efluente
130- 178	1. $Q_r/Q=100\%$ , 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	$206\pm 107$	$138\pm 69$	$99\pm 47$	$11\pm 7$
180- 206	2. $Q_r/Q=100\%$ , 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	$148\pm 20$	$95\pm 31$	$61\pm 20$	$9\pm 4$
211- 241	3. $Q_r/Q=100\%$ , 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	$169\pm 43$	$121\pm 42$	$88\pm 34$	$10\pm 5$
244- 299	4. $Q_r/Q=100\%$ , 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	$118\pm 30$	$68\pm 19$	$48\pm 15$	$13\pm 6$
302- 331	5. $Q_r/Q=0\%$ , 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	$120\pm 33$	$67\pm 17$	$42\pm 9$	$11\pm 5$
333- 361	6. $Q_r/Q=0\%$ , 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	$115\pm 22$	$57\pm 22$	$33\pm 10$	$10\pm 2$
366- 389	7. $Q_r/Q=100\%$ , 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	$105\pm 11$	$53\pm 19$	$36\pm 10$	$9\pm 3$

**Tabla 3.8.4. Concentraciones de SST en los diferentes puntos de muestreo del reactor R3.**

Días	Período	SST (mg L <sup>-1</sup> ) en R3			
		Influyente	Aerobia	Anóxica	Efluente
130- 178	1. Qr/Q=100%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	206±107	142±86	101±53	13±9
180- 206	2. Qr/Q=100%, 7 rpm y 20% infl. a la anóxica	148±20	95±23	62±19	9±3
211- 241	3. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	169±43	118±29	66±22	9±2
244- 299	4. Qr/Q=100%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	118±30	66±22	19±6	9±3
302- 331	5. Qr/Q=0%, 7 rpm y 0% infl. a la anóxica	120±33	70±15	16±4	8±3
333- 361	6. Qr/Q=0%, 14 rpm y 20% infl. a la anóxica	115±22	65±19	13±4	8±2
366- 389	7. Qr/Q=100%, 14 rpm y 0% infl. a la anóxica	105±11	59±9	14±5	7±1

**Tabla 3.8.5. Cantidad removida de SST y porcentaje de contribución de cada zona del R2.**

Días	SST removidos, mg L <sup>-1</sup>				Porcentaje de contribución al total removido de SST		
	Aerobia	Anóxica	Sedi-mentación	Total	Aerobia	Anóxica	Sedi-mentación
130- 178	68	39	87	194	35	20	45
180- 206	53	34	52	138	38	25	37
211- 241	48	32	79	159	30	20	49
244- 299	50	20	35	105	47	19	33
302- 331	54	24	32	109	49	22	29
333- 361	58	24	23	105	55	23	22
366- 389	52	16	27	96	55	17	28

**Tabla 3.8.6. Cantidad removida de SST y porcentaje de contribución de cada zona del R3.**

Días	SST removidos, mg L <sup>-1</sup>				Porcentaje de contribución al total removido de SST		
	Aerobia	Anóxica	Sedi-mentación	Total	Aerobia	Anóxica	Sedi-mentación
130- 178	64	41	87	193	33	21	45
180- 206	53	33	53	138	38	24	38
211- 241	52	52	56	160	32	32	35
244- 299	52	47	10	109	48	43	9
302- 331	50	54	8	112	44	48	7
333- 361	50	52	5	107	46	49	5
366- 389	46	45	7	98	47	46	7

Para el caso del reactor R2 se observa que la remoción de SST en la zona aerobia fue de 30-55%, en la zona anóxica de 17-25% y en la zona de sedimentación de 22-55%. Una distribución similar de las remociones se obtuvo y en R3 durante las primeras tres fases, después en las siguientes cuatro fases se observó una disminución de la aportación de la zona de sedimentación a 5-9% y el resto de la remoción se repartió entre las dos zonas aerobia y anóxica.

#### 4. Conclusiones y principales resultados

Implementación de zona anóxica - aumentó la remoción del NT (en 17%) y DQO (en 4%) comparadas con las determinadas en el BIOSTAR original.

Los mejores resultados se obtuvieron en el reactor en el cual la zona anóxica fue ubicada en la zona periférica, lográndose remociones de  $\text{N-NH}_4 > 93\%$ , de  $\text{NT} > 86\%$ , de  $\text{DQO} > 89\%$ , de  $\text{DBO} > 95\%$ . Se obtuvieron efluentes con una  $\text{DBO}_5 < 15 \text{ mg/L}$ ,  $\text{N-NH}_4 < 2 \text{ mg/L}$  y  $\text{NT} < 10 \text{ mg/L}$ .

De los tres parámetros de operación estudiados en este proyecto, la recirculación del efluente tuvo el mayor efecto sobre la remoción del nitrógeno.