



Universidad del Mar

Campus Puerto Ángel

Optimización paramétrica de la eficiencia de remoción de materia orgánica y calidad de lodos de un reactor operado en lote secuencial por el método de superficie de respuesta

TESIS

**Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ciencias Ambientales**

Presenta:

I. Q. Salinas Pacheco Abimael Nemesio

Director de tesis

Dr. Carlos Estrada Vázquez

Co-Director de tesis

Dr. Alejandro Regalado Méndez

Puerto Ángel, Oaxaca, 2018

*A mis padres, el Arq. Eleazar Salinas Pacheco
y la Sra. Gloria Pacheco López con quienes
comparto este logro académico*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme proporcionado una beca de manutención durante el periodo Octubre 2016 – Septiembre 2018 para la obtención del grado de Maestro en Ciencias ambientales y poder llevar a cabo este proyecto de investigación.

A la Universidad del Mar por proporcionarme una beca de estudios y el uso de sus instalaciones.

Finalmente, a mis directores de tesis y revisores el Dr. Carlos Estrada Vázquez, Dr. Alejandro Regalado Méndez, Dr. Ever Peralta Reyes, Dr. Juan Mentado Morales y Dr Héctor Mario Poggi Varaldo.

RESUMEN

Las actividades antropogénicas en las ciudades contribuyen a la contaminación del agua, las cuales son tratadas en plantas de tratamiento de aguas residuales por lodos activados. Debido a que las aguas residuales se caracterizan por su variabilidad de caudal, composición y concentración de compuestos orgánicos estos sistemas de tratamiento a menudo operan bajo condiciones transitorias, causando problemas operacionales relacionados con las bajas eficiencias de remoción y las pobres propiedades de sedimentación de los lodos.

En este trabajo de investigación se estudió la optimización paramétrica de un Reactor de lodos activados operado en lote secuencial (LOA-SBR) mediante la Metodología de superficie de respuesta (MSR) en el tratamiento de agua residual doméstica real procedente de la Universidad del Mar. Para la aplicación del MSR se propuso el uso de un diseño central compuesto rotatorio, el cual relaciona la influencia de los factores (Demanda química de oxígeno (X_1), concentración de biomasa (X_2) y tiempo de aeración (X_3)) con las respuestas (Eficiencia de remoción de materia orgánica (η) e índice volumétrico de lodos (IVL)), debido a la incertidumbre del punto óptimo en el reactor. Los resultados muestran que las condiciones óptimas de operación son: X_1 de 300 mg O_2/L , X_2 de 2000 mg/L y X_3 de 12 h, para alcanzar una η del 73% y un IVL de 119 mL/g, lo que indica que el LOA-SBR tiene un buen rendimiento. Adicionalmente, se realizó un experimento por triplicado del tratamiento del agua residual domestica bajo las condiciones de operación encontradas para su validación, encontrando un error de desviación relativo para la eficiencia de remoción de materia orgánica del 3.9% y para el índice de calidad de lodos del 9%.

El LOA-SBR empleado en este proyecto demostró ser una tecnología para el tratamiento de aguas residuales domesticas reales, confiable.

PRODUCTOS OBTENIDOS

1. Congreso aceptado

Congreso: The 6th International Symposium on Environmental Biotechnology and Engineering, Ciudad Obregón, Sonora, México, November 5th to 9th, 2018

Título: Removal efficiency of organic matter in a sequential batch activated sludge reactor for treatment of municipal wastewater

2. Artículo sometido

Journal: Water Environment Research

Título: Parametric optimization of COD removal efficiency and SVI of an activated sludge SBR by means of RSM

ÍNDICE

	Página
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN	v
PRODUCTOS OBTENIDOS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS	x
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. ANTECEDENTES.....	3
III. HIPÓTESIS.....	5
IV. OBJETIVOS	6
4.1 General.....	6
4.2 Específicos	6
V. MÉTODOS Y MATERIALES	7
5.1 Configuración y arranque del reactor	7
5.2 Optimización: Método de superficie de respuesta	9
5.2.1 Modelo matemático	10
5.2.2 Factores y respuestas.....	10
5.2.2 Diseño experimental	11
5.2.3 Transformación de las respuestas	12
5.2.4 Selección del modelo	13
5.2.5 Análisis de la varianza	13
5.3 Desarrollo del experimento.....	14
5.4 Cálculo del índice volumétrico de lodos.....	15
5.5 Cálculo de la eficiencia de remoción de materia orgánica	16
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
6.1 Evaluación del diseño experimental	18
6.2 Porcentaje de remoción de materia orgánica	20
6.3 Calidad de los lodos	22

6.4 Valores óptimos de operación del LOA-SBR.....	26
6.5 Validación de los parámetros óptimos de operación del SBR.....	28
6.6 Costo de operación.....	29
6.8 Discusión.....	30
VII. CONCLUSIONES.....	32
TRABAJOS A FUTURO	33
REFERENCIAS.....	34
APÉNDICE A. ARTÍCULO SOMETIDO.....	39
APÉNDICE B. ABSTRACT ACEPTADO AL 6th ISEBE	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Diagrama del SBR	7
2	Red general y equipamiento de las aguas residuales de la Universidad del Mar campus Puerto Ángel	9
3	Desarrollo del experimento y puntos de toma de muestra	15
4	Gráfica de perturbación, 3D y de contorno del error estándar del diseño experimental a las condiciones iniciales	20
5	Gráfica de perturbación de η e IVL de los tres factores empleados a las condiciones iniciales	24
6	Pedicha vs. Actual de η e IVL.....	24
7	Gráfica 3D y contorno de la η a X_3 : 24 h.....	25
8	Gráfica 3D y contorno del IVL a X_3 : 24 h.....	25
9	Gráfica 3D y contorno de la η a las condiciones óptimas	27
10	Gráfica de a) 3D y b) contorno del IVL a las condiciones óptimas	27
11	Gráfica de a) contorno de las interacciones de las respuestas y de b) deseabilidad	28

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
1	Parámetros fisicoquímicos por Hernández Viruel.....	4
2	Características del lodo de inoculación	8
3	Valores experimentales y niveles de los factores.....	11
4	Diseño experimental	12
5	Resultados del diseño experimental	18
6	Diseño experimental evaluados con un modelo cuadrático	19
7	ANOVA respuesta 1	21
8	Significancia de los términos de los modelos para la respuesta 1.....	21
9	ANOVA de la respuesta 2	22
10	Significancia de los términos de los modelos para la respuesta 2.....	23
11	Restricciones	26
12	Resultado de la validación	28
13	Comparación de resultados en distintos artículos	31

I. INTRODUCCIÓN

El proceso de lodos activados (PLA) es el método más usado para el tratamiento de aguas residuales, haciendo necesario mejorar su desempeño desde el punto de vista económico y ambiental [1].

Dentro de los PLA se encuentra los reactores en lote, destacando el Reactor de lote secuencial (SBR, por sus siglas en inglés) el cual representa una de las tecnologías más importantes para el tratamiento de las aguas residuales [2] debido a que la eliminación de compuestos orgánicos y nutrientes se llevan a cabo en el mismo tanque, además de su flexibilidad para soportar variaciones de carga orgánica las cuales rara vez se observa en otro tipo de reactores [3].

En los SBR la biomasa puede encontrarse de forma inmovilizada o dispersa, la diferencia entre uno y otro es la concentración de biomasa, la cual es mayor en los reactores con biomasa inmovilizada [4], esta diferencia en la concentración permite mejores eficiencias de remoción de contaminantes, resistencia a sobrecargas hidráulica y de materia orgánica, generando un nicho que da protección a factores físicos y químicos [4], [5].

Un SBR típico se caracteriza por un consumo de energía y producción de biomasa alto, lo que lleva a altos costos de operación y problemas con la eliminación de gran cantidad de lodo. En los últimos años diversos autores se han enfocado en optimizar las condiciones de operación con el objetivo principal de mejorar la eficiencia de remoción de contaminantes (materia orgánica y de nutrientes), la aireación [6] y la producción de lodos [7], modificando factores operacionales o factores ambientales como el tiempo de retención hidráulica [8]–[10], tiempo de aireación [2], [11], [12], tasa de recirculación [8], [13], temperatura [14], pH [15], concentración de oxígeno disuelto [16] y concentración de biomasa [10], [12].

La elección del método a emplear para la optimización del PLA dependió de si el proceso de optimización es mono- o multi- variable. Estos métodos pueden partir del modelado del proceso ya sea por modelos existentes como el ASM1 y ASM3 los cuales pueden estar calibrados, o, a través de un modelo matemático más simple [1].

Dentro de los métodos de optimización mono-variable usados en el PLA podemos encontrar la Programación cuadrática secuencial (SQP, por sus siglas en inglés) [17], el

algoritmo Rosenbrock [18], el método del punto interior [19], algoritmo genético [20], búsqueda de patrón [21], código DYNO [22] y el algoritmo DICOPT [1]. Mientras que para los métodos de optimización multi-variable el más destacado es el algoritmo genético multi-variable [23].

El método de superficie de respuesta (MSR) emplea técnicas estadísticas multi-variable [24], que para aplicarlo primero es necesario elegir un diseño experimental, el cual puede ser un modelo de primer orden (diseños factoriales) usado cuando el conjunto de datos no presenta curvatura, o si se desea aproximar una función de respuesta a datos experimentales que no pueden describirse mediante funciones lineales, se deben utilizar diseños experimentales para superficies de respuesta cuadrática, como diseños de factor triple, Box-Behnken, compuesto central y Doehlert [25].

Este trabajo se concentró en un SBR de biomasa dispersa debido a que representan un menor costo en los PLA de gran tamaño, teniendo como finalidad la aplicación del MSR en un reactor de lodos activados en lote secuencial (LOA-SBR) para obtener los valores óptimos paramétricos en la remoción de materia orgánica de aguas residuales reales, manteniendo la calidad del lodo.

II. ANTECEDENTES

El MSR ha sido aplicado recientemente en la optimización del PLA en reactores tipo lote por diversos autores, los que se revisan a continuación.

Qarani Aziz *et al.* en 2011 [26] estudiaron la optimización de lixiviados de vertedero mediante dos SBR, uno con carbón activado en polvo (PAC-SBR por sus siglas en inglés) y el otro sin carbón activado. Usaron el método de superficie de respuesta con un diseño experimental central compuesto, con la finalidad de determinar en cuál de los dos reactores se tenía un rendimiento superior para eliminar compuestos orgánicos.

Muhamad *et al.* en 2013 [27] usaron el método de superficie de respuesta para optimizar las variables de operación de un reactor de biopelícula de lote secuencial con carbón activado (GAC-SBBR por sus siglas en inglés), para la eliminación de materia orgánica, NH₃-N y 2,4 diclorofenol, usando un diseño compuesto central y con cuatro factores, el principal resultado fue que el sistema se optimiza cuando el tiempo de retención hidráulica (TRH) es mínimo.

Sathian *et al.* en 2014 [11] utilizaron hongos de la pudrición blanca (*Coriolus versicolor*, *Pleurotus floridanus*, *Ganoderma lucidum* y *Trametes pubescens*, puros y sus combinaciones) en un SBR y optimizaron las diferentes combinaciones de hongos por medio del MSR; encontraron que con la combinación de *Pleurotus floridanus*, *Ganoderma lucidum* and *Trametes pubescens* se alcanzó la mejor remoción de color y demanda química de oxígeno (DQO), mientras que Alimohammadi *et al.* en 2016 [28] optimizaron las variables de operación de un SBR con 2 factores para eliminar nitratos de una solución acuosa. A dicho reactor se le adicionaron nanotubos de carbono magnético.

Como se puede observar en los antecedentes antes mencionados, son pocos los trabajos en los cuales se emplea el MSR para la optimización del tratamiento de aguas residuales por lodos activados en reactores por lotes. No obstante, el más destacado es el trabajo de Zinatizadeh *et al.* quienes en 2011 [12] optimizaron las variables de operación de un SBBR para la eliminación de materia orgánica y mejorar las características del lodo producido en el tratamiento de aguas residuales lácteas. En este trabajo utilizaron un diseño central compuesto con tres factores. Los principales resultados fueron que la eficiencia máxima de eliminación de materia orgánica (99.5%) se obtiene a una DQO de 5000 mg O₂/L, una

concentración de biomasa de 7000 mg/L y un tiempo de aireación de 18 h, con un índice volumétrico de lodos (IVL) entre 74-108 mL/g, reduciendo el tiempo de aireación requerido para la remoción de materia orgánica.

Hernández Viruel en 2011 [29] puso en marcha por primera vez el SBR de la Universidad del Mar campus, Puerto Ángel con la finalidad de obtener un efluente de calidad que pudiese ser usado en el lavado de suelos agrícolas, para ello inoculó el reactor con lodos activados de la planta de tratamiento de aguas residuales de “Chahué” ubicada en Bahías de Huatulco y la alimentó con aguas residuales domésticas de la Universidad del Mar, campus Puerto Ángel. Empleó un periodo de tiempo de 30 días para su aclimatización, periodo en el que la biomasa estabilizó con una concentración de 3000 mg/L, En la Tabla 1 se muestran los resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos por Hernández Viruel.

Tabla 1.

Parámetros fisicoquímicos por Hernández Viruel (2011).

Parámetro	Unidades	
DQO promedio del afluente	237.51	mg O ₂ /L
DQO promedio del efluente	98.49	mg O ₂ /L
Eficiencia	58.5	%
Temperatura	28 - 32	°C
pH licor mezclado	6.5 - 7.5	
MLSST promedio	4733	mg/L
MLSSV promedio	3405	mg/L
SST/SSV	71	%
IVL promedio	81.19	mL/g

DQO: Demanda química de oxígeno, MLSST: Solidos suspendidos totales del licor mezclado, MLSSV: Solidos suspendidos volátiles del licor mezclado, SST: Solidos suspendidos totales, SSV: Solidos suspendidos volátiles, IVL: Índice volumétrico de lodos.

III. HIPÓTESIS

Existe un punto óptimo en el que los valores de los factores (demanda química de oxígeno del afluente, concentración de biomasa y tiempo de aireación) dados por el método de superficie de respuesta, cumplen las restricciones del sistema, mejorando las respuestas (eficiencia de remoción de materia orgánica y calidad de los lodos) en el tratamiento de las aguas residuales domésticas, empleando un reactor de lodos activados en lote secuencial (LOA-SBR).

IV. OBJETIVOS

4.1 General

Obtener los valores óptimos de las variables de operación (demanda química de oxígeno del afluente, concentración de biomasa y tiempo de aireación) de un LOA-SBR para mejorar la eficiencia de remoción de materia orgánica y calidad de lodos en el tratamiento de aguas residuales domésticas empleando el método de superficie de respuesta.

4.2 Específicos

- Desarrollar e implementar un diseño experimental que ajuste a los factores y respuestas determinados para el LOA-SBR.
- Establecer el punto óptimo de operación del LOA-SBR a partir del análisis de datos.
- Validar los parámetros óptimos del proceso de tratamiento de aguas residuales domésticas con datos experimentales.

V. MÉTODOS Y MATERIALES

5.1 Configuración y arranque del reactor

El reactor fue construido con placas de acrílico, con una longitud, anchura y altura de 1.2, 0.60 y 0.60 m respectivamente, con una capacidad de 0.43 m³ operando a un volumen de 0.36 m³. El reactor [29] cuenta con un compresor de aire marca Thomas modelo 5030-A el cual suministra a un aireador construido de PVC con orificios de 1 mm de diámetro (Ver Figura 1).

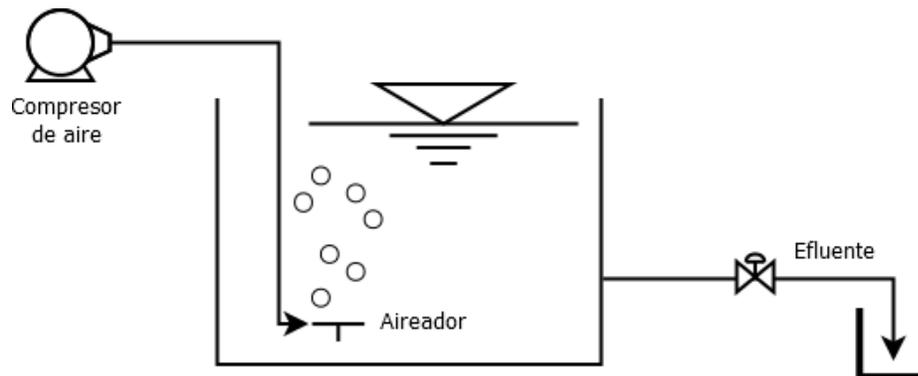


Figura 1.

Diagrama del SBR.

Para la inoculación del reactor se utilizó lodo de purga del sedimentador secundario de la Planta de tratamientos de aguas residuales (PTAR) de la Universidad del Mar campus Huatulco cuyas características se describen en la Tabla 2.

Tabla 2.

Características del lodo de inoculación.

Parámetro	Unidades	
Temperatura	25	°C
MLSST	12600	mg/L
MLSSV	1000	mg/L
SSV/SST	0.79	
Conductividad eléctrica	2152	µS/cm
Color	café	
C/N	3.5	
pH	7.7	

MLSST: Solidos suspendidos totales del licor mezclado, MLSSV: Solidos suspendidos volátiles del licor mezclado, SST: Solidos suspendidos totales, SSV: Solidos suspendidos volátiles

El agua residual empleada en el SBR provino de dos unidades habitacionales, la cafetería, el edificio de posgrado, la biblioteca y los laboratorios de ingeniería ambiental (del cual no son arrojados desechos peligrosos), la distribución de la red general se muestra en la Figura 2. Estas aguas residuales son recolectadas en un taque de almacenamiento a la entrada del tren de tratamiento de aguas residuales de la Universidad del Mar campus Puerto Ángel, desde donde son bombeadas hasta el reactor.

El agua residual presentó una carga orgánica media expresada en DQO de 275.64 mg O₂/L, lo que hace que el agua residual sea de composición diluida, aunque la variabilidad del afluente tiene una carga orgánica que fue desde los 180 hasta los 540 mg O₂/L.

El tiempo del ciclo de operación del SBR durante su aclimatación fue de 24 horas y se distribuyó de la siguiente manera:

1. El reactor fue alimentado hasta el volumen de operación en un tiempo aproximado de 20 min.
2. El tiempo de aireación con flujo constante fue de 22 h.
3. La sedimentación tardó 45 min.
4. y finalmente, la descarga del agua tratada llevó un tiempo aproximado de 20 min.

Factores: Son las condiciones del proceso que influyen las variables de respuesta. Estos pueden ser cualitativos o cuantitativos.

Respuestas: Es una cantidad medible cuyo valor se ve afectado al cambiar los niveles de los factores. El interés principal es optimizar dicho valor.

Función de respuesta: Al decir que un valor de respuesta Y depende de los niveles x_1, x_2, \dots, x_k de k factores, $\xi_1, \xi_2 \dots \xi_k$, estamos diciendo que existe una función matemática de x_1, x_2, \dots, x_k cuyo valor para una combinación dada de los niveles de los factores corresponde a Y [24].

Función de respuesta predicha: La función de respuesta se puede representar como una función polinomial. El éxito en una investigación de una superficie de respuesta depende de que la respuesta se pueda ajustar a un polinomio de primer o segundo grado.

5.2.1 Modelo matemático

Para los casos de optimización de reactores biológicos, se ha observado que responde a un modelo de segundo orden [24], por lo que la ecuación (1) [27] fue implementada para predecir las respuestas en función de los factores y así determinar las interacciones que pueden darse entre ellas.

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^3 \beta_{ij} X_j + \sum_{j=1}^3 \beta_{ij} X_j^2 + \sum_{i < j} \sum_j^3 \beta_{ij} X_i X_j + \dots + e \quad (1)$$

Donde:

β = Coeficientes de la regresión

X = Factores

5.2.2 Factores y respuestas

En el tratamiento de las aguas residuales influyen distintos factores operacionales y ambientales, que pueden ser modificados para obtener un mejor rendimiento en la eficiencia de remoción de contaminantes y la calidad de los lodos, tales como: temperatura, pH, tiempo de retención hidráulica (TRH), tasa de aireación, tiempo de aireación, concentración de biomasa, entre otros. Por lo que para este trabajo se escogieron 3 factores

factibles a modificar que tienen una gran influencia en la remoción de materia orgánica y la calidad de lodos, estos fueron:

- a. La concentración de materia orgánica alimentada al reactor expresada como DQO (X_1)
- b. La concentración de biomasa (X_2)
- c. El tiempo de aireación (X_3)

Se eligió la eficiencia de remoción de materia orgánica (η) y el índice volumétrico de lodos (IVL) como respuestas, ya que son dos medidas representativas del buen funcionamiento del SBR.

Los valores de los factores se seleccionaron conforme a los datos reportados por Hernández Viruel en 2011 [29]. En la Tabla 3, se muestran los valores usados en el diseño experimental, para la obtención de los niveles -1 y +1 se utilizó la ecuación (2).

Tabla 3.

Valores experimentales y niveles de los factores.

Factor	Unidades	Valores y niveles		
		-1	0	1
X_1	mg O ₂ /L	200	250	300
X_2	mg/L	2000	2500	3000
X_3	h	12	24	36

$$x_i = \frac{X_i - X_0}{\Delta X_i} \quad i = 1, 2, 3, \dots, k \quad (2)$$

Donde:

x = Factor

X = Valores del factor

ΔX = intervalo entre valores

5.2.2 Diseño experimental

Debido a la incertidumbre de la región donde se ubicaba el punto óptimo de las variables de operación del reactor, se seleccionó un diseño central compuesto rotatorio, con 2^k puntos

factoriales, más 2k puntos axiales y un punto central con 6 repeticiones, donde k es el número de factores, que para este caso de estudio fue de 3, dando un total de 20 experimentos. Los puntos factoriales representan una varianza de diseño para los términos de primer orden, los puntos axiales permiten una eficiente estimación de los términos cuadráticos y las repeticiones del punto central proporcionan información sobre la existencia de curvatura [24].

Se utilizó el software Design Expert® versión 10.0 para definir la aleatoriedad de los experimentos, en la tabla 4 se muestra el orden en el que se llevaron a cabo dichos experimentos.

Tabla 4.
Diseño experimental.

Corrida	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Respuesta 1	Respuesta 2
	X ₁ (mg O ₂ /L)	X ₂ (mg/L)	X ₃ (h)	η (%)	IVL (mL/g)
1	250	2500	24		
2	200	3000	36		
3	200	3000	12		
4	165.91	2500	24		
5	300	3000	12		
6	250	2500	3.82		
7	250	2500	24		
8	250	2500	24		
9	250	3340.9	24		
10	200	2000	36		
11	250	2500	24		
12	250	1659.1	24		
13	200	2000	12		
14	300	3000	36		
15	334.09	2500	24		
16	250	2500	24		
17	250	2500	24		
18	300	2000	12		
19	300	2000	36		
20	250	2500	44.18		

η: Eficiencia de remoción de materia orgánica, IVL: Índice volumétrico de lodos

5.2.3 Transformación de las respuestas

Design Expert® proporciona ocho transformaciones de respuesta (raíz cuadrada, logaritmo natural, logaritmo base 10, raíz cuadrada inversa, inversa, potencia, logit y raíz cuadrada

arcoseno) a través de su opción Transfor. La transformación de la respuesta es un componente importante de cualquier análisis de datos, es necesaria si el error (residuales) es una función de la magnitud de la respuesta (valores pronosticados) para verificar si se cumplen los supuestos estadísticos que subyacen al análisis de datos [30]. Las gráficas de valores residuales versus valores predichos de respuesta indicarán un problema si existe un patrón, a menos que la relación entre la respuesta máxima y la respuesta mínima sea grande, de lo contrario la transformación de la respuesta no tendrá mucha importancia [31].

5.2.4 Selección del modelo

Para hacer la selección del modelo, Design Expert® ajusta las respuestas a diferentes modelos; lineal, interacción de dos factores (2FI), polinomio cuadrático y cúbico, en cada modelo se examina la probabilidad (“Prob>F”) para ver si cae por debajo de 0.05, de esta forma el software hace la sugerencia del modelo que da un mejor ajuste de las respuestas. También se compara el “error residual” con el "error puro" de los puntos de diseño replicados. Si hay una falta significativa de ajuste (con un valor de baja "Prob> F"), se debe tener cuidado con el uso del modelo [31].

5.2.5 Análisis de la varianza

Se utilizó el análisis de la varianza (ANOVA) proporcionado por Design Expert® para realizar pruebas estadísticas, los términos usados por el software se describen a continuación:

- Suma de cuadrados: suma de las diferencias al cuadrado entre el promedio general y la cantidad de variación explicada por ese factor de filas.
- Grados de libertad (GL): el número de parámetros estimados utilizados para calcular la suma de cuadrados del factor. Igual a uno para los coeficientes de prueba.
- Varianza (s^2): la suma de cuadrados divididos por los grados de libertad.
- Valor F: Prueba para comparar el cuadrado medio del factor con el cuadrado medio residual.
- “Prob>F”: probabilidad de ver el valor F observado si la hipótesis nula es verdadera (no hay efectos de factores), los pequeños valores de probabilidad requieren el

rechazo de la hipótesis nula. Si el valor de “Prob> F” es muy pequeño (menos de 0,05 por defecto) [30], la fuente ha probado ser significativa. La falta significativa de ajuste indica que el modelo no se ajusta a los datos.

- R cuadrado (R^2): es una medida de la cantidad de variación alrededor de la media explicada por el modelo.
- Adj R^2 : una medida de la cantidad de variación alrededor de la media explicada por el modelo, ajustada por el número de términos en el modelo, este disminuye a medida que aumenta el número de términos en el modelo. La R^2 y Adj R^2 deben tener una diferencia máxima de 0.20 uno del otro [31].
- Pred R^2 : mide la cantidad de variación en nuevos datos explicados por el modelo.
- Precisión adecuada: esta es una relación señal/ruido. Los valores mayores que 4 indican una discriminación del modelo adecuado[31].
- Error estándar: es la desviación estándar asociada con las estimaciones del coeficiente.
- Factor de inflación de varianza (VIF por sus siglas en inglés): mide cuanto se infla la varianza en torno a la estimación del coeficiente por falta de ortogonalidad en el diseño. Si el factor es ortogonal a todos los otros factores en el modelo, el VIF es uno. Los valores superiores a 10 indican que los factores están muy correlacionados entre si [31].
- χ^2 : Establece relaciones entre variables, debe ser menor a 0.05.

Habiendo determinado la significancia del modelo y de cada uno de sus términos, se pueden eliminar aquellos términos que no son representativos para mejorar el ajuste del modelo.

5.3 Desarrollo del experimento

El experimento se llevó a cabo conforme a la Tabla 2. Se tomó muestra del afluente y al término del tiempo de aireación se tomaron dos muestras más; del licor mezclado y del efluente (Ver Figura 3).

La muestra del licor mezclado se utilizó para determinar los sólidos suspendidos volátiles y así poder llevar a cabo el cálculo del índice volumétrico de lodos. Con la muestra del

afluente y del efluente se calculó la eficiencia de remoción de materia orgánica a través de la determinación de DQO.

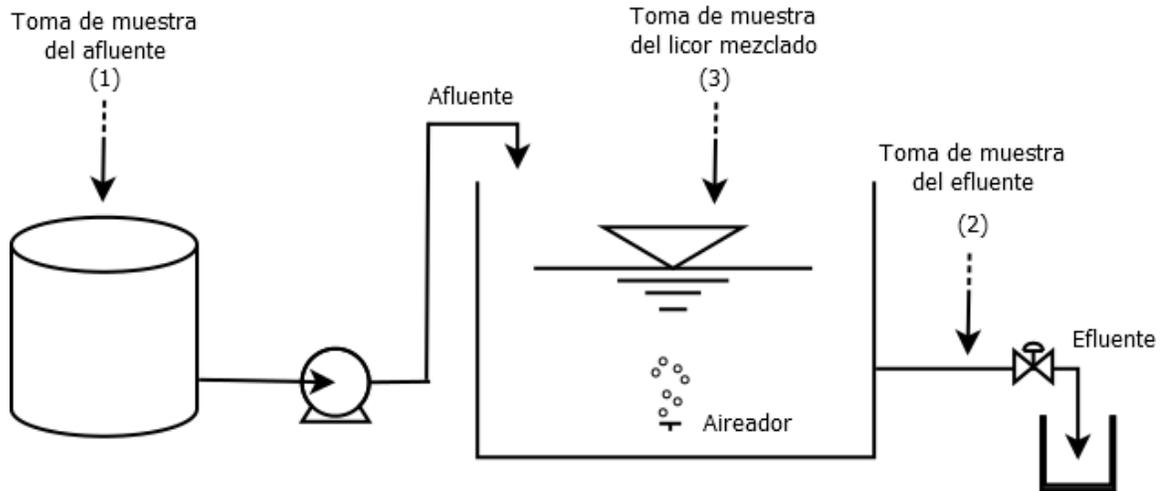


Figura 3.

Desarrollo del experimento y puntos de toma de muestra.

5.4 Cálculo del índice volumétrico de lodos

El IVL se considera uno de los parámetros más adecuados y utilizados para determinar la capacidad de sedimentación de los lodos, esta capacidad de sedimentación de lodos se considera un paso crítico donde la acumulación de bacterias filamentosas y la des floculación de la biomasa son los problemas más comunes en el PLA reduciendo la calidad del efluente [32].

El cálculo del índice volumétrico de lodos se llevó a cabo en 2 etapas. En la primera etapa se calcularon los sólidos sedimentables utilizando como base la Norma oficial mexicana NMX-AA-004-SCFI-2000 [33], para esto se colocó 1 L de licor mezclado en una probeta de plástico de 1L y se dejó sedimentar el lodo por un tiempo de 30 min. Cuando concluyó el tiempo de sedimentación se registró el volumen ocupado por el lodo como $V_{\text{sedimentación}}$. Para la segunda etapa se calcularon los sólidos suspendidos volátiles (SSV) conforme a la Norma oficial mexicana NMX-AA-034-SCFI-205[34], para el cálculo del IVL se utilizó la ecuación (3).

$$IVL = \frac{V_{\text{sedimentación}}}{SSV} [=] \frac{mL}{g} \quad (3)$$

5.5 Cálculo de la eficiencia de remoción de materia orgánica

La Demanda química de oxígeno (DQO) se define como cualquier sustancia orgánica e inorgánica susceptible de ser oxidada mediante un oxidante fuerte, la cantidad de oxidante consumida se expresa en términos de su equivalencia en oxígeno (mg O₂/L). Debido a sus propiedades químicas el ion dicromato (Cr₂O₇²⁻) es el oxidante usado, reduciéndose al ion crómico (Cr³⁺).

Para determinar la eficiencia de remoción de materia orgánica en el reactor, se calculó en primer lugar la demanda química de oxígeno del afluente y del efluente implementando una técnica con base en el Standard Methods for the examination of water and wastewater [35], todos los reactivos fueron preparados conforme a su apartado 5220 B.

Esta consiste en mezclar en un matraz de 250 mL con tapón de rosca, 2.5 mL de muestra (para el blanco se utilizó agua destilada), de 2 a 3 perlas de ebullición y posteriormente se agregaron 1.5 mL de solución de dicromato de potasio 0.25 N y 3.5 mL de ácido sulfúrico concentrado, este último deslizándolo suavemente por las paredes del matraz y agitando la mezcla constantemente para evitar una reacción violenta (al cerrar los matraces se evitó apretar el tapón).

Se colocaron los matraces en una estufa Gravity convection oven modelo DX600 marca YAMATO, a una temperatura de 150 °C por 2 h. Al terminar este tiempo, se dejaron enfriar los matraces hasta alcanzar la temperatura ambiente. Posteriormente se adicionaron dos gotas de disolución de ferroína y se agregaron 42.4 mL de agua destilada, para finalmente titular la mezcla con una disolución de sulfato ferroso amoniacal (SFA) 0.05 N. Se registró el volumen de SFA utilizado en la titulación para la muestra y el blanco.

$$DQO = \frac{(V_{SFA-B} - V_{SFA-M})}{V_M} N_{SFA} [=] \frac{mg O_2}{L} \quad (4)$$

Donde:

V_{SFA-B} = Volumen de SFA usado en el blanco (mL)

V_{SFA-M} = Volumen de SFA usado en la muestra (mL)

N_{SFA} = Normalidad del SFA

V_M = Volumen empleado de la muestra (mL)

La ecuación (4) se utilizó para determinar la demanda química de oxígeno, obtenidos los valores de la DQO del afluente y efluente se utilizó la ecuación (5) para obtener la eficiencia de remoción de materia orgánica en términos de porcentaje.

$$\eta = \frac{DQO_{Afluente} - DQO_{Efluente}}{DQO_{Afluente}} 100 [=] \% \quad (5)$$

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las respuestas obtenidas por el diseño experimental propuesto anteriormente se muestran en la tabla 5. A partir de estos resultados se empleó el software Design Expert® versión 10.0 para obtener los parámetros óptimos de operación del LOA-SBR.

Tabla 5.

Resultados del diseño experimental.

Corrida	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Respuesta 1	Respuesta 2
	X ₁ (mg O ₂ /L)	X ₂ (mg/L)	X ₃ (h)	η (%)	IVL (mL/g)
1	250	2500	24	69	118
2	200	3000	36	85	141
3	200	3000	12	74	120
4	165.91	2500	24	74	103
5	300	3000	12	81	149
6	250	2500	3.82	86	93
7	250	2500	24	70	115
8	250	2500	24	74	100
9	250	3340.9	24	56	118
10	200	2000	36	88	155
11	250	2500	24	64	135
12	250	1659.1	24	69	112
13	200	2000	12	75	77
14	300	3000	36	82	150
15	334.09	2500	24	78	119
16	250	2500	24	85	127
17	250	2500	24	75	87
18	300	2000	12	79	126
19	300	2000	36	71	200
20	250	2500	44.18	70	130

6.1 Evaluación del diseño experimental

El diseño experimental se evaluó con un modelo cuadrático descrito en la ecuación (1) por superficie de respuesta obteniendo la siguiente tabla.

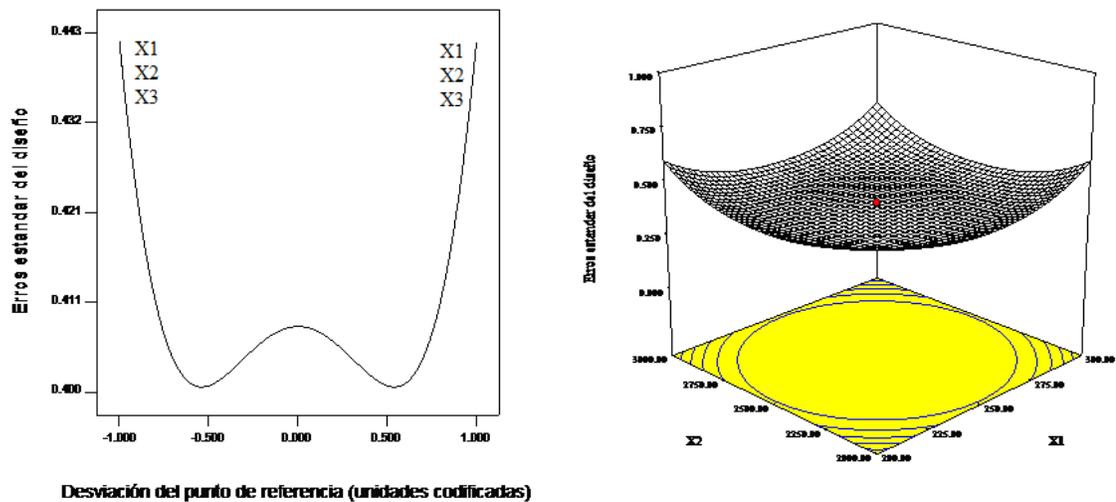
Tabla 6.
Términos del modelo cuadrático.

Término	Error estándar	VIF	χ^2
X ₁	0.27	1.00	0.0000
X ₂	0.27	1.00	0.0000
X ₃	0.27	1.00	0.0000
X ₁ X ₂	0.35	1.00	0.0000
X ₁ X ₃	0.35	1.00	0.0000
X ₂ X ₃	0.35	1.00	0.0000
X ₁ ²	0.26	1.02	0.0179
X ₂ ²	0.26	1.02	0.0179
X ₃ ²	0.26	1.02	0.0179

VIF: Factor de inflación de varianza

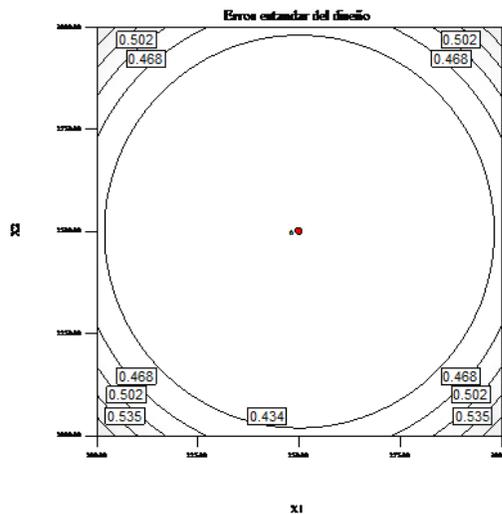
Los errores estándar son iguales para cada subconjunto de los términos usados en el modelo cuadrático, el VIF es cercano a 1 en cada término y χ^2 es menor que 0.05 para todos los casos, por lo que el diseño experimental se ajustó al modelo cuadrático y cada una de las respuestas propuestas fueron evaluadas también en función de un modelo de segundo orden.

Al graficar el error estándar del diseño experimental se observó que la perturbación (Ver Figura 4a) generó curvatura, lo que indicó que los tres factores propuestos tienen significancia dentro del modelo, mientras que en la Figura 4b se observó que el error tendió a un mínimo, por lo que el ajuste del modelo fue bueno, corroborándolo con las líneas de contorno (Ver Figura 4c).



a)

b)



c)

Figura 4.

Gráfica a) de perturbación, b) 3D y c) de contorno del error estándar del diseño experimental a las condiciones iniciales (X_1 : 250 mg O₂/L, X_2 : 2500 mg/L y X_3 : 24 h.).

6.2 Porcentaje de remoción de materia orgánica

No se hizo ajuste a los datos del porcentaje de remoción de materia orgánica, por lo que el reporte de ajuste de modelo de Design Expert sugirió un modelo cuadrático, primero se evaluó el modelo cuadrático y posteriormente un modelo modificado. De esta forma el análisis de varianza (ANOVA) quedó de la siguiente manera:

Tabla 7.

ANOVA respuesta 1

Modelo	Prob > F	R ²	R ² predicha	Precisión	SD	CV	PRESS	Lack of fit F- Value
Cuadrático	0.0003	0.9130	0.5447	14.116	3.26	4.33	556.21	1.48
Modificado	0.0001	0.8504	0.5568	13.856	3.75	4.98	541.52	2.04

SD: Desviación estándar, CV: Coeficiente de variación

Mientras que la “Prob > F” para los términos del modelo se describen en la tabla 8:

Tabla 8.

Significancia de los términos de los modelos para la respuesta 1

Término	Cuadrático	Modificado
	Prob > F	Prob > F
X ₁	0.0013	0.0020
X ₂	0.0006	0.0008
X ₃	0.0006	0.0009
X ₁ X ₂	0.0060	0.0099
X ₁ X ₃	0.6737	-----
X ₂ X ₃	0.0553	-----
X ₁ ²	0.1598	-----
X ₂ ²	0.0266	0.0320
X ₃ ²	0.0143	0.0290

Valores de “Prob > F” menores que 0.05 indica que el término del modelo es significativo. Para este caso en particular los términos con mayor significancia son X₁, X₂, X₃, X₁ X₂, X₂², y X₃².

Aunque el modelo modificado presento una pequeña mejoría en la R² predicha y la “Prob > F”, lo cual es bastante deseable, hubo un aumento en la desviación estándar (SD) y en el “Lack of fit F-Value” lo cual hace que el modelo genere mayor error. Por ello se decidió utilizar el modelo cuadrático para modelar esta respuesta.

Se obtuvo la gráfica de perturbación (Figura 5a) en la cual se puede observar que los tres factores presentaron una pequeña curvatura, sin que ninguno destaque, mientras que la

gráfica 3D (Figura 7a) mostro puntos silla corroborados por las líneas de contorno (Figura 7b). Finalmente se graficaron los valores predichos vs los datos obtenidos por el diseño experimental (Figura 6a), observando que el modelo tiene un buen ajuste y distribución de los datos.

La ecuación de regresión obtenida (ecuación (6)) en términos del código de factores para el porcentaje de remoción de materia orgánica es:

$$\eta = 74.147 + 3.897X_1 + 4.377X_2 + 4.360X_3 - 3.999X_1X_2 - 0.499X_1X_3 - 2.499X_2X_3 + 1.304X_1^2 - 2.231X_2^2 + 2.542X_3^2 \quad (6)$$

Decodificaron la ecuación (6) obtenemos la función que describe la η en términos de DQO, X_s y t (Ecuación (7)):

$$\eta = -118.952 + 0.2371(DQO) + 0.1034(X_s) + 0.7661(t) - 1.599 \times 10^{-4}(DQO)(X_s) - 8.333 \times 10^{-4}(DQO)(t) - 4.166 \times 10^{-4}(X_s)(t) + 5.217 \times 10^{-4}(DQO)^2 - 8.925 \times 10^{-6}(X_s)^2 + 0.0176(t)^2 \quad (7)$$

6.3 Calidad de los lodos

De igual forma que en el factor 1 los datos para el índice volumétrico de lodos no requirieron de ajuste de modelo, por lo que Design Expert sugirió un modelo cuadrático. Primero se evaluó el modelo cuadrático y posteriormente un modelo modificado, de esta forma el análisis de varianza (ANOVA) quedo de la siguiente manera:

Tabla 9.

ANOVA de la respuesta 2

Modelo	Prob > F	R ²	R ² predicha	Precisión	SD	CV	PRESS	Lack of fit F-Value
Cuadrático	0.1149	0.6665	0.3663	4.604	21.90	17.70	27824.9	2.45
Modificado	0.0477	0.5774	0.3823	6.429	21.63	17.48	17327.1	2.11

SD: Desviación estándar, CV: Coeficiente de variación

Tabla 10.

Significancia de los términos de los modelos para la respuesta 2

Termino	Cuadrático	Modificado
	Prob > F	Prob > F
X ₁	0.2408	0.2288
X ₂	0.1115	0.1005
X ₃	0.5755	0.5677
X ₁ X ₂	0.4039	0.3934
X ₁ X ₃	0.3118	-----
X ₂ X ₃	0.4209	-----
X ₁ ²	0.3826	-----
X ₂ ²	0.0080	0.0061
X ₃ ²	0.1737	0.1854

Los resultados mostrados por la ANOVA para el modelo cuadrático indican que el modelo para el ajuste cuadrático no es significativo ya que la “Prob > F” es mayor a 0.05, por lo que se descartó el uso de este modelo y aunque el modelo modificado tiene una “Prob > F” menor a 0.05, el ajuste de R² es menor a lo recomendado por Montgomery [24], por lo que se espera aporte un error significativo en la optimización.

Para el modelo modificado se tomaron en cuenta los factores X₁, X₂, X₃, X₁ X₂, y X₃² los cuales aún en este modelo no tienen gran significancia, pero proporcionaron un mejor ajuste, siendo X₂² el único termino con significancia del modelo modificado.

La gráfica de perturbación (Figura 5b) muestra que el factor X₁ no tuvo influencia significativa dentro del modelo, mientras que el factor X₂ es el de mayor influencia. Al graficar en 3D (Figura 8a) el modelo modificado, se observó que se forma un punto silla al igual que el factor 1.

La gráfica predicho vs. actual (Figura 6b) muestra una fuerte dispersión de los datos con respecto al ajuste, lo cual se reflejaba en el ANOVA. La ecuación de regresión final obtenida en termino de los factores es:

$$IVL = 105.679 + 7.392X_1 + 10.348X_2 + 3.431X_3 + 6.750X_1X_2 + 18.535X_2^2 + 7.929X_3^2 \quad (8)$$

Decodificando la ecuación queda como:

$$IVL = 673.964 - 0.527(DQO) - 0.417(X_s) - 2.356(t) + 2.699 \times 10^{-4}(DQO)(X_s) + 7.414 \times 10^{-5}(X_s)^2 + 0.551(t)^2 \quad (9)$$

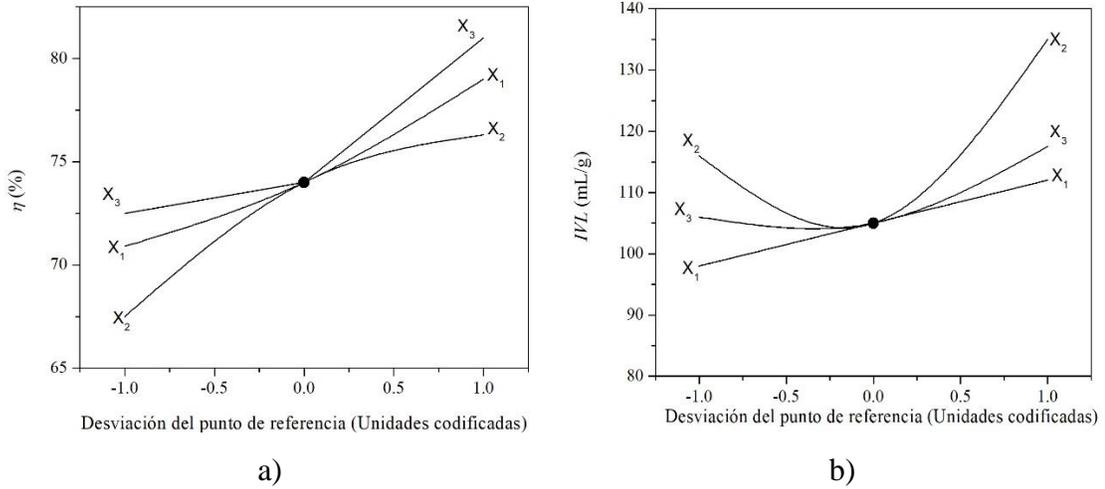


Figura 5

Gráfica de perturbación de a) η e b) IVL de los tres factores empleados a las condiciones iniciales (X₁: 250 mg O₂/L, X₂: 2500 mg/L y X₃: 24 h)

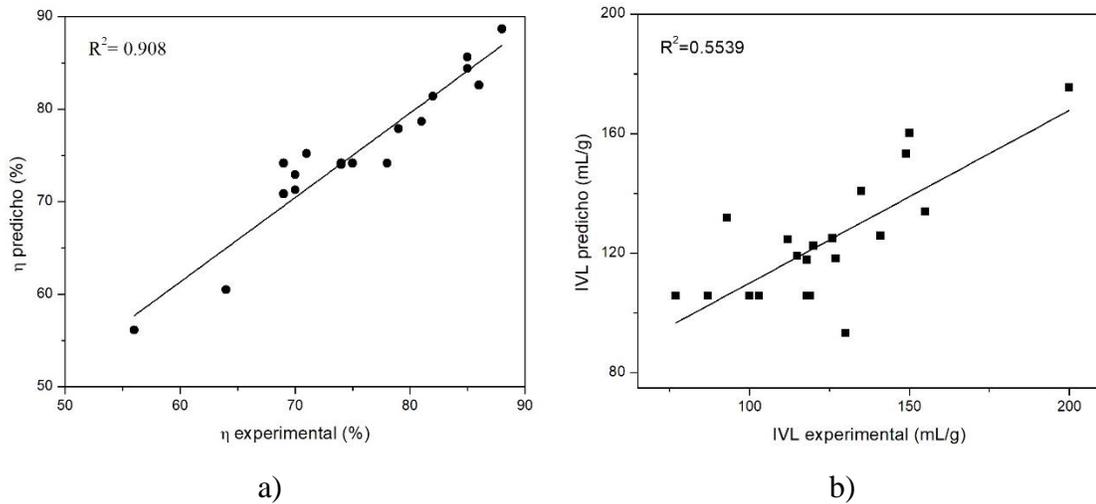


Figura 6

Predicha vs. Actual de a) η e b) IVL

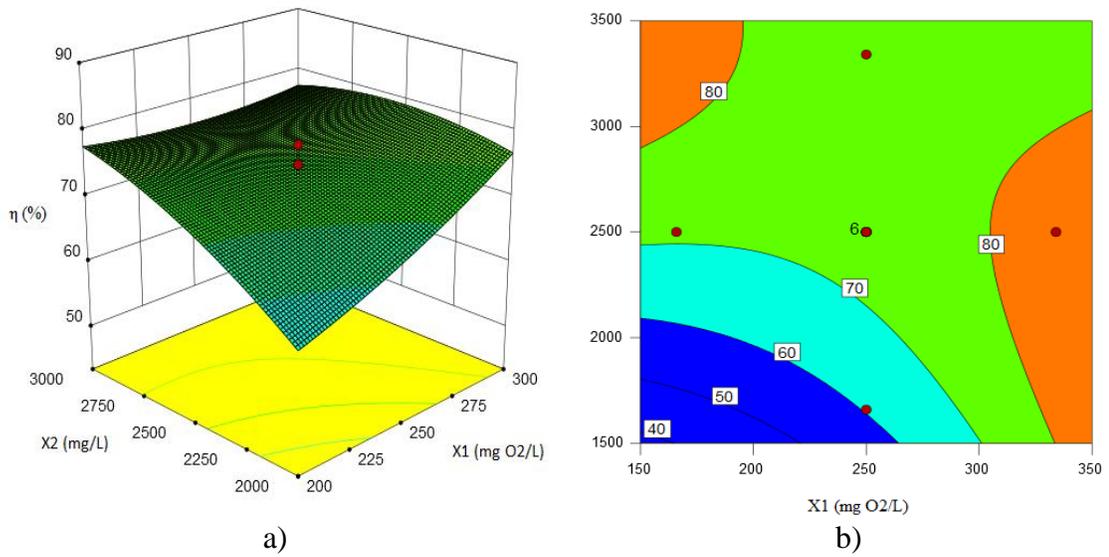


Figura 7
Gráfica a) 3D y b) contorno de la η a X_3 : 24 h

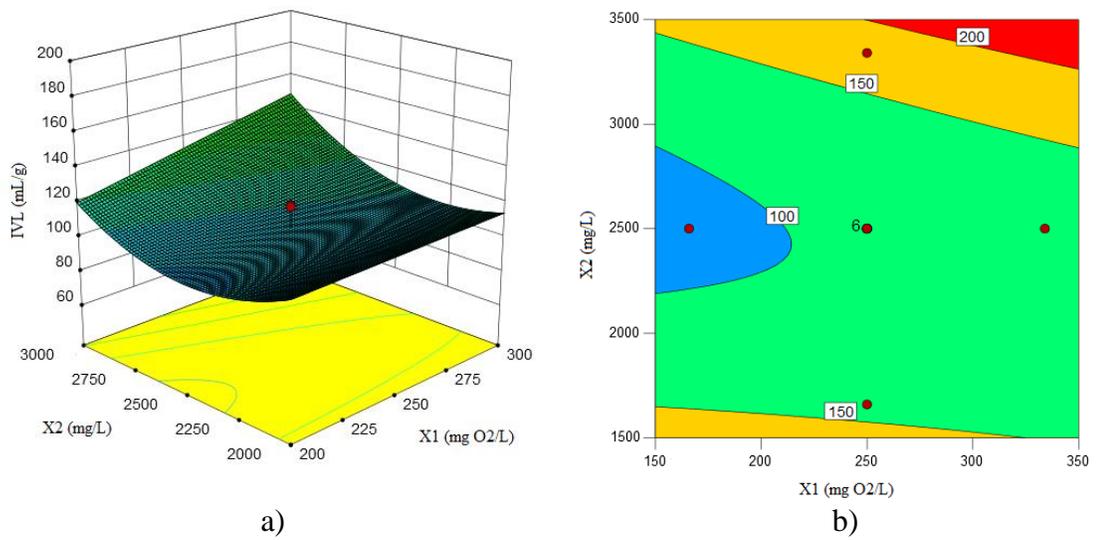


Figura 8
Gráfica a) 3D y b) contorno del IVL a X_3 : 24 h

6.4 Valores óptimos de operación del LOA-SBR

Los valores óptimos de operación se obtuvieron a partir de las restricciones siguientes:

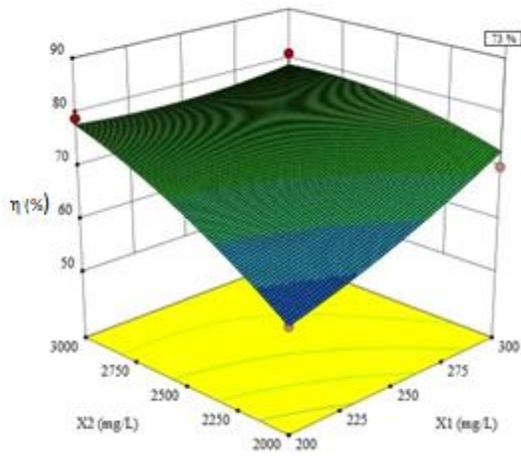
Tabla 11.

Restricciones

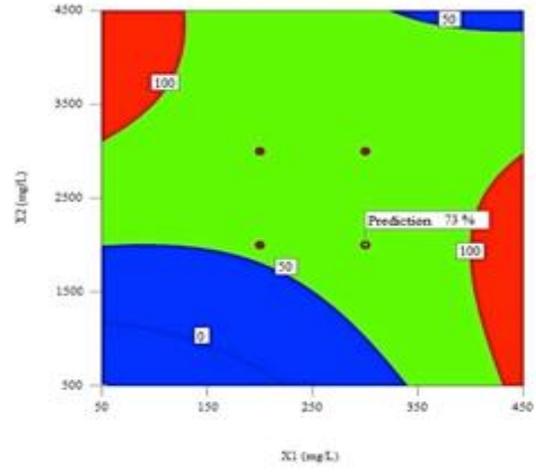
Restricción	Finalidad	Límite mínimo	Límite máximo	Jerarquía
X_1	rango	200	300	+++
X_2	minimizar	2000	3000	+++
X_3	minimizar	12	36	+++
η	maximizar	56	88	+++
IVL	rango	80	150	+++

Todas las restricciones se evaluaron a la misma prioridad, obteniendo un total de 49 posibles puntos óptimos; los cuales tenían deseabilidades que iban entre los 0.5960 hasta 0.8085, cada uno de los 49 posibles resultados se estudiaron y analizaron, siendo el resultado numero 1 el que cumplió con los criterios establecidos y la deseabilidad mayor (Ver Figura 11b).

Donde los valores óptimos de operación del proceso de tratamiento de aguas residuales domesticas son: X_1 de 300 mg O_2/L , X_2 de 2000 mg/L y X_3 de 12 h, obteniéndose las respuestas de η del 73% e IVL de 119 mg/L, con una deseabilidad combinada (Ver Figura 11b) del 0.8087.



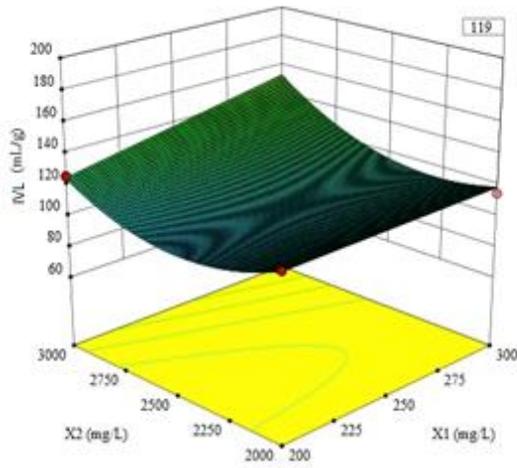
a)



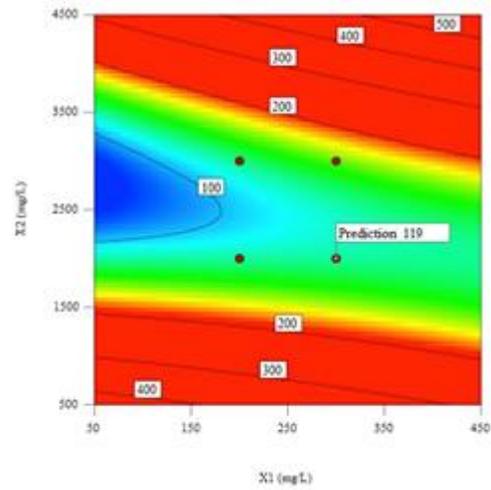
b)

Figura 9

Gráfica a) 3D y b) contorno de la η a las condiciones óptimas



a)



b)

Figura 10

Gráfica de a) 3D y b) contorno del IVL a las condiciones óptimas

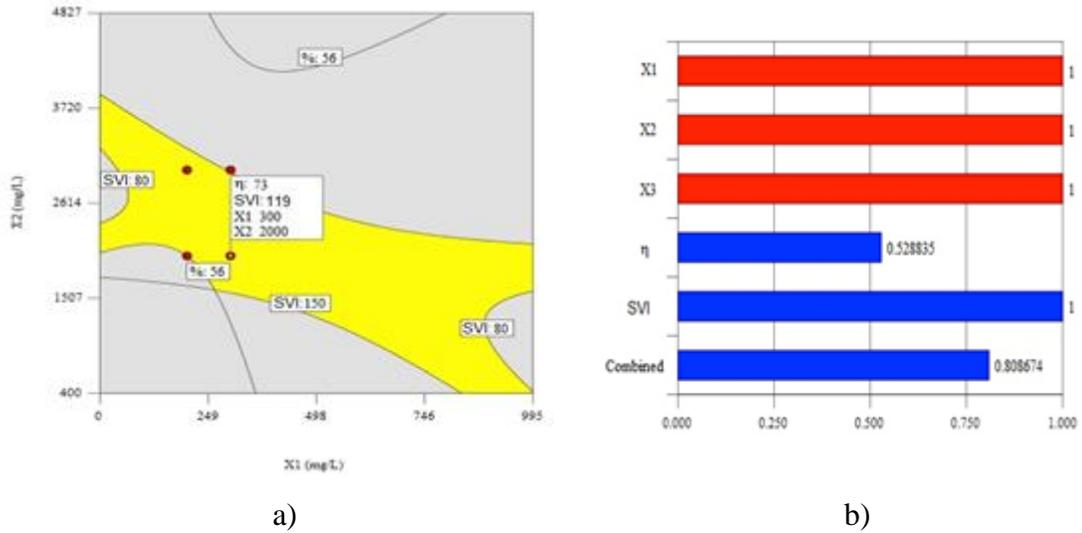


Figura 11

Gráfica de a) contorno de las interacciones de las respuestas y de b) deseabilidad

6.5 Validación de los parámetros óptimos de operación del SBR

Finalmente se operó el reactor a las condiciones óptimas (X_1 de 300 mg O_2/L , X_2 de 2000 mg/L y X_3 de 12 h) para comparar los resultados experimentales de las respuestas, con los obtenidos por el MSR. El desarrollo del experimento se llevó a cabo de la misma manera que en los pasos de la metodología descrito en el apartado 5.3, mientras que para los cálculos se utilizaron los apartados 5.3 y 5.5.

Tabla 12.

Resultado de la validación

	Respuestas	
	η (%)	IVL (mL/g)
Predicho	73	119
Experimental	76	110
Error relativo	3.9	9

6.6 Costo de operación

Finalmente se calculó el costo de operación del SBR empleado, tomándose únicamente el requerimiento energético para llevar a cabo la aireación del tanque, despreciando los requerimientos de energía para bombeo al reactor. De igual forma se despreciaron las ganancias posibles a generarse al convertir el lodo residual en abono, dejando al costo total únicamente en función del tiempo, requerimiento energético del compresor y del costo eléctrico del mercado.

$$C_{Total} = \frac{(V * A)}{1000} * t * \$ \quad (10)$$

Donde:

V = voltios del compresor

A = ampers del compresor

t = tiempo (h)

\$ = costo eléctrico por hora (\$ MXN/kWh)

El compresor Thomas modelo 5030-A tiene en su ficha técnica valores de V = 115 voltios y A = 0.75 ampers, mientras que el valor del costo eléctrico se encuentra en \$ 1.29 MXN/kWh [36] en uso de demanda industrial en el estado de Oaxaca para el mes de Julio de 2018. Por lo que el costo total de operación a las condiciones de estabilización de operación del reactor (22 h) es de \$ 2.45 MXN, para las condiciones iniciales del diseño experimental (24 h) el costo es de \$ 2.67 MXN y finalmente para el punto óptimo (12 h) el costo fue de \$ 1.34 MXN.

6.8 Discusión

Se observó que el ajuste del modelo matemático de la η se encuentra en función de los factores seleccionados, mientras que el IVL no tiene buena correlación con los factores seleccionados. Esto puede deberse a que la carga orgánica en el reactor no garantiza que el consorcio microbiano crezca equitativamente y a que la concentración de biomasa no especifica su influencia directa en la sedimentabilidad del lodo. E. Asensi en 2015 [37] mostró que la sedimentación de los lodos activados se encuentran en función del mecanismo en la formación de los flóculos, la densidad del lodo y de algunos iones como Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} o de la presencia de algunas proteínas y polisacáridos.

Metcalf & Eddy [38] reporta que la eficiencia máxima para los SBR es del 75% habiendo algunos casos particulares en los que la eficiencia alcanza hasta un 80% de oxidación del tejido celular, con base en esta información, se observa al operar el SBR a las condiciones óptimas obtenidas en este trabajo de investigación, la eficiencia de remoción de materia orgánica alcanza valores cercanos a la eficiencia máxima reportada en literatura con un 73% de remoción en valor teórico y un 76% en valor experimental. En la Tabla 13 podemos observar una comparación de los distintos tipos de reactores y tipos de aguas empleadas en reactores SBR y SBBR, destacando que los factores empleados en este trabajo tiene las mejores condiciones de operación con respecto a los SBR en similares condiciones [11], [26], [29] y es competitivo con los SBBR.

La calidad del lodo medida como IVL debe encontrarse entre los 80 y 150 mL/g [39] y el reactor empleado en este estudio se encuentra en el intervalo de 110-119 mL/g describiendo una buena distribución de los microorganismos.

Adicionalmente cabe recalcar que en la mayoría de los trabajos revisados en la tabla 13, las aguas residuales utilizadas son del tipo sintéticas, las cuales proporcionan mayores condiciones de control y eliminan la influencia de otros contaminantes que pudiesen contenerse en un agua residual. Sin embargo en este trabajo se empleó agua residual domestica real, la cual al ser tomada directamente de la fuente esta contenía diversos contaminantes que no podían cuantificarse, los cuales influyen en la biomasa y por lo tanto en las respuestas propuestas, De tal manera es que este trabajo alcanza valores de respuestas cercanos a los obtenidos en plantas de tratamiento ya puestas en marcha.

Tabla 13.

Comparación de resultados en distintos artículos

Agua residual	Reactor	Factores	Respuestas		Referencia
			η (%)	IVL (mL/g)	
Agua residual municipal	SBR escala piloto	t: 12 h, DQO: 300 mg/L y X_s : 2000 mg/L	73.0	119.0	Este trabajo
Agua residual municipal	SBR escala piloto	---	58.5		[29]
Agua residual de papelera	SBR escala laboratorio	TRH: 24 h, DQO: 1316 mg/L y X_s : 300-500 mg/L	93.0	---	[40]
Agua residual sintética láctea	SBBR escala laboratorio	t: 7 h, DQO: 1500-5000 mg/L y X_s : 5000-6000 mg/L	85.0	80.0	[12]
Agua residual de papelera	GAC-SBBR escala piloto	TRH: 24 h, DQO: 700-1000 mg/L y X_s : 2500-2800 mg/L	97.0	---	[27]
Lixiviados de vertedero	PAC-SBR escala laboratorio	t: 5.5 h y flujo de aireación 1 L/min	64.1	122.2	[26]
Agua residual de textilería (colorantes)	SBR escala piloto	Flujo de aire: 15.9 L/h, SRT de 15 días y t: 24 h	63.0	200.0	[11]

VII. CONCLUSIONES

Se obtuvieron las condiciones óptimas de remoción de materia orgánica y calidad de lodos, las cuales son: una concentración de alimentación de materia orgánica de 300 mg O₂/L, una concentración de biomasa de 2000 y un tiempo de 12 h de aireación.

El SBR empleado en este proyecto es una tecnología de tratamiento de aguas residuales domésticas reales exitosa y confiable comparado a lo reportado en literatura [38], ya que alcanza una remoción óptima del 73% de materia orgánica en un tiempo de operación relativamente corto (12 h) comparado a otras publicaciones (Ver tabla 13).

La deseabilidad general de este estudio de optimización multi-paramétrica es de 0.808674, lo que quiere decir, que tiene una fuerte tendencia a la idealidad (1), indicando que el objetivo de optimizar las respuestas se cumplió adecuadamente.

La optimización multi-paramétrica realizada en este trabajo mostró un beneficio económico al tener un ahorro del 49.8% de energía eléctrica.

Los valores óptimos de la operación del SBR, empleado en este trabajo, generan respuestas de tipo silla, los cuales conducen a la operación óptima del proceso de tratamiento de aguas residuales domésticas, lo que significa que, para mantener estas condiciones de operación sin perturbaciones, es necesario implementar un sistema de control.

TRABAJOS A FUTURO

- Realizar experimentos para obtener la cinética de reacción de dicho proceso para obtener un modelo determinístico y/o estocástico, a las condiciones de operación del proceso descritos en este trabajo.
- Diseño e implementación de un sistema de control del tipo plant-wide para mantener las condiciones óptimas de operación, así como la economía del proceso de tratamiento de aguas residuales domésticas.
- Obtener un modelado del proceso de sedimentación de los lodos activados en el SBR empleado en esta tesis.
- Realizar la caracterización del consorcio microbiano que participa en el tratamiento de aguas residuales domesticas empleado en esta tesis.
- Evaluar la influencia de otros compuestos presentes en aguas residuales domésticas reales en la eficiencia y calidad de lodo.

REFERENCIAS

- [1] R. Hreiz, M. A. Latifi, and N. Roche, “Optimal design and operation of activated sludge processes: State-of-the-art,” *Chem. Eng. J.*, vol. 281, pp. 900–920, 2015.
- [2] A. Ferrari, S. Gutierrez, and E. C. Biscaia, “Development of an optimal operation strategy in a sequential batch reactor (SBR) through mixed-integer particle swarm dynamic optimization (PSO),” *Comput. Chem. Eng.*, vol. 34, no. 12, pp. 1994–1998, 2010.
- [3] N. Artan, P. Wilderer, D. Orhon, E. Morgenroth, and N. Ozgur, “The mechanism and design of sequencing batch reactor systems for nutrient removal--the state of the art.,” *Water Sci. Technol.*, vol. 43, no. 3, pp. 53–60, 2001.
- [4] N. U. Lizet Marina, G. S. Raquel, and D. M. Alfonso, “Comparación de un reactor de biomasa suspendida y un reactor de biomasa adherida para la biodegradación de compuestos tóxicos presentes en aguas residuales de refinerías de petróleo,” *Rev. Int. Contam. Ambie.*, vol. 30, no. 1, pp. 101–112, 2014.
- [5] R. Kleerebezem and H. Macarie, “Treating industrial wastewater: anaerobic digestion comes of age: anaerobic treatment systems offer important advantages over conventionally applied aerobic processes for removing organic pollutants from water- based streams,” *Chem. Eng.*, pp. 56–64, 2003.
- [6] B. Chachuat, N. Roche, and M. A. Latifi, “Optimal aeration control of industrial alternating activated sludge plants,” *Biochem. Eng. J.*, vol. 23, no. 3, pp. 277–289, 2005.
- [7] J. Zhai *et al.*, “Optimization of biomass production and nutrients removal by *Spirulina platensis* from municipal wastewater,” *Ecol. Eng.*, vol. 108, pp. 83–92, 2017.
- [8] A. Akhbari, A. A. L. Zinatizadeh, P. Mohammadi, M. Irandoust, and Y. Mansouri, “Process modeling and analysis of biological nutrients removal in an integrated RBC-AS system using response surface methodology,” *Chem. Eng. J.*, vol. 168, no. 1, pp. 269–279, 2011.
- [9] R. O. Cristóvão, C. Gonçalves, C. M. Botelho, R. J. E. Martins, J. M. Loureiro, and R. A. R. Boaventura, “Fish canning wastewater treatment by activated sludge:

- Application of factorial design optimization. Biological treatment by activated sludge of fish canning wastewater.,” *Water Resour. Ind.*, vol. 10, pp. 29–38, 2015.
- [10] S. Rezaee, A. A. L. Zinatizadeh, and A. Asadi, “Comparative study on effect of mechanical mixing and ultrasound on the performance of a single up-flow anaerobic/aerobic/anoxic bioreactor removing CNP from milk processing wastewater,” *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 58, pp. 297–309, 2016.
- [11] S. Sathian, M. Rajasimman, G. Radha, V. Shanmugapriya, and C. Karthikeyan, “Performance of SBR for the treatment of textile dye wastewater: Optimization and kinetic studies,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 53, no. 2, pp. 417–426, 2014.
- [12] A. A. L. Zinatizadeh, Y. Mansouri, A. Akhbari, and S. Pashaei, “Biological treatment of a synthetic dairy wastewater in a sequencing batch biofilm reactor: statistical modeling using optimization using response surface methodology,” *Chem. Ind. Chem. Eng. Q.*, vol. 17, no. 4, pp. 485–495, 2011.
- [13] Z. Shaykhi Mehrabadi and A. A. L. Zinatizadeh, “Performance of a compartmentalized activated sludge (CAS) system treating a synthetic antibiotics industrial wastewater (SAW),” *J. Water Process Eng.*, vol. 3, no. C, pp. 26–33, 2014.
- [14] J. Xu *et al.*, “Evaluating the influence of process parameters on soluble microbial products formation using response surface methodology coupled with grey relational analysis,” *Water Res.*, vol. 45, no. 2, pp. 674–680, 2011.
- [15] C. F. Bustillo-Lecompte and M. Mehrvar, “Treatment of actual slaughterhouse wastewater by combined anaerobic–aerobic processes for biogas generation and removal of organics and nutrients: An optimization study towards a cleaner production in the meat processing industry,” *J. Clean. Prod.*, vol. 141, pp. 278–289, 2017.
- [16] J. Y. Ahn, K. H. Chu, S. S. Yoo, J. S. Mang, B. W. Sung, and K. B. Ko, “Determination of optimal operating factors via modeling for livestock wastewater treatment: Comparison of simulated and experimental data,” *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 95, no. PA, pp. 46–54, 2014.
- [17] M. A. Z. Coelho, C. Russo, and O. Q. F. Araújo, “Optimization of a sequencing batch reactor for biological nitrogen removal,” *Water Res.*, vol. 34, no. 10, pp. 2809–

2817, 2000.

- [18] F. J. Fernández, M. C. Castro, M. A. Rodrigo, and P. Cañizares, “Reduction of aeration costs by tuning a multi-set point on/off controller: A case study,” *Control Eng. Pract.*, vol. 19, no. 10, pp. 1231–1237, 2011.
- [19] I. A. C. P. Espírito-Santo, E. M. G. P. Fernandes, M. M. Araújo, and E. C. Ferreira, “How wastewater processes can be optimized using LOQO,” *Lect. Notes Econ. Math. Syst.*, vol. 563, pp. 435–455, 2006.
- [20] S. Balku and R. Berber, “Dynamics of an activated sludge process with nitrification and denitrification: Start-up simulation and optimization using evolutionary algorithm,” *Comput. Chem. Eng.*, vol. 30, no. 3, pp. 490–499, 2006.
- [21] J. Guerrero, A. Guisasola, R. Vilanova, and J. A. Baeza, “Improving the performance of a WWTP control system by model-based setpoint optimisation,” *Environ. Model. Softw.*, vol. 26, no. 4, pp. 492–497, 2011.
- [22] M. Fikar, B. Chachuat, and M. A. Latifi, “Optimal operation of alternating activated sludge processes,” *Control Eng. Pract.*, vol. 13, no. 7, pp. 853–861, 2005.
- [23] R. Hreiz, N. Roche, B. Benyahia, and M. A. Latifi, “Multi-objective optimal control of small-size wastewater treatment plants,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 102, pp. 345–353, 2015.
- [24] R. H. Myers, D. C. Montgomery, and C. M. Anderson-Cook, *Response surface methodology. Process and product optimization using designed experiments*, 3rd ed., no. 3. 2009.
- [25] M. Almeida, R. Erthal, E. Padua, L. Silveira, and L. Am, “Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry,” *Talanta*, vol. 76, pp. 965–977, 2008.
- [26] S. Q. Aziz, H. A. Aziz, M. S. Yusoff, and M. J. K. Bashir, “Landfill leachate treatment using powdered activated carbon augmented sequencing batch reactor (SBR) process: Optimization by response surface methodology,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 189, no. 1–2, pp. 404–413, 2011.
- [27] M. H. Muhamad, S. R. Sheikh Abdullah, A. B. Mohamad, R. Abdul Rahman, and A. A. Hasan Kadhum, “Application of response surface methodology (RSM) for optimisation of COD, NH₃-N and 2,4-DCP removal from recycled paper

- wastewater in a pilot-scale granular activated carbon sequencing batch biofilm reactor (GAC-SBBR),” *J. Environ. Manage.*, vol. 121, pp. 179–190, 2013.
- [28] V. Alimohammadi, M. Sedighi, and E. Jabbari, “Response surface modeling and optimization of nitrate removal from aqueous solutions using magnetic multi-walled carbon nanotubes,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 4, no. 4, pp. 4525–4535, 2016.
- [29] R. A. Hernández Viruel, “Lavado de sales en suelos agrícolas de la barra Colotepec, Oaxaca, con agua residual tratada,” Universidad del Mar, 2011.
- [30] D. M. Miller, “Reducing Transformation Bias in Curve Fitting,” *Am. Stat.*, vol. 38, no. 2, pp. 124–126, May 1984.
- [31] Stat-Ease, “Response Surface — Design Expert documentation.” [Online]. Available: <https://www.statease.com/docs/v11/credits.html>.
- [32] D. Mesquita, O. Dias, A. Amaral, and E. Ferreira, *Relationship between sludge volume index and biomass structure within activated sludge systems*. 2018.
- [33] Secretaría de economía, “NMX-AA-004-SCFI-2013 Medición de sólidos sedimentables en aguas naturales , residuales y residuales tratadas.” Diario Oficial de la Federación, México, D.F., 2013.
- [34] Secretaría de economía, “" "NMX-AA-034-SCFI-015 Análisis de agua - Medición de sólidos y sales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.” Diario Oficial de la Federación, México, D.F., 2015.
- [35] A. D. E. E.W. Rice, R.B. Baird, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition*, 23rd ed. Washington D. C.: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2017.
- [36] CFE, “Comisión Federal de Electricidad.” [Online]. Available: <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCREIndustria/Tarifas/DemandaIndustrialTran.aspx>.
- [37] E. J. Asensi Dasí, “Estudio y modelización de la velocidad de sedimentación zonal Y de la aceleración de los fangos activados,” Universidad Politécnica de València, 2015.
- [38] Metcalf & Eddy, *Ingeniería de aguas residuales; Tratamiento, vertido y reutilización*. 1995.

- [39] McGraw-Hill, *Water and Wastewater Calculations Manual*, vol. 1, no. 11. 2007.
- [40] Y. F. Tsang, F. L. Hua, H. Chua, S. N. Sin, and Y. J. Wang, "Optimization of biological treatment of paper mill effluent in a sequencing batch reactor," *Biochem. Eng. J.*, vol. 34, no. 3, pp. 193–199, 2007.

APÉNDICE A. ARTÍCULO SOMETIDO

6/9/2018

Γραμμή-Συμβουλευτικών Χημικών Περιβάλλοντος και Υδατικού Περιβάλλοντος, Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογίας, Ινστιτούτο Χημικών Διαδικασιών, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ελλάδα



Alejandro Regalado <alejandro.regalado33@gmail.com>

Submission Confirmation for Parametric optimization of COD removal efficiency and SVI of an activated sludge SBR by means of RSM

1 mensaje

Water Environment Research <em@editorialmanager.com>
Responder a: Water Environment Research <akrizel@wef.org>
Para: Alejandro Regalado-Méndez <alejandro.regalado33@gmail.com>

13 de agosto de 2018, 08:26

Dear Regalado-Méndez,

Your submission entitled "Parametric optimization of COD removal efficiency and SVI of an activated sludge SBR by means of RSM" has been received by journal Water Environment Research.

You will be able to check on the progress of your paper by logging on to <https://wer.editorialmanager.com/>.

Your manuscript will be given a reference number once an Editor has been assigned.

WER IS NOW OFFERING THE OPTION OF OPEN ACCESS. For a fee of \$1400, your article will be labeled as open access on our online platform. WER members who are not subscribers are entitled to 20 percent off. THE OPEN ACCESS FEE IS WAIVED FOR INDIVIDUAL AND INSTITUTIONAL SUBSCRIBERS. (The corresponding author will need to be a subscriber or an employee of an academic institution that subscribes to WER).

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,

Water Environment Research

If you would like your personal information to be removed from the database, please contact the publication office.

https://www.editorialmanager.com/wer/author.asp?access=author&email=alejandro.regalado33@gmail.com&ref=3A1608690468406200161&email=alejandro.regalado33@gmail.com

1/1

Water Environment Research
Parametric optimization of COD removal efficiency and SVI of an activated sludge SBR
by means of RSM
 --Manuscript Draft--

Manuscript Number:	
Full Title:	Parametric optimization of COD removal efficiency and SVI of an activated sludge SBR by means of RSM
Article Type:	Research Article
Section/Category:	0300 Treatment Plant Operations
Keywords:	activated sludge; organic matter (COD) removal efficiency; parametric optimization; pilot-scale; response surface methodology (RSM); sequencing batch reactor
Corresponding Author:	Alejandro Regalado-Méndez, Ph.D. Universidad del Mar SAN PEDRO POCHUTLA, OAXACA MEXICO
Corresponding Author Secondary Information:	
Corresponding Author's Institution:	Universidad del Mar
Corresponding Author's Secondary Institution:	
First Author:	Carlos Estrada-Vázquez, Ph.D.
First Author Secondary Information:	
Order of Authors:	Carlos Estrada-Vázquez, Ph.D. Abimael N. Salinas-Pacheco, Bachelor Ever Peralta-Reyes, Ph.D. Hector M. Poggi-Varaldo, Ph.D. Alejandro Regalado-Méndez, Ph.D.
Order of Authors Secondary Information:	
Abstract:	In this work, the parametric optimization of a real domestic wastewater treated by using an activated sludge sequencing batch reactor (SBR) was performed by means of response surface methodology (RSM). The influence of influent organic matter concentration as Chemical Oxygen Demand (COD _{inf}), biomass concentration (X _s) and aeration time (t) on the chemical oxygen demand (COD), organic matter removal efficiency as COD (η) and sludge volume index (SVI) has been determined in order to evaluate the performance of activated sludge SBR. Results show that organic matter efficiency and maximum SVI were obtained a t of 12 h, 300 mg/L of COD _{inf} and 2000 mg/L of X _s ; the SBR activated sludge exhibited a η of 73 % and a SVI of 119 mL/g. Both values indicated a very good performance of the process. Further, the COD of the effluent under these conditions complied with Mexican regulations for wastewater discharges to water bodies.

1 **Parametric optimization of COD removal efficiency and SVI of an activated sludge SBR by means**
2 **of RSM**

3

4 Carlos Estrada-Vázquez¹, Abimael Salinas-Pacheco¹, Ever Peralta-Reyes¹, Hector M. Poggi-Varaldo²,
5 Alejandro Regalado-Méndez^{1*}

6 ¹ Universidad del Mar, Ciudad Universitaria S/N, Puerto Ángel, San Pedro Pochutla, Oaxaca, México,
7 ZIP 70902

8 ² Environmental Biotechnology and Renewable Energies Group, Centro de Investigación y de Estudios
9 Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Av. Instituto Politécnico Nacional 2508, San Pedro
10 Zacatenco, Delegación Gustavo A. Madero, ZIP 07360

11 * Universidad del Mar, Ciudad Universitaria S/N, Puerto Ángel, San Pedro Pochutla, Oaxaca, México,
12 ZIP 70902, E-mail: alejandro.regalado33@gmail.com

13

14 **ABSTRACT:** In this work, the parametric optimization of a real domestic wastewater treated by using an
15 activated sludge sequencing batch reactor (SBR) was performed by means of response surface
16 methodology (RSM). The influence of influent organic matter concentration as Chemical Oxygen
17 Demand (COD_{inf}), biomass concentration (X_s) and aeration time (t) on the chemical oxygen demand
18 (COD), organic matter removal efficiency as COD (η) and sludge volume index (SVI) has been
19 determined in order to evaluate the performance of activated sludge SBR. Results show that organic
20 matter efficiency and maximum SVI were obtained a t of 12 h, 300 mg/L of COD_{inf} and 2000 mg/L of X_s ;
21 the SBR activated sludge exhibited a η of 73 % and a SVI of 119 mL/g. Both values indicated a very
22 good performance of the process. Further, the COD of the effluent under these conditions complied with
23 Mexican regulations for wastewater discharges to water bodies.

APÉNDICE B. ABSTRACT ACEPTADO AL 6th ISEBE



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA
ESTAR PARA TRABAJAR



The Sixth International
Symposium on Environmental
Biotechnology and
Engineering



IV Congreso Nacional
de Tecnologías y
Ciencias Ambientales



French National Research
Institute for Sustainable
Development
Institut de Recherche
pour le Développement
FRANCE

The Sixth International Symposium on Environmental Biotechnology and Engineering
Ciudad Obregón, Sonora, México, November 5th to 9th, 2018

- And -

IV CONGRESO NACIONAL DE TECNOLOGÍAS Y CIENCIAS AMBIENTALES

Cd. Obregón, Sonora México. Agosto 2018

Dear author,

I am pleased to inform you that your work has been accepted to be presented it in the 6th International Symposium on Environmental Biotechnology and Engineering 2018 (6ISEBE) and IV Congreso Nacional de Tecnologías y Ciencias Ambientales.

Abstract information:

Work title	Work type	Publication mode	Tematical topic
Removal efficiency of organic matter in a sequential batch activated sludge reactor for treatment of municipal wastewater	Poster	Abstract	Wastewater Treatment

To obtain your certificate of participation, it is required that at least one of the authors is registered before September 18th, 2018, and that the work has actually been presented. If you want that your work to be published in full length in the conference proceedings, it is necessary to comply with the above criteria and have sent your work in full before September 28th, 2018 to the e-mail ponenciascnn@gmail.com.

For publication you have three options: a) book with ISBN, b) Mexican Journal of Biotechnology (www.mexbiotechnol.com), and c) Environmental Science Research Pollution (<https://link.springer.com/journal/11356>). To publish in the ISBN book, instructions will be given in this link: www.itson.mx/6isebe. To publish in the indicated journals, you must follow the guide lines and procedures of the journal chosen.

Dra. Ruth Gabriela Ulloa Mercado

Organizing Committee



Asociación de Biotecnología, Ingeniería Ambiental y Energías Renovables

Removal efficiency of organic matter in a sequential batch activated sludge reactor for treatment of municipal wastewater

A. N. Salinas-Pacheco⁽¹⁾, C. Estrada-Vázquez*⁽¹⁾, E. Peralta-Reyes⁽¹⁾, A. Regalado-Méndez⁽¹⁾

Universidad del Mar campus Puerto Ángel, Ciudad Universitaria, Puerto Ángel, Distrito de San Pedro Pochutla, Oax., México

*Corresponding author: carlosvsz@yahoo.com

This pilot-scale study aimed to test the removal efficiency of organic matter in a sequential batch activated sludge reactor (LOA-SBR) for treatment of diluted municipal organic wastewater, for use in populations with a low number of inhabitants. The bioreactor was operated in a 24 h cycle with an aeration time of 22.4 h at constant flow rate, for a period of 365 days. The environmental conditions that mentioned the reactor operated was established from a multiparameter, resulting in a pH of 7.96, a temperature of 26.9 °C and electrical conductivity of 1700 mS/cm.

The average results obtained show that the reactor had a removal efficiency of organic matter expressed as COD of 68.1%, with a sludge concentration of 3100 mg/L and a volumetric sludge index of 120 ml/mg. In spite of the high variation of organic matter concentration in the tributary (with COD values ranging from 180 to 540 mg O₂/L), the LOA-SBR showed no impairment in its functioning; the color of the mud remained brown, there was no presence of odors in the effluent; the difference in color between the affluent and the effluent was visible; the accumulation of solids at the edges was minimal and there was no foam on the surface of the reactor. Finally, the sludge concentration was modified to improve the operation of the reactor in concentrations of 3000, 2500 and 2000 mg/L, with an organic load of 2500 mg O₂/L. It was observed that decreasing the sludge concentration at 2500 mg/L, the reactor efficiency increases up to 70% organic matter removal. In conclusion, the removal efficiency of organic matter in an LOA-SBR reactor tested is low compared with other treatment systems used in literature, so it is necessary to improve the operating variables of the tested reactor to raise the efficiency and that this type of reactors will be useful in small populations where the generation of this type of water is common.

Keywords: SBR, activated sludge, wastewater, pilot-scale.