



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

División de Ciencias e Ingeniería



**CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS
DE LA PLANTA CENTENARIO MEDIANTE EL MÉTODO
RESPIROMÉTRICO DE PULSOS**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
LICENCIADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

PRESENTA:

JORGE LUIS TEJERO GÓMEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. JOSÉ MANUEL CARRIÓN JIMÉNEZ

Chetumal Quintana Roo, México, Octubre de 2007



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

División de Ciencias e Ingeniería



Tesis elaborada bajo la supervisión del comité de Tesis del programa de Licenciatura y aprobada como requisito para obtener el grado de:

LICENCIADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL

COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR: _____
Dr. José Manuel Carrión Jiménez

ASESOR: _____
Q.F.B. José Luíz González Bucio

ASESOR: _____
M.C. Jaime Cuevas Domínguez

ASESOR SUPLENTE: _____
M.C. José Martín Rivero Rodríguez

ASESOR SUPLENTE: _____
M.C. Juan Carlos Ávila Reveles

Chetumal, Quintana Roo, México, Octubre de 2007

Dedicatoria:

*Esta tesis se las dedico con mucho amor y cariño a mis padres: **Sr. German Tejero Manrique y Sra. Asunción Gómez Ortega** muchas gracias por todo su apoyo incondicional y por todo el esfuerzo realizado para darme la mejor herencia de la vida que es la Educación.*

A ti padre que eres un ejemplo de lucha y espíritu y por el apoyo incondicional que me has brindado a lo largo de mi vida.

A ti madre por haberme dado la vida, por todo el amor que me brindas y por apoyarme cuando mas lo he necesitado. Eres única en el mundo te adoro con toda mi alma.

A mi Querida Familia por todo el amor, cariño y consejos que me han dado por siempre para ser una mejor persona. Esto es también triunfo de ustedes los quiero mucho.

A ustedes adoradas hermanas Mariana Elizabeth, Candelaria del Carmen y Karla Karina, por la alegría que le dan a mi vida, por su cariño. Gracias por sus consejos y por hacerme ver mis errores pero sé que todo es para bien...las quiero mucho.

A ti Dios por darme la vida y permitirme llegar a cumplir este sueño que es fruto de constancia y perseverancia.

Agradecimientos:

Al Dr. José Manuel Carrión Jiménez por haber depositado su confianza en mí para la realización de este proyecto, por los conocimientos impartidos y por el tiempo dedicado a la supervisión de esta tesis, también muchas gracias porque en Usted encontré más que un maestro a un gran amigo.

A la División de Ciencias e Ingeniería DCI (Dra. Lourdes Castillo Villanueva y M.E.S. Roberto Acosta Olea) y al Comité de Evaluación por el apoyo económico brindado para la realización de este trabajo de titulación.

Al Ing. Ricardo Alfonso Sánchez Rivera Subgerente Técnico Urbano de CAPA y al personal de operación de la Planta Centenario.

Al Q.F.B. José Luis González Bucio por su generosa amistad, por todos los conocimientos compartidos y por sus consejos que me ayudaron a salir adelante en la carrera.

Al Dr. Víctor Hugo Delgado Blas por sus consejos, amistad, por las experiencias vividas en sus proyectos y conocimientos que me brindó durante la carrera.

A mis mejores amigos “Gabriel Kúk, Jorge Dorantes, Juan May, Norberto López, Santiago Ávila y Sergio Melken” y a toda mi generación por su apoyo académico y por compartir experiencias muy buenas durante la carrera; suerte para todos.

A mis estimados profesores que me brindaron una amplia gama de conocimientos y me ayudaron para seguir escalando peldaños: Laura Patricia, Norma Oropeza, José Luís Guevara, Juan Carlos Ávila, Martín Rivero, Mario Rivero, Alberto Pereira y Julio César San Juan (Q.e.p.d)

A la Q.F.B Magdalena Maldonado Cervera y a la Técnica Rosymar Illescas Rivero, responsables del laboratorio de usos múltiples por el apoyo y las facilidades otorgadas con equipo y material para la realización de esta tesis.

Reflexión.

La voluntad de llegar, las ganas de vencer, el deseo de usar todo tu potencial, estas son las llaves para abrir la puerta a tu excelencia.

(Eddie Robinson)

CONTENIDO

Índice	Pág.
Dedicatoria.....	<i>i</i>
Agradecimientos.....	<i>ii</i>
Índice.....	<i>iv</i>
Introducción.....	1
Objetivos generales.....	4
Objetivos particulares.....	4
Hipótesis.....	4

CAPÍTULO I. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES “CENTENARIO”

1.1. Descripción general.....	5
Figura 1.1.- Diagrama del sistema de tratamiento de agua residual de la planta “Centenario”.....	5
1.2. Etapas de proceso de la planta “Centenario”.....	6
1.2.1. Pretratamiento.....	6
1.2.2. Tratamiento secundario.....	7
1.2.3. Disposición de lodos.....	8
1.2.4. Diseño del sistema de lodos activados de la planta “Centenario”.....	9
Tabla 1.1.- Problemas detectados en la planta “Centenario”.....	9
Tabla 1.2- Valores de datos de diseño y parámetros biocinéticos calculados en SuperPro Designer para diferentes caudales de agua residual doméstica.....	10

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1.- Determinaciones Analíticas.....	12
Figura 2.1.- Arreglo experimental del respirómetro utilizado para la estimación de parámetros biocinéticos.....	13
2.2.- Estimación de parámetros biocinéticos.....	14
2.2.1. Arreglo experimental.....	14

2.2.2. Determinación de $K_L a$	15
2.2.3. Método de pulsos.....	16
Figura 2.2.-Diagrama del modelo teórico utilizado en el programa Model Maker.....	16
2.3. Simulación del proceso de lodos activados.....	17
Tabla 2.1.- Datos de diseño requeridos para realizar la simulación en SuperPro Designer y datos de salida de la simulación.....	17
2.3.1 Diseño del reactor de lodos activados.....	18
2.3.2. Ecuación estequiométrica para degradación de materia orgánica del agua residual.....	18
2.3.3. Requerimientos y abastecimiento de oxígeno.....	20
Tabla 2.2.- Constantes utilizadas para calcular requerimientos de oxígeno.....	21
2.3.4. Cálculo de la potencia de aireación.....	22
2.3.5. Cálculo de la producción de lodos.....	23
Tabla 2.3.- Constantes utilizadas para calcular la producción de lodos.....	23

CAPITULO III. EVALUACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

Tabla 3.1.- Fechas de las mediciones realizadas que se muestran en las graficas.....	24
3.1. Resultados y discusión.....	25
Figura 3.1.- Concentración de DQO en la entrada y salida del Reactor Biológico de la Planta “Centenario”.....	25
Figura 3.2.- Gráfica del porcentaje (%) de remoción de materia orgánica del Reactor Biológico de la planta “Centenario”.....	26
Figura 3.3.- Concentración de amonio en la entrada y salida del Reactor Biológico de la planta “Centenario”.....	27
Figura 3.4.-Gráfica del porcentaje (%) de remoción de amonio del Reactor Biológico de la planta “Centenario”.....	28
Figura 3.5.- Concentración de Nitrógeno-Nitrito en la entrada y salida del Reactor Biológico de la planta “Centenario”.....	29
Figura 3.6.- Concentración de Nitrógeno-Nitrato en la entrada y salida del Reactor Biológico de la planta “Centenario”.....	30

Figura 3.7.- Concentración de sólidos suspendidos totales (SST) en la entrada y la salida del Reactor Biológico de la planta "Centenario".....31

CAPÍTULO IV. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS

4.1. Resultados y discusión.....32

4.1.1. Estimación de parámetros biocinéticos.....32

Figura 4.1.- Respirograma correspondiente al día 5 de experimentación; el perfil negro corresponde al oxígeno disuelto, El perfil azul define el consumo de oxígeno exógeno.....33

Figura 4.2.- Respirogramas correspondientes a los días de experimentación: (A) 9, (B) 11, (C) 12, (D) 16.....35

Figura 4.3.- Ejemplo de un ajuste del modelo teórico a un perfil OUR correspondiente al día 16.....36

4.1.2. Estimación de costos de operación.....37

Tabla 4.1- Parámetros biocinéticos estimados.....37

Tabla 4.2.- Datos para calcular el Requerimiento de Oxígeno.....38

Tabla 4.3.- Potencia suministrada al reactor en los días 2 y 16 de estudio.....39

Tabla 4.4.- Costos de Aireación del Reactor de Lodos Activados de la Planta Centenario.....40

CAPITULO V. CONCLUSIONES.....41

BIBLIOGRAFÍA.....43

INTRODUCCIÓN

La importancia del agua radica en que es un componente esencial para la vida. Diversos factores como el crecimiento demográfico, el desarrollo industrial y la urbanización influyen en el aumento del consumo de ésta, lo cual incrementa los problemas de contaminación de éste líquido vital. En efecto, la presencia de diferentes compuestos y microorganismos patógenos alteran sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Esta problemática obliga a la implementación de tratamientos eficientes para la eliminación de contaminantes, con el objetivo de mejorar la calidad de las descargas al medio ambiente o para una reutilización del agua. Esto ha creado una gran demanda de plantas modernas y eficientes de tratamiento, así como una vigilancia del tratamiento químico y de la calidad del agua que cumpla con normas de vertimiento establecidas. El tratamiento de aguas residuales generadas por industrias o comunidades se realiza para eliminar o reducir la concentración de las sustancias que contaminan el agua y para evitar la afectación producida por las aguas vertidas a los cuerpos de agua receptores.

Los procesos biológicos son ampliamente utilizados para la remoción de contaminantes en aguas residuales, debido a las ventajas que presentan desde el punto de vista tanto económico como ecológico. En el caso específico de las aguas residuales municipales, el principal objetivo es el de reducir su contenido orgánico y en algunos casos de nutrientes, tales como el nitrógeno y el fósforo. Siendo la materia orgánica contaminante utilizada como alimento por los microorganismos presentes en los tanques o en los reactores. De esta forma pueden obtener la energía necesaria para reproducirse y llevar a cabo sus funciones vitales y la materia orgánica es transformada en nuevas células y otros productos que pueden ser más fácilmente separados del agua.

El proceso de lodos activados, desarrollado en Inglaterra por Arden y Lockett en 1914, recibió este nombre porque involucra la producción de una biomasa activa de microorganismos capaces de estabilizar de manera aerobia un desecho.

A pesar de ser un proceso biológico con altos costos de inversión, operación y mantenimiento sigue siendo muy utilizado en el tratamiento de aguas residuales municipales, debido a que es un proceso estable y con altas eficiencias de remoción de materia orgánica. El proceso consiste en un tratamiento aerobio que convierte la materia orgánica en dióxido de carbono, agua, amonio y nueva biomasa. La materia orgánica entra en contacto con los microorganismos que necesitan oxígeno para respirar y así iniciar el proceso de degradación, el oxígeno requerido por los microorganismos es suministrado mediante el uso de difusores o aireadores de burbuja fina que mantienen el líquido en estado de mezcla completa. El agua residual entra al reactor en el que se encuentra un cultivo de microorganismos constituido principalmente por bacterias en suspensión las cuales en su conjunto se le conoce como “licor mezclado”.

Las condiciones aerobias se mantienen por el suministro de aire, por medio de sistemas de difusión o de aireación mecánica, después de un determinado tiempo de retención el licor mezclado pasa a un tanque de sedimentación secundaria, donde se realiza la separación del agua tratada, donde una parte de los microorganismos floculantes se sedimentan y la otra parte son removidos de la corriente del efluente. Los microorganismos sedimentados se recirculan al inicio del tanque de aireación, con la finalidad de mantener en el reactor la concentración de células necesarias para continuar con el proceso de oxidación de la materia orgánica, mientras que la otra parte se retira del sistema mediante un sistema de purga. Bajo estas condiciones los organismos oxidan una parte del desecho orgánico a dióxido de carbono y agua, para obtener energía y sintetizar la otra parte en forma de células microbianas nuevas utilizando la energía obtenida de la oxidación. **(Tchobanoglous, 2000)**. En este proceso se producen en forma continua lodos activados nuevos, cuyo exceso es necesario eliminar cada día (lodos activados de desecho) junto con los lodos provenientes del tratamiento primario de la planta.

Siendo los sistemas de lodos activados procesos aerobios, la respirometría ha sido una herramienta ampliamente utilizada en el diseño, control y optimización del proceso (Gearney y col., 2001, Brouwer y col., 1999).

La respirometría es una técnica basada en la medición del consumo de oxígeno por los microorganismos aerobios presentes en el licor mezclado. Existen diferentes técnicas respirométricas reportadas en la literatura (Carrión y col., 2003, Gearney y col., 2001, Kong y col., 1994), todas ellas se basan en la obtención de lecturas de oxígeno disuelto, las cuales son procesadas para la obtención de información de interés. Entre los diversos métodos respirométricos reportados en la literatura, se encuentra el método de pulsos (Gearney y col., 2001) que permite la estimación de parámetros cinéticos, y tiene la ventaja adicional de que se puede observar la actividad biológica de microorganismos heterótrofos y autótrofos (Brouwer y col., 1998, Carrión y col., 2005). En efecto el método de pulsos ha sido aplicado con éxito en la estimación de parámetros cinéticos del proceso de remoción de materia orgánica en reactores de lodos activados (Rozzi y col., 1999, Sollfrank y Mujer., 1990, Kabouris y Georgakakos., 1996) y para monitorear el efecto de sustancias tóxicas e inhibitorias en el proceso de lodos activados (Kong y col., 1994), además la estimación de parámetros cinéticos del proceso de nitrificación en estos mismos reactores ha sido obtenida mediante éste método (Yuan y col., 1999). Este método permite adicionalmente el cálculo de parámetros cinéticos en línea, por lo cual se presenta como una herramienta altamente potencial en el control y optimización del proceso de lodos activados. Por otro lado tiene una ventaja de ahorro de tiempo y trabajo, con respecto a otras técnicas de valoración de parámetros cinéticos.

Por todo lo antes mencionado éste método es muy utilizado hoy en día en plantas de tratamiento de aguas residuales con sistemas de lodos activados para el control, la simulación y el diseño del reactor biológico.

En este trabajo se utilizará el método respirométrico de pulsos (Gearney y col., 1999) que consiste en la adición de un pulso de un sustrato determinado a los lodos activados, provocando una caída en la concentración de oxígeno disuelto con respecto al tiempo. Este método permite medir el consumo de oxígeno realizado por los microorganismos autótrofos y heterótrofos encargados de la degradación de la materia orgánica y el nitrógeno presentes en el agua residual.

OBJETIVO GENERAL

Caracterizar el proceso de lodos activados de la planta de tratamiento de aguas residuales “Centenario”, mediante respirometría de pulsos.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Monitorear el proceso de lodos activados mediante un respirómetro en línea al reactor biológico de la planta.
- Observar la actividad de microorganismos heterótrofos y autótrofos en el reactor de lodos activados de la planta mediante el método respirométrico de pulsos.
- Estimar los parámetros cinéticos en el reactor de lodos activados de la planta mediante el método respirométrico de pulsos.
- Realizar una simulación del proceso de lodos activados de la planta.
- Desarrollar un método de optimización del proceso de lodos activados de la planta.

HIPOTESIS.

Es posible optimizar el proceso de lodos activados del reactor biológico de la planta “Centenario”, estimando los parámetros cinéticos mediante el método respirométrico de pulsos.

CAPITULO I

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES “CENTENARIO”

1.1.- DESCRIPCIÓN GENERAL.

La planta de tratamiento de aguas residuales “Centenario” está ubicada en la Ciudad de Chetumal capital del Estado de Quintana Roo y realiza un tratamiento biológico con un sistema aerobio del tipo “lodos activados” con dos reactores de mezcla completa.

La planta tiene una capacidad de recibir un caudal máximo de 120 l/s, proveniente de 3 estaciones de bombeo operando de forma alternativa los cuales son: el cárcamo de la avenida 4 de Marzo (final), cárcamo ocho y el cárcamo del Fraccionamiento Caribe. El mayor aporte de agua residual que llega a la planta es proveniente de la estación de bombeo de la Av. 4 de Marzo.

La planta Centenario realiza las siguientes etapas en su proceso.

- Pretratamiento
- Tratamiento secundario
- Disposición de lodos

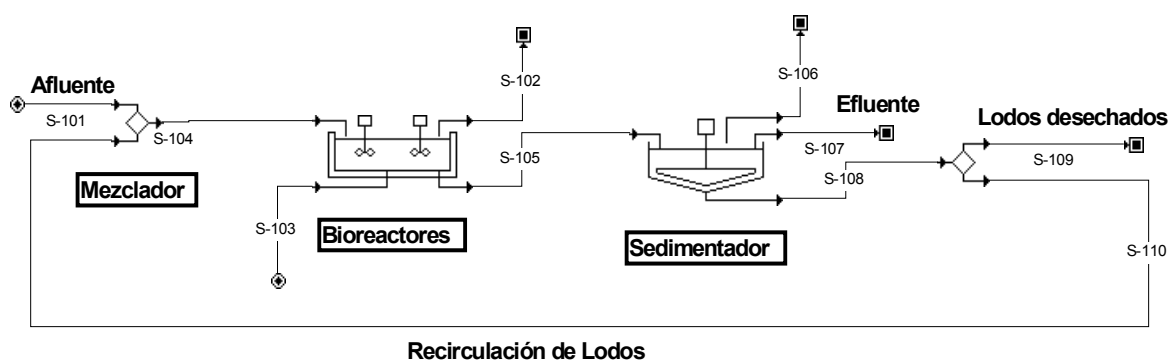


Figura 1.1.- Diagrama del sistema de tratamiento de agua residual de la planta “Centenario” ubicada en Chetumal Quintana Roo.

En el diagrama anterior se observan las etapas de proceso de las que consta la planta centenario de la ciudad de Chetumal, en el diagrama se aprecia que está integrado por un mezclador en el pretratamiento seguido del proceso biológico que constan de 2 reactores de lodos activados de mezcla completa de 3200 m³ cada uno; el clarificador secundario que tiene un volumen de 2123.076 m³, y por ultimo se presenta una corriente de lodos de desecho y la recirculación de lodos.

1.2.- ETAPAS DE PROCESO DE LA PLANTA “CENTENARIO”

1.2.1- Pretratamiento

El diseño de pretratamiento está constituido por una caja receptora, canal de rejillas, canal desarenador y caja distribuidora de flujo. Las unidades que integran el sistema de pretratamiento se diseñaron para el caudal máximo, divididas en tres trenes de tratamiento; uno para cada módulo. Debido a que el agua residual cruda que alimenta a la planta de tratamiento es suministrada por una línea de conducción de (24”) de diámetro y se tienen tres módulos de tratamiento, el agua llega a una caja receptora para después mediante compuertas distribuir el agua a cada uno de los canales del pretratamiento.

1. Cribado

El cribado se realiza para remover el material grueso flotante y los sólidos de diferentes tamaños generalmente en suspensión contenidas en las aguas residuales provenientes de los cárcamos de bombeo. Las rejillas o cribas se usan como elementos de protección para evitar dañar las bombas, tuberías y otros equipos mecánicos de la planta de tratamiento e interferir en la buena operación del proceso de tratamiento por obturaciones ocasionadas por objetos de gran tamaño como trapos y palos. En el tanque de mezcla se deposita el agua que entra a la planta y el lodo recirculado del cárcamo de recirculación de lodos para enviarlos a los dos reactores de mezcla completa del tratamiento biológico.

1.2.2.- Tratamiento secundario.

1. Proceso De Lodos Activados

La planta “Centenario” cuenta con un sistema de lodos activados de mezcla completa con recirculación de lodos. El sistema opera con dos reactores de lodos activados de 3200 m³ de volumen total y un sedimentador secundario de 2120 m³. El objetivo de éste sistema es reducir el contenido de materia orgánica y nitrógeno amoniacal.

Ésta degradación se realiza en un proceso de lodos activados aireado a flujo constante, después de un periodo de tiempo, los microorganismos y el agua de desecho fluyen hacia el clarificador para ser separados, con el proceso de lodos activados, los microorganismos del lodo se regresan al principio del sistema secundario y una porción se desperdicia enviándola al procesamiento de lodos.

2. Sedimentador Secundario.

La función básica de este proceso consiste en decantar los sólidos biológicamente digeridos y floculados para remover el resto de la DQO y SS remanentes en el agua, quedando en los mínimos niveles contaminantes.

3. Sistema de desinfección.

La desinfección del agua residual se realiza mediante el suministro de cloro gas, ya que este reactivo es el más económico y garantiza una desinfección adecuada. El agua tratada es infiltrada a los pozos de absorción, por lo que al tanque de contacto de cloro se construyó un muro vertedor para descargar al cárcamo de bombeo.

Con el objeto de garantizar la mezcla de cloro y realizar en forma eficiente la desinfección la planta cuenta con mamparas intermedias.

1.2.3.- Disposición de Lodos

Los lodos formados en el proceso de tratamiento de aguas salen con un gran contenido de agua es por eso que su primer objetivo es disminuir el contenido de humedad. Una forma de realizar esa operación es por medio del espesamiento por gravedad en bandas. En este proceso el lodo se concentra al liberar agua drenándola por gravedad a través de una banda horizontal. El lodo tiene que ser acondicionado químicamente utilizando un polímero que se alimenta por medio de un inyector, esperando un tiempo determinado para iniciar la floculación adecuada. El lodo floculado se dispersa a través del ancho de la banda que en esta planta es de 1.5 metros. El agua liberada se drena y se utiliza agua limpia a presión para lavar la banda y eliminar los residuos de lodo y polímero de los poros de la banda. El agua que se drena de los lodos se recircula al proceso de tratamiento de aguas primario y secundario.

Se tienen las siguientes opciones para la disposición final de los lodos producidos en la planta de tratamiento “Centenario”:

- ◆ Abono orgánico
- ◆ Disposición al suelo
- ◆ Composteo, recicló, producción de ladrillos, producción de combustibles.

Durante la fase de investigación en la planta “Centenario” se detectaron varios problemas los cuales son descritos en la Tabla 1.1

PROBLEMA	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA
Falta de control de caudal.	<ul style="list-style-type: none">● La planta no cuenta con medidor de caudal en las siguientes líneas de proceso: entrada, efluente y recirculación.● No se sabe exactamente cual es el caudal de operación en la planta centenario
Falta de bitácora de la medición de parámetros.	<ul style="list-style-type: none">● No cuenta con una bitácora de registro de la eficiencia de remoción de los parámetros fisicoquímicos que son determinantes en la calidad de agua tratada que descargan al acuífero.
Falta de control y optimización del proceso	<ul style="list-style-type: none">● Existe muchas deficiencias en la operación del proceso y esto a su vez se refleja en las variaciones de remoción de contaminantes en el sistema.

Tabla 1.1.- Problemas detectados en la planta “Centenario”.

1.2.4. Diseño del Sistema de Lodos Activados de la Planta “Centenario”

Debido a la a problemáticas mencionadas en la Tabla 1.1 los caudales de diseño y de operación de la planta Centenario son datos desconocidos por los operadores de la Planta. Por lo cual mediante el uso del programa SuperPro Designer se calculó el volumen del sistema de lodos activados para tres caudales diferentes, los cuales son mostrados en la Tabla 1.2.

Estos cálculos fueron realizados con el objetivo de conocer el caudal de diseño bajo el cual fue construida la planta. La Tabla 1.2 también muestra los parámetros usados en la estimación del volumen del sistema.

Para poder realizar el cálculo del volumen se definió un fs de 0.47 con el cual se obtuvo la siguiente ecuación estequiométrica:



SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS PLANTA CENTENARIO				
UNIDADES DE PROCESO	PARÁMETROS	CAUDAL		
		75 l/s	90 l/s	120 l/s
REACTOR BIOLÓGICO	Unidades	1	2	2
	Longitud (m)	51	40	45.91
	Ancho (m)	20	16	18.4
	Profundidad (m)	4.5		
	Vol. de reactor (m ³)	4750	2845	3790
	Vol. de trabajo (m ³)	4280	2560	3400
	DQOe (mgDQO/L)	250		
	DQOs (mgDQO/L)	5		
	Biomasa mg SSVLM / L	2215		
	θ _c (TRS) (d)	30.7		
SEDIMENTADOR	Diámetro (m)	16	17	20.2
	Vol. Del sedimentador (m ³)	1012	1195	1598
	θ (TRH) (h)	3	3	3
	IVL (ml/g)	160	160	160
	Biomasa sedimentada (mg/L)SSV	12000	12000	12000

Tabla 1.2- Valores de datos de diseño y parámetros biocinéticos calculados en SuperPro Designer para diferentes caudales de agua residual doméstica de la planta “Centenario”.

Como se puede observar de los datos de volumen y dimensiones proporcionados por SuperpPro Designer, el caudal de 120 L/s es el caudal de diseño bajo el cual fue construida la Planta Centenario, por lo cual éste caudal fue utilizado en las estimaciones de requerimientos de oxígeno, producción de lodos y potencia gastada en éste trabajo de tesis.

CAPITULO II

MATERIALES Y MÉTODOS.

2.1.- DETERMINACIONES ANALÍTICAS

La concentración de materia orgánica en agua se midió como Demanda Química de Oxígeno (DQO) por el método de Digestión (Standard Methods, 1995) con “kits” analíticos y un reactor Hach (USA). Las concentraciones de amonio (N-NH_4^+), Nitrato (N-NO_3^-) y Nitrito (N-NO_2^-) se determinaron por los métodos estándar Nessler, Reducción de cadmio y Diazotización respectivamente (Standar Methods, 1995) con “kits” analíticos comerciales Hach (USA). La concentración de biomasa en el reactor se analizó como Sólidos Suspendidos Totales (SST) mediante filtración como se describe en APHA (Standar Methods, 1995).

2. 2. ESTIMACIÓN DE PARAMETROS BIOCINÉTICOS.

2. 2.1. *Arreglo experimental.*

En la estimación de los parámetros cinéticos del reactor biológico de la planta “Centenario” se utilizó un respirómetro Corning de velocidad de agitación variable (USA) (ver Figura 2.1) con un volumen total de 12 L y con un volumen de trabajo de 7L. El oxígeno disuelto en el respirómetro se midió mediante un electrodo de oxígeno disuelto polarográfico Ingold (USA) con un tiempo de respuesta de 16 segundos por 90% de saturación. Las lecturas de oxígeno disuelto se almacenaron en un computador mediante un sistema de adquisición de datos Data Logger de una vía (Cole Parmer, USA). Para mantener aireado a los lodos de forma constante se utilizó un difusor que suministró aire por medio de una bomba masterflex (Cole- Palmer, USA). El pH se controló a 7.5 mediante un controlador de pH (Cole Parmer, USA) utilizando soluciones de ácido clorhídrico 1 N e hidróxido de sodio 1 N.

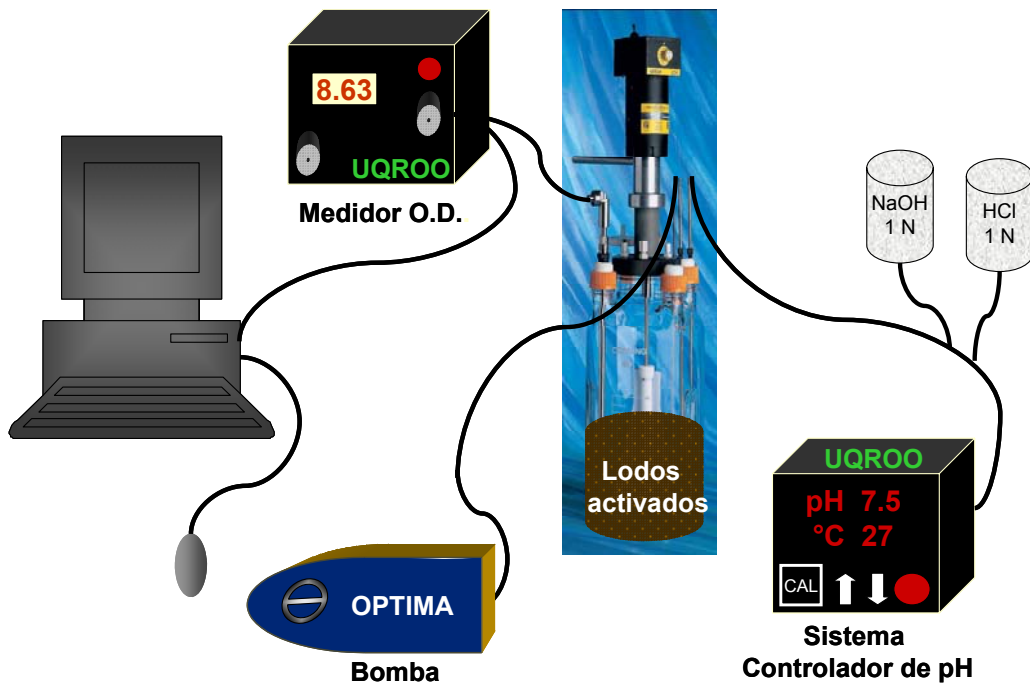


Figura 2.1.- Arreglo experimental del respirómetro utilizado para la estimación de parámetros biocinéticos.

2.2.2 Estimación de K_La

Para estimar el coeficiente de transferencia de masa volumétrico (K_La) en el respirómetro se utilizó el método dinámico propuesto por (Moo Young, 1981). El método consiste en airear el respirómetro de manera constante. Cuando la concentración de oxígeno disuelto llega a un punto estable se suspende la aireación a un tiempo determinado y esto provoca una caída en la concentración de oxígeno formándose una pendiente que representa el valor de QO_2X implícito en la ecuación (2.1). Después de un cierto tiempo se reinicia la aireación a un flujo constante y la concentración de oxígeno disuelto en el respirómetro comienza a subir. El oxígeno disuelto en el respirómetro se midió mediante un electrodo de oxígeno disuelto polarográfico Ingold (USA).

$$\frac{dCo}{dt} = K_La (Co^* - Co) - QO_2X \quad (2.1)$$

En esta expresión Co^* es la concentración de oxígeno de saturación (mg/l), K_La es el coeficiente de transferencia de masa volumétrico (min^{-1}) y puede determinarse con el método dinámico (Moo Young, 1981), Co es la concentración de oxígeno disuelto medida por el electrodo en el tiempo t (mg/l), QO_2X es la velocidad de consumo de oxígeno de los microorganismos (mg /Lmin) y $\frac{dCo}{dt}$ es la derivada de la concentración de oxígeno con respecto al tiempo, y se obtiene directamente de los datos de oxígeno medidos en el respirómetro mediante la ayuda del programa USI-SCAN (Silk Scientific Corporation).

Teniendo determinado el valor de QO_2X se suma a la derivada de la concentración de oxígeno con respecto al tiempo $\frac{dCo}{dt}$ y se divide entre la concentración de oxígeno disuelto al inicio del experimento, obteniendo así el valor de K_La mediante la siguiente fórmula:

$$\frac{1}{K_La} = \frac{QO_2X + \frac{dCo}{dt}}{Co^*} \quad (2.2)$$

2.2.3. Método de Pulsos.

Para estimar los parámetros cinéticos del proceso de lodos activados de la Planta Centenario se utilizó el método respirométrico de pulsos (Gearney y col., 2001). La metodología consistió en lo siguiente:

- Se adicionaron 7 litros de lodos activados del reactor biológico de la planta de tratamiento al respirómetro aireado.
- Cuando la concentración de oxígeno disuelto llega a un punto estable (a ésta concentración se le denomina concentración de oxígeno de línea base) se adiciona una cantidad conocida de un sustrato de interés o pulso (materia orgánica ó amonio). Esto origina una caída en la concentración de oxígeno disuelto por un aumento en el consumo de oxígeno exógeno. Las lecturas de oxígeno disuelto se almacenaron en un computador.
- El consumo de oxígeno exógeno de los microorganismos se estimó mediante las lecturas de oxígeno almacenadas y un balance de oxígeno en el respirómetro de la forma (Kong y col., 1996):

$$OUR_{xo} = K_{La} (C_{olb} - C_o) - \frac{dC_o}{dt} \quad (2.3)$$

Donde C_o es la concentración de oxígeno disuelto en el respirómetro (mg L^{-1}), K_{La} es el coeficiente de transferencia de masa volumétrico (min^{-1}) y se calculó utilizando el método dinámico descrito por Moo Young (1981) sección (2.2.2). C_{olb} es la concentración de oxígeno de línea base (mg L^{-1}) y OUR_{xo} es el consumo exógeno de oxígeno de los microorganismos ($\text{mg min}^{-1} \text{L}^{-1}$). La derivada de oxígeno disuelto implícita en la ecuación (2.3) se estimó mediante el programa USI-SCAN (SYLK Scientific, India).

d) La ecuación (2.3) se ajustó mediante el programa Model Maker (Cherwell Scientific, USA) al siguiente modelo teórico propuesto por (Kong y col., 1996):

$$OUR_{xo} = \left(\frac{1 - f_s}{f_s} \right) \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{th}\right) \right) \mu_{\max} X \frac{S}{K_s + S} \quad (2.4)$$

$$\frac{dS}{dt} = -\left(\frac{1}{fs}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{th}\right)\right) \mu_{max} X \frac{S}{K_s + S} \quad (2.5)$$

Aquí fs es el coeficiente de rendimiento celular (mg DQO biomasa / mg DQO sustrato⁻¹). fs se estimó calculando el área del perfil OUR_{xo} descrito por la ecuación (2.3) y dividiendo el área entre la concentración del pulso adicionado. t es el tiempo (min), X es la concentración de biomasa (mg SSV/L), S es la concentración del pulso de materia orgánica (mg DQO/L), K_s es la constante de saturación (mg DQO/L). th es el tiempo de respuesta biológico a la adición del sustrato descrito por Vanrolleghem (Vanrolleghem y col., 2005). Mediante éste procedimiento se estimaron los valores de th del proceso biológico. Además se estimó el producto de μ_{max} por X como parámetro cinético de interés. Debido a las altas concentraciones de materia orgánica residual del reactor de lodos activados de la planta centenario, un valor de K_s de 45 mg DQO L⁻¹ fue supuesto para la estimación de th y $\mu_{max} X$.

La Figura 2.2 muestra el diagrama de compartimentos utilizados para resolver y ajustar las ecuaciones diferenciales (2.4) y (2.5) a la ecuación (2.3), propuestas en el modelo teórico utilizando el programa Model Maker (Cherwell Scientific, USA).

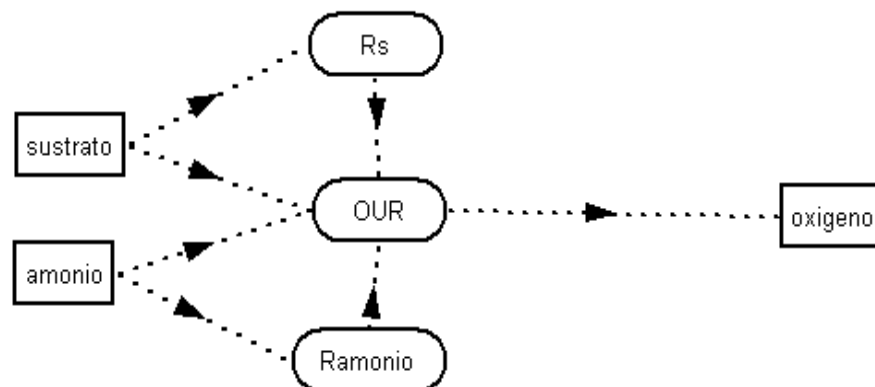


Figura 2.2.- Diagrama del modelo teórico utilizado en el programa Model Maker.

En el diagrama anterior se muestran las variables que integran el modelo teórico que se utiliza para la estimación de parámetros biocinéticos. Aquí el Sustrato representa la concentración de materia orgánica medida en ($mg\ DQO/L$); Amonio es la concentración de nitrógeno-amonio ($mg\ N-NH_4^+/L$); R_s es la velocidad de consumo de sustrato ($masa/vol.tiempo$); OUR es el consumo exógeno de oxígeno de los microorganismos ($mg/min\cdot L$); oxígeno es la concentración de oxígeno disuelto en el sistema ($mg\ O_2/L$).

2.3. SIMULACIÓN DEL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS.

La simulación del proceso de lodos activados de la planta centenario se realizó utilizando el programa SuperPro Designer de acuerdo a los datos de diseño establecidos en la tabla (2.1).

Datos de diseño requeridos para la simulación del proceso de lodos activados.			
Datos de entrada	Unidades	Datos que proporciona el programa	Unidades
Q = Caudal de diseño	L/h	Θ_c = Tiempo de retención de sólidos	h
S_o = Concentración de sustrato a la entrada del reactor	mg DQO/ L	X = Concentración de lodos en el reactor (biomasa)	mg/L
TRH = Tiempo de residencia hidráulico	h	% Remoción de materia orgánica.	%
K_s = Constante de afinidad de sustrato	mg DQO/ L	IVL = Índice volumétrico de lodos	ml/g
X_{sed} = Concentración de biomasa sedimentada	mg/L	k = Tasa máxima de utilización de sustrato	h^{-1}
K_d = Coeficiente de decaimiento	h^{-1}	S = Concentración de sustrato a la salida del reactor biológico.	mg DQO/ L
Ecuación Estequiométrica del proceso	Base Molar	V_r = Volumen del reactor.	m^3
		Y = Coeficiente de rendimiento celular	$\frac{mg\ DQOX}{mg\ DQOS}$

Tabla 2.1.- Datos de diseño requeridos para realizar la simulación en SuperPro Designer y datos de salida de la simulación.

2.3.1.- Diseño del Reactor de Lodos Activados.

Fórmula para calcular el volumen de reactor

El volumen del reactor biológico fue estimado mediante el programa SuperPro Designer el cual incorpora la siguiente formula para un reactor de mezcla completa:

$$V = \frac{Q(S_o - S)Y\theta_c}{X(1 + K_d\theta_c)} \quad (2.6)$$

Donde:

V es el volumen del reactor (m^3); Q es el caudal de diseño (m^3 /d); S_o es la concentración de sustrato a la entrada del reactor (mg DQO /L); S es la concentración de sustrato a la salida del reactor (mg DQO /L); Y es el coeficiente de rendimiento celular ($mg DQO X /mg DQO S$); θ_c es el tiempo de retención de sólidos (d); K_d es el coeficiente de decaimiento (d^{-1}); X es la concentración de biomasa en el reactor (mg SSVLM /L)

2.3.2. Ecuación Estequiométrica para Degradación de Materia Orgánica de Agua Residual

La ecuación estequiométrica para degradar la materia orgánica de las aguas residuales de la planta centenario usada en el programa de simulación, se calculó con el método de semireacciones de McCarty (Grady., 1999)

$$R = R_d - f_e R_a - f_s R_c \quad (2.7)$$

$$f_s + f_e = 1 \quad (2.8)$$

Donde:

R= Reacción completa balanceada

R_d = Reacción media para el donador de electrones

R_a = Reacción media para el aceptor de electrones

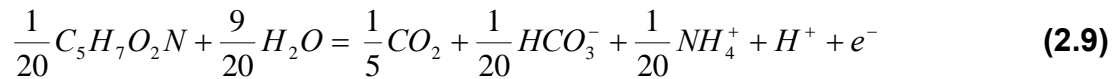
R_c = Reacción media para la síntesis celular

f_s = Fracción del donador de electrones usado en la síntesis celular

f_e = Fracción del donador de electrones usado para energía.

Las reacciones intermedias consideradas para el proceso de remoción de materia orgánica consideradas fueron las siguientes:

1.- Reacción para síntesis celular (R_c) con amonio como fuente de nitrógeno:

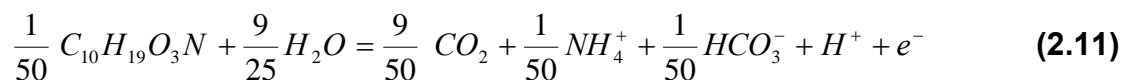


Donde: $C_5H_7O_2N$ representa la concentración de biomasa y 1 mg de $C_5H_7O_2N$ equivale 1mg de SSV y es a su vez 1.18 mg de SST.

2.- Reacción con oxígeno como aceptor de electrones (R_a):

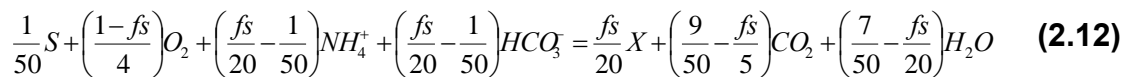


3.- Reacción para donantes de electrones (R_d) considerando como donador orgánico (reacción heterótrofa) a aguas residuales domésticas



Donde: $C_{10}H_{19}O_3N$ representa la fórmula para la materia orgánica presente en el agua residual domestica. Aquí 1 mg de $C_{10}H_{19}O_3N$ equivale a 2 mg de DQO.

La reacción completa con base a las semireacciones se completó de la siguiente forma:



$$fs = \frac{mg \text{ DQO Biomasa}}{mg \text{ DQO Sustrato}} \quad \text{ó} \quad fs = \frac{mg \text{ DQO } X}{mg \text{ DQO } S}$$

fs = Coeficiente rendimiento celular

HCO_3^- = Bicarbonato

S = $C_{10}H_{19}O_3N$

X = $C_5H_7O_2N$

O_2 = Oxígeno

CO2 = Dióxido de carbono

NH_4^+ = Amonio

H2O = Agua

2.3.3. Requerimiento y abastecimiento de oxígeno.

Los requerimientos teóricos de oxígeno para el proceso de lodos activados se calcularon mediante.

$$R_o = Q (S_o - S) - P_x (1.42) + 4.33 \text{ NO}_{3f} * Q \quad (\text{Tchobanoglous}): \quad (2.13)$$

Donde:

Q = Gasto o caudal de entrada, (L /d)

S_o = Concentración de sustrato en el afluente, (kg DQO /L)

S = Concentración de sustrato en el efluente, (kg DQO /L)

P_x = Células producidas que son desechadas, (kg SST /d)

1.42 = Factor de conversión para DQO

(NO₃)_f = Cantidad de Nitrato que se forma, (kg /L)

La cantidad real de oxígeno requerido se calculó mediante la siguiente expresión:

$$\text{TRTO} = \text{TETO} \left(\frac{\beta C_{sTH} - C_L}{C_{s20}} \right) (1.024^{T-20})(\alpha)(F) \quad (2.14)$$

Donde:

TRTO = tasa real de transferencia de oxígeno en condiciones de campo, kg O₂/d

TETO = tasa estándar de transferencia de oxígeno en el agua de la llave a 20°C y cero de oxígeno disuelto, kg O₂/d

β = factor de corrección para la salinidad y la tensión superficial, típicamente de

$$0.95 \text{ a } 0.98 \quad \beta = \frac{C_s(\text{agua residual})}{C_s(\text{agua limpia})}$$

C_{sTH} = concentración media de la saturación de oxígeno disuelto en el agua limpia de un tanque de aireación a una temperatura T y una altitud H, mg /L

$$C_{sTH} = (C_{sTH}) \frac{1}{2} \left(\frac{P_d}{P_{atmH}} + \frac{O_l}{21} \right) \quad (2.15)$$

C_{sTH} = concentración de la saturación de oxígeno en el agua limpia a una temperatura T y una altitud H, mg/L

P_d = presión a la profundidad de liberación de aire, kPa

P_{atmH} = presión atmosférica a altura H, kPa

O_t = porcentaje de la concentración de oxígeno que sale del tanque, generalmente 18 a 20

C_L = concentración de oxígeno de funcionamiento, mg/L

C_{s20} = concentración de saturación de oxígeno disuelto en el agua limpia a 20°C y 1atm, mg/L

T = temperatura de funcionamiento, °C

α = factor de corrección para la transferencia de oxígeno para la purga

$$\alpha = \frac{K_{La} \text{ (agua residual)}}{K_{La} \text{ (agua limpia)}}$$

F = factor de obstrucción para difusores finos y muy finos, típicamente 0.65 a 0.9

Constantes	Unidades	Valor Rango	Valor usado
α	---	0.3 – 0.6	0.5
β	---	0.95 – 0.98	0.97
C_L	(mg/l)		2.0
C_{s20}	(mg/l)		9.08
F	---	0.65 - 0.9	0.9
P	(m)		4.5
P_d	(atm)		1.39
O_t	%	18 - 20	19

Tabla 2.2.- Constantes utilizadas para calcular requerimientos de oxígeno.

2.3.4. Cálculo de la Potencia de Aireación

La capacidad requerida de los sopladores de aire se calculó mediante la siguiente expresión (**Tchobanoglous**):

$$Q_{\text{aire}} = \frac{TETO}{(ERTO)(O_2)(\gamma_{\text{aire}})(1440 \text{ min} / d)} \quad (2.16)$$

Donde Q_{aire} es el flujo requerido de aire, (m^3 / min), TETO es el requerimiento de oxígeno, ($\text{kg O}_2/\text{d}$); ERTO es la eficiencia real de transferencia de oxígeno, expresada como fracción; O_2 porcentaje en fracción de oxígeno en el aire por peso (0.2315) y γ_{aire} es el peso específico del aire ($1.20 \text{ kg} / \text{m}^3$ a una atmósfera y $20 \text{ }^\circ\text{C}$)

** La eficiencia real de transferencia de oxígeno (ERTO) utilizada para calcular el flujo requerido de aire es de 0.35.

El poder soplador que se requiere se determinó a partir de la ecuación (2.17) donde P_2 refleja la pérdida de presión en el impulsor, los equipos de aireación y en los accesorios del sistema de aireación y la presión de funcionamiento.

$$P_w = \frac{W_{\text{aire}}RT_1}{29.7ne} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{0.283} - 1 \right] \quad (2.17)$$

Donde:

P_w es la potencia requerida por soplador (Kw); W_{aire} es el peso del flujo de aire, (kg / s); R es la constante universal de los gases, $8.314 \text{ (kJ} / \text{k mol} \cdot \text{ }^\circ\text{K)}$; T_1 es la temperatura absoluta a la entrada, ($^\circ\text{K}$); P_1 es la presión absoluta a la entrada, (atm); P_2 es la presión absoluta a la salida, (atm); $n = 0.283$ para el aire; e es la eficiencia (en compresores, normalmente entre 0.70 y 0.90).

2.3.5. Cálculo de la Producción de Lodos.

La producción de lodos se calculó mediante la siguiente expresión (**Metcalf & Eddy**):

$$P_x = \frac{Y Q (S_o - S)}{1000 (1 + k_d \theta_c)} + \frac{Q Y_n (NH_4)}{1000 (1 + k_{dA} \theta_c)} \quad (2.18)$$

Donde P_x es la producción de lodos, ($Kg SST/d$), Y es el coeficiente de rendimiento celular ($mg DQO X/mg DQO S$); Q es el caudal de alimentación (m^3/d); S_o concentración de sustrato a la entrada del reactor ($mg DQO /L$); S es la concentración de sustrato a la salida del reactor ($mg DQO /L$); Y_n es el rendimiento de nitrificación ; NH_4 es la concentración de amonio nitrificado ($mg N - NH_4/d$); k_d es el coeficiente de decaimiento (d^{-1}); k_{dA} es el coeficiente de decaimiento autótrofo (d^{-1}); θ_c es el tiempo de retención de sólidos (d).

Constantes utilizadas para calcular la producción de lodos.

Constantes	Unidades	Valor usado
Q = Caudal de alimentación.	m^3/d	10368
k_d = Coeficiente de decaimiento	d^{-1}	0.06
k_{dA} = Coeficiente de decaimiento autótrofo	d^{-1}	0.04
Y_n = Rendimiento de nitrificación.	----	0.14

Tabla 2.3.- Constantes utilizadas para calcular la producción de lodos

CAPITULO III

EVALUACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA.

En este capítulo se presentan los resultados del estudio realizado en la planta de tratamiento de aguas residuales “Centenario”, así como también sus respectivas discusiones.

Con el objetivo de evaluar el funcionamiento del sistema de lodos activados con el que cuenta la planta se realizaron mediciones de la concentración de materia orgánica como DQO, nitrógeno en forma de (Amonio, Nitrito y Nitrato) y sólidos suspendidos totales (SST).

A continuación en la tabla 3.1 se muestra los días en que se realizaron las mediciones de los parámetros antes mencionados.

DIA	FECHA DE ANALISIS	DIA	FECHA DE ANALISIS
1	13 – Julio - 2006	13	27 – Enero – 2007
2	18 – Julio - 2006	14	29 – Enero – 2007
3	25 – Julio - 2006	15	31 – Enero – 2007
4	25 - Agosto - 2006	16	07 – Febrero – 2007
5	29 – Agosto - 2006	17	22 – Febrero – 2007
6	04 – Septiembre - 2006	18	23 – Febrero – 2007
7	07 – Septiembre - 2006	19	25 – Febrero – 2007
8	13 - Octubre - 2006	20	12 – Marzo – 2007
9	14 - Noviembre – 2006	21	13 – Marzo – 2007
10	16 – Noviembre - 2006	22	14 –Marzo – 2007
11	23 – Noviembre – 2006	23	15 – Marzo – 2007
12	14 – Diciembre - 2006		

Tabla 3.1.- Fechas de las mediciones realizadas que se muestran en las graficas.

3.1. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En la Figura 3.1 se presentan las concentraciones de DQO medidas en la entrada y la salida del reactor. Con la finalidad de evaluar el comportamiento del reactor de lodos activados de la planta centenario se realizó un monitoreo de la eficiencia de remoción de materia orgánica. Como se puede observar en la Figura 3.1 Las concentraciones a la entrada del reactor biológico variaron entre 210 y 590 mg DQO/L. Estos resultados muestran que la concentración de materia orgánica en el agua residual alimentada al sistema presenta grandes variaciones. Las concentraciones medidas a la salida variaron entre 21 y 75 mg DQO/L en el periodo de evaluación. Sin embargo se puede observar que la concentración de materia orgánica a la salida del reactor en el día 15 alcanzó un valor de aproximadamente 250 mg DQO/L, sobrepasando por mucho las normas de vertimiento; este punto refleja el hecho de que en el día 15 de investigación el reactor presentó problemas de operación debido a problemas de aireación ya que un compresor dejó de funcionar.

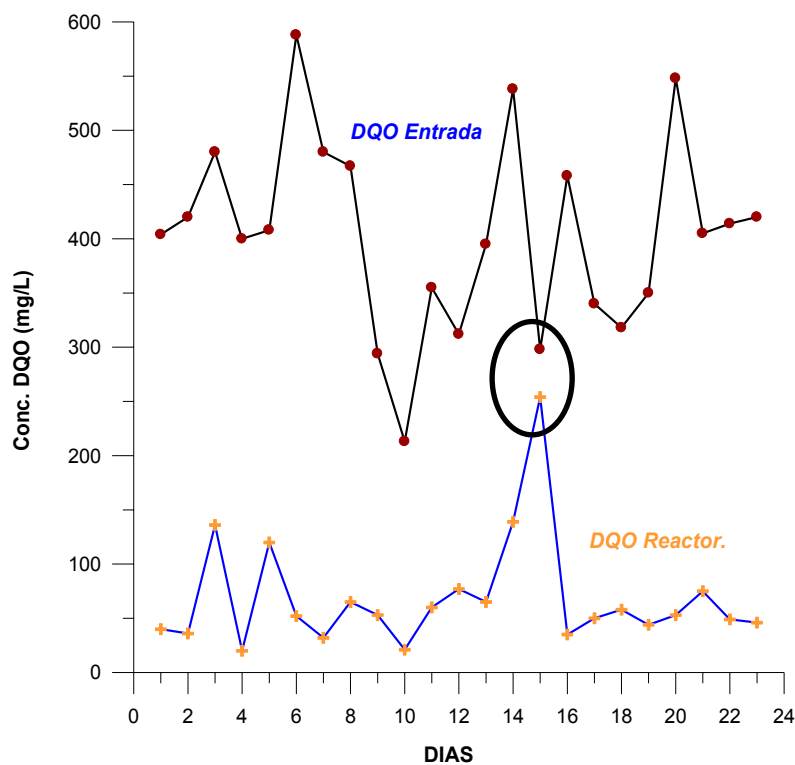


Figura 3.1.- Concentración de DQO en la entrada y salida del Reactor Biológico de la Planta “Centenario”.

Esto queda también demostrado en la Figura 3.2 donde para el día 15 se presentó apenas un 12% de remoción. La Figura 3.2 muestra que los porcentajes de remoción obtenidos en el reactor biológico durante el periodo de investigación variaron entre un 74 a 96% de remoción, con excepción del día 15. Estos valores representan una remoción de materia orgánica de calidad aceptable, lo cual significa descargas de agua residual con un contenido de materia orgánica por debajo de lo que exigen las normas de vertimiento.

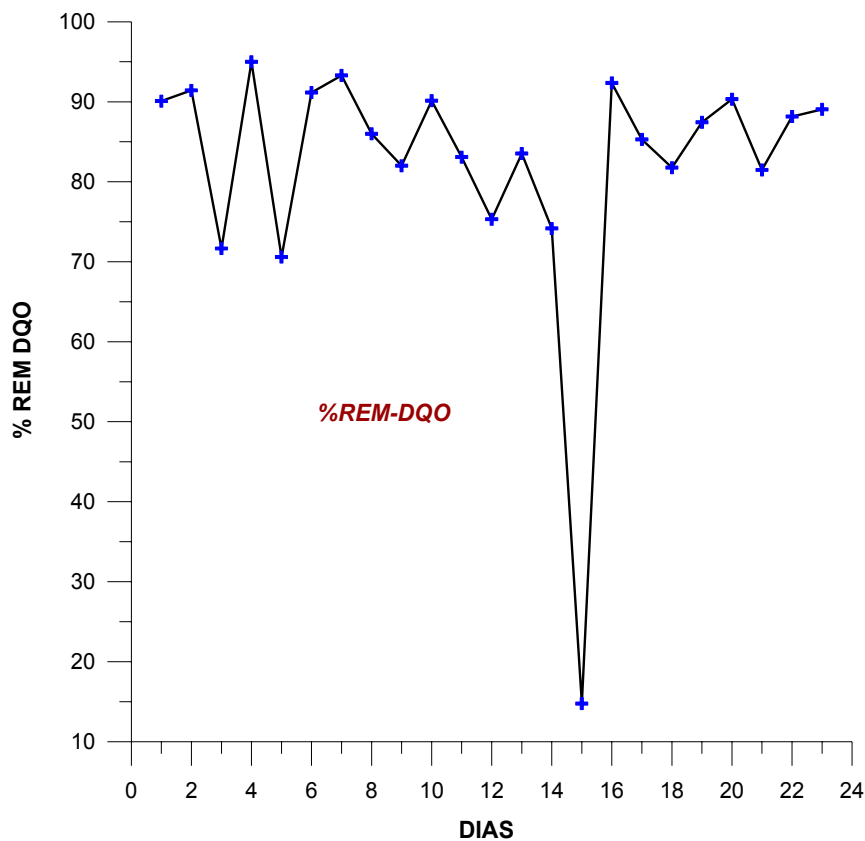


Figura 3.2.- Gráfica del porcentaje (%) de remoción de materia orgánica del Reactor Biológico de la planta “Centenario”.

La Figura 3.3 presenta las concentraciones de N-NH_4^+ medidas en la entrada y la salida del reactor. En la entrada del reactor tenemos concentraciones variables que van desde los 35 mg/L hasta 110 mg N-NH_4^+ /L y en la salida se presentaron resultados de 1mg/L hasta 53 mg N-NH_4^+ /L. Estos resultados demuestran la presencia de bacterias nitrificantes en el reactor biológico. Nuevamente se puede observar que el día 15 no hay una nitrificación importante debido a la problemática del compresor de aire antes mencionada.

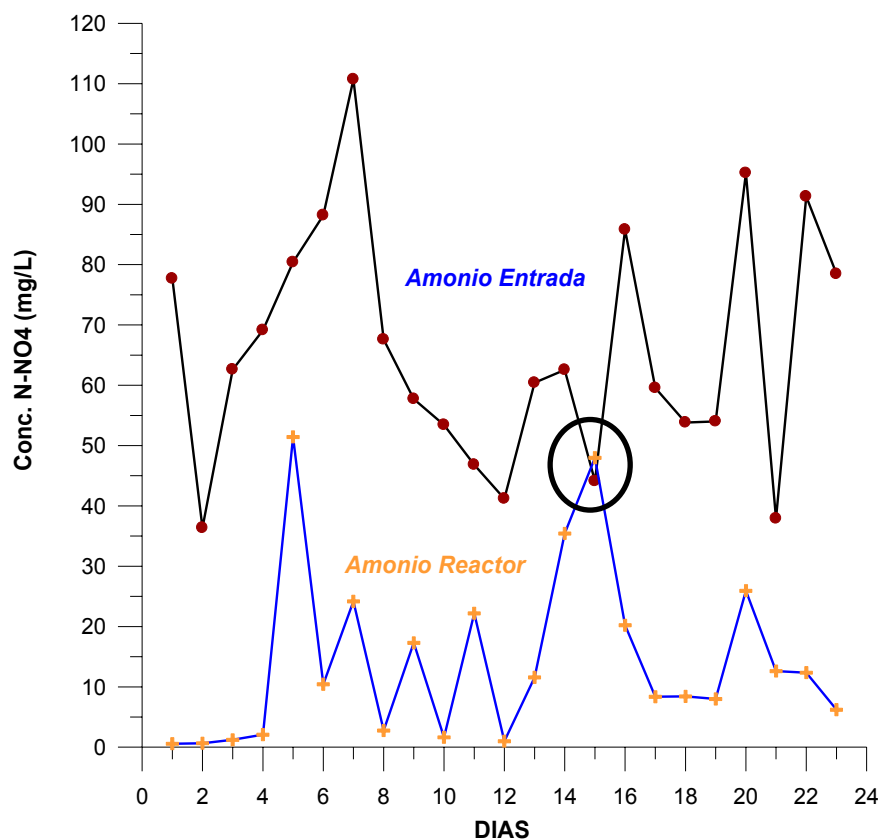


Figura 3.3.- Concentración de amonio en la entrada y salida del Reactor Biológico de la planta “Centenario”.

Lo cual queda confirmado en La Figura 3.4; la cual muestra la eficiencia de remoción de N-NH_4^+ en el reactor biológico en función del periodo de investigación. Se puede observar que existen eficiencias de remoción cercanas al 100 %, siendo las eficiencias más bajas de alrededor del 78%, con excepción del día 15. Sin embargo en los días investigados con baja remoción de contaminante, la disminución en la eficiencia se puede atribuir principalmente a problemas de operación en el proceso.

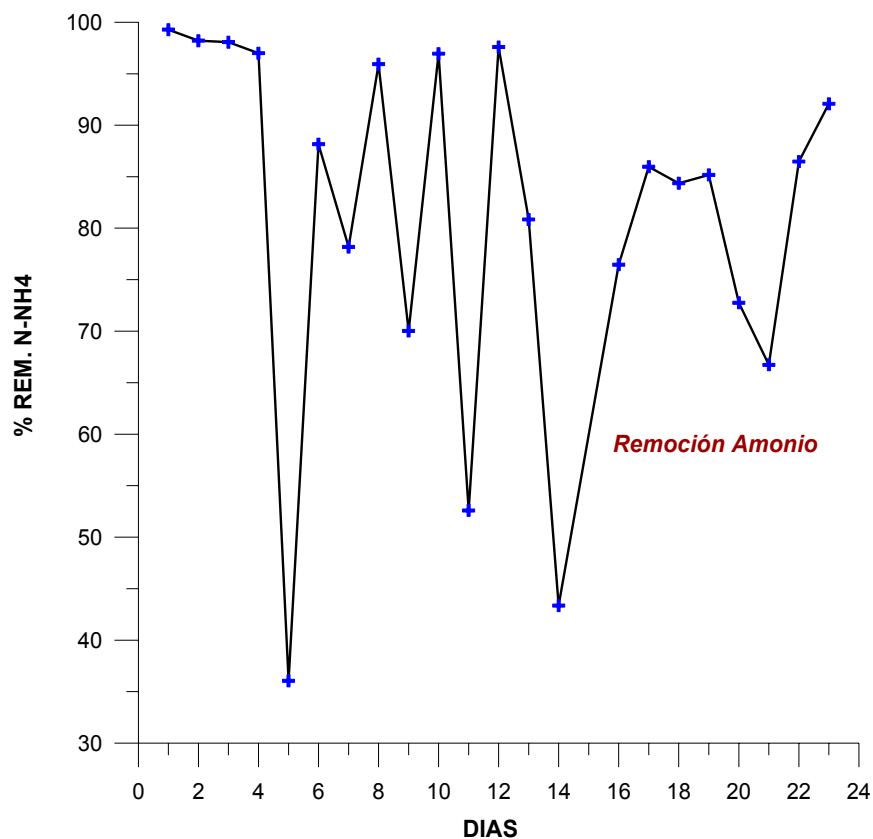


Figura 3.4.- Gráfica del porcentaje (%) de remoción de amonio del Reactor Biológico de la planta “Centenario”.

Las Figuras 3.5 y 3.6 presentan las concentraciones de Nitrito y Nitrato respectivamente. Estas Figuras muestran que el proceso de nitrificación prácticamente se completaba a Nitrato, esto es evidenciado por las bajas concentraciones de Nitrito presentes en el reactor. Se puede observar que las concentraciones de Nitrato en el reactor son más elevadas por la conversión de Amonio y Nitrito a Nitrato.

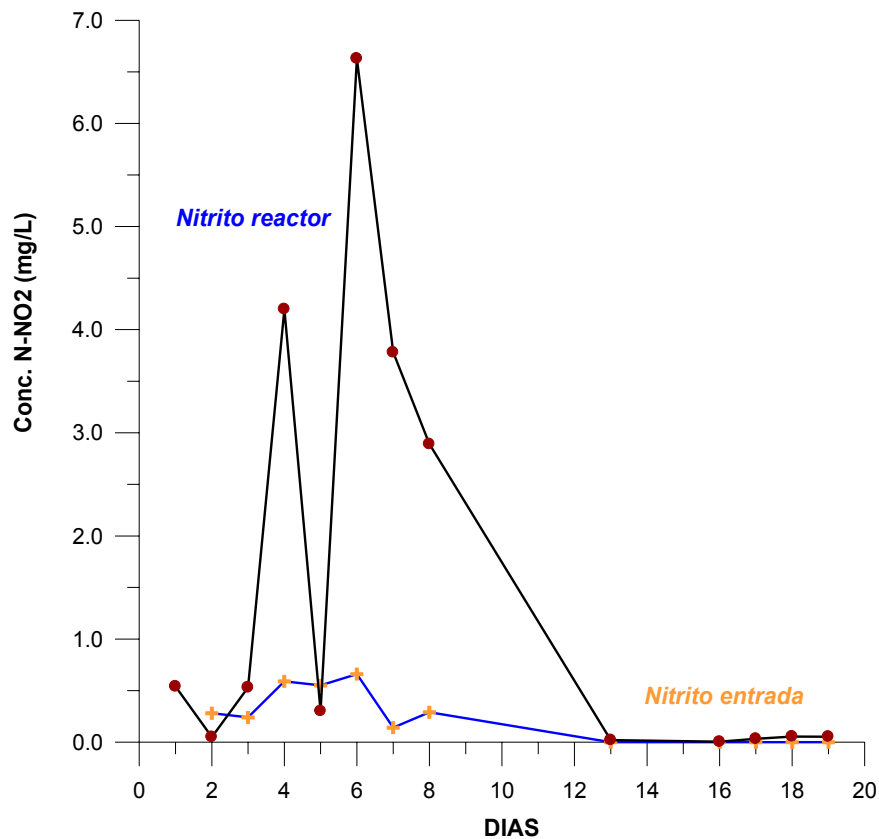


Figura 3.5.- Concentración de Nitrógeno-Nitrito en la entrada y salida del Reactor Biológico de la planta “Centenario”.

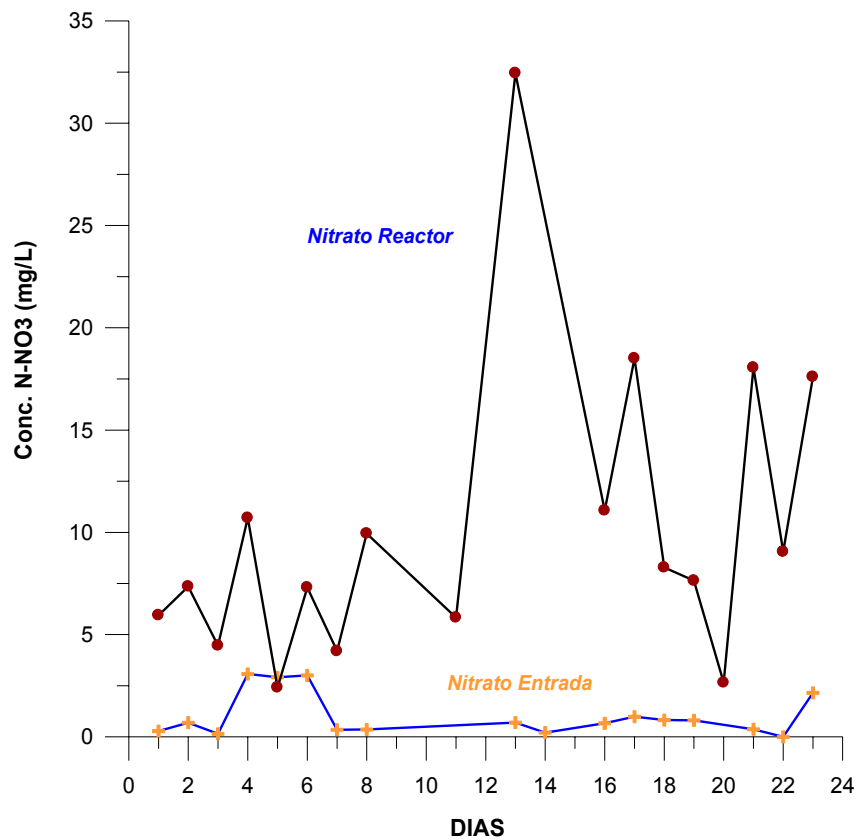


Figura 3.6.- Concentración de Nitrógeno-Nitrato en la entrada y salida del Reactor Biológico de la planta “Centenario”.

La Figura 3.7 presenta la concentración de sólidos suspendidos totales (SST) en la entrada y la salida del reactor biológico de la planta centenaria, como se puede observar la concentración de SST a la entrada del sistema es muy baja que abarca desde los 30 mg/L hasta los 450 mg/L en relación a la salida del reactor biológico que presenta días en que la concentración de SST es muy alta; tal es el caso del día 1, 3, 15 con 7000, 4800 y 3500 mg SST /L respectivamente, pero la concentración promedio está entre 1000 y 2500 mg SST /L en el resto de los días de muestreo. Las variaciones en la concentración de SST en el reactor (esta concentración en el reactor se conoce como SSLM, “Sólidos Suspendidos del Licor Mezclado”), se puede explicar por la falta de control en el caudal de agua residual alimentado al sistema de lodos activados.

En efecto las variaciones en el caudal de alimentación originan variaciones en el caudal de recirculación y en el de los lodos producidos. La variación en el caudal de lodos producidos provoca cambios en el tiempo de retención de sólidos (θ_c). Donde la concentración de SSLM es función de θ_c . El cambio en éste parámetro explica las variaciones medidas en la concentración de biomasa en el reactor.

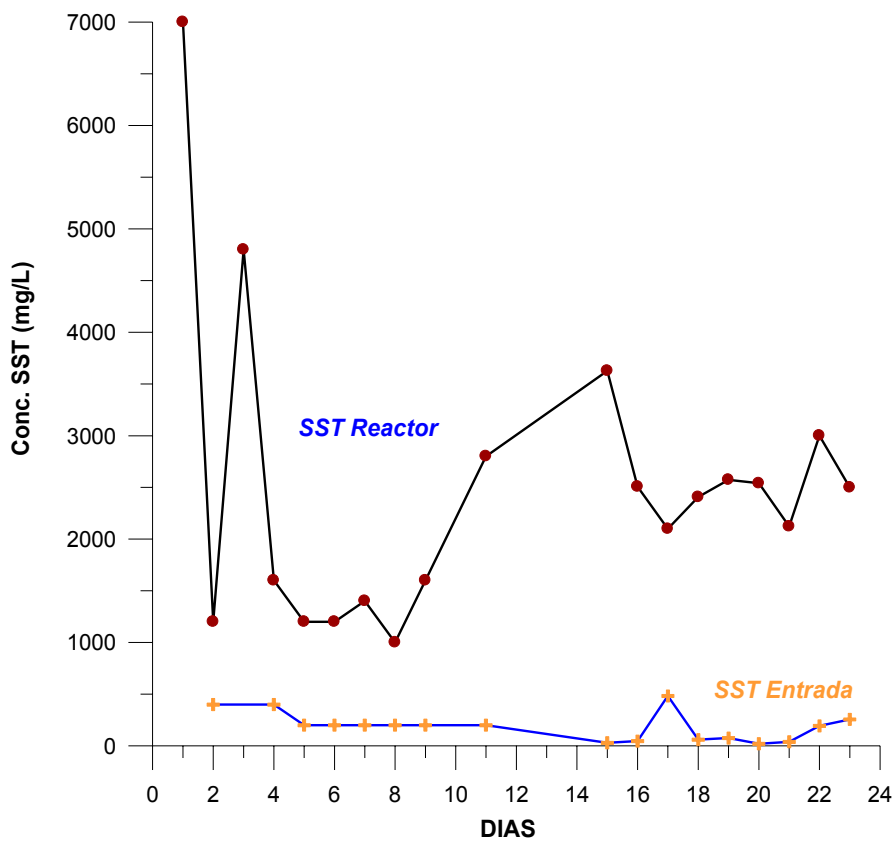


Figura 3.7.- Concentración de sólidos suspendidos totales (SST) en la entrada y la salida del Reactor Biológico de la planta “Centenario”.

CAPITULO IV

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS

En éste capítulo se propone un método de optimización para el proceso de Lodos Activados de la Planta Centenario. El objetivo del método es minimizar los costos de operación con una calidad de efluente y una producción de lodos adecuados. Debido al desconocimiento del caudal alimentado al reactor biológico por la falta de un equipo de medición en la Planta Centenario, el método se desarrolló bajo la consideración de un caudal constante de 120 L/s. Sin embargo el método propuesto puede ser aplicado a diferentes caudales sin ninguna complejidad adicional. El método propuesto consiste básicamente en hacer uso de los parámetros medidos en el capítulo III y el uso de parámetros biocinéticos estimados con el método de pulsos, descrito en el capítulo de materiales y métodos. Mediante estos parámetros es posible estimar la producción de lodos, y los requerimientos de oxígeno, lo cual permite calcular los costos de operación.

4.1. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.1. Estimación de Parámetros Biocinéticos

La Figura 4.1 presenta un ejemplo de un respirograma obtenido durante el día 5 de experimentación, los puntos 1,2 3 y 4 corresponden a la adición de pulsos de materia orgánica de 2.9, 5.8, 2.1 y 11.6 mg DQO/L respectivamente. Éste respirograma muestra los perfiles de consumo de oxígeno exógeno calculados a partir de los perfiles de oxígeno disuelto. Las caídas en la concentración de oxígeno disuelto muestran un incremento en la actividad oxidativa de los microorganismos por la adición de un sustrato específico que puede ser materia orgánica o amonio.

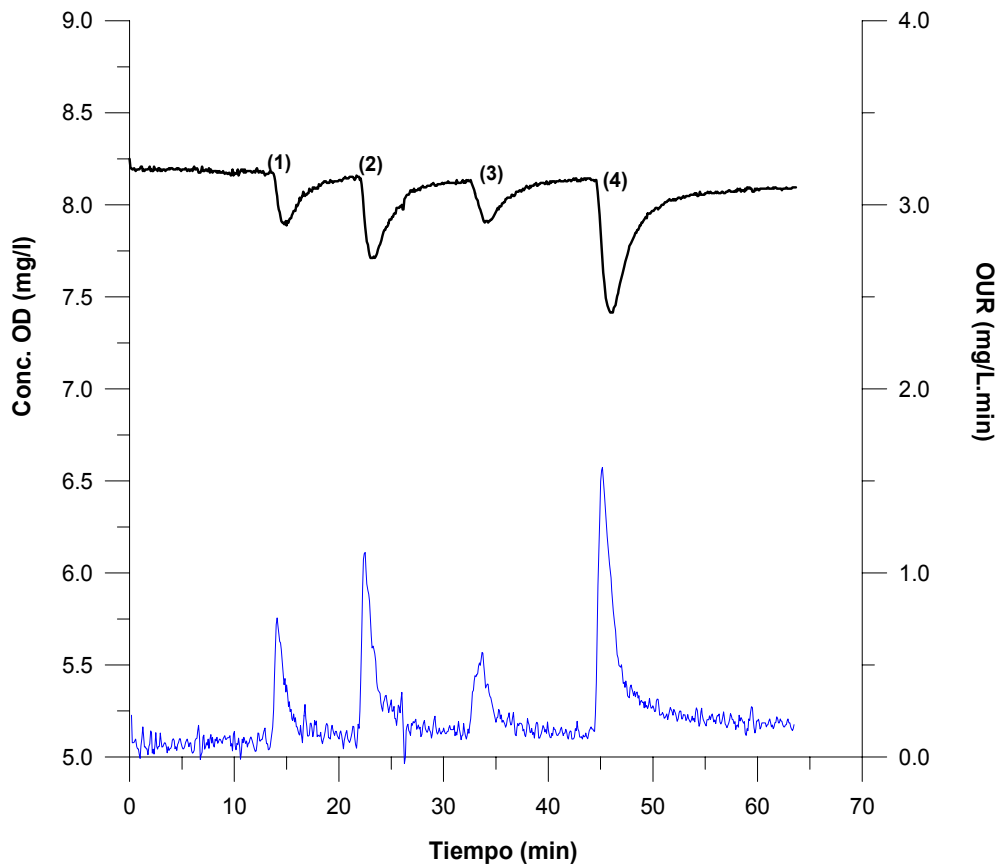


Figura 4.1.- Respirograma correspondiente al día 5 de experimentación; el perfil negro corresponde al oxígeno disuelto, El perfil azul define el consumo de oxígeno exógeno.

La Figura 4.2 presenta respirogramas obtenidos los días 9, 11, 12 y 16. Estos respirogramas muestran una variación notable en la actividad biológica de los microorganismos presentes en el reactor biológico. Es bien conocido que la adición de un sustrato específico genera actividad oxidativa de una especie activa degradante del sustrato específico (Brouwer y col., 1998, Kong y col., 1996). Es decir, la adición de amonio genera actividad de amonio oxidantes y la adición de materia orgánica provoca actividad de microorganismos heterótrofos. Las variaciones en la actividad biológica del reactor se pueden atribuir a una falta de control en el proceso y a las fluctuaciones en la concentración de materia orgánica y nitrógeno en el afluente del agua residual tal como se muestra en los resultados del Capítulo III. Considerando el aspecto de una falta de control adecuada en la operación del reactor, su impacto más evidente se ve reflejado

en la concentración de microorganismos en el reactor, que como se mencionó en el Capítulo anterior tiene su origen en la variación del caudal alimentado y el recirculado; cambiando así el tiempo de retención de sólidos. Un ejemplo claro del efecto de la variación de condiciones de operación en la actividad de microorganismos autótrofos se observa en los respirogramas 4.2(B) y 4.2(C). En efecto en los experimentos respirométricos mostrados en el respirograma 4.2(B), no se presentó actividad notable de microorganismos autótrofos aun cuando se adicionaron cantidades de amonio para alcanzar concentraciones de 1.7 mg N-NH₄⁺ /L en el respirómetro. Mientras que en el respirograma 4.2(C) se puede observar una actividad oxidativa notable de los microorganismos autótrofos. Esta diferencia de actividades concuerda con las eficiencias de remoción de amonio y materia orgánica medidas en el reactor de la planta para estos dos días de experimentación, siendo de 50 % de remoción de amonio y 83.1 % de remoción de materia orgánica para el caso del respirograma 4.2(B) y 98 % de amonio y 75.3 % de materia orgánica para el respirograma 4.2(C). Los respirogramas 4.2(A) y 4.2(D) confirman la variación en la actividad biológica del reactor de lodos activados de la planta Centenario. En el respirograma 4.2(A) correspondiente al día 9 de experimentación se puede observar una actividad oxidativa de microorganismos autótrofos menor a la actividad oxidativa observada en el respirograma 4.2(C). La eficiencia de remoción de amonio medida en el reactor de la planta correspondiente al día 9 de investigación fue del 70 %; con un 82 % de remoción de materia orgánica. Estos porcentajes de remoción de amonio están de acuerdo con la actividad biológica mostrada en los respirogramas. Lo cual concuerda con lo reportado por Kong *et al.* (1996), quién observó que a mayor actividad respiratoria más pronunciadas son las caídas de oxígeno disuelto en los perfiles de los respirogramas. En la cinética que se presenta en el respirograma 4.2(D) se observa una buena actividad oxidativa de microorganismos heterótrofos cuando se adicionaron cantidades de materia orgánica para alcanzar concentraciones de 3.6 mg DQO/L, y la eficiencia de remoción medida en el reactor fue de 75 % de remoción de Amonio y 92 % de Materia Orgánica.

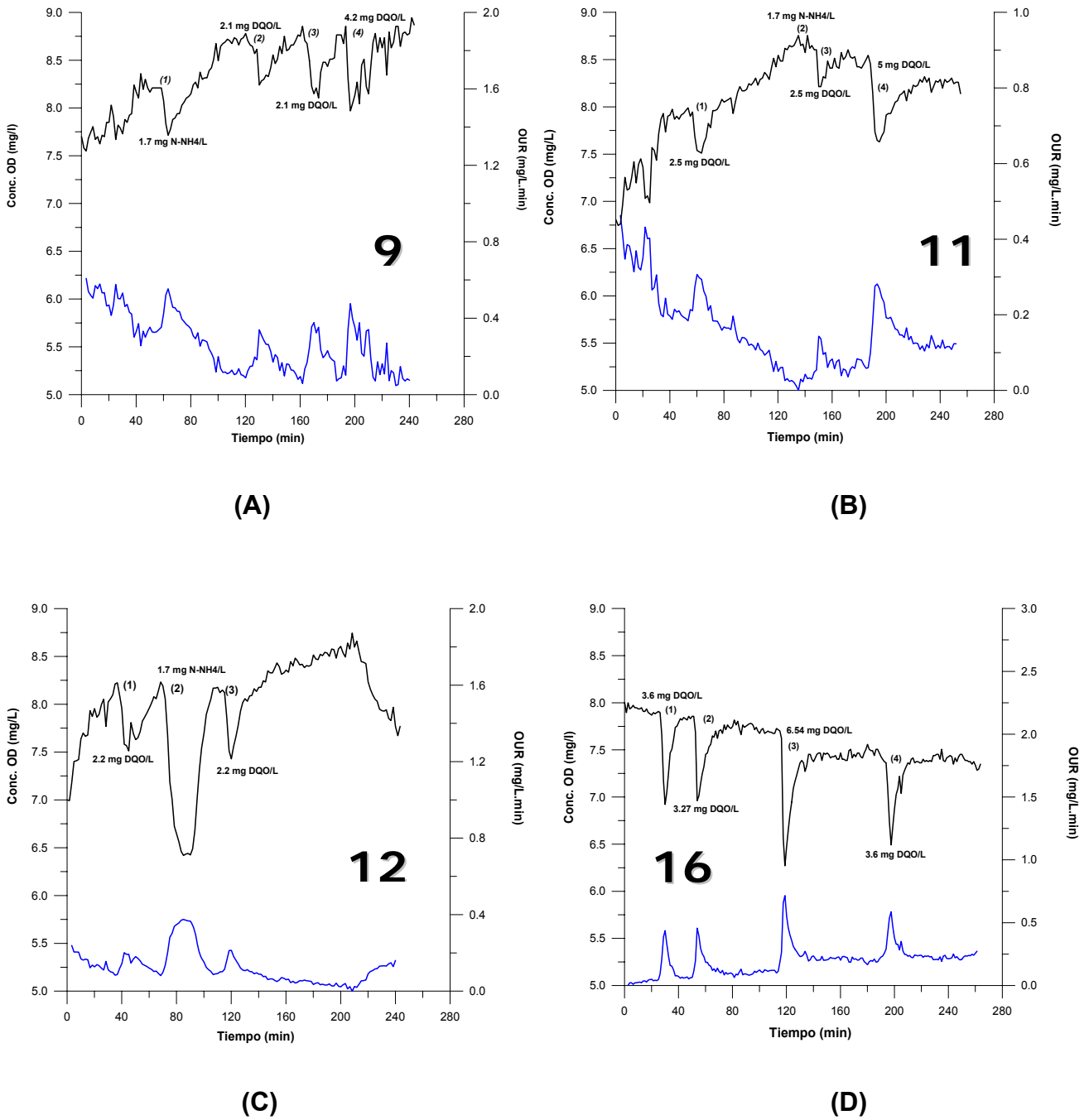


Figura 4.2.- Respirogramas correspondientes a los días de experimentación: (A) 9, (B) 11, (C) 12, (D) 16.

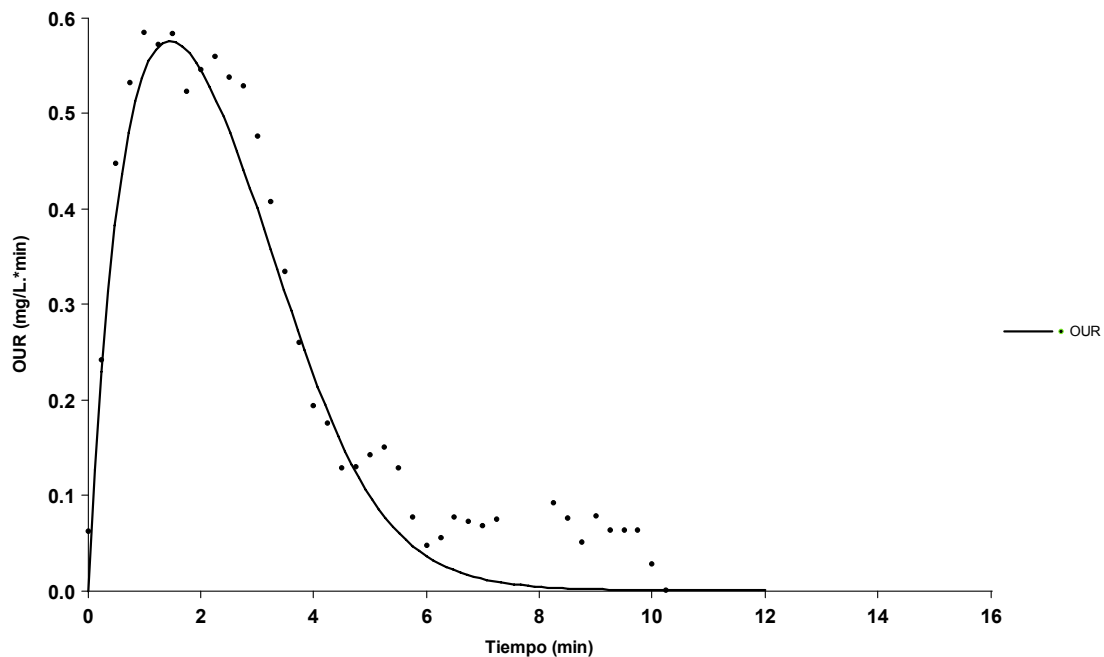


Figura 4.3.- Ejemplo de un ajuste del modelo teórico a un perfil OUR correspondiente al día 16.

La Figura 4.3 muestra un ejemplo de un ajuste realizado a un perfil *OUR* experimental mediante el modelo teórico. La línea sólida representa las predicciones del modelo teórico de acuerdo a las ecuaciones (2.4) y (2.5). Los perfiles de consumo de oxígeno exógeno fueron bien modelados con el modelo matemático. Mediante éste ajuste se estimaron los parámetros biocinéticos μ_{max} y K_s . La tabla 4.1 presenta los valores de los parámetros biocinéticos estimados para los días 2 y 16. Los valores de la velocidad de crecimiento específica máxima están de acuerdo con los valores reportados en la literatura para proceso de lodos activados de aguas residuales domésticas. ($0.04 - 0.20 \text{ h}^{-1}$, Tchobanoglous 2000). Mientras que los valores de K_s estimados en éste trabajo de investigación estuvieron muy por debajo de los valores usuales reportados para proceso de lodos activados ($15 - 70 \text{ mg DQO/L}$, Tchobanoglous 2000). La diferencia entre los valores reportados y los hallados en éste trabajo de investigación, radica en el hecho de que los experimentos respirométricos se realizan bajo condiciones de sustrato muy bajas (menores de 10 mg DQO/L), por lo cual la afinidad por el sustrato es diferente.

Sin embargo las estimaciones de K_s están de acuerdo con los valores estimados en el trabajo realizado por Kong *et al.* (1996). Tomando esto en consideración se utilizó un valor de K_s de 45 mg DQO/L como base para las simulaciones en SuperPro Designer y la estimación de costos de operación.

Por otra parte los valores presentados en la tabla 4.1 confirman las variaciones en la actividad biológica de los microorganismos observada durante los días de experimentación. En efecto los parámetros biocinéticos son muy sensibles a parámetros ambientales así como a las condiciones de operación del reactor.

Día	Parámetros	
	$\mu_{max} (h^{-1})$	$K_s (mg DQO/L)$
2	0.058 \pm 0.08	3.6479
16	0.023 \pm 0.08	1.86736

Tabla 4.1- Parámetros biocinéticos estimados en los días de investigación 2 y 16.

4.1.2. Estimación de Costos de Operación

La estrategia utilizada para calcular los costos de operación consistió en utilizar los parámetros biocinéticos estimados del reactor biológico de la Planta, en el programa SuperPro Designer. Con estos datos el programa es capaz de realizar los balances de materia del proceso y estimar el tiempo de retención de sólidos. Éste dato es muy importante ya que permite calcular la producción de lodos, así como los requerimientos de oxígeno; los cuales permiten calcular los costos de operación del proceso. La tabla 4.2 presenta los valores de los parámetros utilizados para calcular los requerimientos de oxígeno, el flujo de aire necesario y la potencia suministrada al reactor en los días 2 y 16 de investigación.

PARÁMETROS	UNIDADES	VALOR	
		Día 2	Día 16
Caudal (Q)	m ³ /d	10368	10368
DQO (e).	mg/L	420	460
DQO (s)	mg/L	36	35
N-NH ₄ ⁺ (e)	mg N-NH ₄ ⁺ /L	36.5	85.8
N-NH ₄ ⁺ (s)	mg N-NH ₄ ⁺ /L	0.7	20.2
N-NO ₃ ⁻ (s)	mg N-NO ₃ ⁻ /L	36	65
Co	mg/L	2.0	2.0
COsat	mg/L	8.2	8.6
Temperatura. (T)	°C	27	25
Tiempo de retención de sólidos (Θ _c)	días	3.7	18
Rendimiento celular (Y)	mg SSV / mg DQO	0.75	0.47
Co ₂₀	mg/L	9.07	9.07

Tabla 4.2.- Datos para calcular el Requerimiento de Oxígeno.

La tabla 4.3 presenta los resultados obtenidos para los requerimientos de oxígeno, producción de lodos y potencia suministrada al reactor de lodos activados en los días 2 y 16. Con base en los datos de potencia y tomando como base un precio de \$ 5.0 el kWh se calcularon los costos de aireación por un día de funcionamiento del reactor, lo cual es mostrado en la Tabla 4.4. A partir de estos datos se puede realizar un análisis muy interesante, como se puede observar en la Figura 3.2 los días 2 y 16 presentan altos porcentajes de remoción de materia orgánica, siendo de 91.4 y de 92.4 % respectivamente. Sin embargo el costo del proceso para el día 2 es aproximadamente un tercio del costo del día 16. Es decir que tenemos un ahorro significativo manteniendo las condiciones de operación prevalecientes del día 2.

A pesar de que el día 2 tiene una producción de lodos casi tres veces mayor que el día 16, los costos de aireación impactan de una manera mas significativa que los costos de tratamiento de lodos. Los costos de operación de los restantes días de investigación no fueron estimados, debido a la falta de control del caudal de operación, donde la comparación de los días 2 y 16 se realizó bajo la consideración del mismo caudal. Sin embargo como se mencionó anteriormente los valores de caudales de recirculación de lodos y alimentación no son medidos. Sin embargo la metodología desarrollada se puede aplicar en un reactor de lodos activados para optimizar las condiciones de operación para minimizar los costos de operación; siendo un requisito indispensable la colocación de instrumentos de medición de caudal.

PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR	
		Día 2	Día 16
Rendimiento celular (Y)	mg SSV / mg DQO	0.75	0.47
TRS (Θ_c)	(días)	3.7	18
Flujo de aire (Q_{aire})	m ³ /min	22.03	62.506
Requerimiento de oxígeno teórico (R_o)	Kg O ₂ /d	2114.20	6121.06
Requerimiento estándar de oxígeno (TETO)	Kg O ₂ /d	2823.1	8058.26
Producción de lodos (P_x)	Kg SST/d	2443.52	864.48
Potencia requerida (P)	hP	25.2336	71.54

Tabla 4.3.- Potencia suministrada al reactor en los días 2 y 16 de estudio.

DIA	Costos de aireación	Producción de lodos
2	\$2224/d	2443.5 kg/d
16	\$6408/d	864.5 kg/d

Tabla 4.4.- Costos de Aireación del Reactor de Lodos Activados de la Planta Centenario.

CAPITULO V

CONCLUSIONES

Se ha realizado una caracterización del proceso de lodos activados de la planta de tratamiento de aguas residuales “Centenario”, mediante un monitoreo de parámetros determinantes en la calidad del efluente del agua residual y de la estimación de parámetros biocinéticos obtenidos con el método respirométrico de pulsos, haciendo uso de estos parámetros se realizó una simulación del proceso de lodos en SuperPro Designer estimando un caudal de 120 l/s, donde se calcularon los datos y parámetros descritos en la tabla 1.2 del capítulo I; de acuerdo a los resultados de la simulación, de las dimensiones de las unidades de proceso y de los diferentes criterios de diseño, se realizó una comparación con los datos contenidos en la memoria de cálculo de la planta Centenario y se concluye que efectivamente el diseño corresponde para un caudal de 120 l/s.

Se observó que durante el periodo de investigación la eficiencia de remoción en el reactor varió entre 74 y 96 %, con excepción del día 15, lo cual determina que las descargas de agua residual son de calidad aceptable con un contenido de materia orgánica por debajo de lo que exigen las normas de vertimiento. Con respecto al día 15 la disminución en la eficiencia de remoción se puede atribuir principalmente a problemas de operación en el proceso.

El proceso de lodos activados de la Planta Centenario presentó buenas eficiencias de Materia Orgánica y Nitrógeno Amoniacal durante el periodo de estudio. Sin embargo al carecer de un control adecuado el proceso presenta variaciones en la concentración y actividad de los microorganismos presentes en el reactor, estas variaciones cambian el TRS por lo cual no existe un control efectivo en el suministro de aire necesario para el proceso, incrementando de manera importante los costos de operación.

En esta tesis se propone un método de optimización para el proceso de Lodos Activados de la Planta Centenario. El objetivo del método es minimizar los costos de operación con una calidad de efluente y una producción de lodos adecuados. El método propuesto puede ser aplicado a diferentes caudales sin ninguna complejidad adicional. El método propuesto consiste básicamente en hacer uso de los parámetros medidos en el capítulo III y el uso de parámetros biocinéticos estimados con el método de pulsos, descrito en el capítulo de materiales y métodos. Mediante estos parámetros es posible estimar la producción de lodos, y los requerimientos de oxígeno, lo cual permite calcular los costos de operación.

El principal problema detectado se debe a que la planta no cuenta con medidores de caudal en ninguna de sus etapas de proceso, así como también existen problemas de control y operación en el proceso. Las deficiencias que se presentan en la operación del proceso traen como consecuencia que los costos de aireación en ocasiones sean muy altos y con baja producción de lodos, provocando que el sistema sea poco eficiente para los fines correspondientes.

BIBLIOGRAFÍA

APHA, AWWA, WEF. (1995) *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 19th Ed. Am. Public Health Assoc. Washington D. C., USA

Bertola N., Contreras E. y Zaritzky N. (2001). The application of different techniques to determine activated sludge kinetic parameters in a food industry wastewater. *Water SA* **27** (2), 169-176

Brouwer H., Klanpwijk A. y Keesman K J. (1998) Identification of activated sludge and wastewater characteristics using respirometric batch-experiments. *Wat. Res.* **32** (4), 1240-1254

Calderón F, Pavlova, M. (2001) Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO₅; Método Respirométrico; Bogotá.

Carrión M., Assaf A. y Thalasso F. (2003) Respiration rate measurement in submerged fixed bed reactor. *Wat Sci. Tech.* **47** (5), 201-204

Carrión M., Alba J. y Thalasso F. (2005) Effect of hydrodynamic conditions on biofilms oxygen consumption rate in a fixed-bed nitrifying reactor. *Wat Sci. Tech.* **52** (7), 91-95

Chandran K. y F. Smets Barth. (2001) Estimating biomass yield coefficients for autotrophic ammonia and nitrite oxidation from batch respirograms. *Wat Sci Tech.* **35** (13), 3153-3156

Crites R., Tchobanoglous G. (2000) *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*. 1^a Ed. Tomo 2 Mc Graw Hill. Colombia

Gearney A. K., Petersen B., Ottoy J. P. y Vanrolleghem P. (2001) Activated sludge monitoring with combined respirometric- titrimetric measurements. *Wat. Res.* **35** (5), 1280-1294

Grady, C. P. L. Jr., G. Aichinger, S. F. Copper y M. Naziruddin (1999) Biodegradation kinetics for selected toxic/hazardous organic compounds. Air and waste management association, Pittsburgh, PA, 141-153

Gujer W., y Henze Mogens (1991) Activated sludge modeling and simulation. *Wat. Sci. Tech.* **23**, 1011-1023

Kabouris J C., y Georgakakos A P. (1996) Parameter and state estimation of the activated sludge process-II. Applications. *Wat. Res.* **30** (12), 2867-2282

Kappeler J. y Gujer W. (1992) Estimation of kinetic parameters of heterotropic parameters under aerobic conditions and characterization of wastewater for activated sludge modeling. *Wat. Sci. Tech.* **25**, 1992, 125-139

Kong Z., Vanrolleghem P. y Verstraete W. (1994) Automated respiration inhibition kinetics análisis (ARIKA) with a respirographic biosensor. *Wat. Sci. Tech.* **30** (4), 275-284

Kong Z., Vanrolleghem P., Willens P. y Verstraete W. (1996) Simultaneous determination of inhibition kinetics of carbon oxidation and nitrification with a respirometer. *Wat. Res.* **30** (4), 825-836

Metcalf & Eddy, (1995). "*Ingeniería de Aguas Residuales*", Tomo I y II. Tercera edición. Editorial McGraw-Hill. España

Metcalf & Eddy, (1981) INC.: *Wastewater Engineering: Collection and Pumping of Wastewater*, McGraw-Hill, Nueva York,.

Ramalho R. S., (1996). "*Tratamiento de Aguas Residuales*". Edición revisada. Editorial. Reverté, S.A., España.

Rozich, Alan F., y Gaudy Jr Anthony F. (1992) *Desing and operation of activated sludge processes using respirometry*. Lewis Publishers, Inc. USA.

Rozzi A., Ficara E., Cellamare C.M. y Bortone G. (1999) Characterization of textile wastewater and other industrial wastewaters by respirometric and titration biosensors. *Wat Sci. Tech.* **40** (1), 161-168

Sollfrank U., y Gujer W. (1990) simultaneous determination of oxygen uptake rate and oxygen transfer coefficient in activated sludge systems by an on-line method. *Wat. Res.* **24** (6), 725-732

Spanjers H., Takács Imre., y Brouwer H. (1999) Direct parameter extraction from respirograms for wastewater and biomass characterization. *Wat Sci. Tech* **39** (4), 137-145

Sundstrom D.W. y Klei H.E. (1979) *Wastewater treatment*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J: 07632, USA.

Tchobanoglous G y Crites R.,. (2000) *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*. 1ª Ed. Tomo 2 Mc Graw Hill. Colombia

Tejero J., Cuevas J. y Carrión M. (2007) *Análisis del proceso de lodos activados de la planta centenario*. México.

Vanrolleghem P., Gurkan sin, y Gearney K. (2004) Transient response of aerobic and anoxic activated sludge activities to sudden substrate concentration changes. *Biotech* **86** (3), 227-288

Winkler Michael A., (1994). "*Tratamiento Biológico de Aguas de Desecho*". Tercera reimpresión. Editorial Limusa.

Wise citado por Moo-Yong, M. y Blanch H. (1980) Desing of biochemical reactors. Mass transfer criteria for simple y complex system. En advances in biochemical engineering, ed. T. K. Chose, A. Fiechter y N. Blekebrogh. **17**, 1-69. Springer, Berlin

Yuan Z., Bogaert H. Devisscher M. Vanrolleghem P. y Verstraete W. (1999) On-line estimation of the maximum specific growth rate of nitrifiers in activated sludge systems. *Biotech. and Bioeng.m* **65** (3), 265-273