



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CENTRO INTERAMERICANO DE RECURSOS DEL AGUA



DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS CINÉTICOS DE UN LODO-MODELO PARA ESTUDIAR LA MINIMIZACIÓN DE LOS SÓLIDOS, EN UN PROCESO BIOLÓGICO DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS DEL AGUA

PRESENTA:

JAVIER ARTURO ROGEL DORANTES

DIRECTOR DE TESIS

DR. CHEIKH FALL

Toluca, Estado de México septiembre 2013

RESUMEN

En las plantas de tratamiento de aguas residual, uno de los problemas que ocurren es la producción constante de lodos en exceso. Existen ya estudios y propuestas sobre la minimización de la generación de sólidos en las plantas, como el concepto Cannibal, (variante de lodo activado). Aunque ya hay avances en los conocimientos al respecto. Existe la necesidad de indagar más sobre esta línea.

Esta investigación es parte de un proyecto enfocado en el estudio de los procesos de baja producción de lodo (BPL) en el cual se buscan alternativas novedosas. Un punto importante de dicho proyecto es la modelación dinámica para el concepto BPL; Para esto, la investigación se basa en el desarrollo de un lodo modelo con agua sintética, montado en el laboratorio, el cual se caracterizó con estudios físico-químicos y respirometricos.

El objetivo de la investigación fue caracterizar el lodo modelo y determinar las constantes cinéticas específicas de este lodo. La metodología utilizada para ello fue llevar a cabo estudios respirometricos para encontrar los parámetros de decaimiento heterótrofo bH , la tasa máxima de crecimiento específico μH_{max} , y también evaluar un método alternativo (Incremento de Semillas IS) para determinar μH_{max} . Las constantes que se determinaron en esta investigación se obtuvieron a 5 temperaturas diferentes 16, 20, 24, 28, y 32°C y para poder estimar el coeficiente de corrección de temperatura (θ), para cada parámetro.

Como resultado se pudo estimar el valor de bH a 20°C, siendo 0.62 d⁻¹ mientras que su θ en el rango de 20 a 32°C es 1.06. En el caso de μH_{max} (por el método de crecimiento) se obtuvo un valor de 4.47 d⁻¹ a 20°C y un θ de 1.057 en el rango de 20 a 28°C. Con respecto al método alternativo incremento de semillas (IS) si se consiguió la linealidad de la función en la que se basa este método, fue confirmada por observaciones en esta investigación, pero no se pudo demostrar la equivalencia de los valores de μH_{max} medidos por este método con el método tradicional.

Los resultados obtenidos dan la certeza a la modelación del proceso BPL que se está desarrollando en el proyecto global.

AREVIATURAS

DQO	Demanda química de oxígeno
DQO _{sol}	DQO soluble
DQO _{total}	DQO total
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
SSF	Sólidos suspendidos fijos.
SST	Sólidos suspendidos totales
μ_{H-max}	Tasa máxima específica de crecimiento de la biomasa heterótrofa
b_H	Constante o coeficiente de decaimiento de la biomasa heterótrofa (muerte-regeneración)
$b'H$	Constante de decaimiento de la biomasa heterótrofa (respiración endógena)
Y_H	Coficiente de rendimiento heterotrófico
θ	Coficiente de corrección de la temperatura
S/X	Relación entre sustrato y microorganismos
r_{O_2}	Tasa de consumo de oxígeno
ASM1	Modelo de lodos activados No.1 (Activated Sludge Model)
IS	Método de incremento de semillas
RBS	Reactor batch secuencial
θ_{bH}	Coficiente de corrección de temperatura para el b_H
$\theta_{\mu_{H-max}}$	Coficiente de corrección de temperatura para μ_{H-max}
X_p	Producto particulado derivado del decaimiento de la biomasa
BPL	Procesos de Baja Producción de Lodo

Contenido

ÍNDICE DE FIGURAS	I
ÍNDICE DE TABLAS.....	I
1 INTRODUCCIÓN	2
2 ANTECEDENTES.....	4
2.1 Concepto del proceso de baja producción de lodo BPL	4
2.2 Generalidades sobre los procesos biológicos de tratamiento de aguas.....	5
2.3 Sistema de lodos activados	7
2.4 Modelo tradicional de lodo activado.....	8
2.5 Modelo dinámico de lodo activado (ASM1).....	9
2.6 Procesos de crecimiento y decaimiento de microorganismos heterótrofos en el modelo ASM1.....	13
2.6.1 Crecimiento aerobio de los microorganismos heterótrofos.....	13
2.6.2 Decaimiento o muerte de los microorganismos heterotróficos.....	14
3. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	17
3.1 Justificación	17
3.2 Hipótesis	18
3.3 Objetivos	18
3.3.1 Objetivo general.....	18
3.3.2 Objetivos específicos	18
4. METODOLOGÍA	20
4.1 Plan experimental.....	21

4.2	Operación y estabilización del sistema de producción del lodo modelo	23
4.2.1	Operación del reactor batch secuencial (RBS)	23
4.2.2	Composición del agua residual sintética	24
4.2.3	Monitoreo del reactor batch secuencial (RBS).....	25
4.3	Montaje del respirómetro	26
4.4	Procedimientos de las pruebas respirometricas	27
4.4.1	Decaimiento heterótrofo (<i>bH</i>).....	27
4.4.2	Tasa máxima de crecimiento heterotrófico (μ_{Hmax}) por el método de Kappeler y Gujer (1992). 30	
4.4.3	Método de incremento de semillas (IS) (Fall et al., 2012)	33
4.4.4	Efecto de la temperatura en los parámetros cinéticos.....	35
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
5.1	Caracterización del reactor RBS	37
5.2	Resultados de las pruebas de decaimiento heterótrofo (<i>bH</i>).....	41
5.2.1	Ejemplo de resultado de la prueba <i>bH</i> y métodos de cálculos	41
5.2.2	Detalles de los resultados y cálculos del <i>bH</i>	43
5.2.3	Factor de corrección de temperatura de Arrhenius (Θ) para <i>bH</i>	45
5.3	Determinación de μ_{Hmax} por el método de Kappeler y Gujer.	49
5.3.1	Ejemplo de calculo μ_{Hmax}	49
5.3.2	Resultados de μ_{Hmax} a las diferentes temperaturas	51
5.3.3	Factor de corrección de temperatura (Θ) para μ_{Hmax}	54
5.4	Método de Incremento de semillas para la determinación de la tasa máxima de crecimiento específico de la biomasa heterotrófica (μ_{Hmax})	56
5.4.1	Ejemplo de cálculo para el método de incremento de semillas (IS)	56
5.4.2	Valores de μ_{Hmax} medidos por el método IS a diferentes temperaturas	58
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	61
6.1	Conclusiones.....	61
6.2	Recomendaciones.....	62
	REFERENCIAS.....	63

ANEXOS A SEGUIMIENTO DEL RBS	B
ANEXOS B CALCULO DE S/X	G
ANEXOS C GRAFICAS Y TABLAS PARA <i>BH</i>.....	K
ANEXOS D GRAFICAS Y TABLAS DE <i>MHMAX</i> POR EL METODO DE KAPPELER Y GUJER... X	
ANEXOS E GRAFICAS Y TABLAS DE <i>MHMAX</i> POR EL METODO INCREMENTO DE SEMILLAS (IS)	DD

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema de un proceso de lodos activados	7
Figura 4.1 Diagramas de las etapas experimentales	20
Figura 4.2 Esquema del respirómetro montado en el laboratorio de calidad del agua del CIRA	26
Figura 5.1 Vista del reactor RBS	37
Figura 5.2 Comportamiento a lo largo de la investigación de SSV, SST y DQO del reactor RBS.	40
Figura 5.3 muestra la tendencia por duplicado de la r_{O_2} de bH a $20^{\circ}C$	41
Figura 5.4 se observa el logaritmo natural del r_{O_2} a $20^{\circ}C$ para bH	42
Figura 5.5 muestra la tendencia de los resultados de bH a diferentes temperaturas	46
Figura 5.6 Representación de $(T - 20)$ vs $\ln(bH)$	48
Figura 5.7 prueba de μ_{Hmax} realizada en varias repeticiones	49
Figura 5.8 Respirograma de la curva de crecimiento a $20^{\circ}C$	50
Figura 5.9 Respirograma de la curva de crecimiento a $20^{\circ}C$ para determinar μ_{Hmax}	50
Figura 5.10 Tendencia de μ_{Hmax} con $T^{\circ}C$	52
Figura 5.12 Representación de $r_{O_2ini} (V_{ww} + v_{ML})$ vs v_{ML} a $16^{\circ}C$	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Rangos típicos de temperatura para los microorganismos	6
Tabla 2.2 Matriz del modelo ASM1	10
Tabla 4.1 Diseño experimental de las pruebas de respirometria	21
Tabla 4.2 calendarización de las pruebas respirometricas	22
Tabla 4.3 Compuestos del agua residual sintética	24
Tabla 5.1 Resultados del monitoreo de la operación del reactor RBS.	38
Tabla 5.2 Resultados finales de $bH (d^{-1})$ a diferentes temperaturas (d^{-1}).	43
Tabla 5.3 Comparación de $bH (d^{-1})$ a $20^{\circ}C$	44
Tabla 5.4 Valores de $bH (d^{-1})$ obtenidos a diferentes temperaturas	44
Tabla 5.5 Valores de Θ para varios parámetros cinéticos.....	46

Tabla 5.6 Datos de bH a diferentes temperaturas	47
Tabla 5. 7 Valores bH y bH ajustado a diferentes temperaturas	48
Tabla 5.8 Tasa de crecimiento máximo heterotrófico promedio a diversas temperaturas .	51
Tabla 5.9 Comparación de valores de μ_{Hmax} (d^{-1}) a $20^{\circ}C$	52
Tabla 5.10 Datos de μ_{Hmax} a diferentes temperaturas (Linealización)	54
Tabla 5.11 Estimación de μ_{Hmax} y X_{Ho_ww} a $16^{\circ}C$ por el método de incrementos.....	57
Tabla 5.12 Datos obtenidos de μ_{Hmax} por método de incremento de semillas	58
Tabla 5.13 Datos de crecimiento por métodos IS y Kappeler y Gujer (d^{-1}).....	58

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1 INTRODUCCIÓN

Existe gran interés en desarrollar procesos de tratamiento de agua residual que produzcan menos lodo, ya que el manejo de los sólidos representa hasta el 50% de los costos de operación de las plantas, y 30 a 50% de los costos de construcción (Metcalf y Eddy, 2003). Por eso las investigaciones sobre el tema de la modelación dinámica están más orientadas hacia los llamados “sistemas de baja producción de lodo (BPL)”. Se trata de repensar el concepto de lodo activado, para proporcionar nuevas vías de minimización de la generación de lodo, en una forma que no ocasione un incremento de los volúmenes requeridos por los tanques de aireación. Se busca minimizar los sólidos generados, pero esta vez en el seno mismo de la línea de tratamiento de agua.

El modelo No.1 de lodos activados ASM1 (Henze et al., 2000) permite la simulación dinámica de los reactores biológicos (planta) para la remoción de la materia orgánica así como nitrificación y desnitrificación. Después del ASM1 se desarrollaron también el ASM2 y ASM3 que complementan los tradicionales modelos de régimen estacionario de McCarty y Lawrence (1970). Los modelos se han convertido en la base para investigar la minimización de lodos en los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales, por lo que es importante conocer sus parámetros cinéticos y las principales características de los lodos para una efectiva modelación de los procesos.

Una de las técnicas para determinar los parámetros cinéticos del ASM1, es la respirometría. (Spanjers y Vanrolleghem, 1995; Spanjers et al., 1998; Vanrolleghem et al., 1999; Vanrolleghem et al., 2004; Sin et al., 2005; Hoque et al., 2008), Esta técnica mide el consumo de oxígeno (r_{O_2}) de los microorganismos y permite estimar en menor tiempo los parámetros que se relacionan con la dinámica de los microorganismos, tales como el rendimiento (Y_H), el coeficiente de decaimiento (b_H) y la tasa máxima específica de crecimiento (μ_{Hmax}) de la biomasa heterótrofa.

La estrategia de este proyecto de tesis es utilizar un lodo modelo que solo contiene las fracciones X_H (biomasa heterótrofa) y X_P (residuos de biomasa), para investigar los mecanismos de reducción de masa. La investigación se enfocó a determinar los parámetros cinéticos de crecimiento y decaimiento (μ_{Hmax} y b_H) del lodo modelo.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

2 ANTECEDENTES

2.1 Concepto del proceso de baja producción de lodo BPL

El principio de los sistemas BPL consiste en eliminar la purga de lodo, y buscando remover las tres fracciones inertes (X_{ISS} , X_i y X_p) que componen el lodo y que regularmente se acumulan en los tanques de aireación.

Por medio de algunos procesos físicos como el tamiz y el hidrociclón se llega a remover algunas de estas fracciones y en algunos otros procesos solo degrada (X_p), con esta propuesta abrió el campo de investigación para la reducción de lodo y aparecieron procesos BPL con nombres comerciales como (proceso Cannibal, Novak et al., 2007; OSA, Saby et al., 2003) y llegan a reducir la producción de lodo de entre 33 y 60 % de lodo generado en un proceso convencional (Goel y Noguera, 2006; Novak et al., 2007; Giraldo et al., 2007).

Investigadores como Johnson and Daigger, 2009; Sun et al., 2010; entre otros más que han criticado desde el punto de vista del mecanismo de degradabilidad de los X_p y la separabilidad física de las fracciones X_{ISS} X_i , han llevado a desarrollar investigaciones sobre el tema y al no existir modelos conceptuales de los BPL, basados en los ASM para simular los nuevos procesos de baja producción de lodo, deja abierta la línea sobre la simulación dinámica.

Los retos para los procesos de BPL, son encontrar mecanismos que ayuden a reducir la masa de los residuos de la biomasa, así como desarrollar un modelo matemático que incluya los parámetros cinéticos y estequiométricos medidos que describa realmente el concepto de baja producción de lodo.(Fall, et al., 2012).

2.2 Generalidades sobre los procesos biológicos de tratamiento de aguas

La materia orgánica es el principal contaminante en las aguas residuales municipales. Estas se encuentran ya sea en suspensión o en solución y están formadas por un sin número de compuestos como: proteínas, carbohidratos grasas, aceites y microorganismos de todo tipo. Dentro de esta descripción, también se encuentran compuestos orgánicos e inorgánicos, algunos muy especializados que son utilizados por los microorganismos para su mantenimiento y crecimiento.

El propósito del tratamiento de aguas es remover todos los contaminantes posibles antes de que se descarguen al medio ambiente. Las aguas crudas representan un peligro para la salud humana y para la vida acuática que se desarrolla en los ríos, lagos o cualquier otro cuerpo de agua natural, donde se descarguen aguas sin tratamiento previo.

En los tratamientos de tipo biológico, los microorganismos son utilizados para la eliminación de la materia orgánica del agua residual. Una gran variedad de estos son utilizados en el proceso de depuración y forman un cultivo heterogéneo en donde prevalecen las bacterias. Los microorganismos tienen la función de oxidar o convertir la materia orgánica en nuevos productos y células. Los sistemas biológicos también son usados para remover o transformar el nitrógeno y fósforo en los procesos de tratamientos de aguas.

Existen varios tipos de grupos de microorganismos, donde los más conocidos se clasifican en heterótrofos y autótrofos. Los primeros son los que utilizan la materia orgánica como fuente de carbono y energía y los otros utilizan bióxido de carbono para la síntesis de sus células. Los microorganismos heterótrofos tienen un papel fundamental en la transformación de los contaminantes en los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales (Metcalf y Eddy, 2004).

Existen varios tipos de procesos biológicos para tratar el agua residual; entre ellos destacan los siguientes: lodos activados, lagunas de activación, reactores UASB, biodiscos etc. Estos se distinguen caracterizan según el medio de soporte en que se desarrollan y la disponibilidad o no de oxígeno que tengan para realizar las funciones necesarias los microorganismos. Entre ellos destacan: En sistemas anaerobios, el

tratamiento se desarrolla en ausencia de oxígeno y nitratos para realizar las funciones biológicas sin disponibilidad de oxígeno realiza las funciones biológicas. En los sistemas anóxicos, se sustituye el oxígeno por iones de compuestos como nitratos para aportar átomos de oxígeno al proceso. Los tratamientos aerobios, son los que la concentración de oxígeno es mayor a cero. Todos estos procesos se utilizan para depurar las aguas residuales e industriales, siempre y cuando sus componentes sean biodegradables y tengan lo mínimo de sustancias tóxicas.

La actividad microbiana es afectada o favorecida, dependiendo de varios factores que influyen directamente en los procesos biológicos de tratamiento de aguas; entre ellos, destacan la temperatura y el pH.

El pH y la temperatura son aspectos fundamentales en el desarrollo de los microorganismos en los sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales.

De acuerdo al rango de temperatura los microorganismos se pueden clasificar en: psicrófilas, mesófilas y termófilas. Tabla 2.1 (Metcalf y Eddy, 2004).

Tabla 2.1 Rangos típicos de temperatura para los microorganismos

Tipo de microorganismos	Rango de temperatura, °C	Rango óptimo, °C
Psicrófilas	10-30	12-18
Mesófilas	20-50	25-40
Termófilas	35-75	55-65

El pH es un factor fundamental en el crecimiento de los organismos dentro del reactor biológico. Existen bacterias que soportan niveles de pH por encima de 9.5 y por debajo de 4.0, pero el valor en el que se desarrollan mejor las bacterias es de 6.5 y 7.5.

2.3 Sistema de lodos activados

El sistema de lodos activados (Figura 2.1) es un proceso biológico aerobio continuo con los microorganismos en suspensión, mismos que se deben mantener en alta concentración dentro del tanque de aireación (Reactor). Después de degradar la materia orgánica, los microorganismos que han crecido y los que se han reproducido son capaces de formar flóculos biológicos; luego estos se separan y concentran en un sedimentador secundario. Una parte de los flóculos se hace recircular al tanque de aireación para mantener una alta concentración y el resto se retira del sistema como lodo purgado. La purga de lodo se puede realizar desde el sedimentador secundario o alternativamente desde el tanque de aireación. El lodo activado es un tratamiento biológico secundario muy empleado para descomponer y estabilizar la materia orgánica que queda después de los tratamientos primarios. Existen diferentes variaciones de este proceso, algunos de los cuales permiten la remoción de nutrientes como fósforo y nitrógeno.

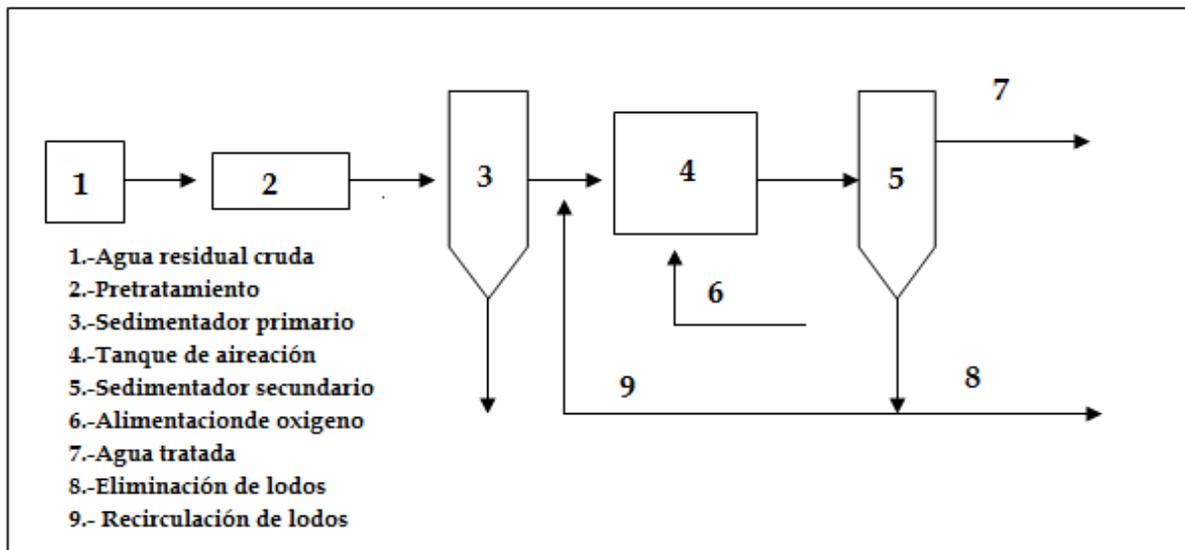


Figura 2.1 Esquema de un proceso de lodos activados

El proceso de lodo activado como tal comprende el tanque 4 y su sedimentador.

2.4 Modelo tradicional de lodo activado.

El modelo tradicional de diseño y operación de plantas de lodo activado está basado en un régimen estacionario tal que fue propuesto por McCarty y Lawrence (1970). Este modelo de mucha utilidad es toda la base para diseñar plantas de tratamiento, sin embargo no permite predecir la calidad del efluente en condiciones dinámicas. Los conceptos del modelo en régimen estacionario se retoman en las diferentes ediciones del libro de Metcalf y Eddy. Estos modelos son más simples pero tienen muchas hipótesis que a la hora de modelar se vuelven, menos precisos.

Paralelamente al uso del modelo estacionario, los parámetros tradicionalmente enfocados fueron la demanda biológica de oxígeno (DBO) para representar el sustrato y los sólidos suspendidos totales para la biomasa (SST).

Esto representa una desventaja ya que las determinaciones requieren varias horas y días para obtener los resultados. Entonces el control de operación de la planta se vuelve deficiente si se pretende realizar algunas modificaciones en caso de algún cambio en el contenido del agua entrante o alguna sustancia tóxica.

La modelación clásica tiene algunas complicaciones cuando la nitrificación-desnitrificación se hace presente en los sistemas de lodos activados. Esto implica relacionar procesos de degradación de la materia orgánica así como otros componentes del sistema. Todas las complicaciones y desventajas encontradas en los modelos clásicos fueron atendidas con la entrada del ASM1, que a diferencia del modelo clásico, fue desarrollado para describir la eliminación de los componentes de carbono orgánico y nitrógeno, con consumo de oxígeno y nitrato como aceptores de electrones, además de hacer una buena descripción de la producción de lodos en el proceso biológico de la planta.

2.5 Modelo dinámico de lodo activado (ASM1)

El modelo No.1 de lodo activado (ASM1) es un modelo que permite representar la dinámica del proceso y describir la degradación de la materia orgánica, nitrificación y desnitrificación en el sistema de lodo activado.

Los logros más destacados del grupo de científicos reunido por la IAWQ en 1983, fue un consenso en los procesos biológicos que integran el modelo, la estandarización de los símbolos, la presentación del modelo utilizando una notación matricial, la propuesta de valores de "default" de los parámetros del modelo, la adopción de la DQO y su fraccionamiento para caracterizar las aguas y lodos, un código de programación para el desarrollo futuro de software de modelización (Fall et al., 2006). La última acción propulsó la existencia actual de varios softwares y programas que tienen implementados, los conceptos del ASM1 original o algunas de sus modificaciones para fines de diseño, operación de plantas o investigación: Aquasim, Biowin, GPS-X, SSSP, Simba etc.

El modelo de lodos activados ASM1, (Henze et al, 2000) fue desarrollado sobre la base de 8 procesos que implican 2 grupos de microorganismos (heterótrofos y autótrofos) y 13 componentes en (DQO, Nitrógeno, oxígeno y alcalinidad) El ASM1 incluye cerca de veinte parámetros cinéticos y estequiométricos que se deben conocer, esto para describir el funcionamiento de una planta de tratamiento de lodos activados. Debido a la gran cantidad de constantes cinéticas y estequiométricas que están incluidas en el ASM1, surgen algunos problemas para identificarlas (Liwarska-Bizukojc y Biernacki, 2010). Sólo un número muy limitado de los parámetros se estiman o calibran al modelar una planta de tratamiento de aguas residuales; la mayoría se mantiene a sus valores predeterminados (Fall et al., 2012). Sin embargo, es importante tener buenos métodos que permiten fijar con precisión los valores de default y estimar las constantes particulares en determinados casos.

El modelo ASM1 es una descripción matemática de una serie de sub-procesos que ocurren en el lodo activado. Suceden varias reacciones que involucran un gran número de componentes. El modelo matemático describe los procesos fundamentales más importantes que ocurren dentro del sistema. La tabla 2.2 muestra la matriz del modelo ASM1 (Henzel et al., 2000).

Tabla 2.2 Matriz del modelo ASM1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Tasas de reacción, ρ_j ($M L^{-3} T^{-1}$)					
	S_I	S_S	X_I	X_S	$X_{B,H}$	$X_{B,A}$	X_P	S_O	S_{NO}	S_{NH}	S_{ND}	X_{ND}	S_{ALK}						
1. Crecimiento aerobio heterotrófico		$-1/Y_H$			1			$-(1-Y_H)/(Y_H)$		$-i_{XB}$			$-i_{XB}/14$	$\mu_{H,max} \left[\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right] \left[\frac{S_S}{K_S + S_S} \right] X_{B,H}$					
2. Crecimiento anóxico heterotrófico		$-1/Y_H$			1			$-(1-Y_H)/(2.86 Y_H)$		$-i_{XB}$			$[(1-Y_H)/(14 \cdot 2.86 Y_H)] - i_{XB}/14$	$\mu_{H,max} \left[\frac{S_S}{K_S + S_S} \right] \left[\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right] \left[\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right] \eta_g X_{B,H}$					
3. Crecimiento aerobio autotrófico						1		$-(4.57-Y_A)/(Y_A)$	$1/Y_A$	$-i_{XB}(1/Y_A)$			$(-i_{XB}/14) - (1/7Y_A)$	$\mu_{A,max} \left[\frac{S_O}{K_{O,A} + S_O} \right] \left[\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right] X_{B,A}$					
4. Decaimiento heterotrófico				$1-f_p$	-1		f_p					$i_{XB} - f_p i_{XP}$		$b_H X_{B,H}$					
5. Decaimiento autotrófico				$1-f_p$		-1	f_p					$i_{XB} - f_p i_{XP}$		$b_A X_{B,A}$					
6. Amonificación de N orgánico soluble										1	-1		1/14	$k_a S_{ND} X_{B,H}$					
7. Hidrólisis de mat. orgánica particulada		1		-1										$k_h \frac{X_S / X_{B,H}}{K_X + (X_S / X_{B,H})} \left[\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right] + \eta_h \left[\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right] \left[\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right] X_{B,H}$					
8. Hidrólisis del N orgánico enredado											1	-1		$\rho_7 (X_{ND} / X_S)$					
Tasa de conversión Total (observada)	$r_{i\ neto} = \sum v_{ji} \rho_j$																		
Parámetros estequiométricos					Componentes							Parámetros cinéticos							
Rendimiento de los heterotróficos:... Y_H Rendimiento de los autotróficos:... Y_A Fracción de biomasa que se transforma en productos inertes:..... f_p Masa de N por unidad de masa de biomasa en DQO: i_{XB} Masa de N por unidad de masa de productos residuales en DQO: i_{XP}					S_I : mat. orgánica inerte soluble, $M(DQO)L^{-3}$ S_S : mat. org. rápidamente biodegradable, $M(DQO)L^{-3}$ X_I : mat. org. inerte en forma particulada, $M(DQO)L^{-3}$ X_S : mat. org. lentamente biodegradable, $M(DQO)L^{-3}$ $X_{B,H}$: biomasa heterótrofa activa, $M(DQO)L^{-3}$ $X_{B,A}$: biomasa autótrofa activa, $M(DQO)L^{-3}$ X_P : Productos particuladas inertes procedentes del decaimiento, $M(DQO)L^{-3}$							S_O : oxígeno disuelto (DQO negativa), $M(-DQO)L^{-3}$ S_{NO} : N en nitratos y nitritos, $M(N) L^{-3}$ S_{NH} : $N_NH_4^+ + N_NH_3$, $M(N)L^{-3}$ S_{ND} : N orgánico soluble biodegradable, $M(N)L^{-3}$ X_{ND} : N orgánico particulada biodegradable, $M(N)L^{-3}$ S_{ALK} : Alcalinidad: unidades molares				Crecimiento y decaimiento de heterotróficos: $\mu_{H,max}$, K_S , $K_{O,H}$, K_{NO} , b_H Crecimiento y decaimiento de autotróficos: $\mu_{A,max}$, K_{NH} , $K_{O,A}$, b_A Factor de corrección para el crecimiento de Autotróficos en medio anóxico: η_g Hidrólisis: k_h , K_X Amonificación: k_a Factor de corrección para la hidrólisis en medio anóxico: η_h			

Los procesos individuales que forman el modelo son relacionados a través de ecuaciones de leyes de conservación de masas (balances), las cuales se deben resolver, para poder describir los cambios en el estado del sistema a través de las variables de estado (concentraciones de biomasa, oxígeno, DQO, nitrógeno). La escritura de balances de masas de un modelo resulta en un sistema de ecuaciones diferenciales totales y/o parciales de ecuaciones algebraicas (Fall et al., 2006). Una forma sistemática de presentar los modelos y facilitar su entendimiento es a través de una matriz que tiene:

- Una lista de componentes representados por variables de estado (formas de sustancias) involucrados en los procesos: matriz de concentraciones.
- Una descripción de los procesos de transformación que afectan los componentes: modelos bioquímicos, coeficientes estequiométricos, expresiones de ley de velocidad de reacciones.

A la hora de modelar, se requiere además:

- Una caracterización del transporte convectivo de sustancias en los límites del sistema: diagrama de flujo.
- Una caracterización de la dispersión y mezcla interna según el tipo de reactor/sistema, tanto para los componentes disueltos como para los sólidos suspendidos (sedimentación), (Henze et al., 2000).

El modelo ASM1, ha llevado al desarrollo de nuevas formas de entender y medir la composición en sólidos de lodos generados. En el ASM1 la DQO del agua esta fraccionada en 4 componentes.

- **S_i** Materia orgánica inerte soluble.
- **S_s** Sustrato rápidamente biodegradable.
- **X_i** Materia orgánica en partícula inerte.
- **X_s** Sustrato lentamente biodegradable en partícula.

El modelo requiere al menos dos componentes para describir lo que ocurre en un reactor biológico (Henze et al., 2000). Estos componentes son:

Sustrato (S_s)

Componente del agua residual (materia orgánica), que sirve de alimento a la biomasa. En un proceso heterotrófico, su concentración podría medirse a través de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) o en demanda química de oxígeno (DQO).

Biomasa (X_v)

Cultivo de microorganismos heterótrofos o autótrofos que se alimentan de la materia orgánica biodegradable del agua residual. Su concentración se puede medir mediante la concentración de sólidos suspendidos volátiles (SSV) en el reactor biológico o bien en DQO. La biomasa está formada por partículas y puede separarse por sedimentación, filtración o flotación

Crecimiento de la biomasa heterótrofa activa (X_H)

Con base en la tabla 2.2 del modelo ASM1 este proceso se da con el consumo del sustrato (S_s) y de oxígeno (S_o) en una relación estequiometrica que se encuentra en la intersección de la tabla con los componentes del proceso y una velocidad determinada por la expresión cinética de este proceso.

2.6 Procesos de crecimiento y decaimiento de microorganismos heterótrofos en el modelo ASM1.

2.6.1 Crecimiento aerobio de los microorganismos heterótrofos.

Este proceso está representado en la línea 1 de la matriz del ASM1. Se considera que solo S_s interviene en el crecimiento de los heterótrofos. X_s sufre una hidrólisis (tardada) antes de que pueda transformarse en S_s y ser utilizado por los microorganismos. El crecimiento se modela utilizando la estructura del modelo de Monod donde pueden ser limitantes tanto S_s como S_o , (oxígeno). Este proceso es el que más contribuye en la remoción de la DQO, producción de biomasa nueva y demanda de oxígeno. La principal constante de velocidad es μH_{max} (Tasa máxima de crecimiento heterótrofo).

La tasa máxima de crecimiento heterótrofo (μH_{max}), varía con la cantidad de sustrato presente en el reactor. Con alto sustrato dentro del medio, la tasa de crecimiento alcanza un valor máximo y constante. En cambio cuando el sustrato es limitante la tasa se reduce.

Antes del ASM1, la tasa máxima de crecimiento (μH_{max}) de un agua residual se determinaba clásicamente considerando la relación entre el consumo específico de sustrato y la concentración de sustrato, y se expresaba a través de una ecuación de Monod (Sozen et al., 1998). Pero con la introducción de los modelos matemáticos, dinámicos y los problemas para interpretar la DQO_{total} , DBO, y las medidas de SSV, fomentaron el desarrollo del método respirométrico, desarrollado por Kappeler y Gujer (1992), y comúnmente utilizado para la estimación de μH_{max} .

Un método alternativo para estimar (μH_{max}) es el de incrementos de semillas (IS) ha sido propuesto recientemente (Fall et al., 2012), el cual se basa en la medición de las velocidades iniciales de la respiración (ro_2) a diferentes cantidades de SS, en un solo reactor y en presencia de exceso de sustrato fácilmente biodegradable (S_s). Se desarrollaron las ecuaciones basados en el ASM1, las cuales demostraron que μH_{max} podría estimarse a través de la pendiente de la función lineal de ro_{2_ini} ($V_{WW} + V_{ML}$) en comparación con V_{ML} (volumen de inóculo licor mezclado); V_{WW} representan el volumen añadido de aguas residuales.

En el (IS) el tiempo no es un factor determinante, pero es importante llevar a cabo rápidamente los incrementos, por cualquier caída de sustrato. Los resultados obtenidos Fall et al., (2012) en la función lineal de $ro_{2_ini} (V_{ww} + V_{ML})$ vs V_{ML} demuestran la linealidad con los incrementos realizados a lo largo de la prueba y confirman la hipótesis que la biomasa generada es insignificante a partir del crecimiento, comparada con la biomasa añadida por la siembra.

2.6.2 Decaimiento o muerte de los microorganismos heterotróficos.

El decaimiento heterotrófico en este modelo incluye todos los fenómenos de lisis, reparación endógena, muerte o depredación (Línea 4 de la matriz del ASM1). Su tratamiento matemático en el ASM1 es diferente al enfoque tradicional en el cual se le atribuía directamente el consumo de oxígeno (respiración endógena). En el ASM1 se utiliza la noción de muerte-regeneración, donde $X_H = X_s + X_p$ sin consumo directo de oxígeno. El consumo de O_2 esta diferido hasta después cuando el X_s se transforma en S_s , el cual se utiliza luego en el proceso de crecimiento. Por eso el valor de bH difiere con el del modelo tradicional ($b'H$), El proceso de decaimiento del ASM1, manifiesta ningún consumo directo de oxígeno, por el contrario, produce residuos inorgánicos inertes (X_p) y una DQO lentamente biodegradable (X_s). (Henze et al., 2000).

En los modelos actualmente desarrollados se emplean, principalmente la respirometría para la evaluación experimental de la $b'H$. El procedimiento propuesto por Ekama et al. (1986) es ahora ampliamente reconocido para este propósito. Se trata de observar el perfil (ro_2) obtenido a partir de la digestión aeróbica de los lodos activados sin sustrato exterior, durante un período de varios días. La pendiente de la gráfica de $\ln(ro_2)$ frente al tiempo se obtiene el valor de bH . Un valor de $b'H$ de 0.24 d-1 a 20 °C se reportó para las aguas residuales domésticas y fue adoptado como un valor inicial consensual en los modelos recientes.

Evaluaciones similares para los efluentes industriales resultó en valores bH variables y menor en general. Spanjers y Vanrolleghem (1995) propusieron un método para la determinación del parámetro decaimiento endógeno, junto con la tasa de crecimiento de un respirograma. Sus experimentos produjeron datos dispersos, a veces con variaciones

cíclicas que se atribuyeron a la liberación secuencial y la utilización de residuos endógenos, por lo que la evaluación numérica fue casi imposible. Se han definido otro método respirométrico que consiste en medir los cambios en la respuesta μH_{max} y X_H .

El método refleja la variación de X_H con el tiempo que siempre se mantiene a un nivel constante durante el curso del experimento. Se obtuvo una significativa reducción de bH con un valor de alrededor de 0,1 d⁻¹ a 20 °C, para las aguas residuales domésticas. Van Loosdrecht y Henze (1999), en una revisión más completa sobre este tema, afirmó que lo que se define simplemente como la descomposición endógena, podría ser en realidad un espectro de diferentes mecanismos como de mantenimiento, el deterioro de las células, la respiración endógena, el efecto de sustancias tóxicas o condiciones adversas que resultan en la lisis celular. En este sentido, las pruebas de digestión aeróbica, como el propuesto por Ekama et al., (1986), puede estar sujeta a interferencias graves por cualquiera de las partículas externas como sustrato lentamente biodegradable, X_S enredados con la biomasa o de los productos de almacenamiento interno, X_{STO} , incluido como un componente del modelo, en algunos modelos nuevos (Gujer et al., 2000).

CAPÍTULO 3
JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS
Y
OBJETIVOS

3. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.

3.1 Justificación

La presente investigación es parte de un proyecto que se desarrolla sobre la línea de la reducción de los sólidos biológicos generados en los procesos de lodos activados. En el proyecto se utiliza un lodo modelo que solo contiene las fracciones X_H y X_P , para investigar los diversos procesos modificados de lodo activado, capaz de reducir la generación de sólidos. También para modelar dichos procesos, se requiere conocer las características específicas de este lodo modelo en particular, por lo que en este trabajo de tesis se enfoca en determinar los parámetros cinéticos de la biomasa heterotrófica (μ_{Hmax} y b_H) y sus coeficientes de temperatura $\theta_{\mu_{Hmax}}$ y θ_{b_H} . Esta caracterización basada en el ASM1, es de suma importancia para una efectiva modelación del proceso de baja producción de lodo (BPL). Para esto es necesario obtener información de un estudio de laboratorio exhaustivo, para conocer el comportamiento de los parámetros.

Por otro lado actualmente, el método más utilizado para medir la tasa máxima de crecimiento específico de la biomasa heterótrofa (μ_{Hmax}), es por respirometría, mediante la prueba de crecimiento de la biomasa heterótrofa bajo condiciones de alta relación de S/X (comida/microorganismos) (Kappeler and Gujer 1992).

Este primer enfoque fue criticado por proporcionar constantes cinéticas que podrían ser no respectivos de la biomasa original. Un método alternativo es el de incrementos de semillas (IS) (Fall et al., 2012), mismo que en esta investigación se evaluó y comparó con el método tradicional de (Kappeler and Gujer 1992).

También existen diversos estudios que se relacionan con el efecto de la temperatura de las constantes cinéticas en los procesos de lodos activados para el ASM1 (Henzel et al., 2000; Metcalf and Eddy 2003). Pero principalmente se han desarrollado en países europeos a temperaturas bajas. Todo eso aunado a las características específicas del agua a estudiar. Nace la necesidad de realizar estudios detallados y específicos, para el lodo bajo estudio con el fin de proponer valores adecuados de coeficientes de temperaturas de ($\theta_{\mu_{Hmax}}$ y θ_{b_H})

Esta investigación forma parte de una serie de estudios complementarios. Los resultados de los parámetros cinéticos, derivados de esta investigación, serán ocupados posteriormente para la modelación dinámica de los sistemas de baja producción de lodos (BPL), que se están desarrollando.

3.2 Hipótesis

Los valores de los parámetros cinéticos (μ_{Hmax} y b_H) y la dependencia en la temperatura, para un licor mixto, que solo contiene fracciones de X_H y X_P , son diferentes de los valores aceptados para lodos activados comunes.

El método de incremento de semillas (IS) es equivalente al método clásico Kappeler and Gujer (1992) para la estimación de μ_{Hmax} .

3.3 Objetivos

3.3.1 Objetivo general.

Determinar las principales características cinéticas de la biomasa heterótrofa (μ_{Hmax} , b_H , $\theta_{\mu_{Hmax}}$ y θ_{b_H}) de un cultivo modelo que solo contiene X_H y X_P y que sería utilizado en el estudio de un proceso de minimización de lodo.

3.3.2 Objetivos específicos

- a) Producir un lodo modelo que solo contiene X_H y X_P a partir de un agua residual sintética.
- b) Con base en el modelo No.1 de lodo activado (ASM1), determinar la tasa máxima de crecimiento μ_{Hmax} y la tasa de decaimiento b_H de la biomasa, del lodo modelo a 20 °C.
- c) Evaluar el efecto de la temperatura a 16 °C, 20 °C, 24 °C, 28 °C y 32 °C, sobre los parámetros cinéticos y estimar los coeficientes de corrección de temperatura (θ).
- d) Realizar un estudio comparativo entre el método actual establecido para estimar μ_{Hmax} del ASM1, y el nuevo método (IS) incremento de semilla.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

4. METODOLOGÍA

Las diferentes etapas que se llevaron a cabo en la investigación, se describen en el diagrama de la Figura 4.1

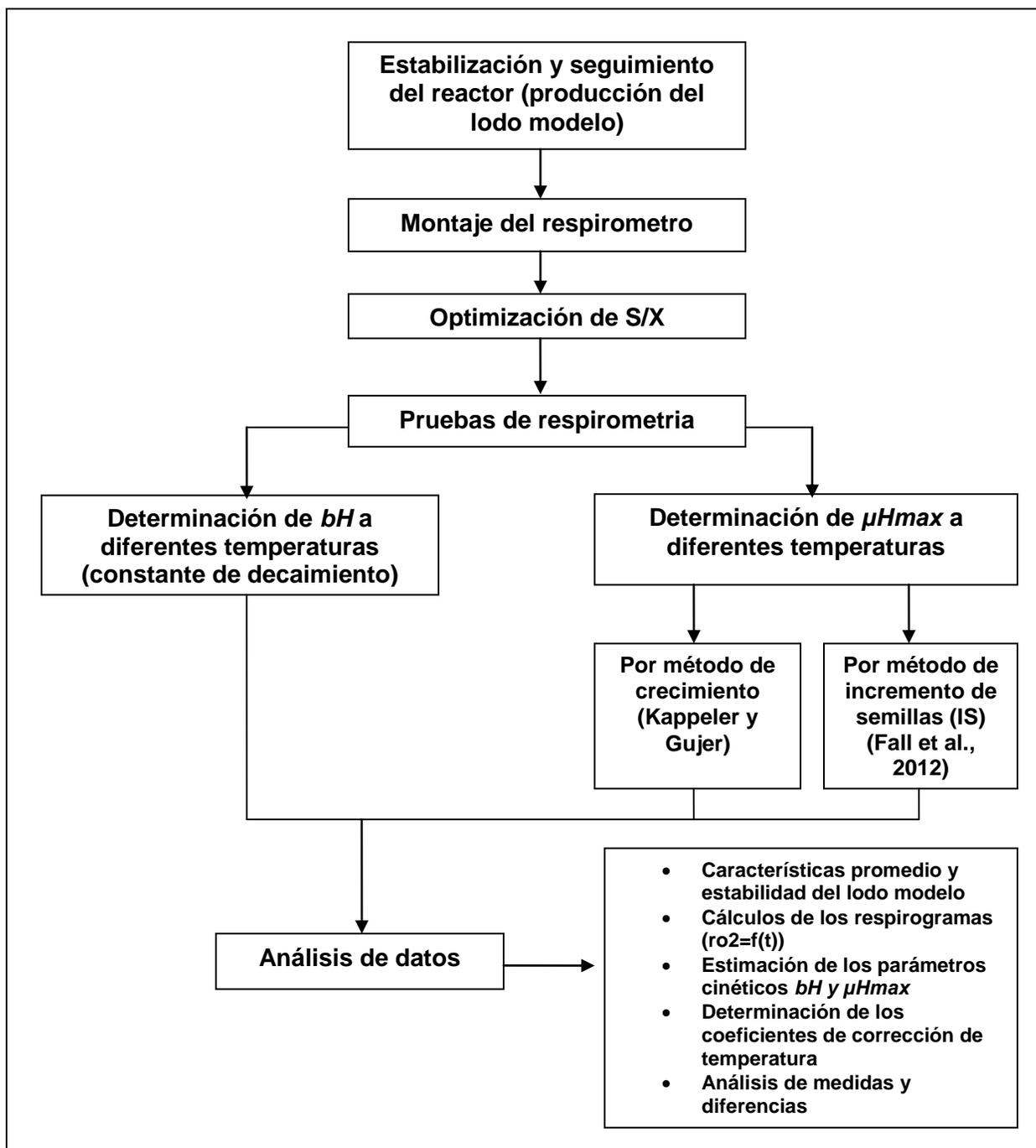


Figura 4.1 Diagramas de las etapas experimentales

4.1 Plan experimental

El plan experimental para las pruebas respirométricas se describen en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Diseño experimental de las pruebas de respirometria

Parámetros cinéticos a determinar		bH	μH_{max} por crecimiento	μH_{max} por *IS
Temperaturas 5 niveles	16°C	X	X	X
	20°C	X	X	X
	24°C	X	X	X
	28°C	X	X	X
	32°C	X	X	X

*IS: Método de incremento de semillas

En general cada corrida se realizó en triplicado (tres reactores a la vez) y las mismas mediciones se repitieron de 2 a 3 veces en diferentes fechas. Antes se hicieron pruebas preliminares para fijar las condiciones óptimas de cultivo (S/X ajustado).

En cada prueba se obtuvieron las tasas de consumo de oxígeno ro_2 en función del tiempo y además de determinar la DQO del agua residual del alimentado en los reactores de respirometria y la cantidad de sólidos biológicos (SSV) de las siembras.

La Tabla 4.2 muestra la programación de los análisis que se realizaron para obtener las constantes cinéticas del lodo modelo. En la primera columna se encuentran los análisis que se realizaron de acuerdo a la temperatura. En las siguientes columnas se muestra el periodo en meses en que se realizaron las pruebas respirométricas. En general se agruparon en un mismo periodo las pruebas de una misma temperatura.

Tabla 4.2 calendarización de las pruebas respirometricas

Parámetros cinéticos de acuerdo a la temperatura	Enero 2013	Febrero 2013	Marzo 2013	Abril 2013	Mayo 2013	Junio 2013
16°C <i>bH</i>						
16°C μH -max						
16°C IS						
20°C <i>bH</i>						
20°C μH -max						
20°C IS						
24°C <i>bH</i>						
24°C μH -max						
24°C IS						
28°C <i>bH</i>						
28°C μH -max						
28°C IS						
32°C <i>bH</i>						
32°C μH -max						
32°C IS						

En el mes de enero del año 2013, se realizaron las primeras pruebas a 20 C. de acuerdo a que es la temperatura más estable al ambiente del laboratorio. Todo esto para lograr la familiarización de la técnica y del equipo respirométrico. Periódicamente se fueron realizando los análisis sin ninguna dificultad de acuerdo al plan establecido.

4.2 Operación y estabilización del sistema de producción del lodo modelo

Para producir el lodo modelo que es objeto de la evaluación esta investigación, se implementó un reactor tipo batch secuencial, este sistema se propuso para producir bacterias heterótrofas para llevar a cabo el trabajo en esta investigación. Como reactor se utilizó una pecera de acuario de 40 litros, pero se trabajó con un volumen útil de 30 litros.

4.2.1 Operación del reactor batch secuencial (RBS)

Para el arranque del sistema se utilizó un inóculo de bacterias provenientes de la planta de tratamiento de aguas que se encuentra en el CIRA. Estos microorganismos se introdujeron en pequeña cantidad en el reactor tipo batch alimentado con agua sintética.

El reactor se operó con un tiempo de retención celular de 15 días, controlado con la ayuda de timers programados para realizar la purga automática diaria de 2 litros del licor mixto del reactor. La alimentación en agua residual sintética y la purga se realizaban una vez por día. El volumen del sobrenadante vertido y desechado cada día era de 20 litros, lo que da un tiempo de residencia hidráulica (TRH) de 36 h. El sistema contó un suministro de aire constante con bombas de acuario. Estas se automatizaron (paros) con la finalidad de controlar la sedimentación. Se programó la sedimentación automática que duraba entre 2 y 3 horas diarias. En general la sedimentación se alcanzaba un nivel de satisfactorio una hora después de llevar a cabo la purga, excepto los episodios de problemas con bacterias filamentosas.

Una vez sedimentada la biomasa del reactor, se retiraban 20 litros del sobrenadante. Después de este proceso, los microorganismos que quedaban en el reactor se alimentaban con 20 litros de agua residual sintética con una DQO de 500 mg/L (641 mg/L de acetato sódico). La composición del agua se presenta en la siguiente sub-sección.

Al paso de los días, el sistema presentaba un amplio desarrollo de bacterias filamentosas y esto dificultaba la operación del reactor. Se realizaron posteriormente cambios en la operación en busca de una mejora continua de la producción de microorganismos. Se agregó al proceso un selector para evitar el crecimiento de las bacterias filamentosas.

Este consta de un mezclador controlado con un regulador de velocidad, con el fin de llevar a las bacterias a un ambiente totalmente anaerobio sin oxígeno y totalmente mezclado, al momento de verter la alimentación. El selector sirvió para erradicar totalmente a las bacterias filamentosas que causaban problemas en el reactor. Con estas modificaciones se produjeron bacterias capaces de sedimentar muy bien y alcanzar un equilibrio. A partir de ahí se monitoreo el reactor con pruebas fisicoquímicas hasta obtener un punto de equilibrio en los sólidos generados. La estabilización fue la pauta para empezar a realizar las pruebas respirométricas.

4.2.2 Composición del agua residual sintética

Teóricamente el agua residual sintética está compuesta solo de sustrato rápidamente biodegradable (S_s) y totalmente soluble. El objetivo de utilizar esta agua fue que el lodo que se desarrolla en el reactor no contenga las fracciones de DQO inerte procedente del influente (X_i). Con lo cual se aseguro, qué los componentes del lodo modelo sean únicamente biomasa (X_H) y los productos residuales del decaimiento (X_P)

Tabla 4.3 Compuestos del agua residual sintética

Medio		
Nombre de compuestos	Formula química	Concentración mg/L
Fosfato de potasio monobásico	KH_2PO_4	12
Allythiourea		5
Cloruro de calcio bihidratado	$CaCl_2 \times 2H_2O$	14
*Bicarbonato de sodio	$NaHCO_3$	400
Extracto de levadura		1
EDTA		1
Acetato sódico (500mg/L-DQO)	CH^3COONa	641
Cloruro de amonio	NH_4Cl	107
Sulfato de magnesio hepta hidratado	$MgSO_4 \times 7H_2O$	90
Cloruro de potasio	KCl	36
Cloruro de hierro hexa hidratado	$FeCl_3 \times 6H_2O$	5
Solución de elementos traza (mL)		30 mL/L.
Elementos traza		mg/L
Acido bórico	H_3BO_3	150
Sulfato de zinc hepta hidratado	$Zn SO_4 \times 7H_2O$	120
Cloruro de manganeso tetrahidratado	$MnCl_2 \times 4H_2O$	120
Sulfato cúprico pentahidratado	$Cu SO_4 \times 5H_2O$	30
Yoduro de potasio	KI	180
Molibdato de sodio bi hidratado	$Na_2MoO_4 \times 2H_2O$	60
Cloruro de cobalto hexahidratado	$CoCl_2 \times 6H_2O$	150

*Se quito el bicarbonato, ya que el agua de la llave cumplió con la función del bicarbonato

4.2.3 Monitoreo del reactor batch secuencial (RBS)

Los análisis y pruebas de medición que se realizaron fueron las siguientes:

- Demanda química de oxígeno (DQO): Se determinaron el DQO total y la DQO soluble del licor mixto del RBS, mediante el método HACH. Por lo menos dos veces por semana.
- Sólidos suspendidos totales (SST) y volátiles (SSV) del licor mixto fueron determinados con base en los métodos estándares (Standard Methods 2540D y SM 2540E, respectivamente APHA., 1995). Por lo menos, una vez por semana.
- Oxígeno disuelto O₂: Se midió con un medidor de oxígeno YSI-58, con colocar la sonda dentro del licor mixto del reactor. Esta medición se realizó por lo menos una vez por semana, a diferentes momentos del ciclo del RBS.
- pH: Se midió con un potenciómetro por lo menos una vez por semana.
- IVL, Conductividad, Turbidez, Alcalinidad y temperatura, se midieron ocasionalmente.

4.3 Montaje del respirómetro

El respirómetro (Figura 4.2) consta de cuatro reactores de 1 litro, donde se llevaron a cabo todos los experimentos (2 a 3 repeticiones a la vez). Cada reactor fue equipado cada uno con un agitador magnético, y una barra de agitación de una pulgada de larga, todo eso acompañado de dos pequeños difusores porosos conectados a una bomba de aire de acuario, un equipo de calefacción-refrigeración para controlar la temperatura, así como un medidor digital y su sonda para medir el oxígeno disuelto montados en cada reactor del respirómetro. Los resultados de las mediciones se enviaron via un convertidor analógico digital a una computadora, el cual produce un registro automático de las concentraciones de oxígeno disuelto (OD) en función del tiempo y este a su vez manda una señal a las bombas de aire que son controladas automáticamente (ON/OFF a 3.5-4 mg/L de O₂). Los registros se realizaban con un software instalado en donde se establece una comunicación directa entre el hardware y el software (Figura 3).

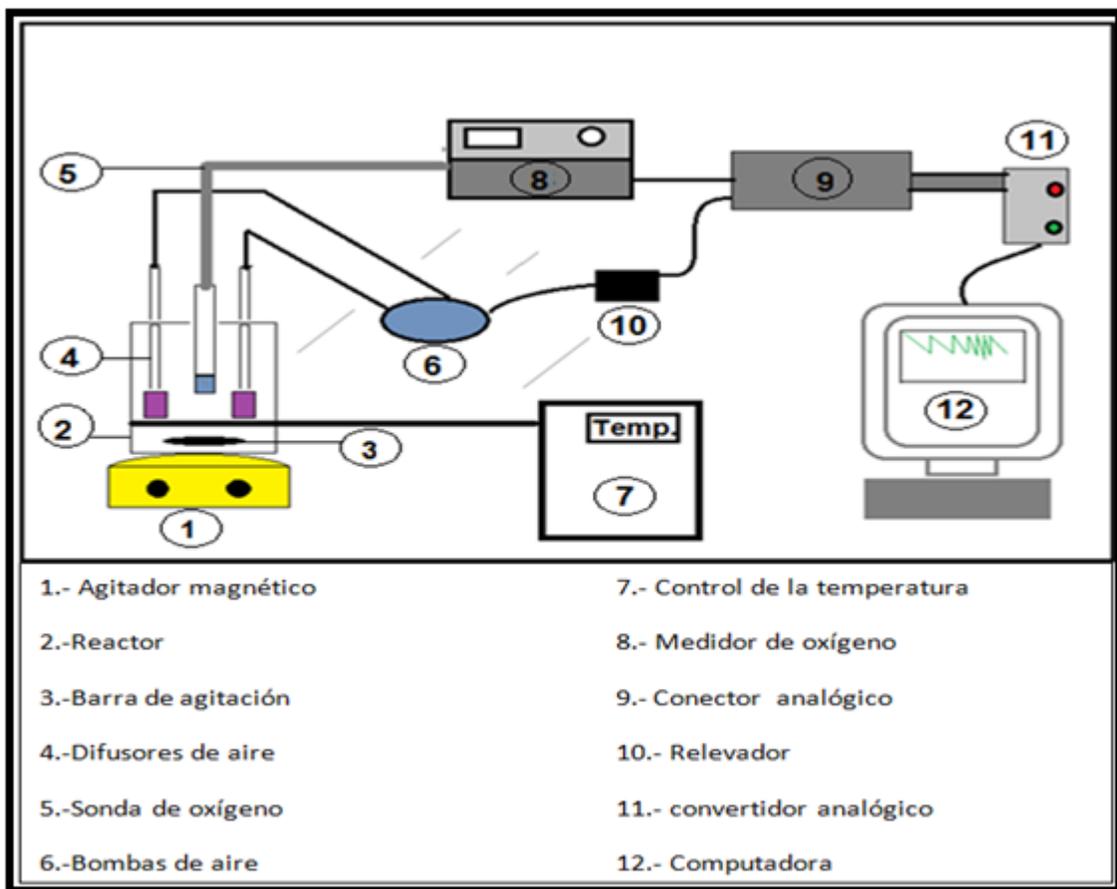


Figura 4.2 Esquema del respirómetro montado en el laboratorio de calidad del agua del CIRA

Para establecer el respirograma de una muestra (lodo con o sin alimento) el sistema incrementa el O₂ en el agua y luego corta la fuente, lo que hace que el oxígeno decrezca por el único efecto de consumo por las bacterias.

La pendiente del deceso de la concentración de O₂ en el tiempo representa la tasa de consumo de oxígeno (r_{O_2} en mg/L.h.). Cada ciclo ON/OFF produce un valor de r_{O_2} .

4.4 Procedimientos de las pruebas respirométricas

Las pruebas respirométricas se realizaban, con utilizar los 2 litros de lodo purgado diariamente del reactor RBS. Se utilizó este como siembra para el inoculo en las corridas de la tasa máxima de crecimiento heterótrofo (para los dos métodos IS y crecimiento) y el decaimiento heterótrofo (*bH*).

4.4.1 Decaimiento heterótrofo (*bH*).

Acondicionamiento inicial de la muestra

- Muestra: Se obtuvo de los 2 L del licor mixto purgado en el día de la prueba. Este lodo se dejó sedimentar a 1.2 L, para obtener una muestra más concentrada.
- De 1.2 L de muestra concentrada solo se utilizó 1L. Esto con el fin de poder maniobrar y manipular la muestra ya que esta prueba abarca 7 días continuos aproximadamente.
- Al tener la muestra ya establecida, se colocaba una bomba pequeña y una piedra de aireación para tener a los microorganismos en un ambiente saturado de oxígeno.
- El acondicionamiento inicial de la muestra se lleva a cabo de acuerdo con la temperatura en la cual se trabajaba. Para esto, se utilizaron varios métodos para ambientar la muestra antes de pasar a medir los parámetros en el respirómetro.

- Para temperaturas bajas como 16 grados la muestra se metía a una incubadora, esto para bajar la temperatura y así lograr ambientar los microorganismos antes de la medición.
- En el caso de la temperatura a 20 grados, variaba el proceso de acondicionamiento inicial; algunas veces se calentaba o se enfriaba según la temperatura ambiente del laboratorio.
- Para las temperaturas altas como 24 28 y 32 grados, se utilizó una parrilla calentadora para llevar las muestras a los grados específicos.

Sin embargo al tener la temperatura deseada, al inicio este no significa que podría conservarse durante todo el desarrollo de la prueba respirométrica. Luego la muestra fue introducida a una incubadora equipada con un sistema de aireación constante, durante los 7 días que dura el estudio. Lo anterior permitió mantener a los microorganismos a la temperatura constante durante todo el periodo de prueba.

Procedimiento para la medición del ro_2 (Tasa de consumo de O_2)

El método propuesto para determinar la tasa específica de decaimiento de la biomasa heterotrófica bH , es el sugerido en el ASM1, y que se basa en el procedimiento de Ekama et al., (1986). Al final de cada día de incubación y aireación a temperatura constante, el lodo se transfería al respirometro para medir la tasa de consumo de oxígeno para ese día.

Para esto, se llevaron una serie de pasos complementarios.

- Se encendió el equipo de respirometría.
- Se calibraron los medidores de oxígeno para las condiciones atmosféricas de la ciudad de Toluca (72 % de saturación de oxígeno).
- En esta prueba se utilizó un doble control de temperatura que consta de: 1 baño de temperatura (Neslab RTE 7, Termo Electrón Corporation) que sirve para mantener la temperatura del agua de recirculación, hacia los reactores del

respirometro. Al reactor montado sobre un agitador magnético, se le agregó 400 mL de agua limpia a la temperatura a la que se trabajó, el control sirve para ser más preciso en las mediciones del respirometro. La muestra de lodo se colocaba en una botella (de DBO), misma que se sumergía en el agua del reactor cuya temperatura era controlada a través de un serpentín conectado al baño refrigerador.

- 300 mL de la muestra del todo saturada de oxígeno. Se colocaba junto con una barra magnética dentro de una botella winkler de vidrio en la que se insertaba una sonda de oxígeno para medir el ro_2 del día en cuestión.

Con este procedimiento se determinaron las tasas de consumo de oxígeno (ro_2) por 7 días (dos a tres ciclos por día). Con los datos obtenidos, se grafico el logaritmo natural de ro_2 ($\ln ro_2$) en función del tiempo (t). La pendiente de la curva es el coeficiente de decaimiento clásico $b'H$ (respiración endógena), del que se puede deducir el valor de la constante bH para el modelo ASM1 (cuando es por muerte-regeneración).

Finalmente bH (muerte-regeneración) se obtiene con la siguiente expresión.

$$bH = \frac{b'H}{1-Y(1-fp)} \quad (1)$$

Donde:

bH es el coeficiente de decaimiento por muerte-regeneración (ASM1)

$b'H$ es el coeficiente de decaimiento por respiración endógena.

YH es el rendimiento real de crecimiento bacteriano de la biomasa heterotrófica.

fp es la fracción de biomasa transformada en materia particulada durante el decaimiento (0.2 por consenso).

El coeficiente de decaimiento heterotrófica bH (constante de orden 1), se determinó para las siguientes temperaturas de 16 °C, 20 °C, 24 °C ,28 °C y 32 °C.

4.4.2 Tasa máxima de crecimiento heterotrófico (μH_{max}) por el método de Kappeler y Gujer (1992).

Procedimiento de acondicionamiento inicial de la muestra.

- La muestra de lodo utilizada como siembra en esta prueba de μH_{max} se tomaba de los 2 litros del licor mixto purgado del reactor RBS, el día del análisis. Este lodo se dejó sedimentar a 1.2 L, para obtener una muestra más concentrada.
- La siguiente etapa consistió en aclimatar el lodo con una pequeña bomba de acuario y a la temperatura deseada, ya sea enfriar o calentar la muestra según corresponda a la temperatura de estudio.
- Después de obtener la temperatura deseada, se colocaba la muestra de lodo en la incubadora durante un cierto tiempo para una mejor aclimatación y en espera de la prueba de r_{o_2} .
- Se preparó 3 litros de agua residual sintética a una concentración de 350 mg/L-DQO. Esta se realizó con diluir con agua destilada un agua residual sintética preparada con 5000 mg/L de DQO.

El volumen V1 de agua sintética se calculaba de la siguiente forma:

$$V1 = \frac{C2 \cdot V2}{C1} = \frac{350 \frac{mg}{L} \cdot 3 L}{5000 mg/L} = 0.21 L \text{ del concentrado} \quad (2)$$

$V2 = 0.21 L \text{ del concentrado} + 2.79 L = 3 L$ de agua residual sintética con una concentración de 350 mg/L

V1=Volumen utilizado del agua residual concentrada.

V2=Volumen total que se requiere a la concentración C2 (3 L)

C1=Concentración del agua residual concentrada (5000 mg/L de DQO)

C2=Concentración a la cual se quiere llegar (350 mg/L de DQO)

Procedimiento de obtención del respirograma de μH_{max} .

La siguiente etapa consta de un procedimiento específico para esta prueba.

- Una vez que se tenía el volumen y la concentración de DQO (350 mg/L) del agua residual sintética diluida, lo que seguía era estabilizar la temperatura, y luego correr la prueba respirometrica.
- El agua residual se distribuyo en los 4 reactores de 1L del respirometro (0.70 L de agua) montado sobre agitadores magnéticos. Se dejó por un tiempo, mientras se estabilizaba el agua a la temperatura deseada con ayuda del control de temperatura.
- Se revisó y calibró todos los 4 medidores de oxígeno del respirómetro.
- En esta prueba se requiere una relación de F/M alta, esto es para que la comida no sea un limitante y que se pueda observar claramente una curva creciente de consumo de oxígeno. Por lo anterior el volumen de lodo utilizado para siembra de cada reactor debe ser muy baja (5 a 20 mL)
- La prueba se pone en funcionamiento y al tiempo cero, se inyecta en el reactor de 1L (0.70 mL de agua residual) un inculo de biomasa (5 a 20 mL)
- Las bombas de aireación son controladas por la computadora (OFF-ON de 3.5 a 4 mg/L O₂).
- Los datos obtenidos durante el estudio son mandados a la computadora que controla el respirometro por medio del software de control y adquisición de datos (windmill).

Procedimiento de análisis de datos para hallar μH_{max}

El método de Kappeler y Gujer (1992), establece que para determinar la tasa máxima de específica de crecimiento heterótrofo (μH_{max}), se debe realizar una prueba respirométrica (r_{O_2}) en un sistema batch, con agua residual en la cual se inocula biomasa con una relación alta S/X. Entonces se graficará el logaritmo natural de r_{O_2} . ($\ln r_{O_2}$) en función del tiempo (t). La ecuación de la curva estará dada por la siguiente ecuación.

$$\ln \left\{ \frac{r_{O_2} t}{r_{O_2} (t_0)} \right\} = (\mu H_{max} - b'H) * t \quad (3)$$

Donde:

Conociendo el valor de $b'H$, μH_{max} se obtendrá de la pendiente de la curva la cual es ($\mu H_{max} - b'H$)

$r_{O_2} t$ = Tasa de consumo de oxígeno en el tiempo t.

$r_{O_2} t_0$ = Tasa de consumo de oxígeno en el tiempo 0.

$b'H$ = Constante de decaimiento o muerte (d^{-1})

μH_{max} = Tasa específica máxima de crecimiento heterótrofo (se evaluó a 16 °C, 20 °C, 24 °C 28 °C y 32 °C).

4.4.3 Método de incremento de semillas (IS) (Fall et al., 2012)

La muestra de lodo utilizada en las pruebas se obtuvo de los 2 L del licor mixto purgado del reactor RBS en el día del análisis. Este lodo se dejó sedimentar a 1.2 L. Para obtener la muestra más concentrada.

- Se preparó 3 litros de agua residual sintética a una concentración de 350 mg/L-DQO, de la misma forma descrita anteriormente (ver en 4.7.2).

Cada prueba de incremento de semillas se realizó en triplicado en los reactores 1, 2, y 3 del equipo respirométrico. Al mismo tiempo en el reactor 4 se determinó el ro_2 inicial de la biomasa utilizada como siembra.

El ro_2 inicial de la biomasa se midió con primero aclimatar el lodo a la temperatura de estudio y saturado de oxígeno; Luego se colocó 300mL de lodo y una barra magnética dentro de una botella winkler de vidrio para incubación. Esta botella se colocó dentro del reactor 4 ya con la temperatura establecida para empezar a medir el ro_2 inicial (reactor 4).

En cuanto a las pruebas de incremento de siembra en sí mismo, la medición se llevó a cabo en los reactores de 1 litro tipo batch de mezcla completa del respirómetro, a diferentes temperaturas, bajo condiciones de S_s saturada. Se añaden de 0.7 L de agua residual sintética con una concentración de 350 mg/L-DQO y una cantidad inicial de siembra (lodo).

Tras medir el ro_2 a este nivel la siembra se incrementa y se vuelve a medir el ro_2 ; Los incrementos se repiten 6 a 7 veces (10 mL+ 10 mLetc.)

El volumen de la siembra inicial fue de 10mL. Se analizaron después tres ciclos de aireación para determinar el ro_2 a través de las tres pendientes representadas en el respirograma de la computadora. Después de los tres ciclos se sembró otros 10mL de X_H . La siembra se realizó a cada tres ciclos de aireación y los volúmenes acumulativos de todo lo añadido fueron después de cada etapa 10mL, 20mL, 30mL, 40mL, 50mL, 60mL y 70mL, respectivamente del primero al séptimo incremento.

En lugar de controlar la curva r_{O_2} -tiempo de crecimiento exponencial por una cantidad fija inicial de siembra, tal como se realiza tradicionalmente, el volumen de inóculo va aumentando, mientras que las correspondientes velocidades iniciales de consumo de oxígeno (r_{O_2} -ini) se miden en cada paso. Se espera que la tasa de consumo de oxígeno inicial (r_{O_2} -ini) aumente proporcionalmente a la cantidad de inóculo presente en el sistema. (Fall et al., 2012).

Mediante la medición de la r_{O_2} inicial en cada uno de los pasos, μ_{Hmax} se puede extraer con interpretar los datos de acuerdo a Fall et al.,(2012), y con base en la siguiente ecuación lineal

$$r_{O_2\text{-ini}} * (V_{WW} + V_{ML}) = K * V_{ML} + C \quad (4)$$

Donde las constantes K (pendiente) y C (intersección) representan las siguientes combinaciones de parámetros. (ecuación 5)

$$K = \frac{1-Y_H}{Y_H} \mu_{Hmax} * X_{H0_ML} \quad \text{y} \quad C = \frac{1-Y_H}{Y_H} \mu_{Hmax} * V_{WW} * X_{H0_WW} \quad (5)$$

t= Tiempo

Y_H = Rendimiento de la biomasa heterótrofa

$\mu_H \text{ max}$ = Tasa específica máxima de crecimiento

f_p = es la fracción de biomasa que se transforma en inerte (X_p)

b_H = coeficiente de decaimiento endógena

X_{H0} = concentración inicial de la biomasa.

V_{WW} = representa el volumen de agua residual añadida

V_{ML} = volumen de licor mixto añadido en el reactor. (Siembra variando de 10 a 70 mL)

X_{H_WW} y X_{H0_ML} son las concentraciones de biomasa presentes en el agua residual ($_{ww}$) y en el licor mixto ($_{ML}$) respectivamente.

En la ecuación (5) muestra que mediante la variación de la cantidad de V_{ML} (semillas), de cada una de las diferentes siembras, se puede estimar μH_{max} , con la pendiente de ro_{2_ini} ($V_{WW} + V_{ML}$), en función de V_{ML} . Este es el principio básico del método de incremento de semillas (IS).

4.4.4 Efecto de la temperatura en los parámetros cinéticos.

La temperatura es uno de los factores más importantes en el modelo, ya que este afecta los valores de los parámetros cinéticos. El efecto de la temperatura sobre la tasa de reacción del proceso biológico puede ser determinado con la expresión de Van't Hoff-Arrhenius simplificado (Metcalf and Eddy, 2004).

$$k_T = k_{T_1} \cdot \theta^{(T-T_1)} \quad (6)$$

Donde:

$$\ln k_T = \ln k_{20} + (T-20) \cdot \ln \theta \quad (7)$$

k_T : Es la tasa de reacción a evaluar a la temperatura T.

k_{T_1} : Es la tasa de reacción conocida a la temperatura T_1 (20 °C).

θ : Coeficiente de corrección de la temperatura. (Orden de valor generalmente cerca de 1)

Se determina θ tanto para bH como para μH_{max} utilizando la ecuación 6, el coeficiente θ para b_H (θ_{bH}) se halla por regresión a partir de los bH medidos a las diferentes temperaturas (16, 20, 24, 28 y 32°C); Igualmente para el θ del μH_{max} ($\theta_{\mu H_{max}}$), con utilizar los valores de la tasa de crecimiento a diferentes temperaturas.

El método matemático para extraer el valor de θ consiste en linearizar la ecuación 6 lo que da la ecuación 7. Con representar $\ln k_T$ en función $(T-T_1)$, se obtiene una recta, cuya pendiente es $\ln \theta$ y cuyo valor a origen es $\ln k_1$.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Caracterización del reactor RBS

Durante esta investigación se determinaron parámetros fisicoquímicos o para el control y operación del reactor RBS que sirvió en esta investigación para producir el lodo modelo. Para el éxito de las numerosas pruebas realizadas en laboratorio en busca de encontrar los parámetros cinéticos por medio de respirometría, la estabilización del reactor era importante; por lo que se realizó un seguimiento estricto.

Los análisis realizados en el reactor RBS durante el tiempo que duró esta investigación fueron: Demanda química de oxígeno (DQO), Sólidos suspendidos totales (SST) y volátiles (SSV).

El reactor (Figura 5.1) se manejó durante el periodo de investigación, con un tiempo de retención celular de 15 días, para lo cual se purgó diario 2 litros del licor mezclado. De esta forma se buscó la estabilización en la cantidad de sólidos que se desarrollaron para el inicio de las pruebas respirométricas.



Figura 5.1 Vista del reactor RBS

Durante los 5 meses de seguimiento de reactor RBS operado con un selector anaerobio, se alcanzó estabilizar el reactor obteniéndose valores de sólidos de alrededor de 1400 mg de SSV, 1700 mg de SST y 1900 mg/L de DQO (Tabla 5.1)

Antes de instalar el selector, se presentaron algunos problemas de sedimentación y con ello derivó un periodo más largo antes de poder empezar la investigación. La variabilidad de los resultados se representa en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Resultados del monitoreo de la operación del reactor RBS.

FECHA	Numero de muestra	SSV	SST	IVT	DQO _{Total}	ICV
14/01/2013	M1	1580	1910	0.83	2142	1.36
17/01/2013	M2	1570	1910	0.82	2112	1.35
21/01/2013	M3	1670	1940	0.86	2134	1.28
24/01/2013	M4	1450	1720	0.84	1950	1.34
31/01/2013	M5	1390	1780	0.78	1980	1.42
06/02/2013	M6	1610	2060	0.78	2322	1.44
08/02/2013	M7	1380	1830	0.75	2004	1.45
14/02/2013	M8	1380	1700	0.81	2250	1.63
20/02/2013	M9	1360	1660	0.82	1812	1.33
27/02/2013	M10	1390	1610	0.86	1810	1.30
06/03/2013	M11	1280	1620	0.79	1694	1.32
13/03/2013	M12	1290	1690	0.76	1970	1.53
20/03/2013	M13	1260	1440	0.87	1674	1.33
03/04/2013	M14	1560	1710	0.91	1998	1.28
10/04/2013	M15	1480	1640	0.90	2000	1.35
17/04/2013	M16	1090	1260	0.87	1290	1.18
24/04/2013	M17	1260	1510	0.83	1650	1.31
08/05/2013	M18	1570	1650	0.95	2026	1.29
17/05/2013	M19	1120	1270	0.88	1790	1.60
PROMEDIO		1405	1679	0.99	1927	1.37
DESV.EST.		164	210	0	243	0
C.V.		11.70%	12.50%	6.30%	12.60%	8.30%

Estos últimos resultados sirvieron para calcular la cantidad de siembra añadida en las pruebas respirometricas.

SSV	Sólidos suspendidos volátiles
SST	Sólidos suspendidos totales
IVT	Relación SSV/SST
DQO_T	Demanda química de oxígeno particulada (Total-soluble)
ICV	Relación DQO/SSV
Desv.Est	Desviación estándar
C. V.	Coefficiente de variación Desv.Est/Prom.X 100

La concentración de sólidos en el reactor vario de un mínimo de lodo y un máximo de 1670 mg/L de SSV, y con un coeficiente de variación global de tan solo 11.7% lo que es aceptable.

Los valores extremos podrían coincidir con días perturbados donde no se realizo la purga por alguna razón o cuando se tuvo que cosechar más lodo para las necesidades de otros estudiantes.

Las fracciones $IVT = (SSV/SST)$ y $ICV = (DQO/SSV)$ del lodo fueron respectivamente 0.99 y 1.37 en promedio mismo orden de valor de 0.85 y 1.42 respectivamente de (Metcalf y Eddy 2004)

En el anexo A se tienen los detalles de los resultados de los análisis que fueron resumidos en la tabla 5.1 anterior. En lo particular el anexo A muestra el cálculo de los promedios por muestra así como las desviaciones estandares que fueron aceptables.El anexo A muestra también algunos resultados del análisis del licor mixto purgado del reactor RBS y concentrado después para servir de siembra.la tabla 5.2 muestra las cantidades de lodo en el reactor RBS, en DQO, SSV y SST.

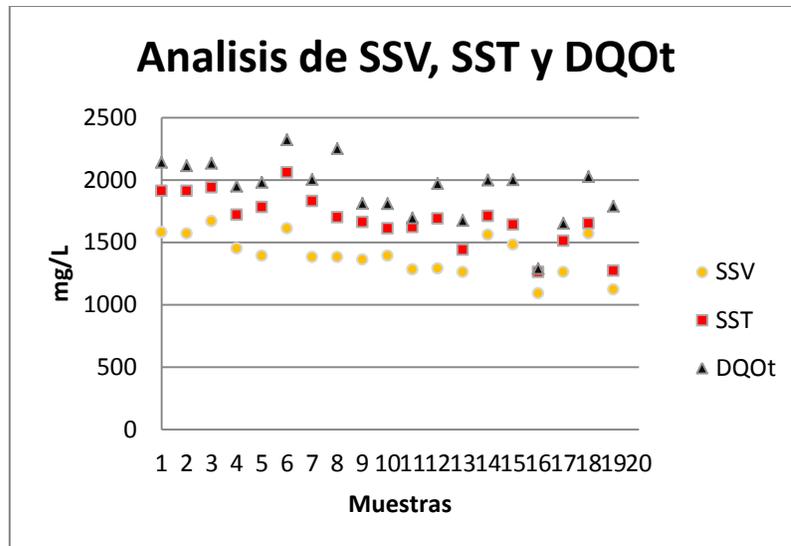


Figura 5.2 Comportamiento a lo largo de la investigación de SSV, SST y DQO del reactor RBS.

5.2 Resultados de las pruebas de decaimiento heterótrofo (*bH*)

Las pruebas respirométricas para determinar el coeficiente de decaimiento o muerte fueron muy largas de acuerdo al procedimiento recomendado. Las condiciones de temperatura y aireación se mantuvieron constantes durante siete días.

Se realizaron las pruebas a cinco temperaturas diferentes; estas son 16, 20, 24, 28 y 32 grados centígrados. Las pruebas de *bH* se realizaron a la par con las pruebas de la tasa máxima de crecimiento por los dos métodos propuestos en esta investigación. Lo anterior para aprovechar mejor los equipos de control de temperatura (incubadora y baño).

5.2.1 Ejemplo de resultado de la prueba *bH* y métodos de cálculos

La siguiente figura 5.3 muestra el resultado de la tasa de consumo de oxígeno del lodo en una de las tres pruebas de *bH* realizadas a 20°C (prueba *bH1-20*) en función del tiempo (7 días).

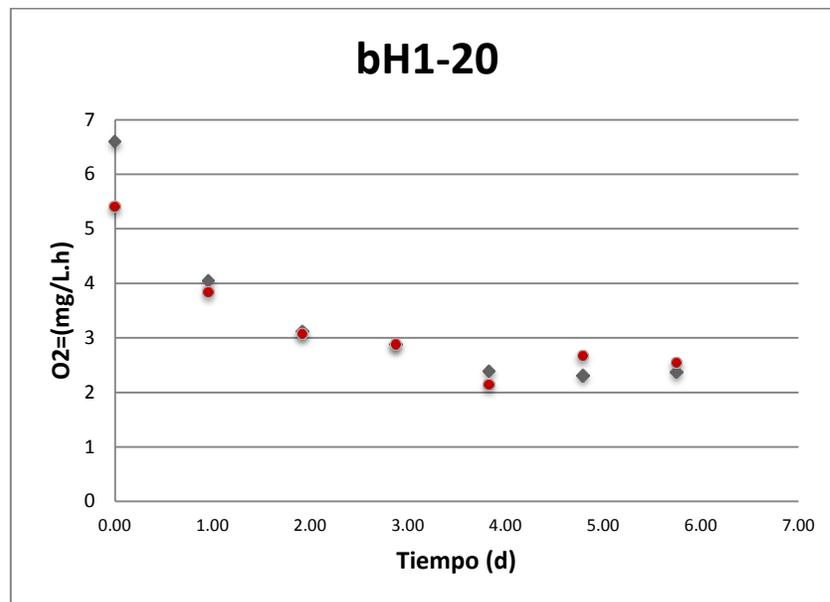


Figura 5.3 muestra la tendencia por duplicado de la ro_2 de *bH* a 20°C

En cada día, el ro_2 de la muestra de lodo fue medido en duplicado (Ver figura 5.3) y la prueba entera fue repetida por lo menos tres veces con muestras diferentes en diferentes días.

En general las repeticiones fueron muy concordantes y a partir del día 4, ya el ro_2 ya no cambia (Figura 5.3)

Como fue explicado en los métodos, la manera de estimar bH a partir de estos datos consistió en graficar $\ln(ro_2)$ en función del tiempo (Figura 5.4 replica A de prueba bH1-20)

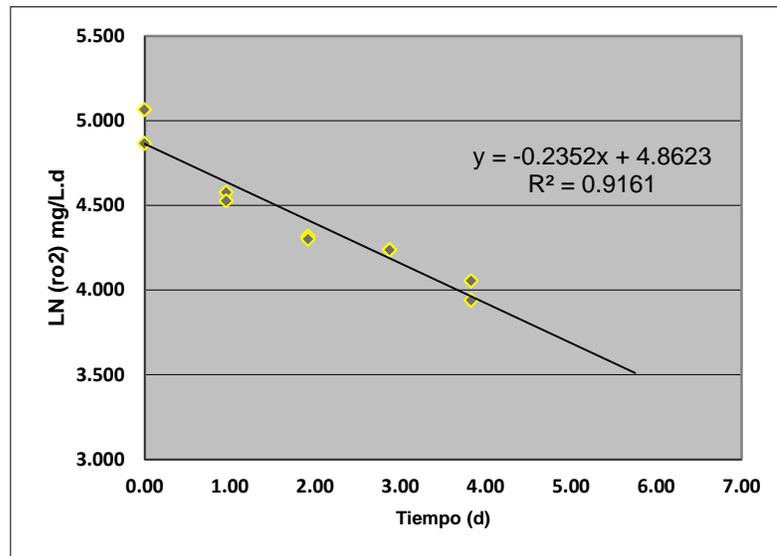


Figura 5.4 se observa el logaritmo natural del ro_2 a 20°C para bH

Quitando los días después de la estabilización se obtiene un buen coeficiente a determinación ($R^2=91\%$) mientras que la pendiente de el valor de $b'H=0.235 d^{-1}$ considerando un valor de fp de 0.08 (ASM1) y un Y_H de 0.69, se calculo el valor de bH para el ASM1, sea $0.61 d^{-1}$ con base en la ecuación (6) $bH = \frac{b'H}{1-Y(1-fp)}$ el ejemplo de la corrida 1 de bH a 20°C. Este valor ya es el promedio de las 2 repeticiones de la prueba bH1-20.

5.2.2 Detalles de los resultados y cálculos del bH

Los resultados y cálculos para todas las repeticiones y para todas las temperaturas es conseguido en el anexo C mientras que la siguiente tabla 5.2 presenta el resumen, dando los valores promedios del bH y la desviación estándar a cada temperatura.

Considerando $Y_H = 0.67$ mg DQO/mg DQO y $fp = 0.08$ a dimensional (valores establecidos en el ASM1).

Este mismo procedimiento se siguió para todos los bH a sus diferentes temperaturas.

En la Tabla 5.2 tenemos un resumen de los bH obtenidos a diferentes temperaturas estos datos muestran bajas desviaciones estándar, por lo tanto, podrían ser considerados resultados confiables.

Tabla 5.2 Resultados finales de bH (d^{-1}) a diferentes temperaturas (d^{-1}).

Pruebas	Temperatura °C	Resultados ($b'H$)	Promedio ($b'H$)	Resultados (bH)	Promedio (bH)	Desv.Est (bH)
P-1	16	0.082	0.075	0.21	0.20	0.03
P-2		0.068		0.18		
P-1	20	0.235	0.225	0.61	0.59	0.05
P-2		0.239		0.62		
P-3		0.201		0.52		
P-1	24	0.336	0.330	0.88	0.86	0.02
P-2		0.324		0.84		
P-1	28	0.401	0.391	1.05	1.02	0.04
P-2		0.38		0.99		
P-1	32	0.48	0.475	1.25	1.24	0.02
P-2		0.47		1.23		

P-1, P-2 y P-3: Pruebas repetidas 2 a 3 muestras diferentes para cada temperatura. Cada P en si mismo se midió por duplicado por lo menos.

$b'H$: Coeficiente de decaimiento (respiración endógena)

bH Coeficiente de decaimiento ASM1

Al realizar una comparación del valor obtenido en la presente investigación con los resultados, reportados en otras investigaciones (tabla 5.3) podemos observar una concordancia con los valores de Henze et al (2002), Hauduc et al (2010) y GPS-X mientras que difieren con los valores de Cox (2004) y Rodríguez et al (2012) más bajos.

Tabla 5.3 Comparación de bH (d^{-1}) a $20^{\circ}C$

Henze et al.,2002	Cox (2004)	Hauduc et al.,2010	GPS-X	Espinosa-Rodríguez et al., 2012	Valor obtenido
0.62	0.35	0.62	0.62	0.4	0.59

Los valores mostrados en la tabla 5.3 de bH por algunos autores (columnas 1 y 5) son todos datos observados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales o bien son promedios recomendados (Henze et al., 2002), (Hauduc et al., 2010) y el software GPS-X solamente recopilan información específicamente del modelo ASM1 (Henze et al., 2002).

Los datos obtenidos por Espinosa-Rodríguez et al., 2012, fueron de la planta de tratamiento de aguas residuales “dulces nombres” ubicada un Monterrey, Nuevo León, México. Sus pruebas de respirometría se realizaron a temperaturas de 20, 24, 28, y $32^{\circ}C$, cuyos valores promedio se muestran en la tabla 5.4.

Tabla 5.4 Valores de bH (d^{-1}) obtenidos a diferentes temperaturas

Temperatura	$20^{\circ}C$	$24^{\circ}C$	$28^{\circ}C$	$32^{\circ}C$
Espinosa-Rodríguez et al., (2012)	0.4	0.5	0.48	0.64
Valores obtenidos en esta investigación	0.59	0.86	1.02	1.24

Los resultados obtenidos de bH de la PTAR “dulces nombres” difieren de los de esta investigación (lodo modelo), lo cual es debido a las características del agua (municipal, industrial, potencial de toxicidad, pH, variación en el consumo de oxígeno).

También no hay que olvidar que los valores presentados corresponden al promedio, existiendo valores máximos y mínimos. Así por ejemplo el mismo Cox (2004) presenta resultados de bH en un rango de 0.05 a 1.6 d^{-1} a la temperatura de 20°C. Por lo anterior es recomendado el bH para cada lodo y cada planta en particular (Henze et al., 2002).

No existe en la literatura muchos trabajos en el que se reportan explícitamente valores de bH para lodo cultivado con agua residual sintética (lodo modelo) (Abdallah et al., 2010), mencionan un valor a 20°C de bH de 0.237 (bH : 0.62), muy similar al dato reportado en la presente investigación (0.59 d^{-1}), totalmente concordante con el valor sugerido por defecto para las plantas de aguas municipales (bH : 0.62, Henze et al., 2002). Se puede entonces concluir que el bH evaluado por respirometría del lodo modelo (Esta investigación y (Abdallah et al., 2010) es del orden de 0.6 a 20°C; Corresponde al promedio para agua municipal pero difiere ampliamente de los extremos reportados en estas aguas 0.05 y 1.6.

5.2.3 Factor de corrección de temperatura de Arrhenius (Θ) para bH

La velocidad o tasa de reacción es la velocidad con la cual desaparece un reactivo o la rapidez con la que se forma de un producto. La tasa de reacción depende de la temperatura la cual influye sobre la “r” por medio de la constante k como es el caso de bH y μ_{HMAX} . Debido a la necesidad de utilizar constantes que han sido determinadas a una temperatura de referencia, en sistemas sometidos a otra temperatura se requiere corrección. Lo anterior se hace por medio de la ecuación de Arrhenius (8) que se describe como:

$$k_T = k_{20} \cdot \theta^{(T - 20)} \dots\dots\dots(8)$$

Donde:

k_T = es el valor de la constante cinética evaluada a la temperatura T

k_{20} = Es el valor de la constante cinética evaluada a la temperatura 20°C

Θ = para lodos activados se considera entre 1.00 y 1.08, Melcalf y Eddy (1992). Pero se pueden considerar valores específicos para cada parámetro, como se hace en la guía para el uso de aquasim®, Reichert (1998), donde se tienen valores de Θ que se muestran en la tabla 5.5

Tabla 5.5 Valores de Θ para varios parámetros cinéticos

Parámetro	Θ
b_H	1.1198
μ_H	1.1030
k_h	1.1160
K_x	1.1160

La figura 5.5 siguiente muestra la tendencia de variación del bH al lodo modelo en función de la temperatura.

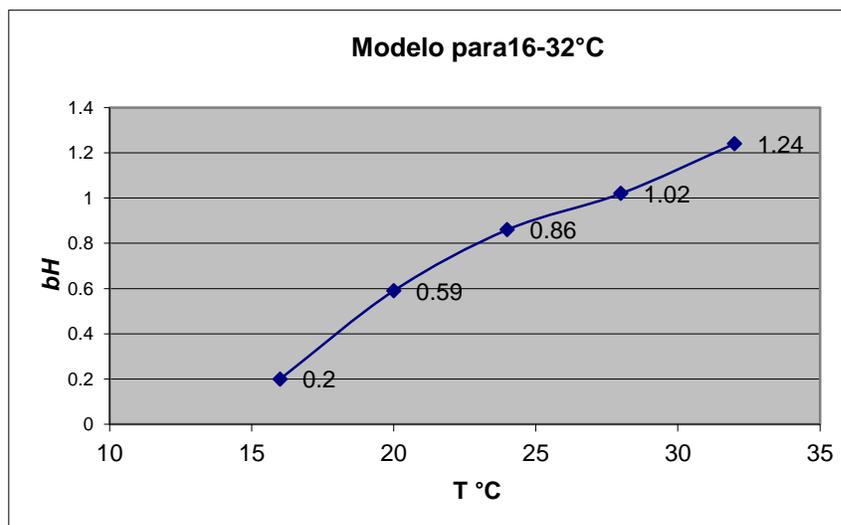


Figura 5.5 muestra la tendencia de los resultados de bH a diferentes temperaturas

Para los datos obtenidos en esta investigación se procederá a obtener la θ calculándola a partir de la linealización de la ecuación de Arrhenius:

$$\ln k_T = \ln k_{20} + (T-20) \cdot \ln \theta \quad \dots\dots(9)$$

Esta es la forma linealizada, tipo $Y = b + ax$

Con representar $\ln(k_T)$ en función de $(T-20)$, se obtiene una recta cuya pendiente “a” eso equivale a $\ln(\theta)$, mientras que el intercepto “b” es igual a $\ln(bH_{20})$.

Los datos para bH ya reportados se muestran en la siguiente tabla 5.6 (además de $T-20$ y $\ln(bH)$).

Tabla 5.6 Datos de bH a diferentes temperaturas

T	bH	T-20	$\ln(bH)$
16	0.2	-4	-1.61
20	0.59	0	-0.53
24	0.86	4	-0.15
28	1.02	8	0.02
32	1.24	12	0.22

Al ajustar los datos linealizados (Figura 5.6) se observó que el punto correspondiente a la temperatura de 16°C estaba lejos de la tendencia que se tiene entre 20 y 32°C, por lo que fue excluido de la modelación aunque su valor se conserva como tal ($bH_{16}^{\circ C} = 0.22$). Sin el punto 16°C el R^2 pasa de 84% a 96%, por lo que se optó por derivar un modelo para el intervalo 20-32°C e informando del valor de $bH_{16}^{\circ C}$ a parte.

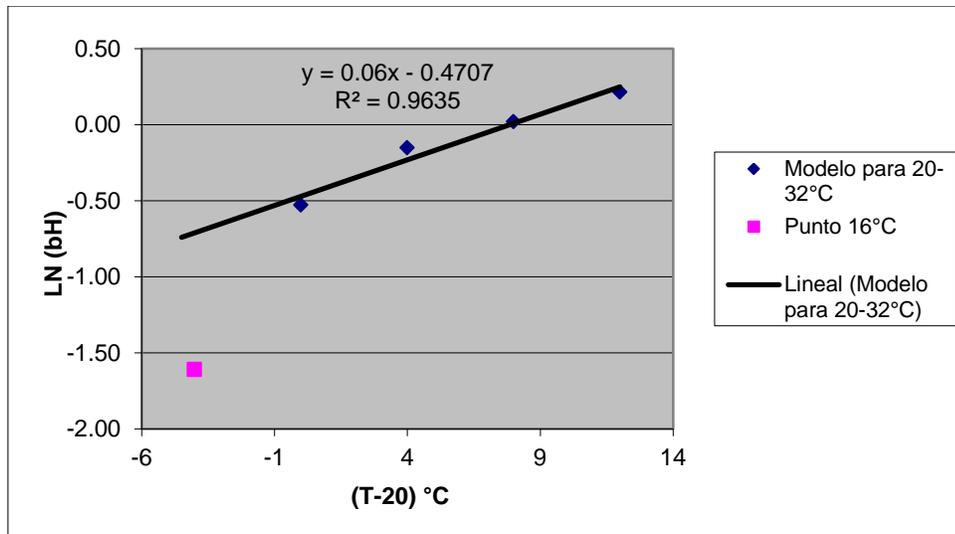


Figura 5.6 Representación de $(T - 20)$ vs $\ln(bH)$

Ya obtenidos los valores de la pendiente y del intercepto se saca su exponencial: $\Theta = 1.061$ (valor que se encuentra dentro del rango establecido por la bibliografía) y $bH_{20} = 0.62$.

La tabla 5.7 compara los valores medidos de bH con los derivados con el modelo entre 20 y 32°C.

Tabla 5. 7 Valores bH y bH ajustado a diferentes temperaturas

T °C	bH	bH ajustado con Θ
16	0.20	0.49
20	0.59	0.62
24	0.86	0.79
28	1.02	1.01
32	1.24	1.28

5.3 Determinación de μH_{max} por el método de Kappeler y Gujer.

5.3.1 Ejemplo de calculo μH_{max}

La obtención de este parámetro fue primero con aplicar la metodología de Kappeler y Gujer (1992) que se desarrolla en condiciones de una relación alta de sustrato/biomasa. Se realizaron las pruebas a cinco temperaturas diferentes que son 16, 20, 24, 28 y 32 grados centígrados. Se determinaron las curvas respirométricas donde se aprecie un aumento de velocidad de respiración (ro_2), ocasionada por un crecimiento neto de los microorganismos, y se obtuvieron curvas como la figura 5.7.

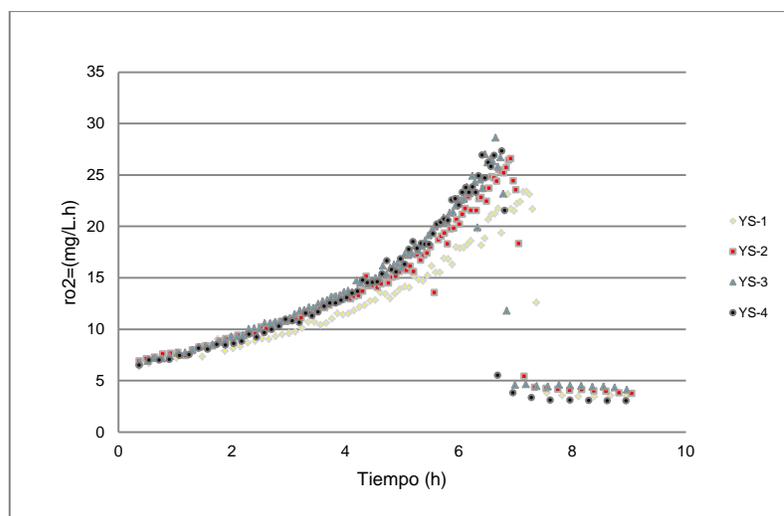


Figura 5.7 prueba de μH_{max} realizada en varias repeticiones

Del respirograma obtenido con una relación alta S/X se considera la sección donde existe crecimiento de microorganismos, representado en la misma figura 5.8 por los datos que se encuentran entre las líneas punteadas.

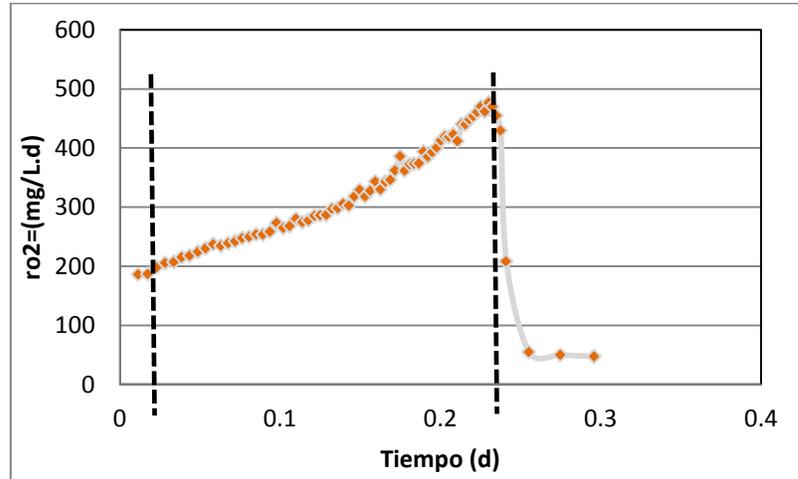


Figura 5.8 Respirograma de la curva de crecimiento a 20°C.

Después de graficar las tasas de respiración contra el tiempo, se calculó una regresión exponencial ($y=ae^{bt}$) cuya ecuación está dada en la figura 5.9, y donde la información sobre μ_{Hmax} se extrae del valor de b.

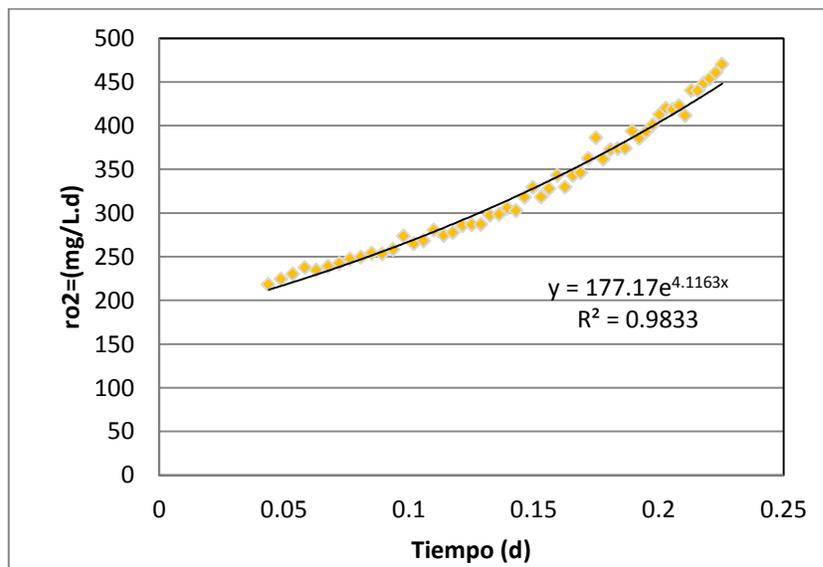


Figura 5.9 Respirograma de la curva de crecimiento a 20°C para determinar μ_{Hmax} .

La pendiente de esta línea corresponde a la diferencia ($\mu_{Hmax}-b'_H$), de donde se puede calcular la tasa máxima de crecimiento específico de la biomasa heterotrófica. Siendo $b'_H = 0.267 \text{ d}^{-1}$, entonces $\mu_{Hmax} = 4.116 + 0.267 = 4.387 \text{ d}^{-1}$. Este mismo procedimiento se siguió para calcular todos los μ_{Hmax} a diferentes temperaturas y para las diferentes replicas.

5.3.2 Resultados de μ_{Hmax} a las diferentes temperaturas

La tabla 5.8, muestra un resumen de los μ_{Hmax} obtenidos a diferentes temperaturas. Estos datos son el promedio de dos a cuatro corridas realizadas a cada temperatura, y donde cada corrida se realiza en los reactores al mismo tiempo (2 a 4 replicas). Se muestran los promedios y la desviación estándar (Desv.est) de cada corrida, pero también el promedio global y su desviación estándar a cada temperatura. Los detalles de los resultados son mostrados en el anexo D.

Las desviaciones estándar fueron bajas por lo tanto, los resultados podrían ser considerados confiables. La excepción fue las corridas a 16°C debido a la dificultad de lograr un crecimiento a al menos esta temperatura. Los cuadro vacios son resultados que fueron descartados por presentar valores irreales (Anexo D).

Tabla 5.8 Tasa de crecimiento máximo heterotrófico promedio a diversas temperaturas

Temp. °C	parámetro	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 4	Promedio	Desviación Std
16	$\mu_{Hmax} \text{ (dia}^{-1}\text{)}$	1.6	1.2	1.9	2.5	1.80	0.55
	Desv.Est	0.3	0.2	0.2	0.3		
20	$\mu_{Hmax} \text{ (dia}^{-1}\text{)}$	4.5	4.3	4.8		4.5	0.3
	Desv.Est	0.2	0.1	0.2			
24	$\mu_{Hmax} \text{ (dia}^{-1}\text{)}$		5.6	5.4		5.5	0.2
	Desv.Est		0.4	0.1			
28	$\mu_{Hmax} \text{ (dia}^{-1}\text{)}$		7	6.9	7.2	7.0	0.2
	Desv.Est		0.2	0.2	0.8		
32	$\mu_{Hmax} \text{ (dia}^{-1}\text{)}$	6.6	5.8	6.9	5.9	6.3	0.5
	Desv.Est	0.7	0.6	0.2	0.4		

La figura 5.10 siguiente pone en evidencia la tendencia de μ_{Hmax} cuando aumenta la temperatura.

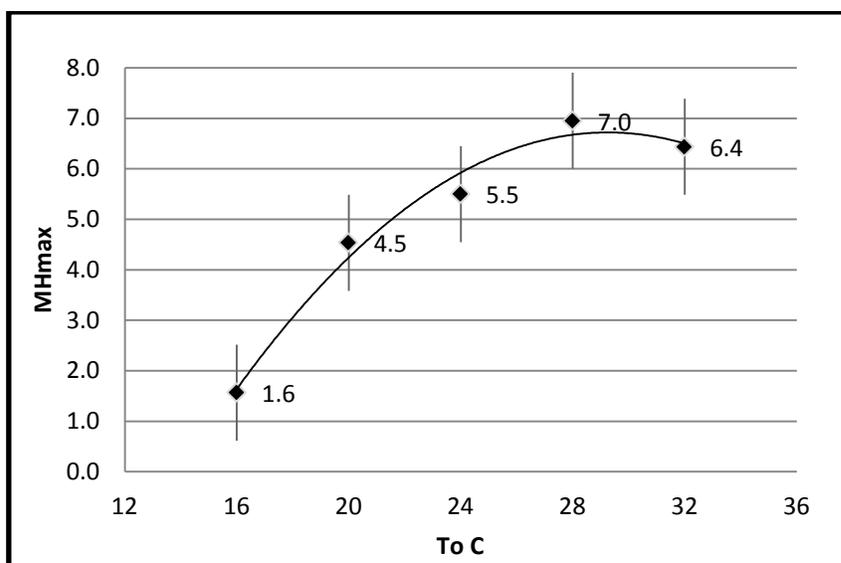


Figura 5.10 Tendencia de μ_{Hmax} con T°C

Se observa una tendencia de μ_{Hmax} a incrementar con la temperatura entre 16 y 28°C seguida de una bajada al llegar a 32°C. Esta es una tendencia que se suele observar, mostrando en este caso que a 32°C ya las bacterias no están en su mejor rango de desarrollo. La temperatura alta (32°C) empezó a afectarlas.

Nuevamente en la tabla 5.9, se comparan valores de la tasa de crecimiento máximo, reportados en la literatura a 20°C con el valor obtenido en este trabajo para el lodo modelo.

Tabla 5.9 Comparación de valores de μ_{Hmax} (d⁻¹) a 20°C

Henzel et al., 2002	Cox (2004)	Hauduc et al., 2010	GPS-X	Espinosa-Rodríguez et al., 2012	Valor obtenido
6	3.12	6	6	6.9	4.5

Los valores de Henze et al. (2002), Hauduc et al.(2010) GPS-X provienen de la misma fuente y se presenta el valor promedio recomendado por defecto en el documento del ASM1 para agua residual municipal. En el mismo documento, está provisto que μ_{Hmax} tiene un amplio rango (2 a 12 d⁻¹) por lo que el valor obtenido para el lodo modelo (4.5 d⁻¹) se considera como adentro de los rangos para agua municipal pero difiere del valor promedio de 6 d⁻¹. Si bien el valor Espinoza-Rodríguez (agua municipal) fue cercano al valor por defecto de 6 d⁻¹ la tasa máxima hallado por el lodo modelo es simplifcativamente menor y se asemeja más bien al valor de Cox (2004)

Hay que Recordar que los datos obtenidos por Espinosa-Rodríguez et al. (2012) fueron de la planta de tratamiento de aguas residuales “dulces nombres” ubicada un Monterrey, Nuevo León, México.

Kappeler y Gujer (1992) propusieron determinar únicamente la μ_{Hmax} , observando el aumento de la respiración en un reactor cerrado con una relación S/X alta. Algunos autores consideran que esta alta relación S/X puede favorecer el crecimiento selectivo, resultando en valores altos de μ_{Hmax} (Vanrolleghem et al., 1999).

Es concebible aceptar posibles diferencias entre μ_{Hmax} determinado en agua residual sintética y el de un agua municipal real, debido a la diferencia de composición y según los tipos de microorganismos que se desarrollan en cada caso. El agua residual sintética no contiene fracción no-biodegradable, ni compuestos tóxicos como pueda llegar en plantas reales; Pero tampoco es seguro que todos y cada uno de macro-elementos requeridos por cada determinado tipo de bacterias estén presentes en el agua sintética.

Para evaluar μ_{Hmax} existen limitaciones, debido a que el sustrato incluye fracciones, no-biodegradable y biodegradables, limitación que en esta investigación en la teoría no existen. Porque el agua residual sintética no tiene fracción no-biodegradable. Originando las diferencias de valores entre esta y otras investigaciones.

5.3.3 Factor de corrección de temperatura (Θ) para μ_{Hmax}

Para la determinación del factor de corrección Θ , se utilizó el mismo procedimiento usado en el bH , utilizando ahora los datos de μ_{Hmax} . En primer lugar se calcularon los datos de la ecuación de Arrhenius linealizada (Ecuación 8) para ser graficados como se muestra en la tabla 5.10. Alternativamente, sería posible hallar Θ y $\mu_{Hmax-20^{\circ}C}$ por regresión no lineal.

Tabla 5.10 Datos de μ_{Hmax} a diferentes temperaturas (Linealización)

T	μ_{Hmax}	T-20	$\ln(\mu_{Hmax})$
16	1.80	-4	ND
20	4.5	0	1.504
24	5.5	4	1.705
28	7.0	8	1.946
32	6.3	12	1.856

Al representar los datos logarítmicos (figura 5.10) entre 20 y 28°C. Se observa una tendencia de incremento de μ_{Hmax} , la cual es coherente con la ecuación de Arrhenius. Cabe recordar que el cultivo (Producción de lodo) se hizo a alrededor de 20°C ($\pm 2^{\circ}C$), por lo que las bacterias son aclimatadas a la temperatura de 20°C. La desviación estándar comparada a la ecuación de Arrhenius es mayor a la temperatura de 16°C y 32°C.

En la grafica se muestran los datos ya graficados y con la ecuación de ajuste.

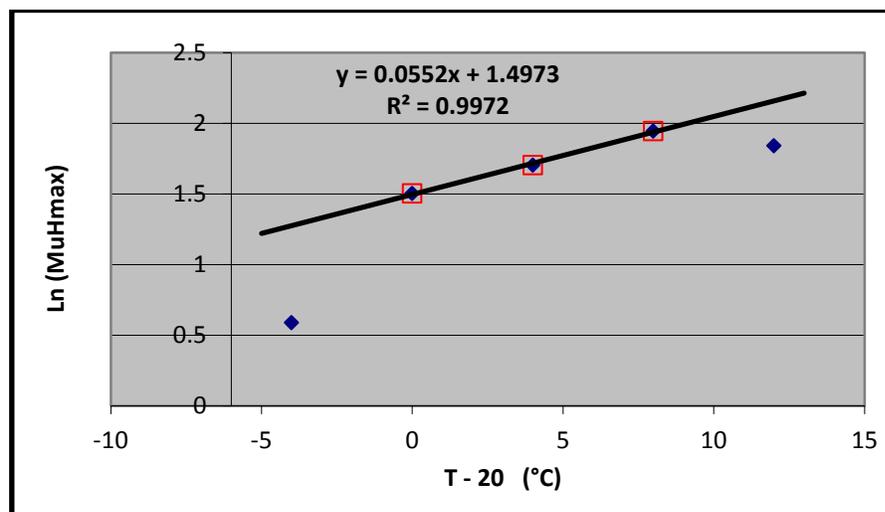


Tabla 5. 11 Representación de (T-20) vs $\ln(\mu_{Hmax})$

La tendencia de declive de μ_{Hmax} a temperaturas altas (32°C) ya está muy conocida en la literatura (Lopez-Vasquez et al., 2008) debiéndose al alcance de temperaturas sub-optimas para los microorganismos considerados. En cuanto a la desviación a la temperatura de 16°C (no muy lejos de 20°C), este ya fue igualmente notado con el parámetro bH , pero no existen antecedentes relatados en la literatura. Al contrario, estudios realizados en cultivos de bacterias acumuladoras de glucógeno (GAO) y de fosforo (PAO) pudieron utilizar una misma ecuación de Arrhenius para toda la zona 10-30°C antes de notar un declive a temperaturas mayores.

En este trabajo considerando la zona 20-28°C, se obtiene una excelente descripción de μ_{Hmax} con la ecuación de Arrhenius ($t= 1.057$, $\mu_{Hmax}-20^{\circ}\text{C}= 4.47$ y $R^2=99.7\%$, recta de la figura 9), si se incluyera también los resultados de 16 y 32°C el R^2 seria bajo (70%)

Ya obtenidos los valores de la pendiente y del intercepto se saca su exponencial: $\Theta = 1.057$ y $\mu_{Hmax}-20^{\circ}\text{C} = 4.47$ valores que se encuentran dentro de rangos establecidos en la bibliografía de Arrhenius.

5.4 Método de Incremento de semillas para la determinación de la tasa máxima de crecimiento específico de la biomasa heterotrófica (μ_{Hmax})

Este método es una alternativa al método tradicional de Kappeler y Gujer. En lugar de calcular la curva de r_{O_2} vs tiempo con una cantidad fija de inóculo como regularmente se hace, el volumen del inóculo se incrementa escalonadamente, mientras las correspondientes tasas de respiración inicial (r_{O_2ini}) son medidas en cada incremento. El método fue llamado incremento de semillas (Fall *et al.*, 2012).

5.4.1 Ejemplo de cálculo para el método de incremento de semillas (IS)

Para encontrar la μ_{Hmax} fue necesario obtener la gráfica de $r_{O_2ini} (V_{ww} + v_{ML})$ vs v_{ML} y la pendiente de la misma es $K = ((1-Y_H)/Y_H) * \mu_{Hmax} * X_{Ho_ML}$ y su intercepción con el eje (y) será: $C = ((1-Y_H)/Y_H) * \mu_{Hmax} * V_{ww} * X_{Ho_ww}$. Como ejemplo la ecuación y la gráfica se observan en la figura 10 a una temperatura de 16°C. Hay que enfatizar que todas las corridas por este método fueron hechas también con S/X alto. Para la gráfica 5.11 se utilizó un S/X = 6.5. La primera siembra. Los datos de S/X se encuentran en anexos B.

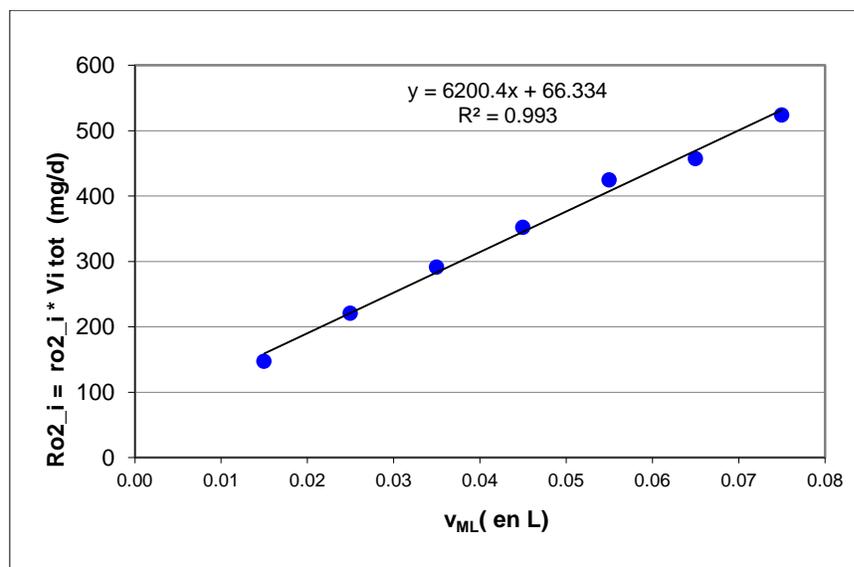


Figura 5.11 Representación de $r_{O_2ini} (V_{ww} + v_{ML})$ vs v_{ML} a 16°C

Como anticipado por el método, la función representada fue siempre altamente lineal como se puede apreciar en la figura 5.11 como en el anexo E. Siendo Y_H un valor constante de 0.67 y V_{ww} , X_{Ho_ML} conocidos es posible obtener el valor de μ_{Hmax} por medio de este método alternativo.

Los valores de la cantidad de biomasa heterótrofa presente en el licor mixto encontrado y utilizado para los inoculos, (X_{Ho_ML}), se hayan con medir la tasa de respiración endógena (ro_2 -endo), con base a la siguiente ecuación.

$$X_{Ho_ML} = \frac{ro_2 \text{ endo}}{(1-f_p) \cdot b \cdot H} \quad (10)$$

X_{Ho_ML}	Concentración de biomasa inicial
f_p	Fracción de biomasa inerte (0.2)
$b \cdot H$	Coefficiente de decaimiento endógeno
ro_2 -endo	Respiración endógena de la biomasa heterótrofa

Para el ejemplo de la primera corrida a 16°C ro_2 -endo fue 112.8 mg/L.d (medido en duplicado), por lo que X_{Ho_ML} fue estabilizada a 1878 mg/L de DQO.

La tabla 5.11 siguiente muestra los cálculos de μ_{Hmax} y X_{Ho_ww} para las 3 replicas de las corridas a 16°C.

Tabla 5.12 Estimación de μ_{Hmax} y X_{Ho_ww} a 16°C por el método de incrementos

Replicas	k (mg/L d)	C (mg/d)	μ_{Hmax} (d ⁻¹)	X_{Ho_ww} mgDQO/L
1	6200.40	66.33	6.7	28.7
2	6084.70	53.11	6.6	23.4
3	6726.80	73.96	7.3	29.5
$Y_H = 0.67$ (ASM1)			Promedio±Desv.Est	
			6.9±0.4	27.2±3.3

5.4.2 Valores de μ_{Hmax} medidos por el método IS a diferentes temperaturas

La primera corrida a 16°C mostrada como ejemplo (3 replicas), fue repetida otras veces (cada una con 3 replicas). Este fue también el caso de las corridas a 20, 24, 28 y 32°C, cuyos resultados detallados están consignados en el anexo D.

En resumen la tabla 5.12 siguiente muestra los resultados μ_{Hmax} a cada una de las temperaturas.

Tabla 5.13 Datos obtenidos de μ_{Hmax} por método de incremento de semillas

Temperatura	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 4	promedio	Desv. STD
16	6.9	28.3	33.5		26.7	7.7
20	15	9.8	8.3	13.7	11.7	3.5
24	9.3	10.1	12.5	19.7	12.9	1.7
28	17.3	11.7	15.6	10.5	13.8	2.9
32	7	14			10.5	4.9

Los datos obtenidos de μ_{Hmax} por medio del método I.S. muestran un alta desviación entre sí. Esta alta desviación puede ser debida a la técnica para realizar el método o posiblemente al agua residual sintética. La tabla 20 muestra los datos de crecimiento por los métodos I.S. y Kappeler y Gujer.

Tabla 5.14 Datos de crecimiento por métodos IS y Kappeler y Gujer (d^{-1}).

Temperatura °C	I.S.	Kappeler y Gujer
16	26.7	1.80
20	11.7	4.5
24	12.9	5.5
28	13.8	7.0
32	10.5	6.3

En anteriores investigaciones (C. Fall *et al.*, 2012) con este método se tienen valores más acorde a los obtenidos con el método de Kappeler y Gujer. Una posible razón para el alejamiento de estos valores de los obtenidos del método de crecimiento exponencial es el valor tan pequeño de X_{HO_ww} debido al agua residual sintética que no contiene biomasa inicial. Otra razón mas es la posibilidad de un crecimiento significativo entre los incrementos de semillas.

CAPÍTULO 6
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

El bH del lodo modelo fue estimada en esta investigación, siendo 0.62 d^{-1} a 20°C mientras que el factor de corrección de temperatura (θ) fue 1.061 para el rango de $20\text{-}32^\circ\text{C}$. Se logro llevar a cabo el método respirometrico de estimación de bH con seguir paso a paso el procedimiento propuesto, haciendo hincapié en el adecuado control de las temperaturas estudiadas y de las mediciones de la tasa de consumo de oxígeno.

El bH a 16°C de 0.2 d^{-1} desvió de la ecuación de Arrhenius, se tuvo que descartar, y el valor no se debe de estimar don el θ para el rango de 20 a 32°C

El método Kappeler y Gujer fue adecuadamente aplicado al caso del lodo modelo. Los resultados dieron un valor μ_{Hmax} de 4.47 d^{-1} a 20°C y un valor θ de 1.057 para el rango de 20 a 28°C . De la misma forma que para el bH , el valor de μ_{Hmax} a 16°C también dio un valor singular bajo fuera de la ecuación de Arrhenius. En cuanto a la temperatura de 32°C , se observó un declive natural en la tendencia ascendente μ_{Hmax} con la temperatura, dando un valor de μ_{Hmax} de XX, menor al valor a 28°C XX

Para el μ_{Hmax} por el método de incremento de semillas (IS), se obtuvieron valores medidos muy altos como 11.7 d^{-1} a 20°C comparado con el método de crecimiento es 4.5 d^{-1} a la misma temperatura. Si bien la linealidad de la función en la que se basa este método, fue confirmada por observaciones en esta investigación, pero no se pudo demostrar la equivalencia de los valores de μ_{Hmax} medidos por este método con el método tradicional.

Se hace la hipótesis de que las diferencias podrían deberse al comportamiento de la bacteria cultivada, y que el modelo matemático para evaluar la μ_{Hmax} por el método IS, debería de modificarse para tomar en cuenta los posibles mecanismos de almacenamiento de sustrato por la bacteria.

Desde el punto de vista práctico, desarrollar esta investigación a temperaturas de 16°C y 32°C fue un reto el llegar a estabilizar las bacterias cierta temperatura para los diferentes métodos de prueba.

6.2 Recomendaciones

Tener un cuidado especial al reactor RBS, ya que este el productor de biomasa la cual se utilizó en todas las pruebas.

Tener una estabilización de todos los parámetros de operación del reactor del respirometro, podría mejorar la eficiencia de los resultados, sobre todo en el incremento de semillas.

Realizar un estudio comparativo de los resultados de esta investigación del método de incremento de semillas IS con otro posterior para avalar estos resultados o desecharlos.

Evaluar la adaptación del modelo matemático utilizado para el método IS, lo anterior para que pueda tomar en cuenta el mecanismo de almacenamiento y llegar a resultados idénticos al método tradicional.

REFERENCIAS

- APHA (1992). Métodos estandarizados para el análisis de aguas potables y residuales. Madrid, Editorial Diaz de Santos, S.A.
- Fall C. Diaz-Delgado C. y Chávez Romero R. (2006). Modelación matemática de plantas de tratamiento de lodos, Revista Técnica de Medio Ambiente, RETEMA, ISSN 1130-9881, España vol 110, p.32-47.
- C Fall, C.M. Hooijmans, M. Esparza-Soto, Olguin M.T. and Ba K.M.(2012). Initial-Rate Based Method For Estimating The Maximum Heterotrophic Growth Rate Parameter (μ_H max) Bioresource Technology.
- Cox, C. D. (2004). Statistical distributions of uncertainty and variability in activated sludge model parameters. Water Environment Research 76, 2672-2685.
- Ekama, G.A., Dold, P.L. and Marais, G.v.R., 1986. Procedures for determining influent COD fractions and the maximum specific growth rate of heterotrophs in activated sludge systems. Water Sci. and Technol., 18: 91-114.
- Fall, C. (2012) "Reducción de los sólidos generados por el proceso de lodo activado" Notas de curso. Centro Interamericano de Recursos del Agua. UAMEX.
- Hauduc, H., Rieger, L., Ohtsuki, T., Shaw, A., Tákacs, I., Winkler, S., Héduit, A., Vanrolleghem, P. A. y Gillot, S. (2010). Activated sludge modelling: Development and potential use of a practical applications database. WWTmod2010. *Second Seminary QC Canada*.
- Henze M., Gujer W., Mino T. y Van Loosdrecht M. V. (2000). Activated sludge models, ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. IWA Publishing, London, UK,
- Johnson B. R., Daigger G. T. y Novak J. T., (2009) The Use of ASM based Models for the Simulation of Biological Sludge Reduction Processes. Water Practice & Technology. Vol 3, issue 3.

- Kappeler J. and Gujer W., 1992. Estimation of kinetic parameters of heterotrophic biomass under aerobic conditions and characterization of wastewater for activated sludge modeling. *Water Sci. Technol.*, 25 (6), 125-139.
- M. A. Espinoza-Rodríguez, N. Flores-Álamo, M. Esparza-Soto y C. Fall (2012). Efecto de la temperatura en la tasa de crecimiento y decaimiento heterotrófico en el rango de 20-30 °C en un proceso de lodos activados. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. Centro Interamericano de Recursos del Agua. Facultad de Ingeniería, Universidad del Estado de México.
- Metcalf & Eddy (2003). *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*. McGraw-Hill, New York.
- Novak J. T.; Chon D. H.; Curtis B. y Doyle M., (2007). Biological Solids Reduction Using the Cannibal Process. *Water Environment Research*. 79, 12.
- Spanjers, H. and P.A. Vanrolleghem, 1995. Respirometry as a tool for rapid characterization of wastewater and activated sludge. *Water Sci. Technol.*
- Sun L., Randall C. W. y Novak J. T., (2010). The influence of sludge interchange times on the oxic settling anoxic process. *Water Environment Research* 82, 6.
- Vanrolleghem, P., Spanger, H., Petersen, B., Ginestet, P. y Takács, I.(1999). Estimating (combination of) activated sludge model No. 1 parameters and components by respirometry. *Water Science and Technology* 39, 195-214.

ANEXOS

ANEXOS A SEGUIMIENTO DEL RBS

Parámetros de operación del reactor RBS

Se muestran los resultados detallados del RBS de los diversos análisis de operación (Sólidos y DQO del licor mixto y purga).

Tarado= masa del filtro

Seco= masa después del secado de la muestra a 103°C

Cenizas= masa después de la mufla a 550°C

LM=licor mixto del RBS

V= volumen de la muestra filtrada

SST=sólidos suspendidos totales

SSV= sólidos suspendidos volátiles

SSF= sólidos suspendidos fijos

IVT= SSV/SST

CA= licor mixto de la purga del RBS

14/01/2013

Muestra	Tarado (g)	Seco (g)	Cenizas (g)	Lugar	Reactor	V (mL)	SST (mg/L)	SSV (mg/L)	SSF (mg/L)	IVT
1	1.3856	1.3952	1.3875	LM	A	5	1920	1540	380	0.8021
2	1.3974	1.4069	1.3988	LM	A	5	1900	1620	280	0.8526

17/01/2013

Muestra	Tarado (g)	Seco (g)	Cenizas (g)	Lugar	Reactor	V (mL)	SST (mg/L)	SSV (mg/L)	SSF (mg/L)	IVT
1	1.387	1.3962	1.3888	LM	A	5	1840	1480	360	0.8043
2	1.3989	1.4088	1.4005	LM	A	5	1980	1660	320	0.8384

24/01/2013

Muestra	Tarado (g)	Seco (g)	Cenizas (g)	Lugar	Reactor	V (mL)	SST (mg/L)	SSV (mg/L)	SSF (mg/L)	IVT
1	1.3984	1.4067	1.3995	LM	A	5	1660	1440	220	0.8675
2	1.3997	1.4086	1.4013	LM	A	5	1780	1460	320	0.8202
5	1.3959	1.4089	1.398	PUR A	CA	5	2600	2180	420	0.8385

06/02/2013

Muestra	Tarado (g)	Seco (g)	Cenizas (g)	Lugar	Reactor	V (mL)	SST (mg/L)	SSV (mg/L)	SSF (mg/L)	IVT
1	1.3902	1.4008	1.3922	LM	A	5	2120	1720	400	0.8113
2	1.3974	1.4074	1.3999	LM	A	5	2000	1500	500	0.75
5	1.4038	1.4189	1.4075	PUR A	CA	5	3020	2280	740	0.755
6	1.4012	1.4157	1.404	PUR A	CA	5	2900	2340	560	0.8069

14/02/2013

Muestra	Tarado (g)	Seco (g)	Cenizas (g)	Lugar	Reactor	V (mL)	SST (mg/L)	SSV (mg/L)	SSF (mg/L)	IVT
1	1.3894	1.3956	1.3909	LM	A	5	1240	940	300	0.7581
2	1.4012	1.4097	1.4028	LM	A	5	1700	1380	320	0.8118
5	1.4027	1.4155	1.4051	PUR A	CA	5	2560	2080	480	0.8125
6	1.3926	1.4062	1.3956	PUR A	CA	5	2720	2120	600	0.7794

20/02/2013

Muestra	Tarado (g)	Seco (g)	Cenizas (g)	Lugar	Reactor	V (mL)	SST (mg/L)	SSV (mg/L)	SSF (mg/L)	IVT
1	1.3858	1.3929	1.3875	LM	A	5	1420	1080	340	0.7606
2	1.3679	1.3762	1.3694	LM	A	5	1660	1360	300	0.8193
5	1.4003	1.4133	1.4029	PUR A	CA	5	2600	2080	520	0.8
6	1.379	1.3928	1.3819	PUR A	CA	5	2760	2180	580	0.7899

27/02/2013

Muestra	Tarado (g)	Seco (g)	Cenizas (g)	Lugar	Reactor	V (mL)	SST (mg/L)	SSV (mg/L)	SSF (mg/L)	IVT
1	1.3867	1.3948	1.3878	LM	A	5	1620	1400	220	0.8642
2	1.4037	1.4117	1.4048	LM	A	5	1600	1380	220	0.8625
5	1.3833	1.396	1.3845	PUR A	CA	5	2540	2300	240	0.9055
6	1.3962	1.408	1.3975	PUR A	CA	5	2360	2100	260	0.8898

06/03/2013

Muestra	Tarado (g)	Seco (g)	Cenizas (g)	Lugar	Reactor	V (mL)	SST (mg/L)	SSV (mg/L)	SSF (mg/L)	IVT
1	1.3848	1.395	1.3863	LM	A	5	2040	1740	300	0.8529
2	1.3861	1.3942	1.3878	LM	A	5	1620	1280	340	0.7901
5	1.403	1.415	1.4049	PUR A	CA	5	2400	2020	380	0.8417
6	1.3824	1.3944	1.384	PUR A	CA	5	2400	2080	320	0.8667

13/03/2013

Muestra	Tarado (g)	Seco (g)	Cenizas (g)	Lugar	Reactor	V (mL)	SST (mg/L)	SSV (mg/L)	SSF (mg/L)	IVT
1	1.3837	1.3924	1.3858	LM	A	5	1740	1320	420	0.7586
2	1.377	1.3852	1.3789	LM	A	5	1640	1260	380	0.7683
5	1.4081	1.4211	1.4099	PUR A	CA	5	2600	2240	360	0.8615
6	1.3951	1.4073	1.3973	PUR A	CA	5	2440	2000	440	0.8197

20/03/2013

Muestra	Tarado (g)	Seco (g)	Cenizas (g)	Lugar	Reactor	V (mL)	SST (mg/L)	SSV (mg/L)	SSF (mg/L)	IVT
1	1.3905	1.3976	1.3913	LM	A	5	1420	1260	160	0.8873
2	1.3921	1.3994	1.3931	LM	A	5	1460	1260	200	0.863
5	1.3993	1.4169	1.4008	PUR A	CA	5	3520	3220	300	0.9148

03/04/2013

Muestra	Tarado (g)	Seco (g)	Cenizas (g)	Lugar	Reactor	V (mL)	SST (mg/L)	SSV (mg/L)	SSF (mg/L)	IVT
1	1.3505	1.3592	1.3513	LM	A	5	1740	1580	160	0.908
2	1.3544	1.3628	1.3551	LM	A	5	1680	1540	140	0.9167

Tabla de resultados de la prueba de la demanda química de oxígeno (DQO), para el reactor RBS.

Fecha	DQO-Total (Vial) mg/L	Factor de dilucion (F.D)	DQO muestra= Vial*F.D	Promedio (mg/L.)	Desv.Est
14/01/2013	530	4	2120	2142	31
	541	4	2164		
17/01/2013	530	4	2120	2112	11
	526	4	2104		
21/01/2013	525	4	2100	2134	48
	542	4	2168		
24/01/2013	481	4	1924	1950	37
	494	4	1976		
31/01/2013	501	4	2004	1980	34
	489	4	1956		
06/02/2013	639	4	2556	2322	331
	522	4	2088		
08/02/2013	502	4	2008	2004	6
	500	4	2000		
14/02/2013	631	4	2524	2250	387
	494	4	1976		
20/02/2013	454	4	1816	1812	6
	452	4	1808		
27/02/2013	446	4	1784	1810	37
	459	4	1836		
06/03/2013	430	4	1720	1694	37
	417	4	1668		
13/03/2013	488	4	1952	1970	25
	497	4	1988		
20/03/2013	398	4	1592	1674	116
	439	4	1756		
03/04/2013	500	4	2000	1998	3
	499	4	1996		
10/04/2013	493	4	1972	2000	40
	507	4	2028		
17/04/2013	318	4	1272	1290	25
	327	4	1308		
08/05/2013	499	4	1996	2026	42
	514	4	2056		
17/05/2013	450	4	1800	1790	14
	445	4	1780		

ANEXOS B CALCULO DE S/X

Tablas de resultados de los cálculos para obtener una S/X alta para las pruebas respirométricas realizadas en esta investigación.

Por medio de la siguiente fórmula $V1=C2*V2/C1$ donde:

V1= Representa el volumen del concentrado que se necesita para obtener la concentración C2

C2= Concentración deseada para las pruebas respirométricas

V2= Es el volumen el cual se necesita, para distribuir 700mL. En cuatro reactores de 1 litro

C1= Concentración establecida del concentrado del agua residual sintética.

Se determinó la cantidad del concentrado de comida en mL. Para obtener una concentración de DQO alta, con respecto a la siembra de biomasa en las pruebas de mu y por el método de Incremento de semillas I.S.

C2 (mg/L)	C1 (mg/L)	V2 (mL)	V1(mL)
150	5000	3000	90
250	5000	3000	150
300	5000	3000	180
350	5000	3000	210
400	5000	3000	240

Cálculo de S/X

Se realizaron las pruebas respirométricas con el lodo purgado del reactor grande del día de la corrida. De los 2 litros purgados se concentró a 1200 mL. Para obtener una biomasa más concentrada. Los resultados de la cantidad de biomasa en SSV se relacionan en la siguiente tabla para obtener la relación comida/microorganismos F/M.

La siguiente tabla representa los resultados de las primeras corridas de μ_{Hmax} experimentales, para la calibración de la técnica.

Corrida	Temperatura	C-1 (mg/L-dqo)	Vf (L)	X (mg/L-SSV)	VXH (L)	S/X (mg-dqo/mg-SSV)
1	20	300	0.71	1910	0.01	10.995
1	20	300	0.72	1910	0.02	5.497
1	20	300	0.73	1910	0.03	3.665
1	20	300	0.74	1910	0.04	2.749
2	20	300	0.715	1910	0.015	7.330
2	20	300	0.72	1910	0.02	5.497
2	20	300	0.73	1910	0.03	3.665
2	20	300	0.74	1910	0.04	2.749
3	20	300	0.72	3427	0.02	3.063
3	20	300	0.725	3427	0.025	2.451
3	20	300	0.73	3427	0.03	2.042
3	20	300	0.74	3427	0.04	1.532
4	20	300	0.725	3054	0.025	2.750
4	20	300	0.73	3054	0.03	2.292
4	20	300	0.735	3054	0.035	1.964
4	20	300	0.74	3054	0.04	1.719
5	20	300	0.73	3161	0.03	2.214
5	20	300	0.74	3161	0.04	1.661
	20	300	0.73	2931	0.03	2.388
	20					
	20	300	0.735	2931	0.035	2.047
6	20	300	0.74	2931	0.04	1.791
	20	300	0.73	3100	0.03	2.258
	20	300	0.735	3100	0.035	1.935
7	20	300	0.74	3100	0.04	1.694
8	20	250	0.73	2652	0.03	2.199
8	20	250	0.735	2652	0.035	1.885
8	20	250	0.74	2652	0.04	1.649
9	20	250	0.73	2635	0.03	2.214
9	20	250	0.74	2635	0.04	1.660
10	24	300	0.71	2538	0.01	8.274
10	24	300	0.72	2538	0.02	4.137
10	24	300	0.73	2538	0.03	2.758
10	24	300	0.74	2538	0.04	2.068
11	24	250	0.73	2939	0.03	1.985
11	24	250	0.74	2939	0.04	1.488

La siguiente grafica representa los resultados de S/X real, después de pasar por la etapa de calibración. Estos resultados representan la relación S/X a diferentes temperaturas real.

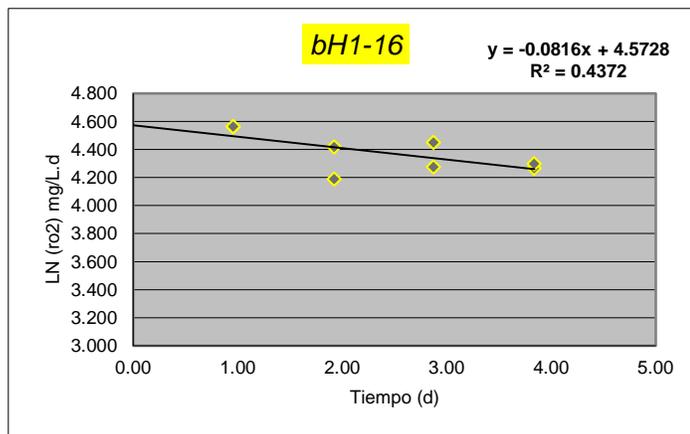
Fecha	Corrida	Temperatura	C-1 (mg/L-dqo)	Vf (L)	X (mg/L-SSV)	VXH (L)	F/M (mg-dqo/mg-SSV)
06/02/2013	12	24	300	0.73	2963.13523	0.03	2.362
	12	24	300	0.74	2963.13523	0.04	1.772
07/02/2013	13	28	400	0.71	2898.81568	0.01	9.659
	13	28	400	0.72	2898.81568	0.02	4.830
	13	28	400	0.73	2898.81568	0.03	3.220
	13	28	400	0.74	2898.81568	0.04	2.415
08/02/2013	14	28	250	0.71	3232.63473	0.01	5.414
	14	28	250	0.715	3232.63473	0.015	3.609
	14	28	250	0.72	3232.63473	0.02	2.707
12/02/2013	15	24	250	0.73	2828.55539	0.03	2.062
20/02/2013	16	20	250	0.74	2656.73289	0.04	1.647
21/02/2013	17	24	250	0.71	3017.68212	0.01	5.799
	17	24	250	0.72	3017.68212	0.02	2.900
22/02/2013	18	28	250	0.705	2838.12362	0.005	12.332
	18	28	250	0.71	2838.12362	0.01	6.166
26/02/2013	19	28	250	0.705	2181.50552	0.005	16.044
27/02/2013	20	24	250	0.71	2688.5221	0.01	6.509
06/03/2013	21	28	300	0.705	2756.3773	0.005	15.237
07/03/2013	22	24	250	0.71	2711.04879	0.01	6.455
08/03/2013	23	20	300	0.715	2861.46886	0.015	4.893
09/03/2013	24	28	300	0.705	2833.48651	0.005	14.823
12/03/2013	25	20	300	0.715	2538.65677	0.015	5.515
13/03/2013	26	24	300	0.71	2608.66722	0.01	8.050
16/03/2013	27	16	300	0.715	2153.32494	0.015	6.502
17/03/2013	28	32	300	0.705	2283.65776	0.005	18.392
19/03/2013	29	28	300	0.705	2415.87947	0.005	17.385
20/03/2013	30	24	300	0.715	2805.16776	0.015	4.991
21/03/2013	31	20	300	0.715	2509.88694	0.015	5.578
21/03/2013	32	16	300	0.715	2509.88694	0.015	5.578
22/03/2013	33	20	350	0.71	2850.76259	0.01	8.594
04/04/2013	34	32	300	0.705	3225.17561	0.005	13.023
05/04/2013	35	16	300	0.715	2939.14397	0.015	4.763
06/04/2013	36	16	300	0.715	2939.14397	0.015	4.763
08/04/2013	37	16	350	0.715	2975.17945	0.015	5.490
10/04/2013	38	16	300	0.715	2762.14981	0.015	5.069
16/04/2013	39	32	300	0.705	2593.51779	0.005	16.194
17/04/2013	40	32	300	0.705	2157.05537	0.005	19.471
18/04/2013	41	32	300	0.705	3054.00042	0.005	13.752
22/04/2013	42	28	300	0.705	2630.0994	0.005	15.969
29/04/2013	43	24	300	0.715	2517.75847	0.015	5.561

**ANEXOS C GRAFICAS Y
TABLAS PARA *bH***

Graficas y tablas de las pruebas de *bH* a diferentes temperaturas

*bH*1 a 16 grados

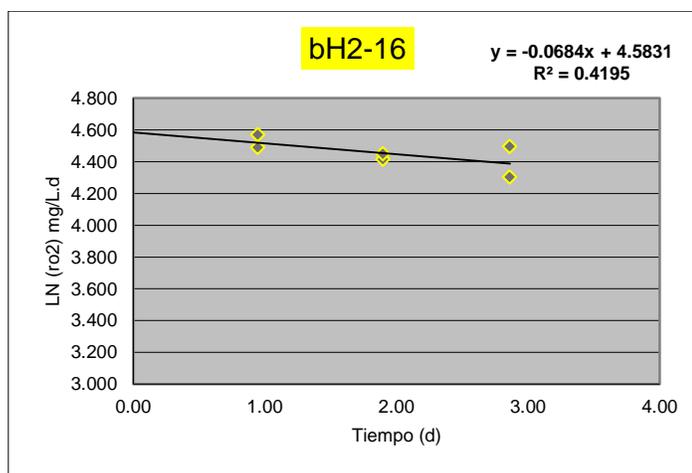
			por hora	por dia	mg/L.d	mg/L.d
	RUN	T (dias)	r02 (mg/L.h)	r02 (mg/L.d)	Ln (r02)	Ln (r02)
Replica A	Med 1a	0.00	11.029	264.70	5.579	
	Med 2	0.96	3.9886	95.73	4.561	4.561
	Med 3	1.92	3.452	82.85	4.417	4.417
	Med 4	2.88	3.5691	85.66	4.450	4.450
	Med 5	3.84	2.9651	71.16	4.265	4.265
	Med 6	0.00	0	0.00		
	Med 7	0.00	0	0.00		
Replica B	Med 1b	0.00	9.6499	231.60	5.445	
	Med 2b	0.96	3.9922	95.81	4.562	4.562
	Med 3b	1.92	2.746	65.90	4.188	4.188
	Med 4b	2.88	2.9951	71.88	4.275	4.275
	Med 5b	3.84	3.064	73.54	4.298	4.298
	Med 6b	0.00	0	0.00		
	Med 7b	0.00	0	0.00		



YSSa	b'H prim (dia - 1)	bH ASM1	Rsq	Calculo bH vs bH Prim.
	0.082	0.21	91.7%	1-yH (1-fp) = 0.3836
	fp = 0.08 yH = 0.67			

bH2 a 16 grados

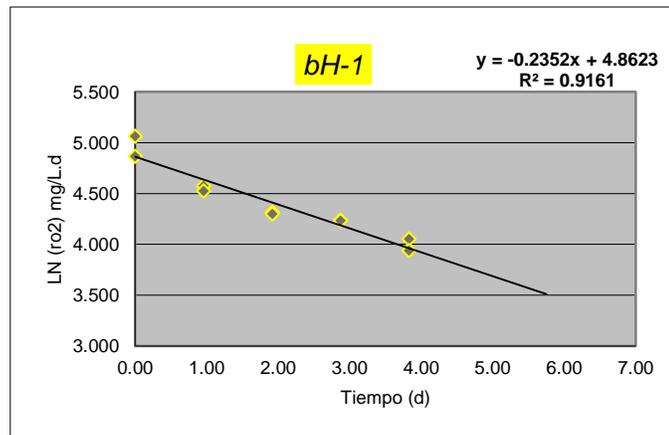
			por hora	por dia	mg/L.d	mg/L.d
	RUN	T (dias)	r02 (mg/L.h)	r02 (mg/L.d)	Ln (r02)	Ln (r02)
Replica A	Med 1a	0.00	6.6329	159.19	5.070	
	Med 2	0.95	4.0207	96.50	4.570	4.570
	Med 3	1.90	3.4474	82.74	4.416	4.416
	Med 4	2.86	3.0758	73.82	4.302	4.302
	Med 5	0.00	0	0.00		
	Med 6	0.00	0	0.00		
	Med 7	0.00	0	0.00		
Replica B	Med 1b	0.00	6.4665	155.20	5.045	
	Med 2b	0.95	3.708	88.99	4.489	4.489
	Med 3b	1.90	3.5611	85.47	4.448	4.448
	Med 4b	2.86	3.7291	89.50	4.494	4.494
	Med 5b	0.00	0	0.00		
	Med 6b	0.00	0	0.00		
	Med 7b	0.00	0	0.00		



YSSa	b'H prim (dia - 1)	bH ASM1	Rsq	Calculo bH vs bH Prim.
	0.068	0.18	91.7%	1-yH (1-fp) = 0.3836

bH1 a 20 grados

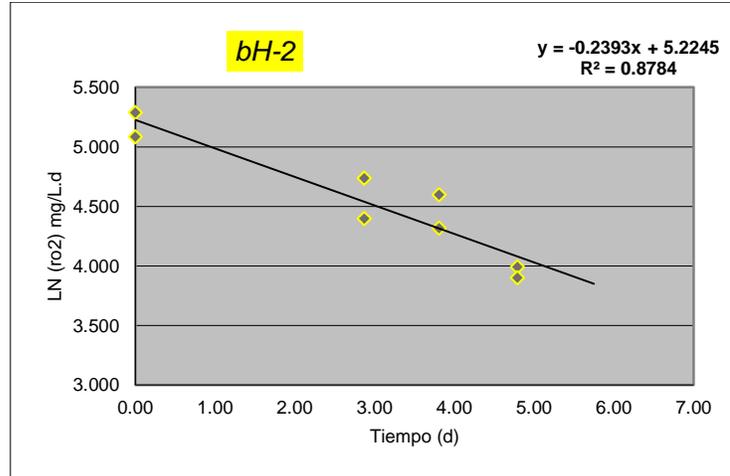
			por hora	por dia	mg/L.d
	RUN	T (dias)	r02 (mg/L.h)	r02 (mg/L.d)	Ln (r02)
Replica A	Med 1a	0.00	6.6019	158.45	5.065
	Med 2	0.96	4.0472	97.13	4.576
	Med 3	1.92	3.1228	74.95	4.317
	Med 4	2.88	2.8841	69.22	4.237
	Med 5	3.83	2.3997	57.59	4.053
	Med 6	4.79	2.3085	55.40	
	Med 7	5.75	2.3702	56.88	
Replica B	Med 1b	0.00	5.4087	129.81	4.866
	Med 2b	0.96	3.8443	92.26	4.525
	Med 3b	1.92	3.068	73.63	4.299
	Med 4b	2.88	2.8803	69.13	4.236
	Med 5b	3.83	2.1412	51.39	3.939
	Med 6b	4.79	2.6764	64.23	
	Med 7b	5.75	2.537	60.89	



YS5a	b'H prim (dia - 1)	bH ASM1	Rsq	Calculo bH vs bH Prim.
	0.235	0.61	91.7%	1-yH (1-fp) = 0.3836
	fp = 0.08 yH = 0.67			

bH2 a 20 grados

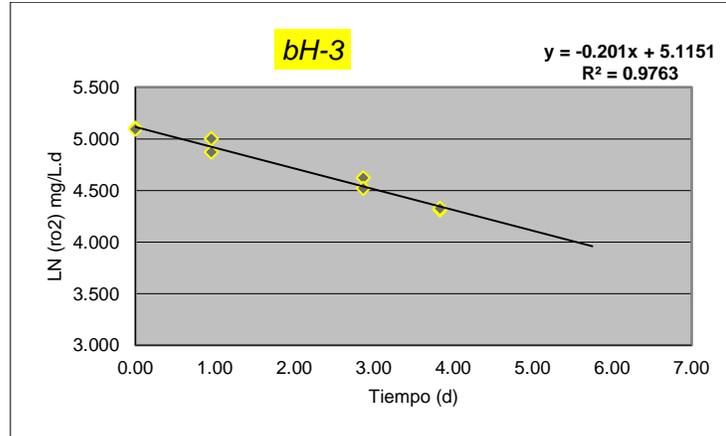
			por hora	por dia	mg/L.d	mg/L.d
	RUN	T (dias)	r02 (mg/L.h)	r02 (mg/L.d)	Ln (r02)	Ln (r02)
Replica A	Med 1a	0.00	8.2188	197.25	5.284	5.284
	Med 2	0.96	3.4517	82.84	4.417	
	Med 3	1.91	3.1555	75.73	4.327	
	Med 4	2.87	4.7492	113.98	4.736	4.736
	Med 5	3.81	4.1338	99.21	4.597	4.597
	Med 6	4.79	2.2538	54.09	3.991	3.991
	Med 7	5.75	2.4883	59.72	4.090	
Replica B	Med 1b	0.00	6.7129	161.11	5.082	5.082
	Med 2b	0.96	3.6442	87.46	4.471	
	Med 3b	1.91	3.0127	72.30	4.281	
	Med 4b	2.87	3.3803	81.13	4.396	4.396
	Med 5b	3.81	3.1246	74.99	4.317	4.317
	Med 6b	4.79	2.0596	49.43	3.901	3.901
	Med 7b	5.75	2.6588	63.81	4.156	



YS5a	b'H prim (dia - 1)	bH ASM1	Rsqr	Calculo bH vs bH Prim.
	0.239	0.62	91.7%	1-γH (1-fp) = 0.3836
	fp = 0.08 γH = 0.67			

bH3 a 20 grados

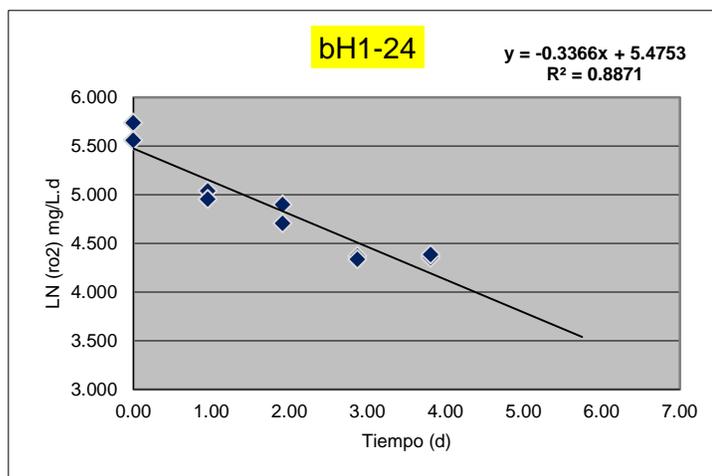
			por hora	por dia	mg/L.d	mg/L.d
	RUN	T (dias)	r02 (mg/L.h)	r02 (mg/L.d)	Ln (r02)	Ln (r02)
Replica A	Med 1a	0.00	6.8455	164.29	5.102	5.102
	Med 2	0.96	6.1835	148.40	5.000	5.000
	Med 3	1.92	6.6199	158.88	5.068	
	Med 4	2.87	4.2318	101.56	4.621	4.621
	Med 5	3.83	3.1038	74.49	4.311	4.311
	Med 6	4.79	3.425	82.20	4.409	
	Med 7	5.75		0.00		
Replica B	Med 1b	0.00	6.7859	162.86	5.093	5.093
	Med 2b	0.96	5.439	130.54	4.872	4.872
	Med 3b	1.92	5.5758	133.82	4.896	
	Med 4b	2.87	3.8222	91.73	4.519	4.519
	Med 5b	3.83	3.147	75.53	4.325	4.325
	Med 6b	4.79	3.061	73.46	4.297	
	Med 7b	5.75		0.00		



YS5a	b'H prim (dia - 1)	bH ASM1	Rsqr	Calculo bH vs bH Prim.
	0.201	0.52	91.7%	1-yH (1-fp) = 0.3836
	fp = 0.08 yH = 0.67			

bH1 a 24 grados

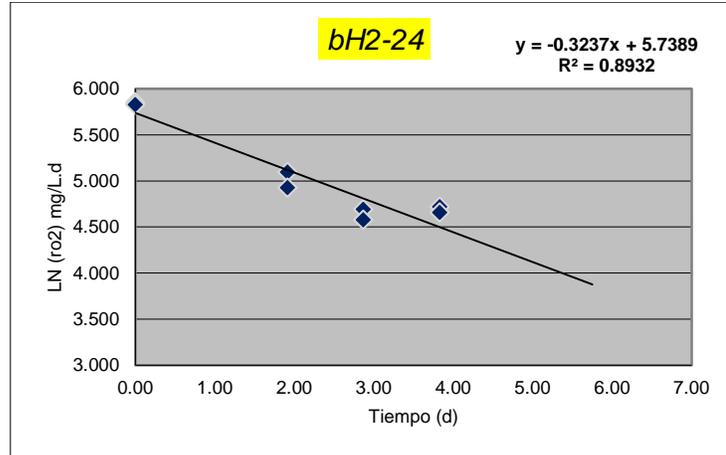
			por hora	por dia	mg/L.d	mg/L.d
	RUN	T (dias)	r02 (mg/L.h)	r02 (mg/L.d)	Ln (r02)	Ln (r02)
Replica A	Med 1a	0.00	12.943	310.63	5.739	5.739
	Med 2	0.96	6.4157	153.98	5.037	5.037
	Med 3	1.92	5.5756	133.81	4.896	4.896
	Med 4	2.87	3.2818	78.76	4.366	4.366
	Med 5	3.81	3.2296	77.51	4.350	4.350
	Med 6	4.79	3.4638	83.13	4.420	
	Med 7	5.75	3.3465	80.32	4.386	
Replica B	Med 1b	0.00	10.804	259.30	5.558	5.558
	Med 2b	0.96	5.8884	141.32	4.951	4.951
	Med 3b	1.92	4.6037	110.49	4.705	4.705
	Med 4b	2.87	3.1779	76.27	4.334	4.334
	Med 5b	3.81	3.3378	80.11	4.383	4.383
	Med 6b	4.79	4.1565	99.76	4.603	
	Med 7b	5.75	4.3885	105.32	4.657	



YS5a	b'H prim (dia - 1)	bH ASM1	Rsqr	Calculo bH vs bH Prim.
	0.336	0.88	91.7%	1-yH (1-fp) = 0.3836
	fp = 0.08 yH = 0.67			

bH2 a 24 grados

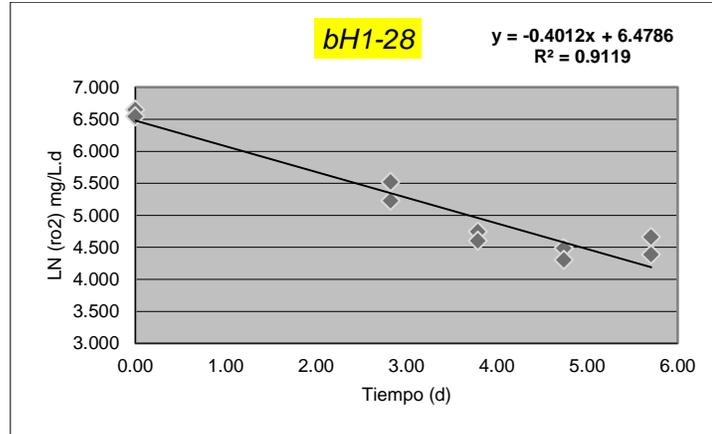
			por hora	por dia	mg/L.d	mg/L.d
	RUN	T (dias)	r02 (mg/L.h)	r02 (mg/L.d)	Ln (r02)	Ln (r02)
Replica A	Med 1a	0.00	14.492	347.81	5.852	5.852
	Med 2	0.96	6.806	163.34	5.096	
	Med 3	1.92	6.7902	162.96	5.094	5.094
	Med 4	2.87	4.5393	108.94	4.691	4.691
	Med 5	3.83	4.6616	111.88	4.717	4.717
	Med 6	4.79	3.9545	94.91	4.553	
	Med 7	5.75		0.00		
Replica B	Med 1b	0.00	14.121	338.90	5.826	5.826
	Med 2b	0.96	6.4191	154.06	5.037	
	Med 3b	1.92	5.7329	137.59	4.924	4.924
	Med 4b	2.87	4.0418	97.00	4.575	4.575
	Med 5b	3.83	4.3796	105.11	4.655	4.655
	Med 6b	4.79	4.0257	96.62	4.571	
	Med 7b	5.75		0.00		



YS5a	b'H prim (dia - 1)	bH ASM1	Rsq	Calculo bH vs bH Prim.
	0.324	0.84	91.7%	1-yH (1-fp) = 0.3836
	fp = 0.08 yH = 0.67			

bH1 a 28 grados

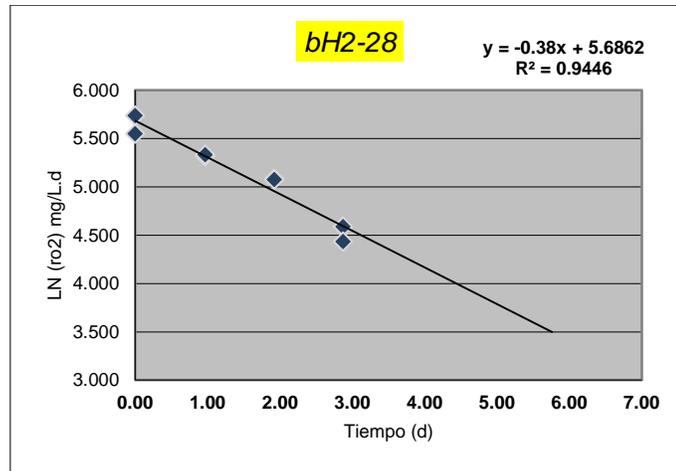
	RUN	T (dias)	por hora	por dia	mg/L.d	mg/L.d
			r02 (mg/L.h)	r02 (mg/L.d)	Ln (r02)	Ln (r02)
Replica A	Med 1a	0.00	32.101	770.42	6.647	6.647
	Med 2	0.96	4.0044	96.11	4.565	
	Med 3	1.91	6.4597	155.03	5.044	
	Med 4	2.83	10.367	248.81	5.517	5.517
	Med 5	3.79	4.775	114.60	4.741	4.741
	Med 6	4.74	3.6892	88.54	4.483	4.483
	Med 7	5.71	3.3465	80.32	4.386	4.386
Replica B	Med 1b	0.00	28.833	691.99	6.540	6.540
	Med 2b	0.96	4.4252	106.20	4.665	
	Med 3b	1.91	3.7748	90.60	4.506	
	Med 4b	2.83	7.7532	186.08	5.226	5.226
	Med 5b	3.79	4.1317	99.16	4.597	4.597
	Med 6b	4.74	3.0652	73.56	4.298	4.298
	Med 7b	5.71	4.3885	105.32	4.657	4.657



YSSa	b'H prim (dia - 1)	bH ASM1	Rsq	Calculo bH vs bH Prim.	
	0.401	1.05	91.7%	1-yH (1-fp) =	0.3836
	fp = 0.08 yH = 0.67				

bH2 a 28 grados

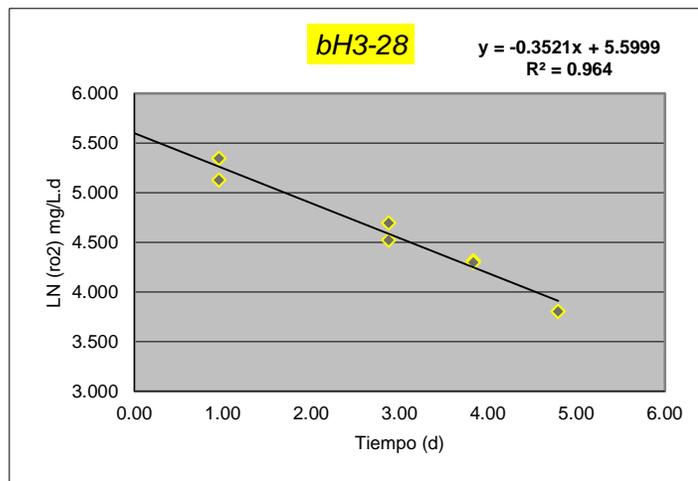
			por hora	por dia	mg/L.d	mg/L.d
	RUN	T (dias)	r02 (mg/L.h)	r02 (mg/L.d)	Ln (r02)	Ln (r02)
Replica A	Med 1a	0.00	12.929	310.30	5.738	5.738
	Med 2	0.97	8.477	203.45	5.315	5.315
	Med 3	1.92	6.6999	160.80	5.080	5.080
	Med 4	2.88	4.0862	98.07	4.586	4.586
	Med 5	3.84	4.2163	101.19	4.617	
	Med 6	4.79	4.7382	113.72	4.734	
	Med 7	5.76	4.7255	113.41	4.731	
Replica B	Med 1b	0.00	10.693	256.63	5.548	5.548
	Med 2b	0.97	8.6063	206.55	5.331	5.331
	Med 3b	1.92	6.6671	160.01	5.075	5.075
	Med 4b	2.88	3.5077	84.18	4.433	4.433
	Med 5b	3.84	3.7576	90.18	4.502	
	Med 6b	4.79	4.2389	101.73	4.622	
	Med 7b	5.76	4.2637	102.33	4.628	



YS5a	b'H prim (dia - 1)	bH ASM1	Rsqr	Calculo bH vs bH Prim.	
	0.380	0.99	91.7%	1-yH (1-fp) =	0.3836
	fp = 0.08 yH = 0.67				

bH3 a 28 grados

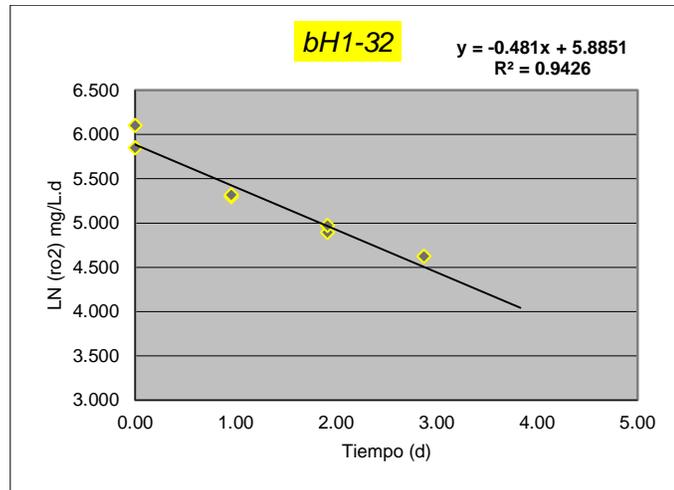
			por hora	por dia	mg/L.d	mg/L.d
	RUN	T (dias)	r02 (mg/L.h)	r02 (mg/L.d)	Ln (r02)	Ln (r02)
Replica A	Med 1a	0.00	9.1054	218.53	5.387	
	Med 2	0.96	8.734	209.62	5.345	5.345
	Med 3	1.91	8.9634	215.12	5.371	
	Med 4	2.88	4.5583	109.40	4.695	4.695
	Med 5	3.84	3.1167	74.80	4.315	4.315
	Med 6	4.79	3.0885	74.12	4.306	
	Med 7	0.00	0	0.00		
Replica B	Med 1b	0.00	8.1834	196.40	5.280	
	Med 2b	0.96	7.0259	168.62	5.128	5.128
	Med 3b	1.91	8.4291	202.30	5.310	
	Med 4b	2.88	3.8334	92.00	4.522	4.522
	Med 5b	3.84	3.0674	73.62	4.299	4.299
	Med 6b	4.79	1.8692	44.86	3.804	3.804
	Med 7b	0.00	0	0.00		



YS5a	b'H prim (dia - 1)	bH ASM1	Rsq	Calculo bH vs bH Prim.
	0.352	0.92	91.7%	1-yH (1-fp) = 0.3836

bH1 a 32 grados

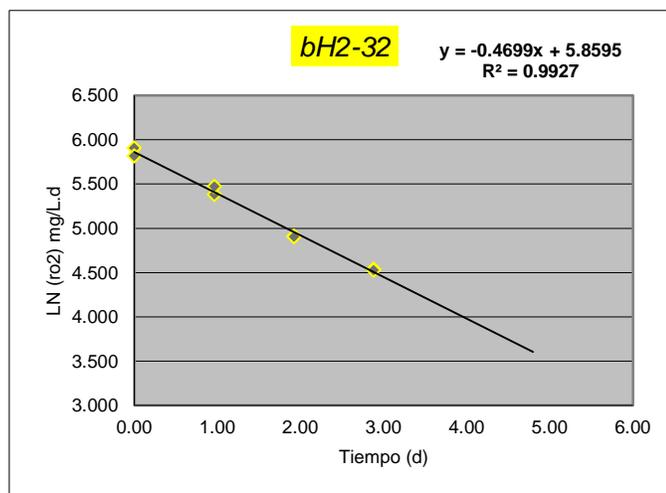
			por hora	por dia	mg/L.d	mg/L.d
	RUN	T (dias)	r02 (mg/L.h)	r02 (mg/L.d)	Ln (r02)	Ln (r02)
Replica A	Med 1a	0.00	18.604	446.50	6.101	6.101
	Med 2	0.96	8.3152	199.56	5.296	5.296
	Med 3	1.92	5.5586	133.41	4.893	4.893
	Med 4	2.88	4.2774	102.66	4.631	
	Med 5	3.83	4.0664	97.59		
	Med 6	0.00	0	0.00		
	Med 7	0.00	0	0.00		
Replica B	Med 1b	0.00	14.441	346.58	5.848	5.848
	Med 2b	0.96	8.4829	203.59	5.316	5.316
	Med 3b	1.92	6.0024	144.06	4.970	4.970
	Med 4b	2.88	4.2438	101.85	4.624	4.624
	Med 5b	3.83	3.4655	83.17	4.421	
	Med 6b	0.00	0	0.00		
	Med 7b	0.00	0	0.00		



YS5a	b'H prim (dia - 1)	bH ASM1	Rsqr	Calculo bH vs bH Prim.
	0.481	1.25	91.7%	1-yH (1-fp) = 0.3836

bH2 a 32 grados

			por hora	por dia	mg/L.d	mg/L.d
	RUN	T (dias)	r02 (mg/L.h)	r02 (mg/L.d)	Ln (r02)	Ln (r02)
Replica A	Med 1a	0.00	15.306	367.34	5.906	5.906
	Med 2	0.97	9.0671	217.61	5.383	5.383
	Med 3	1.92	5.6613	135.87	4.912	4.912
	Med 4	2.88	3.8884	93.32	4.536	4.536
	Med 5	3.84	3.7251	89.40	4.493	
	Med 6	4.80	3.7111	89.07	4.489	
	Med 7	0.00	0	0.00		
Replica B	Med 1b	0.00	13.993	335.83	5.817	5.817
	Med 2b	0.97	9.9011	237.63	5.471	5.471
	Med 3b	1.92	5.6058	134.54	4.902	4.902
	Med 4b	2.88	3.844	92.26	4.525	4.525
	Med 5b	3.84	4.0105	96.25	4.567	
	Med 6b	4.80	3.6779	88.27	4.480	
	Med 7b	0.00	0	0.00		



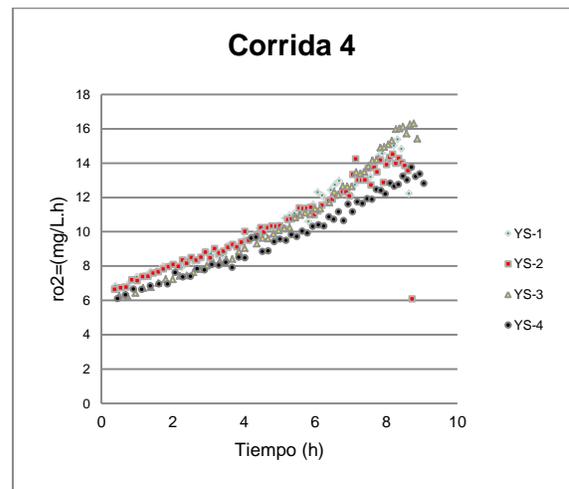
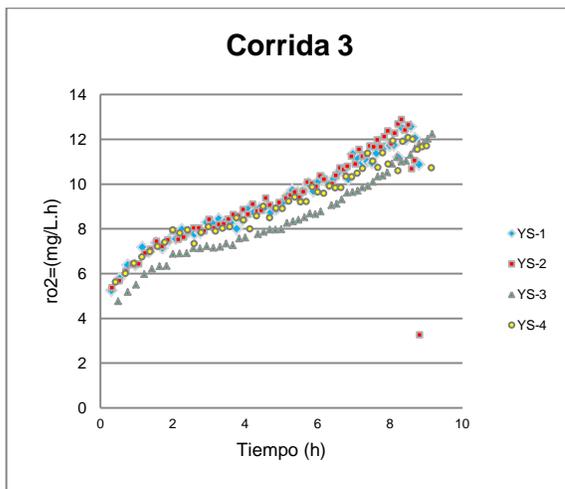
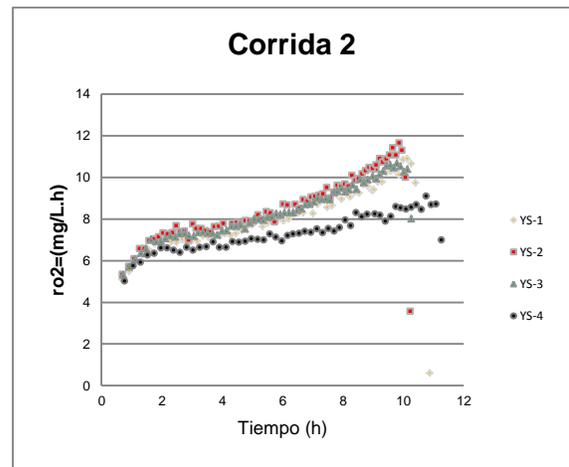
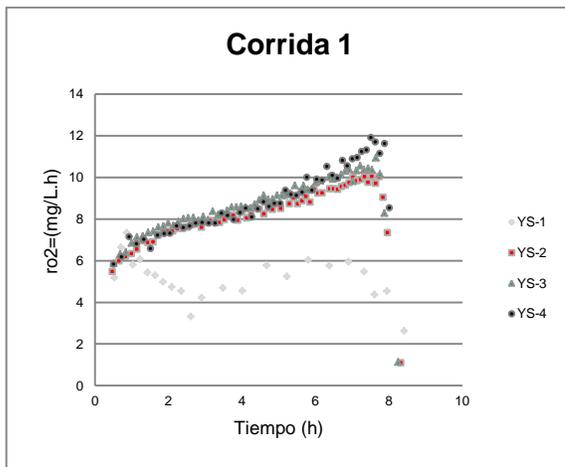
YS5a	b'H prim (dia - 1)	bH ASM1	Rsq	Calculo bH vs bH Prim.
	0.470	1.22	99.3%	1-yH (1-fp) = 0.3836

**ANEXOS D GRAFICAS Y
TABLAS DE μH_{max} POR EL
METODO DE KAPPELER Y
GUJER**

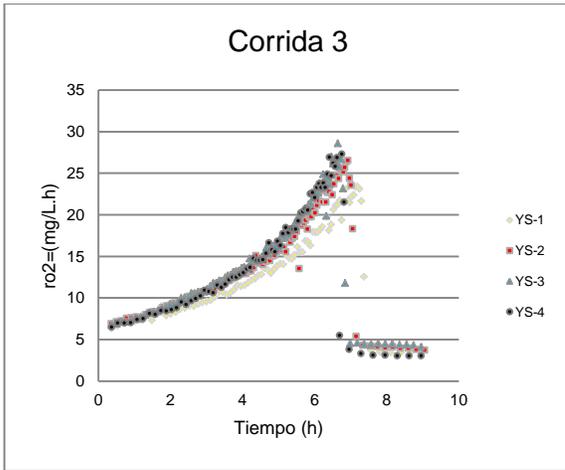
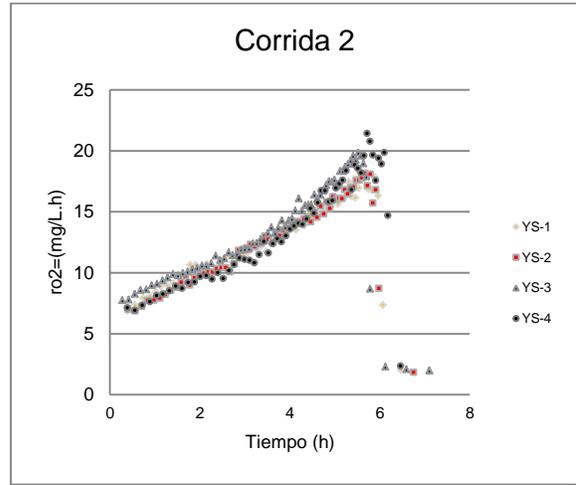
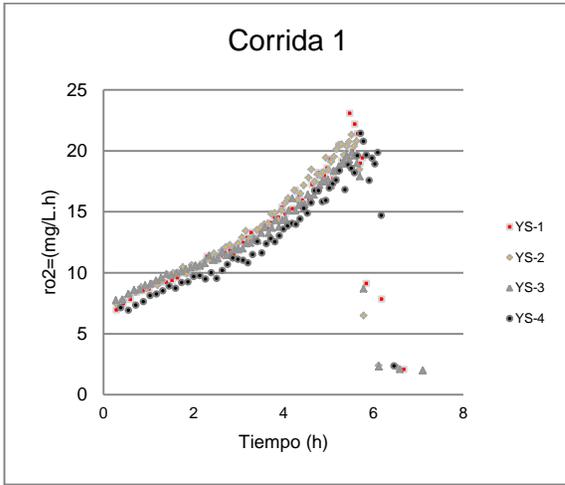
Graficas de los resultados de la pruebas de la tasa máxima de crecimiento heterótrofo μH_{max} por el método de Kappeler y Gujer

YS-1, YS-2, YS-3 y YS-4 son las sondas de O_2 utilizadas para replicar el experimento en 4 reactores al mismo tiempo.

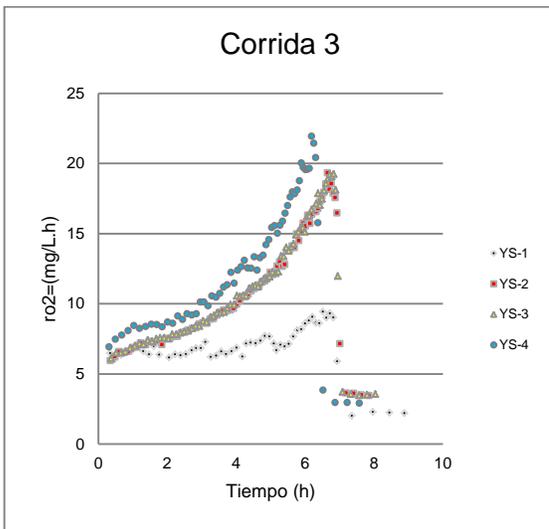
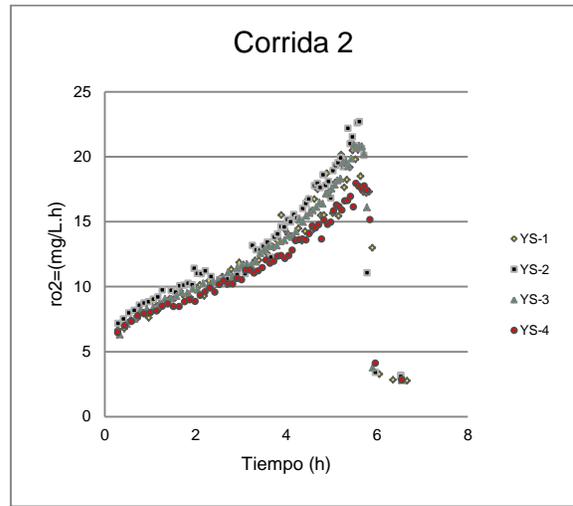
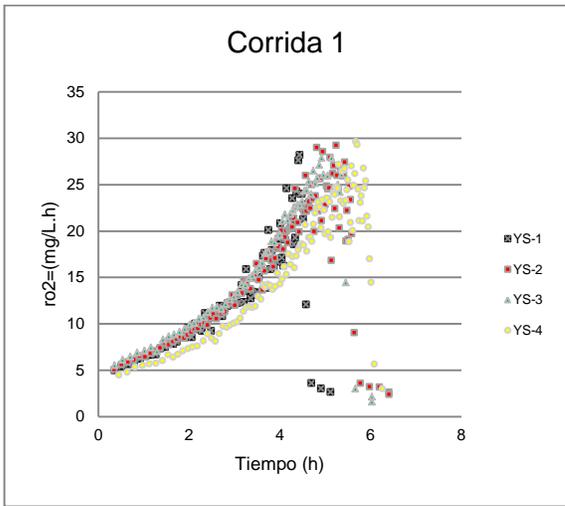
Graficas del método de crecimiento de μH_{max} a $16^\circ C$.



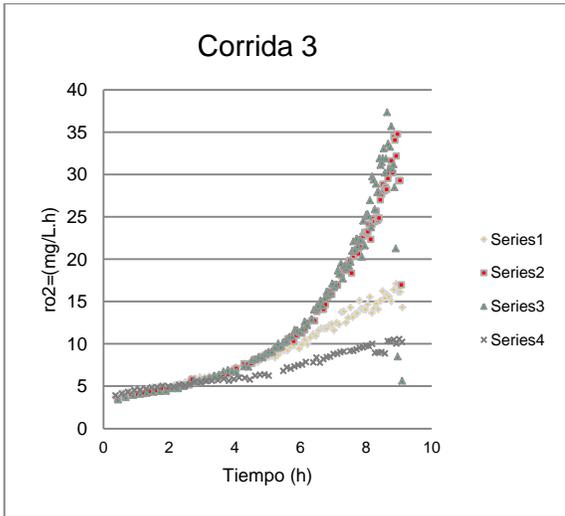
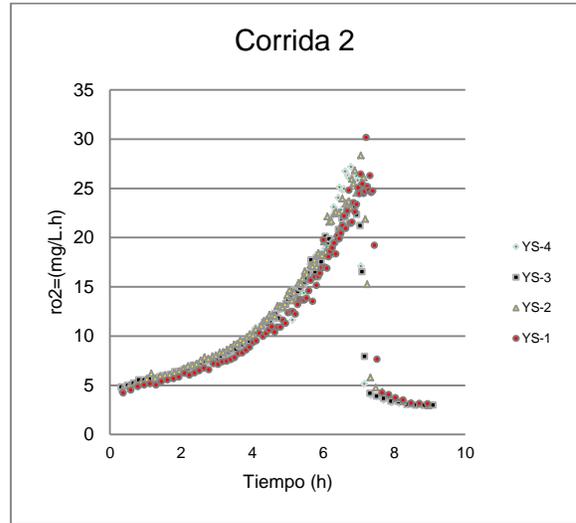
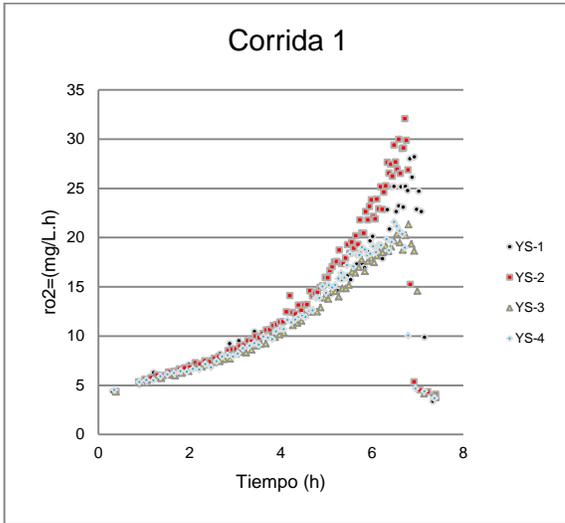
Graficas del método de crecimiento de la μH_{max} a $20^\circ C$.



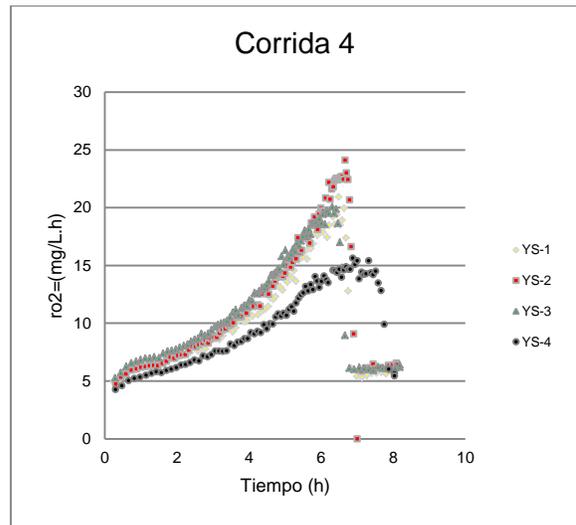
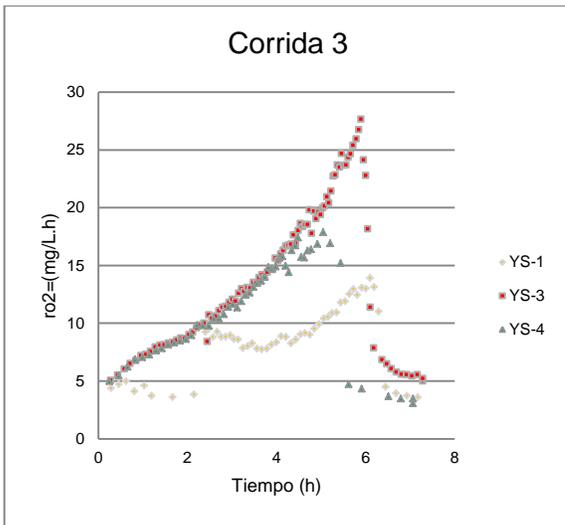
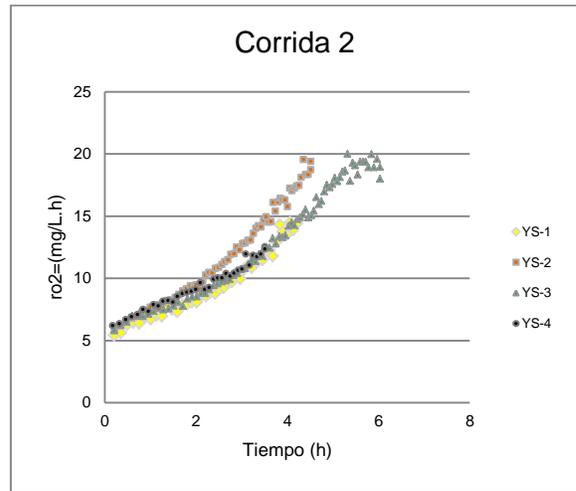
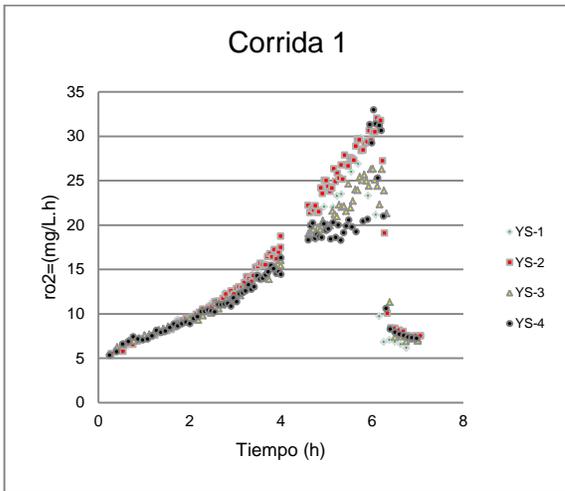
Graficas del método de crecimiento de $\mu H-max$ a 24°C.



Graficas del método de crecimiento de $\mu H-max$ a 28°C.



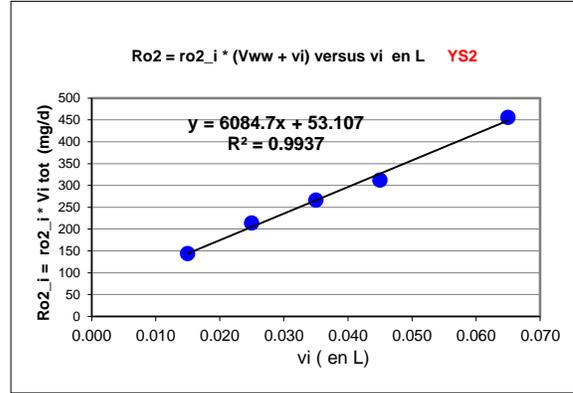
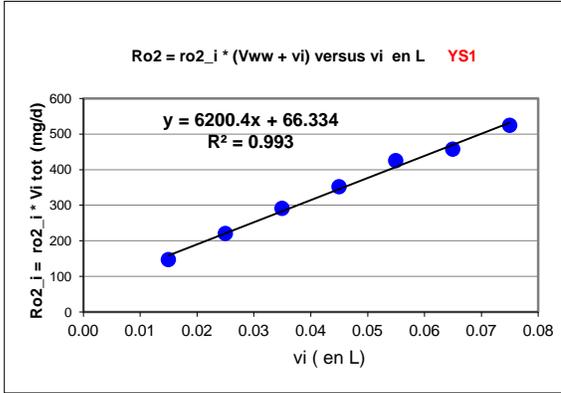
Graficas del método de crecimiento de μH_{max} a 32°C.



**ANEXOS E GRAFICAS Y
TABLAS DE μH_{max} POR EL
METODO INCREMENTO DE
SEMILLAS (IS)**

Graficas de los resultados del método de Incremento de semillas (I.S.)

Ejemplo del cálculo por el método (IS) a 16°C.

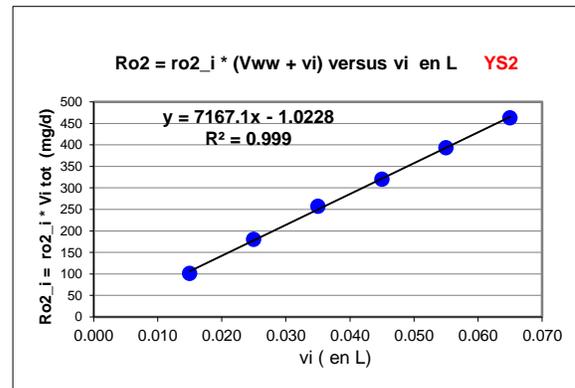
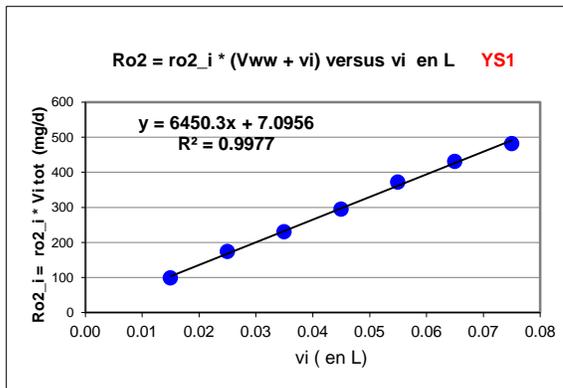
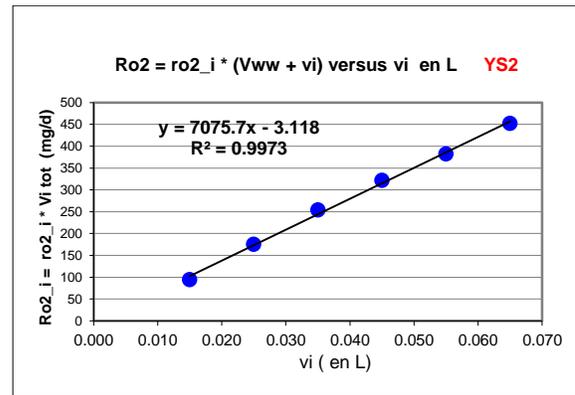
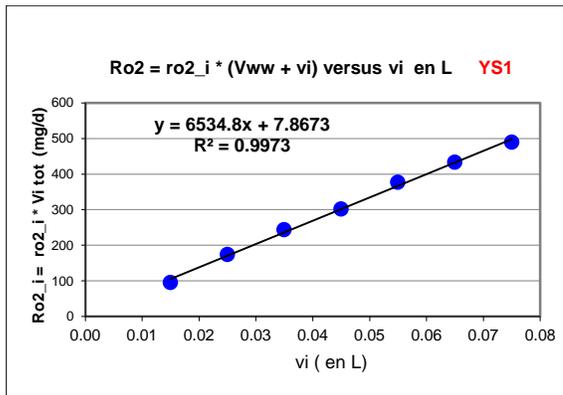


Calculo de la μH_{max} por el método de IS a 16°C

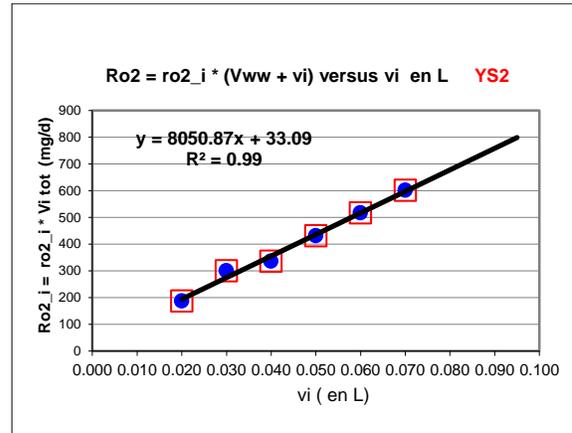
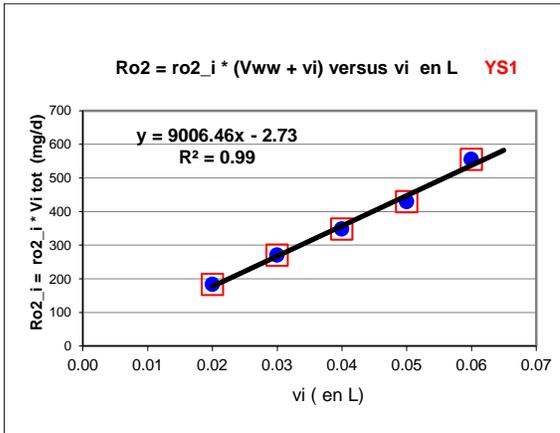
b'H prim (16°C)	0.08	d-1
f'p prim	0.2	
ro2 ini YS-5a	5.3	mg/L.h
ro2 ini YS-5b	4.1	mg/L.h
	4.70	
Xho_mL YS-5a	2120	
Xho_mL YS-5b	1637	
Promedio		
Xho_ML1	1878	mg/LDQO licor ML1_mu
	1	Std DEV

	Pendiente K = (1- yh/yh)*uHmax*Xho_ML	Intercepto C = (1- yh/yh)*uHmax*Xho_ww*Vww	1-yh/yh		Si Xho_ML 1878	
Ys1	6200.40	66.33	0.49254	Ys1	uHmax 6.7	Xho_ww 28.7
Ys2	6084.70	53.11		Ys2	6.6	23.4
Ys3	6726.80	73.96		YS3	7.3	29.5
	mg/L.d	mg/d			d-1	mg/L
					promedio	promedio
			20°C		6.9	27.2
					StdD	StdD
					0.4	3.3

Graficas de incremento por el método (IS) a 16°C.



Ejemplo del cálculo por el método (IS) a 20°C.

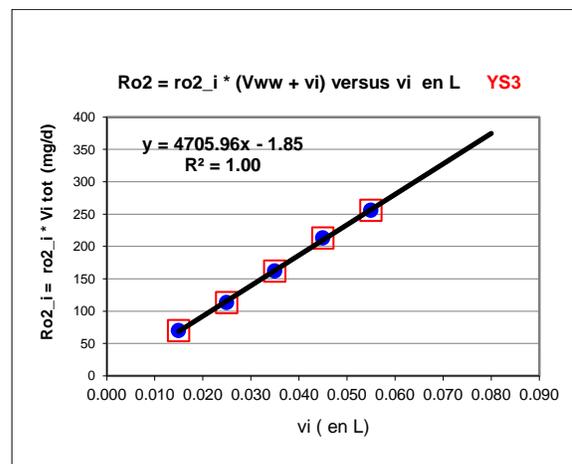
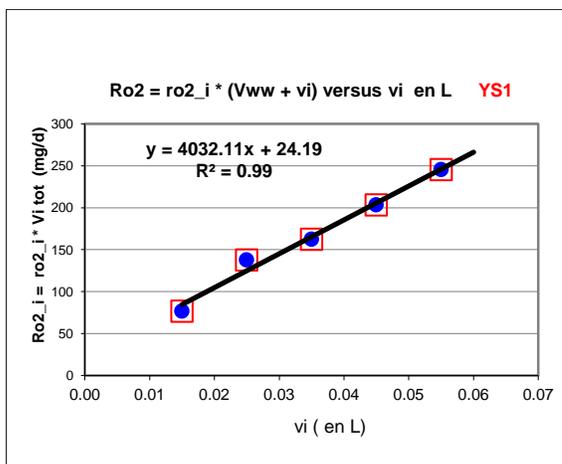
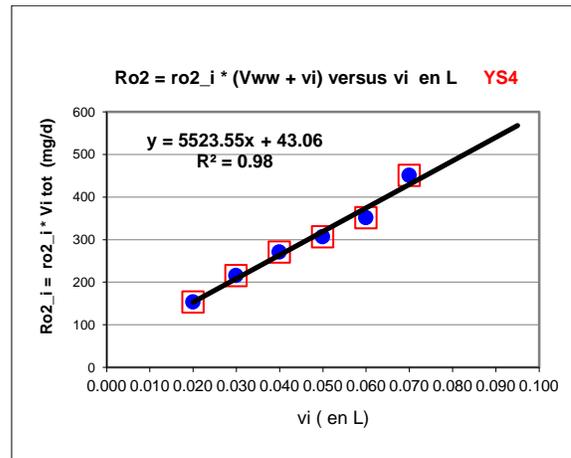
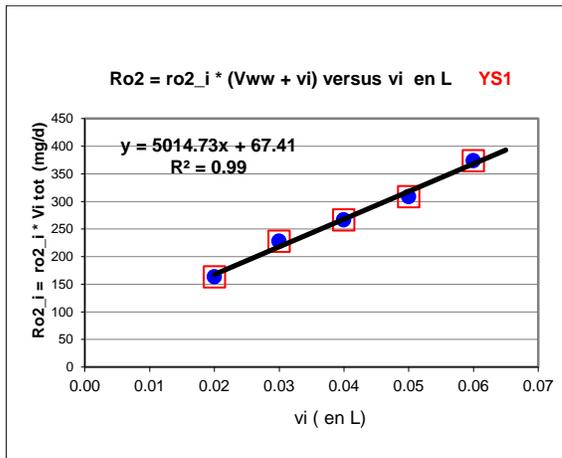


Calculo de la μH_{max} por el método de IS a 20°C

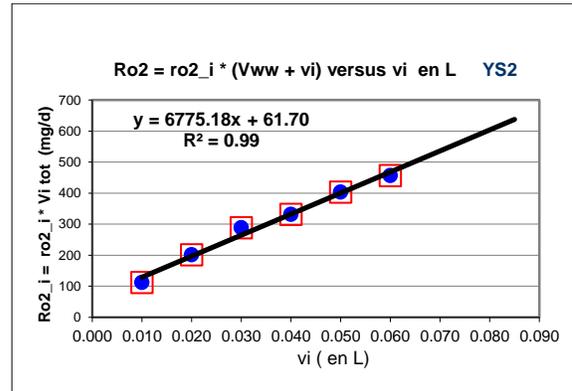
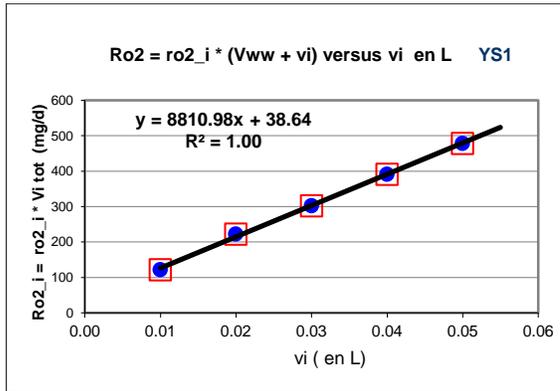
b'H prim (20°C)	0.27	d-1
f'p prim	0.2	
ro2 ini YS-5a	9.1	mg/L.h
ro2 ini YS-5b	8.3	mg/L.h
	8.73	
Xho_mL YS-5a	1023	
Xho_mL YS-5b	937	
Promedio	980	mg/LDQO
Xho_ML1		licor ML1_mu
	1	Std DEV

	Pendiente K = (1 - y _h /y _h) * uH _{max} * X _{ho_M} L	Intercepto C = (1 - y _h /y _h) * uH _{max} * X _{ho_ww} * V _w w	1 - y _h /y _h		Si Xho_ML 980	
Ys1	9006.46	2.73	0.49254	Ys1	uH _{max}	Xho_ww
Ys2	8050.87	33.09		Ys2	16.7	5.8
Ys3	8097.00	12.04		YS3	16.8	2.1
	mg/L.d	mg/d			d-1	mg/L
					promedio	promedio
				20°C	16.7	3.9
					StdD	StdD
					0.1	2.6

Graficas de incremento por el método (IS) a 20°C.



Ejemplo del cálculo por el método (IS) a 24°C.

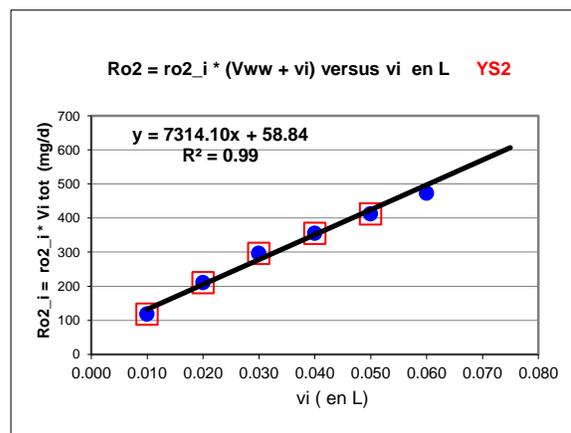
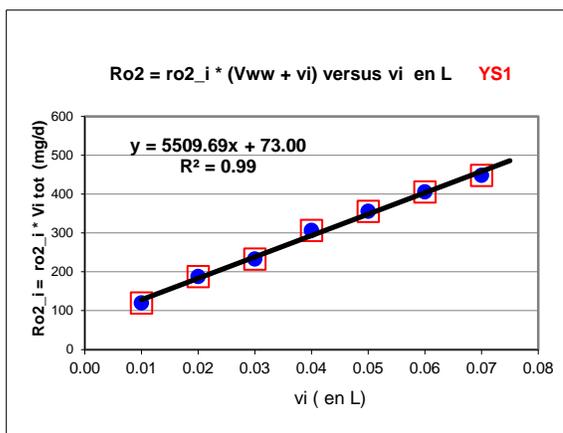
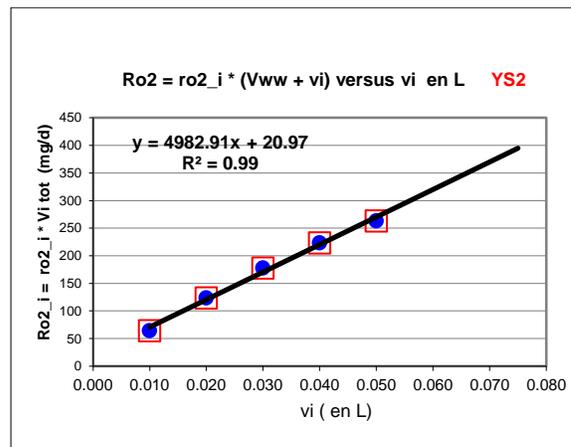
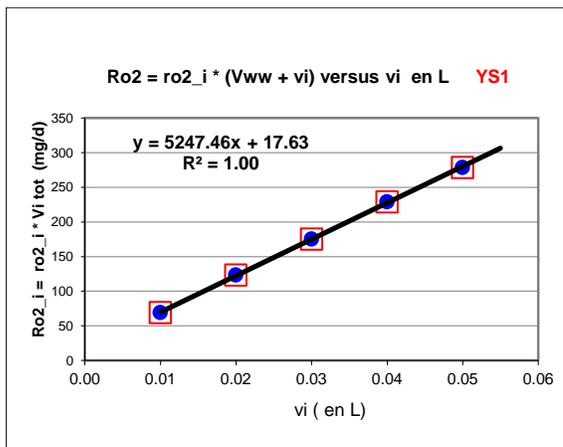


Calculo de la μH_{max} por el método de IS a 24°C

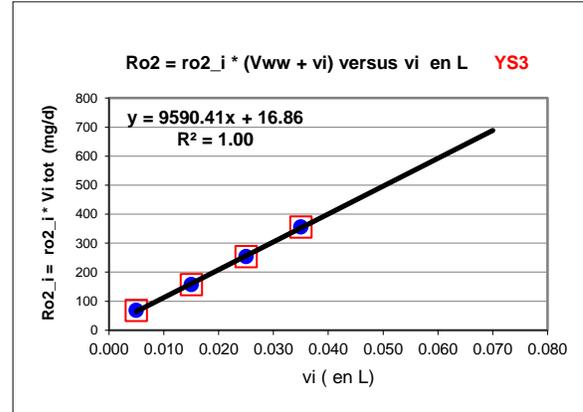
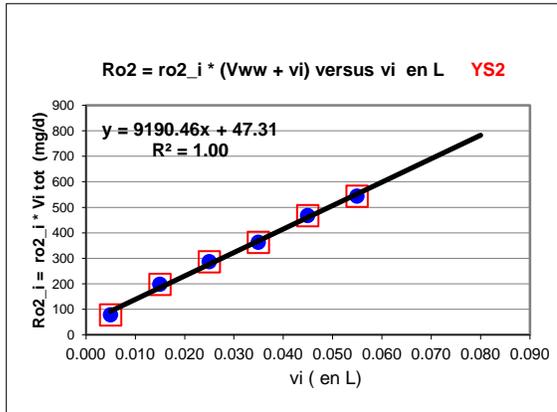
b'H prim (24°C)	0.32	d-1
f'p prim	0.2	
ro2 ini YS-5a	12.0	mg/L.h
ro2 ini YS-5b	11.3	mg/L.h
	11.66	
Xho_mL YS-5a	1121	
Xho_mL YS-5b	1058	
Promedio		
Xho_ML1	1089	mg/LDQO
		licor ML1_mu
	0	Std DEV

	Pendiente K $= (1 - \frac{y_h}{y_h}) * uH_{max} * Xho_ML$	Intercepto C $= (1 - \frac{y_h}{y_h}) * uH_{max} * Xho_ww * Vww$	$1 - \frac{y_h}{y_h}$		Si Xho_ML	
Ys1	8810.98	38.64	0.49254	Ys1	1089	uHmax
Ys2	6775.18	61.70		Ys2		Xho_ww
Ys3	9242.64	28.63		YS3		
	mg/L.d	mg/d				d-1
						promedio
				20°C		promedio
						StdD
						StdD

Graficas de incremento por el método (IS) a 24°C.



Ejemplo de cálculo por el método (IS) a 28°C.

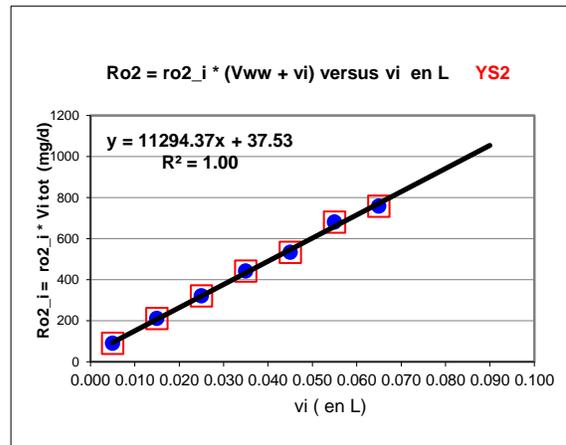
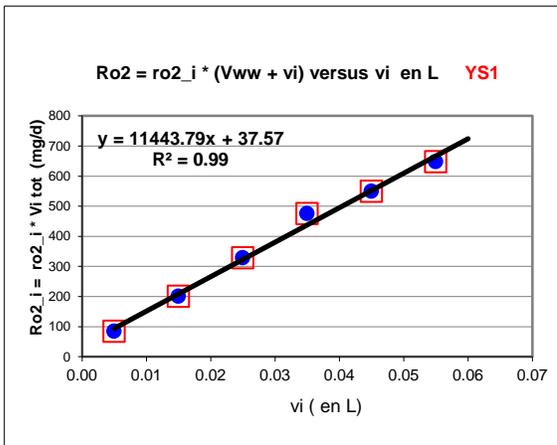
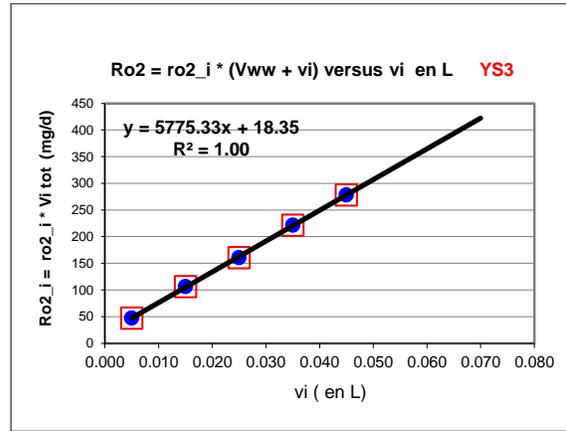
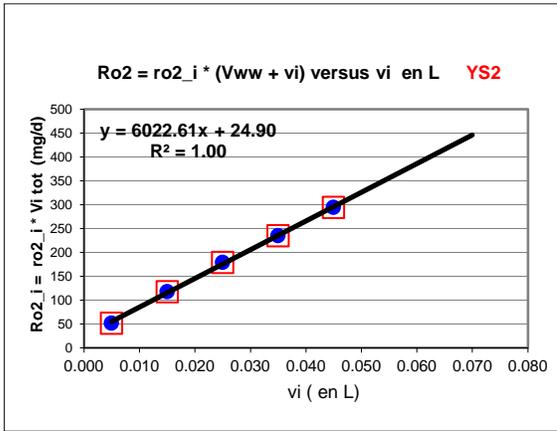


Calculo de la μH_{max} por el método de IS a 28°C

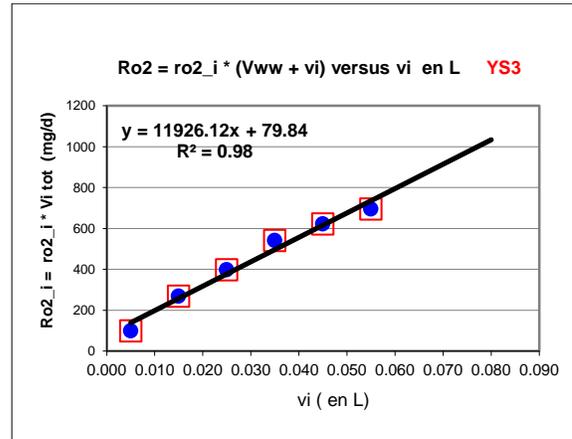
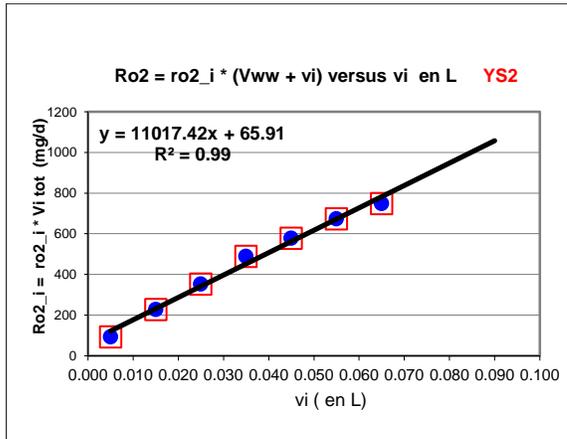
b´H prim (28°C)	0.41	d-1
f´p prim	0.2	
ro2 ini YS-5a	17.8	mg/L.h
ro2 ini YS-5b	14.3	mg/L.h
	16.03	
Xho_mL YS-5a	1290	
Xho_mL YS-5b	1039	
Promedio Xho_ML1	1164	mg/LDQO licor ML1_mu
	2	Std DEV

	Pendiente K $= (1 - y_h/y) * uH_{max} * Xho_M / L$	Intercepto C $= (1 - y_h/y) * uH_{max} * Xho_{ww} * V_{ww} / 1 - y_h/y$		Si Xho_ML	
Ys1	9542.46	29.87	0.42857	1164	uHmax
Ys2	9190.46	47.31			Xho_ww
Ys3	9590.41	16.86			
Ys4	8154.29	47.76			
	mg/L.d	mg/d			d-1
					promedio
20°C				18.9	5.6
				StdD	StdD
				0.4	2.8

Graficas de incremento por el método (IS) a 28°C.



Ejemplo de cálculo por el método (IS) a 32°C.



Calculo de la μH_{max} por el método de IS a 32°C

b'H prim (32°C)	0.48	d-1
f'p prim	0.2	
ro2 ini YS-5a	42.3	mg/L.h
ro2 ini YS-5b	43.1	mg/L.h
	42.68	
Xho_mL YS-5a	2671	
Xho_mL YS-5b	2720	
Promedio Xho_ML1	2696	mg/LDQO
		licor ML1_mu
	1	Std DEV

	Pendiente K = (1-yh/yh)*uHmax*Xho_M L	Intercepto C = (1-yh/yh)*uHmax*Xho_ww*Vw w	1-yh/yh	YS1	YS2	YS3	Si Xho_ML 2696	
YS1	13838.12	25.92	0.49254	YS1	10.4	7.2	uHmax	Xho_ww
YS2	11329.50	70.22		YS2	8.5	23.9		
YS3	8576.34	87.22		YS3				
	mg/L.d	mg/d					d-1	mg/L
							promedio	promedio
							9.5	15.5
							StdD	StdD
							1.3	11.8

mm

Graficas de incremento por el método (IS) a 32°C.

