



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIERREZ
SISTEMA MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILADO

Ingeniería Química

Reporte de residencia profesional:

**Evaluación de un proceso de lodos activados por medio de constantes
biocinéticas.**

Que presenta:

Kevin Ali Hernández Hernández

Asesor Interno:

Ing. Leonardo Gómez Gutiérrez

Asesores externos:

M.I. Martina Hernández Vázquez

Dra. Cristina Blanco González

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

1. Agradecimientos

Es de suma importancia expresar el agradecimiento a las siguientes personas e instituciones que han contribuido de manera significativa a la realización de este estudio.

En primer lugar, agradecemos a M.I. Martina Hernández Vázquez, por su orientación, apoyo y conocimientos expertos a lo largo de todo el proceso. Sus valiosas sugerencias y comentarios han sido fundamentales para el éxito de este proyecto.

Asi mismo, agradecer a la Dr. Cristina Blanco González y Dr. Josué Chanona Soto por su colaboración y por proporcionarnos acceso a los recursos y datos necesarios para llevar a cabo este estudio. Su ayuda ha sido invaluable y ha enriquecido enormemente nuestros hallazgos.

Además, extendemos nuestro agradecimiento a los participantes voluntarios que dedicaron su tiempo y esfuerzo para ser parte de este estudio. Sus contribuciones fueron esenciales para obtener los datos necesarios y su participación fue fundamental para el avance de la investigación.

No podemos dejar de mencionar a nuestras familias y amigos, quienes nos brindaron su apoyo incondicional y comprensión durante todo el proceso. Su aliento y motivación fueron vitales para superar los desafíos y obstáculos que encontramos en el camino.

Por último, agradecemos a las instituciones que respaldaron este proyecto de investigación, Sistema Municipal de Agua Potable y Alcantarillado, Universidad Politécnica de Chiapas e Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Su colaboración y apoyo ha hecho posible llevar a cabo este estudio y ha permitido el desarrollo de nuevos conocimientos en este campo.

Sin la contribución de todas estas personas e instituciones, este estudio no habría sido posible.

2. Resumen

En determinadas situaciones no es posible evaluar el proceso biológico con medidas físicas o químicas por lo que se necesita información directa de la biomasa, así como del efecto que causa sobre ella el agua residual a tratar.

Es por eso que por medio de técnicas respirométricas se busca obtener parámetros cinéticos y estequiométricos de la biomasa presente en la Planta de Aguas Residuales “Real del Bosque” que nos permitan conocer el estado del proceso de acuerdo a la actividad biológica en el lodo activado.

Contenido

1. Agradecimientos.....	2
2. Resumen.....	3
3. Introducción.....	6
4. Descripción de la empresa.....	7
5. Problemas a resolver.....	8
6. Objetivos generales.....	9
Objetivos específicos.....	9
7. Justificación.....	10
8. Marco teórico.....	11
Aguas residuales.....	11
Tratamiento de aguas residuales.....	12
Procesos de lodos activados.....	13
Metabolismo aerobio.....	14
Necesidades de nutrientes y de factores de crecimiento.....	17
Crecimiento bacteriano.....	17
Cinética del tratamiento biológico.....	19
Efectos del metabolismo endógeno.....	20
Modelo ASM 1 del proceso de lodos activados.....	21
Componentes del modelo ASM1.....	22
Procesos del modelo ASM1.....	23
Crecimiento aerobio de la biomasa heterótrofa.....	23
Crecimiento anóxico de los heterótrofos.....	24
Decaimiento de la biomasa heterótrofa.....	24
Hidrólisis de la materia orgánica.....	25

Respirométrica	25
9. Procedimiento y descripción de las actividades realizadas	27
Pretratamiento al agua residual	27
Pretratamiento al licor mezcla	27
Determinación de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)	28
Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)	28
Determinación de los parámetros cinéticos del crecimiento aerobio de las bacterias heterótrofas.	28
Determinación de Y_H , rendimiento de las bacterias heterótrofas.	29
Determinación del coeficiente de decaimiento b_H	30
10. Resultados	31
11. Conclusiones de proyecto	37
12. Competencias desarrolladas y/o aplicadas.....	38
13. Fuentes de información	39
14. Anexos	40

3. Introducción

El proceso de lodos activados es uno de los métodos más comunes utilizados para el tratamiento de aguas residuales. En México, existen 2,872 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales, de las cuales 818 tienen un proceso de lodos activados, lo que representa el 28.48%. (CONAGUA,2021)

Consiste en un proceso biológico que utiliza microorganismos para eliminar los contaminantes presentes en el agua residual, se basa en la activación de los microorganismos en una mezcla de lodo recirculado y aguas residuales dentro de un reactor biológico para eliminar la materia orgánica y otros contaminantes del agua residual.

Los parámetros biocinéticos son valores utilizados para describir la actividad biológica en un proceso de lodos activados. Estos parámetros muestran, por ejemplo, los requerimientos de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica presente por medio de los lodos biológicos, las constantes de velocidad de remoción de contaminantes, el sistema de aireación y la recirculación de lodos al biorreactor. (Delgadillo, 1999)

Por medio de técnicas respirométricas es posible obtener la tasa de consumo de oxígeno por las bacterias presentes en el lodo para oxidar la materia orgánica contenida en el agua residual, permitiendo determinar los parámetros biocinéticos de los microorganismos que intervienen en la biodegradación de los contaminantes presentes en el afluente.

Existen distintos modelos matemáticos para la aplicación y uso de este tratamiento, pero uno de los más aceptados por la comunidad científica es el modelo ASM1 ya que define los distintos procesos que se llevan a cabo dentro de la degradación y eliminación de materia orgánica, así como algunos otros nutrientes en las aguas residuales.

4. Descripción de la empresa

El **Sistema Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Tuxtla Gutiérrez (SMAPA)** es una empresa que proporciona el servicio de agua potable, alcantarillado y tratamiento de aguas residuales a toda persona física o moral dentro del Municipio de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. El SMAPA es un organismo descentralizado y tiene como objetivo garantizar el acceso al agua potable y saneamiento básico a la población.

El artículo 115, fracción III, inciso a), de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, señala que los municipios tendrán a su cargo los servicios públicos de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales.

Las aguas residuales que se generan dentro del área de cobertura de alcantarillado y saneamiento de Tuxtla Gutiérrez reciben un tratamiento, con la operación continua de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Paso Limón y Tucthlán, El Jobo, Copoya, Tres Marías, Real del Bosque y Emiliano Zapata.

Se ilustra el tratamiento de las aguas residuales de la PTAR Real del Bosque en la siguiente ilustración:

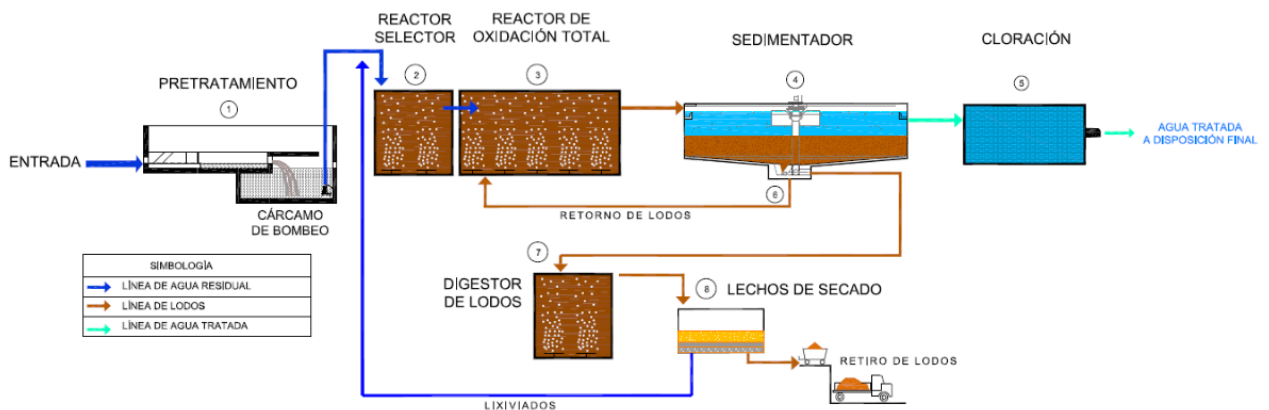


Ilustración 1. Tren de tratamiento PTAR "Real del Bosque"

5. Problemas a resolver

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Real del Bosque, tiene un proceso de lodos activados de aireación extendida, cuenta con 2 módulos con una capacidad de 28 L/s y 40 L/s, respectivamente. El módulo con capacidad de 40 L/s, presenta baja sedimentabilidad de los lodos, ocasionando una alta cama de lodos en el sedimentador, por lo que es necesario realizar una alimentación del agua residual alternada con la PTAR de 28 L/s, para evitar que los lodos pasen al Tanque de Cloración.

El presente trabajo, nos permitirá conocer las características metabólicas de los lodos activados de la PTAR, tal como el Rendimiento de la Biomasa Heterótrofa (Y_H), Velocidad Media de Crecimiento de la Biomasa Heterótrofa (K_s), Coeficiente de Decaimiento de la Biomasa Heterótrofa (b_H), utilizando la técnica respirométrica, con la que se generará información directa sobre la biomasa de los lodos activados, a través de la medición del consumo de oxígeno de los microorganismos que degradan la materia orgánica y la oxidan a CO_2 .

Lo anterior permitirá optimizar el proceso de tratamiento de la planta, determinando las necesidades reales de oxígeno para un agua residual.

6. Objetivos generales

Determinar parámetros biocinéticos en el proceso de lodos activados de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Real del Bosque con una capacidad de 40 L/s.

Objetivos específicos

- Instalar un montaje experimental para el desarrollo de pruebas respirométricas.
- Determinar parámetros cinéticos (K_s) y (b_H) mediante técnicas respirométricas.
- Determinar parámetros estequiométricos (Y_H) de las bacterias heterótrofas mediante técnicas respirométricas.

7. Justificación

Siempre se ha considerado el agua como un recurso sumamente vital para la subsistencia de una sociedad, y el aumento en la población exige un aumento en la demanda, es por lo que diversas instituciones comparten la misma misión; el ofrecer a la población el servicio centrándose tanto en su calidad como en su cantidad, mientras se concientiza a los usuarios del uso y la preservación del agua como un elemento indispensable en la vida.

El tratamiento de aguas residuales domésticas en Chiapas, es un problema que compete al desarrollo local sostenible, para el saneamiento de estas aguas han surgido una serie de tecnologías, brindando opciones en la elección de las mismas brindando así diferentes sistemas de tratamiento personalizado de acuerdo a las fuentes de contaminación y su concentración.

Sin embargo, uno de los tratamientos comúnmente utilizados en el tratamiento de aguas de origen urbano son los métodos biológicos por medio de lodos activados, ya que presentan una alta eficiencia en la remoción de materia orgánica.

No obstante, durante el proceso pueden presentarse fallas y alteraciones al sistema, debido a que se habla de un sistema que contiene microorganismos, éste suele ser muy sensible y en consecuencia alterable al presentarse una variación en la afluente. Es por eso, que se plantea la metodología por medio de respirometría para la determinación de parámetros biocinéticos y coeficiente estequiométrico con el fin de entender mejor a la población de microorganismos presentes en la planta de tratamiento de aguas residuales "Real del bosque".

Debido a que las medidas relacionadas únicamente con la naturaleza del agua o comportamiento físico no brindan datos decisivos para una caracterización completa del proceso es coherente considerar otros criterios de valoración, estos pueden ser los parámetros biocinéticos.

8. Marco teórico

Aguas residuales

(Metcalf & Eddy, 1995) define al agua residual como la fracción líquida desprendida por la comunidad una vez ha sido contaminada por sus diferentes y posteriormente se ha mezclado con aguas subterráneas, superficiales y pluviales.

Las aguas residuales se clasifican de acuerdo a su uso, explotación, su origen, puesto que este conjunto de líquidos y residuos que llegan al agua son variados, las características de este fluido serán específica de acuerdo a las actividades sociales, económicas, comerciales, así como el nivel de precipitación que presenta el área.

Es por eso que (Espigares Garcia M. & Perez Lopez, 1985) propone la siguiente clasificación de acuerdo a sus diversos orígenes:

- *Aguas residuales domesticas o aguas negras:* proceden de las heces y orinas humanas, aseo personal, cocina y limpieza de la casa. Suelen contener gran cantidad de materia orgánica y microorganismos, así como restos de jabones, detergentes, lejía y grasas.
- *Aguas blancas:* Pueden ser de procedencia atmosférica, ya sea lluvia, hielo o nieve en su caso, del riego y limpieza de calles, parques y lugares públicos. En aquellos lugares en las precipitaciones atmosféricas son muy abundantes pueden ser evacuadas por separado para no saturar los sistemas de depuración.
- *Aguas residuales industriales:* Proceden del procesamiento realizado en fábricas y establecimientos industriales, con cualquier actividad cuyo proceso productivo llevan a cabo una transformación o manipulación de la materia. Estas aguas suelen contener aceites, detergentes, ácidos grasos y otros productos de origen mineral, químico, vegetal o animal. Estas dependerán

de la actividad industrial realizada. Además, suelen presentar variaciones en cuanto a caudal y carga a lo largo del día.

- *Aguas residuales agrícolas*: proceden de las labores agrícolas en las zonas rurales. Estas aguas suelen participar, en cuanto a su origen, de las aguas urbanas utilizadas en numerosos lugares, para riego agrícola con o sin tratamiento previo. Debido a la utilización de pesticidas, fertilizantes y restos orgánicos de animales en este ámbito. Dentro de estos contaminantes se incluye sedimentos de las tierras de cultivo como compuestos de fósforo y nitrógeno de los residuos de animales y fertilizantes comerciales.

Las características del agua residual son exclusivas de la zona la cual es recolectada, ya que es dependiente del tamaño de su población, el saneamiento utilizado, el grado de industrialización y la incidencia de las aguas pluviales, de acuerdo con ello existen rangos de variación habituales, tanto para los caudales como de las características fisicoquímicas de estos vertidos. Este conjunto de datos es esencial para el correcto diseño de los sistemas de recogida, tratamiento y evacuación de estas.

Tratamiento de aguas residuales

El objetivo principal en la gestión del tratamiento del agua residual es la protección del medio ambiente por medio de medidas adecuadas a el entorno social, económico, cultural, es por eso que el grado de tratamiento requerido va a ser determinado de acuerdo a la normatividad y sus límites máximos de concentración de contaminantes contenidos en el efluente.

Los tratamientos biológicos de aguas residuales (reactores aeróbicos) aprovechan la capacidad de determinados microorganismos, de asimilar la materia orgánica y los nutrientes disueltos en el agua residual a tratar para su propio crecimiento,

llevando a cabo la separación de componentes solubles en el agua reduciendo el contenido de materia orgánica de las aguas, el contenido de nutrientes (conversión de sustancias inorgánicas) y eliminar los patógenos y parásitos. Esto se logra por medio de procesos con suministros de aire u oxígeno puro, en las cuales la materia orgánica e inorgánica es metabolizada por diferentes cepas bacterianas.

Las bacterias aeróbicas son aquellas que utilizan el oxígeno molecular disuelto presente en el agua, como insumo para la reacción bioquímica de oxidación, a través de la cual se logra estabilizar el sustrato (materia orgánica e inorgánica contaminante).

La materia orgánica soluble es asimilada por los microorganismos como fuente de carbono. Debido a esta operación se retira por decantación la biomasa generada del sobrenadante. Para el crecimiento de los microorganismos es necesario, aparte de la materia orgánica, la presencia de nitrógeno y fósforo en el efluente.

La aplicación tradicional consiste en la eliminación de materia carbonosa del agua residual, expresada como DBO, carbono orgánico total (COT), o demanda química de oxígeno DQO, nitrificación, desnitrificación, eliminación de fosforo y estabilización de lodos. (Metcalf & Eddy, 1995)

Procesos de lodos activados

El lodo activado consiste en el desarrollo de un cultivo bacteriano disperso en forma de flóculos en un depósito agitado, aireado y alimentado con el agua residual, que es capaz de metabolizar como nutrientes los contaminantes biológicos presentes en esa agua. (Alpirez, y otros, 2017)

Desde un punto de vista el funcionamiento del tratamiento biológico por medio de lodos activados se lleva a cabo mediante la adición de un residuo orgánico dentro de un reactor, donde se mantiene un cultivo microbiológico aerobio, conocido como licor mezcla.

En el licor mezcla por medio de la agitación y aireación los microorganismos se encargan de la oxidación y degradación de la materia orgánica. Después de la acción de este conjunto de bacterias se realiza una sedimentación para la separación de flóculos dentro del agua, sin embargo, para mantener una adecuada concentración de microorganismo dentro del reactor se realiza una recirculación de parte de los fangos sedimentados.

Diferentes microorganismos pueden utilizar una amplia gama de aceptores de electrones, incluyendo oxígeno, nitrito, nitratos de hierro (III), sulfato, compuestos orgánicos, y dióxido de carbono.

Es de suma importancia el esquema del metabolismo bacteriano, ya que es el medio por el cual todos estos agentes degradadores de contaminantes generan su necesidades energéticas y producción de carbono.

En sistemas biológicos de depuración los microorganismos intervienen en múltiples procesos, entre ellos, la degradación de la materia orgánica por vía aerobia en la oxidación y síntesis de materia orgánica nueva, sin embargo, también tienen un papel fundamental en procesos de descomposición anaerobia, como en la desnitrificación.

Los microorganismos obtienen el carbono para el crecimiento celular por medio de materia orgánica o dióxido de carbono. Lo organismos heterótrofos utilizan carbono orgánico para la formación de nueva biomasa, mientras que los microorganismos que derivan de células de carbono a partir de dióxido de carbono se llaman autótrofos, son aquellos con la capacidad de sintetizar biomasa a partir de sustancias inorgánicas.

Según (Metcalf & Eddy, 1995) los géneros de bacterias que intervienen en el proceso de lodos activados son pseudomonas, zoogloe, achromobacter, flavobacterium, nocardia, mycobacterium y las nitrificantes que son nitrosomas y Nitrobacter. Las cuales su crecimiento optimo se encuentra en condiciones de pH entre 6.5 y 7.5 unidades.

Metabolismo aerobio

La descomposición de la materia orgánica por vía aerobia se divide en tres fases principales: la hidrólisis de las moléculas orgánicas complejas en sus respectivos monómeros, la descomposición de estos monómeros en intermediarios comunes y la final en la que se realiza el ciclo de Krebs y la cadena respiratoria, en donde el aceptor final de electrones es el oxígeno molecular, para formar agua como producto final, junto con el bióxido de carbono y el amoníaco. (Moeller & Tomasini Ortiz, s.f.)

La tecnología del tratamiento de aguas residuales por vía aerobia está bien desarrollada y es sin duda la más comúnmente aplicada. La experiencia acumulada y las altas eficiencias en la remoción de materia orgánica son algunas de las razones de su aceptación.

Existe un buen número de modalidades en los procesos aerobios algunos de ellos son:

- Tipo extensivo (lagunas)
- Procesos de biomasa en suspensión (lodos activados en sus diversas modalidades)
- Procesos de biopelícula (filtros percoladores y biodiscos).

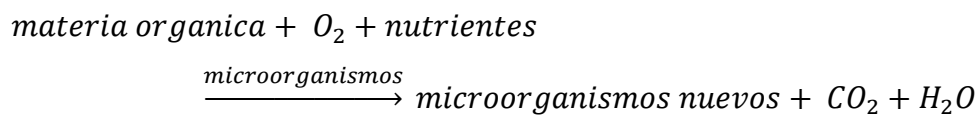
Eliminación de materia orgánica

La materia orgánica presente en el agua residual influente a un sistema de fangos activados sirve como sustrato de las bacterias heterótrofas del líquido mezcla. La eliminación de la materia orgánica presente en el agua residual que ha entrado en contacto con los fangos activados se produce a través de las siguientes etapas (Rivas Mijares, 1978, como se citó en Nadal Angelica, Mengual Cuquerella, & Marco Montolio, 2010,):

1. Atrapamiento de las partículas en la estructura del floculo de los fangos activados.
2. Adsorción del material coloidal

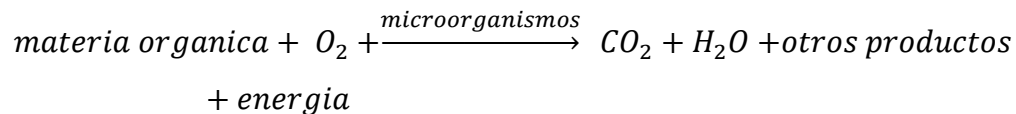
3. Biosorción, eliminación rápida e inicial por absorción y almacenamiento celular de compuestos solubles de elevado peso molecular.
4. Asimilación y acumulación intracelular de sustancias fácilmente biodegradables.
5. Autogestión o respiración endógena de la biomasa cuando existan limitaciones de sustrato biodegradable.

La reacción que tiene lugar en la eliminación de la materia orgánica biodegradable es la siguiente:

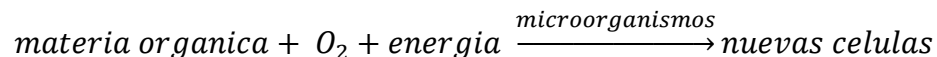


Esta ecuación incluye una serie de reacciones bioquímicas más complejas que se pueden resumir en tres actividades principales:

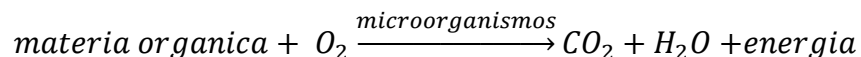
1. Oxidación: obtención de energía mediante la conversión de la materia orgánica en CO₂ y H₂O.



2. Síntesis: conversión de una parte de la materia orgánica en nueva biomasa con la ayuda de la energía obtenida en la oxidación.



3. Autooxidación: obtención de energía mediante la conversión de algunos constituyentes celulares en productos energéticamente inferiores.



Dentro del proceso se puede considerar que los microorganismos utilizan el oxígeno presente en el agua para poder consumir el sustrato o alimento, en este caso las

moléculas orgánicas biodegradables contenidas en el agua residual y como resultado de este consumo los microorganismos obtienen la energía necesaria para mantener sus funciones vitales, al mismo tiempo que generan nuevos individuos.

Necesidades de nutrientes y de factores de crecimiento.

En ocasiones los nutrientes pueden condicionar y limitar, en mayor medida que el carbono y la energía, la síntesis celular y el crecimiento bacteriano. Los principales nutrientes inorgánicos necesarios para los microorganismos son: N, S, P, K, Mg, Ca, Fe, Na, y Cl, mientras que entre los nutrientes de menos importancia se hallan el Zn, Mn, Mo, Se, Co, Cu, Ni, V y W.

Crecimiento bacteriano

Las bacterias son los microorganismos que en mayor proporción constituyen la biomasa de los lodos activados (95%). Estos organismos unicelulares crecen en el agua residual consumiendo la materia orgánica biodegradable tales como las proteínas, carbohidratos, lípidos y otros compuestos. La manera más común para la reproducción de las bacterias es por fisión binaria, donde la célula original se convierte en dos organismos nuevos. El tiempo requerido para cada división, conocido como tiempo de generación o de duplicación, puede variar desde menos de 20 minutos hasta varios días. Existen limitaciones ambientales que frenan la duplicación como disponibilidad del sustrato, concentración de nutrientes, o incluso, el tamaño del sistema. Existen dos maneras de expresar el crecimiento de los microorganismos, uno, en términos de números y el otro en términos de masa bacteriana en un cultivo puro, al igual que el crecimiento en cultivos mixtos.

De acuerdo con, (Metcalf & Eddy, 1995), el crecimiento celular se caracteriza por cuatro fases, donde el sustrato y concentración de biomasa cambia con respecto al tiempo:

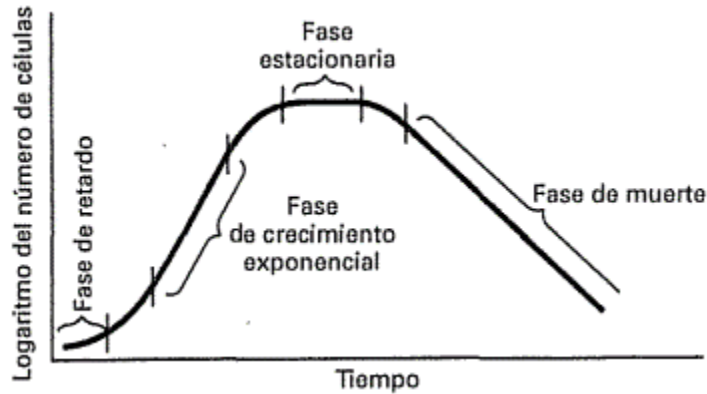


Ilustración 2. Curva de crecimiento bacteriano típica. Recuperado de (Metcalf & Eddy, 1995).

- Fase de retardo. Tras la adición de un inóculo a una media de cultivo, la fase de retardo representa el tiempo necesario para que los organismos se aclimaten a las nuevas condiciones ambientales y comiencen a dividirse.
- Fase de crecimiento exponencial. Durante esta fase, la célula se divide a una velocidad determinada por su tiempo de generación y su capacidad de procesar alimento (tasa constante de crecimiento porcentual).
- Fase estacionaria. En esta fase, la población permanece constante. Las razones que se apuntan para la explicación de este fenómeno son las siguientes:
 - las células han agotado el sustrato o los nutrientes necesarios para el crecimiento.
 - la generación de células nuevas se compensa con la muerte de células viejas.
- Fase de muerte exponencial. Durante esta fase, la tasa de mortalidad de bacterias excede la de generación de células nuevas. La tasa de mortalidad suele ser función de la población viable y de las características ambientales. En algunos casos, la fase de muerte exponencial se corresponde con la inversa de la fase de crecimiento exponencial.

Cinética del tratamiento biológico

Se han descrito características puntuales para el crecimiento de los microorganismos, no se ha tratado las características ambientales necesarias para su crecimiento. Las condiciones ambientales pueden controlarse regulando el pH, la temperatura y los elementos trazas que se agregan, así como añadiendo los microorganismos tengan un medio adecuado para crecer. Por ejemplo, la homogenización de los caudales, controlando la tasa de flujo y con ello la tasa de carga orgánica.

Para asegurarse que los organismos crezcan, se debe permitir que permanezcan en el sistema el tiempo suficiente como para que se reproduzcan. El tiempo requerido va a depender de su tasa de crecimiento, la cual se relaciona directamente con la velocidad a la cual ellos metabolizan o utilizan los desechos. Suponiendo que las condiciones ambientales se controlan adecuadamente, se puede asegurar la estabilización efectiva de los desechos al controlar la tasa de crecimiento de los microorganismos.

Cuando los microorganismos se han adaptado y logrado un equilibrio para su supervivencia se alimentan de la materia orgánica a depurar; un número alto de microorganismos denota una mayor velocidad de consumo de alimentos.

La velocidad de crecimiento puede expresarse mediante una ecuación de primer orden con respecto a la concentración de biomasa activa:

$$r_x = \mu X \quad (1)$$

Donde:

r_x = velocidad de crecimiento de los microorganismos, ML⁻³ T⁻¹

μ = velocidad crecimiento específico, T⁻¹

X = concentración de biomasa activa, ML⁻³

Experimentalmente se ha encontrado que el efecto de un sustrato o nutriente limitante puede definirse adecuadamente mediante la siguiente expresión empírica propuesta por **Monod**.

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_S + S} \quad (2)$$

Donde:

μ_m = velocidad máxima de crecimiento

S= concentración del sustrato limitante del crecimiento, ML^{-3}

K_S = constante de semi saturación, concentración de sustrato tal que la velocidad de crecimiento es la mitad de la máxima ML^{-3} , cuanto más bajo es su valor es más bajo el valor de la concentración de sustrato para la que μ se aproxima a μ_m , es decir, mayor es la afinidad de los microorganismos por ese sustrato

El efecto de la concentración de sustrato sobre la tasa de crecimiento específico, μ , se expresa gráficamente a continuación:

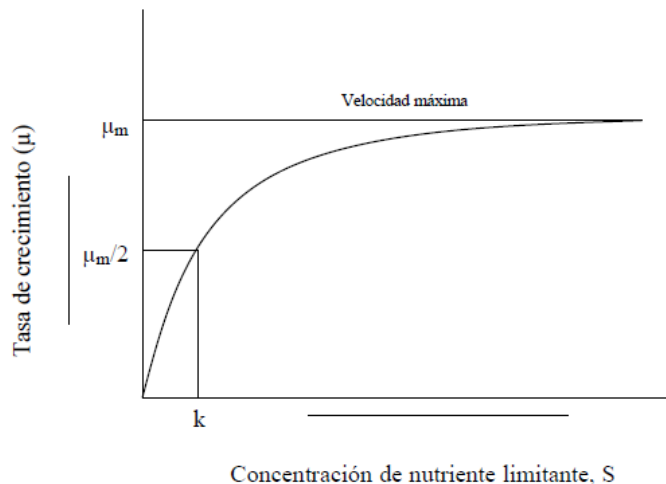


Ilustración 3. Influencia de la concentración de sustrato en la tasa de crecimiento.

Efectos del metabolismo endógeno

Los sistemas de metabolismo endógeno que se emplean en el tratamiento biológico del agua residual, la distribución de edades de las células es tal que no todas las

células del sistema están en fase de crecimiento exponencial. Consecuentemente, la expresión de la tasa de crecimiento se debe corregir para tener en cuenta la energía necesaria para el mantenimiento celular. Otros factores, tales como la muerte y la depredación, también debe ser objeto de consideración. Generalmente, estos factores se engloban en uno único, y se supone que la disminución de la masa celular causada por ellos es proporcional a la concentración de organismos presentes. En la literatura técnica, esta disminución se identifica como descomposición endógena. El término de la descomposición endógena se puede formular de la siguiente manera:

$$rd = -KdX$$

Donde:

K_d = coeficiente de descomposición endógena tiempo⁻¹

X = concentración de células, masa/unidad de volumen.

La expresión correspondiente a la tasa de crecimiento específico viene dada por la siguiente ecuación.

$$\mu' = \mu \frac{S}{K_s + S} - Kd$$

Modelo ASM 1 del proceso de lodos activados

El modelo ASM1 fue desarrollado por el Task group en 1987. Tiene como propósito simular la degradación de la materia orgánica, así como la nitrificación y desnitrificación de los procesos de lodos activados de tipo lodos únicos. El modelo fue presentado utilizando la notación matricial.

El modelo de lodos activados ASM1, 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).

Componentes del modelo ASM1

Son 13 componentes que incluyen 7 disueltos y 6 con una forma de partículas. Dentro de los 13 componentes los 7 primeros se relacionan con las sustancias carbonosas del agua y del lodo (medidos en DQO) mientras que existen 4 constituyentes nitrogenados además del oxígeno y de la alcalinidad. El parámetro de alcalinidad no es esencial al modelo, es sólo una información adicional añadida para permitir detectar indirectamente los riesgos de cambio en el pH.

El material carbonoso del modelo está dividido en un primer tiempo en DQO biodegradable, DQO no biodegradable (materia orgánica inerte) y Biomasa.

La parte biodegradable está dividida en una fracción rápidamente biodegradable (S_s soluble) y en una fracción lentamente biodegradable (X_s , particulada). Se toma como hipótesis que la fracción rápidamente biodegradable está compuesta de materia orgánica soluble que se adsorbe y metaboliza rápidamente por los microorganismos mientras que la fracción X_s está compuesta de partículas, coloides y materia orgánica compleja, la cual sufre una hidrólisis enzimática antes de poder ser adsorbida. En realidad, la fracción lentamente biodegradable incluye compuestos orgánicos solubles difícilmente biodegradables que se tratan como si fueran materia particulada. La fracción no biodegradable de la DQO está dividida en una fracción soluble inerte (S_i) y en una fracción particulada (X_i). Las dos no son afectados por el proceso. S_i abandona la planta con el efluente del sedimentador secundario mientras que X_i se enreda en el fango purgado y contribuye a los sólidos volátiles (SSV).

La biomasa activa se divide en dos tipos de grupos de microorganismos: heterótrofos ($X_{B,H}$) y autótrofos ($X_{B,A}$). Por ende, una variable adicional, X_P , está introducida para modelizar la fracción inerte de productos procedentes del decaimiento de la biomasa. En la realidad, no se puede diferenciar X_P de X_i en el fango.

El nitrógeno total presente en el sistema incluye por un lado los nitratos y nitritos (S_{NO}) y por otro el nitrógeno total de Kjeldahl (NTK). Los nitratos y nitritos se combinaron en un solo componente para simplificar el modelo. Algunos autores utilizan versiones modificadas del modelo con una separación entre estos dos productos.

El nitrógeno total de Kjeldahl se fragmenta en nitrógeno amoniacal (SNH , que incluye el $N-NH_4^+$ y $N-NH_3$), nitrógeno orgánico y nitrógeno contenido en la biomasa. De forma idéntica a la materia orgánica carbonosa (DQO), el nitrógeno orgánico se divide en una fracción soluble y otra particulada, cada una teniendo su fracción biodegradable y no biodegradable. Son únicamente las fracciones biodegradables, soluble (S_{ND}) y particulada (X_{ND}), que aparecen de forma explícita en el modelo.

Procesos del modelo ASM1

El ASM1 original incluye 8 procesos que se pueden reagrupar en cuatro tipos:

- Procesos de crecimiento (tres).
- Procesos de decaimiento (dos).
- Procesos de hidrólisis de partículas enredadas en los bio-flocs (dos).
- Proceso de amonificación (uno)

Crecimiento aerobio de la biomasa heterótrofa.

Se considera que sólo el sustrato rápidamente biodegradable (S_S) interviene en el crecimiento de los heterótrofos. El sustrato lentamente biodegradable particulada (X_S) debe sufrir una hidrólisis antes de que pueda transformarse en S_S y ser utilizado por los microorganismos. El crecimiento se modeliza utilizando la estructura del modelo de Monod donde pueden ser limitantes tanto S_S , como S_0 (consumo de oxígeno). Este proceso es el que más contribuye en la remoción de DQO, producción de biomasa nueva y demanda de oxígeno. El nitrógeno amoniacal se

consume en el proceso de crecimiento por su incorporación en las células mientras que cambia también la alcalinidad. A continuación, se muestra la ecuación de la velocidad de crecimiento de la biomasa heterótrofa en condiciones aerobias

$$\mu_{max} = \left(\frac{S_s}{K_s + S_s} \right) \left(\frac{S_o}{K_o + S_o} \right) X_{BH}$$

Crecimiento anóxico de los heterótrofos.

En la ausencia de oxígeno, los organismos heterótrofos son capaces de utilizar los nitratos como aceptor terminal de electrones con S_s como sustrato. El proceso resulta en una producción suplementaria de biomasa heterótrofa y de nitrógeno gaseoso (desnitrificación). Se utilizan las mismas expresiones cinéticas de tipo Monod pero multiplicadas por un factor de corrección η_g (siempre inferior a 1), que representa el hecho que en condiciones anóxicas la eliminación del sustrato es más lenta que en condiciones aerobias. A continuación, se muestra la ecuación de la velocidad de crecimiento de la biomasa heterótrofa en condiciones anoxicas:

$$\mu_{max} \left(\frac{S_s}{K_s + S_s} \right) \left(\frac{K_o H}{K_o H + S_o H} \right) \left(\frac{S_o}{K_o + S_o} \right) \eta_g X_{BH}$$

Decaimiento de la biomasa heterótrofa

La noción de decaimiento en este modelo incluye todos los fenómenos de lisis, respiración endógena, muerte o depredación. Su tratamiento matemático en el ASM1 es diferente del enfoque tradicional donde se le atribuía directamente un consumo de O_2 (respiración endógena).

La modelación en el ASM1 utiliza la noción de muerte - regeneración, donde $X_B = X_S + X_P$ sin consumo directo de O_2 . El consumo de O_2 está diferido hasta después que el X_S se transforma en S_s (hidrólisis) y que S_s se utiliza en el proceso de crecimiento. Por eso, el valor de b_H del modelo tiene mucha diferencia con respecto al valor empleado en los modelos tradicionales ($b'H$). El proceso manifiesta ninguna pérdida de DQO, ni consumo directo de O_2 ; por el contrario, produce residuos

orgánicos inertes (X_P) y una DQO lentamente biodegradable (X_S). Se supone que el proceso ocurre con la misma velocidad en condiciones aerobias que anóxicas. El modelo utilizado es de orden 1 respecto a la biomasa. El proceso de muerte de la biomasa se representa en la siguiente ecuación, en la cual la velocidad de desaparición depende de la cantidad de biomasa y es proporcional a una constante, el valor de la cual cambia en función del concepto de muerte que se utilice:

$$b_H X_{BH}$$

Hidrólisis de la materia orgánica.

La materia orgánica particulada lentamente biodegradable (X_S) sufre un rompimiento y solubilización por efecto de las enzimas extracelulares. El resultado es la producción de sustrato soluble fácilmente biodegradable que se utiliza luego en el crecimiento- La hidrólisis es un proceso que ocurre tanto en condiciones aerobias como en condiciones anóxicas.

Respirometría

Las técnicas respirométricas están basadas en la medida e interpretación del consumo biológico de oxígeno, debido a la respiración aerobia, de una población microbiana bajo unas condiciones determinadas.

El consumo biológico de oxígeno está directamente relacionado con el crecimiento bacteriano y con el consumo de sustrato para la obtención de energía. Sólo una parte del sustrato consumido se utiliza para obtener energía, el resto pasa a la formación de nueva biomasa.

El consumo de oxígeno se considera asociado solamente al consumo de sustrato para obtener energía mediante una reacción de oxidación. La biomasa, durante su proceso de muerte, se divide en materia orgánica inerte y materia orgánica lentamente biodegradable que después de hidrolizarse puede ser utilizada para mantenimiento e incluso para el crecimiento. Así se explica que, aun cuando todo el sustrato extracelular se ha consumido, siga existiendo un consumo de oxígeno (respiración endógena).

Por lo tanto, la respirometría es una técnica que mide el consumo de oxígeno de las bacterias contenidas en un fango activo.

Fundamentos de la metodología de pruebas respirométricas

La respirometría es una técnica que se mide por medio de un respirometro, puede ser desde su configuración más básica como un frasco equipado con un sensor, hasta los más sofisticados los cuales instrumentalmente funcionan de forma automática.

El funcionamiento de todos los equipos respirométricos involucra algún procedimiento para evaluar la velocidad a la cual la biomasa remueve o produce un componente líquido.

Por lo cual Spanjers et al. (1998) como se citó en (López Vázquez C. M. Menéndez Gutiérrez C., 2016) menciona que la velocidad de respiración se clasifica en ocho principios básicos de acuerdo con dos criterios:

1. La fase donde se mide la concentración, gas (G) o líquido(L).
2. Si existe o no alguna entrada y/o salida de líquido y gas. Si se encuentra fluyendo (F) o estático (E).

La mayor parte de los procedimientos basados en mediciones que se realizan en una fase líquida es utilizado un electrodo o sensor específico, para que la medición sea confiable la correcta calibración de estos dispositivos es de suma importancia.

Los respirometros que se basan en la medición de la concentración de oxígeno disuelto (OD) en la fase líquida usan el balance de masas de OD en la fase líquida.

En la literatura se describen diversas aplicaciones prácticas de las técnicas de respirometría y algunas de ellas han sido introducidas en el mercado, en donde para una respirometría aerobia consiste en una botella o reactor agitado donde se mezcla la biomasa en condiciones aerobias o anoxicas y un agua residual u otro sustrato específico. Se requiere además un sistema para medir y registrar el consumo del aceptor final de electrones ya sea oxígeno, nitrato o nitrito. La manipulación de los datos puede ser manual o como ocurre en las mediciones de DBO, automatizada.

En el caso de ciertos respirometros el equipamiento es tan sofisticado que su operación requiere de un sistema de control totalmente automatizado.

La respirométrica es una técnica sencilla y practica que aporta información directa sobre la biomasa de los lodos activados, midiendo el consumo de oxígeno por parte de los microorganismos que trabajan sobre un sustrato orgánico que es degradado y oxidado a CO₂.

La respirométrica se basa en la medida de la velocidad del consumo de oxígeno de las bacterias cuando degradan un sustrato orgánico, nitrógeno amoniacal o bien a ellas mismas (respiración endógena).

El parámetro principal de estudio en la respirométrica es la Tasa de respiración (OUR), nos indica la cantidad de oxígeno consumido por las bacterias por unidad de tiempo expresada en mg O₂/L

9. Procedimiento y descripción de las actividades realizadas

Pretratamiento al agua residual

Se recolectó agua residual de entrada a la Planta de Tratamiento como fuente de sustrato para las pruebas respirométricas, posteriormente la muestra fue trasladada a un recipiente de volumen adecuado hasta que sedimentó, fue hasta este punto en que se procedió a decantar el sobrenadante por medio de papel filtro, hasta que fuera posible el paso del líquido por un filtro de 1.2 µm.

Pretratamiento al licor mezcla

Se muestreo un volumen de 8 litros de licor mezcla proveniente del reactor aerobio de la planta de tratamiento de aguas residuales. La mezcla fue depositada en un recipiente y se le adicionó tiourea con una concentración de 20 mg/L para inhibir una posible nitrificación. Además, fue sometido a aireación durante dos días por medio de una bomba de aire y difusores de burbuja fina con el fin de tener un lodo en respiración endógena.

Determinación de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)

El objetivo de este ensayo es obtener la DBO carbonosa como valor estándar al cabo de los cinco días (DBO_5). Este ensayo fue elaborado de acuerdo a lo establecido por el método manométrico.

Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

El valor de la demanda química de oxígeno del agua representa la cantidad de oxígeno consumida en la oxidación química de constituyentes orgánicos presentes en el agua.

Este ensayo fue elaborado de acuerdo con lo establecido por la NMX-AA-030/2-SCFI-2011 por el método titulométrico.

Determinación de los parámetros cinéticos del crecimiento aerobio de las bacterias heterótrofas.

Las pruebas respirométricas fueron realizadas con una muestra de licor mezcla después de su pretratamiento, dicha muestra había sido acondicionada con tiourea en concentración de 20 mg/L, con la finalidad de inhibir una posible nitrificación.

El montaje de reactor a escala laboratorio se llevó a cabo mediante un matraz encapuchado, por el cual circula agua como medio refrigerante, mientras es

controlada la temperatura en 20°C; mientras que, por medio de un agitador magnético se mantiene en mezcla homogénea la muestra.

Se lleva a cabo la medición de la concentración de oxígeno disuelto por medio de una sonda CellOx y un oxímetro Oxi 3310 IDS, al mismo los datos son registrados en el ordenador por medio del software del fabricante.



Ilustración 4. Montaje de reactor para la determinación de K_s .

La metodología del siguiente ensayo consiste en adicionar diferentes cantidades de agua residual filtrada, de DQO biodegradable conocida, al fango activado en condiciones endógenas.

La velocidad de consumo de oxígeno se registra dos veces en el ensayo: antes de la adición del sustrato (OUR_{end}) y en el momento inmediatamente posterior a la adición (OUR_{max}).

Determinación de Y_H , rendimiento de las bacterias heterótrofas.

Una muestra 3.5 L de licor mezcla en condiciones endógenas se colocó dentro de un reactor. Se sometió a sedimentación, y se decantó el sobrenadante midiendo el volumen retirado, el cual fue remplazado por agua residual después de su pretratamiento.

Una vez sustituido el sobrenadante se da inicio al programa generado en la Universidad Politécnica de Chiapas, dicho programa hace la función de control de la aireación dentro de la muestra, esta aireación va a ser activada y desactivada de acuerdo a la concentración de oxígeno disuelto medida por medio de un oxímetro conectado al ordenador, mientras se registran las concentraciones de oxígeno dentro de la muestra y se mantiene una mezcla homogénea dentro del reactor.

El control de aireación se programó para mantener la concentración de oxígeno en la muestra en un intervalo de 2 mg/L a 4 mg/L, es decir que cuando el oxímetro registraba una concentración menor de 2 mg/L, activa las bombas de aire y por medio de difusores se suministraba oxígeno a la muestra. Una vez que la concentración ascendía a 4 mg/L desactivaba el sistema de aireación hasta que descendiera y se activará nuevamente.

Se tomó muestra en el momento en que se inicia el procedimiento, inmediatamente después de la puesta en marcha del programa (tiempo cero), así como al final del proceso. Posteriormente, se realizó la determinación de la DQO de dichas muestras.

Determinación del coeficiente de decaimiento b_H

Se utilizó un vaso de precipitado de 4 litros como reactor, en el que se le agregó 3.5 litros de lodo biológico después del pretratamiento correspondiente, se mantiene en agitación constante por medio de un agitador magnético, mientras que por medio de una PC se registran los datos de OD medidos por un oxímetro previamente calibrado de acuerdo a las especificaciones del fabricante. Estos datos obtenidos son graficados con el fin de obtener las pendientes que genera el consumo de oxígeno en condiciones endógenas, dichas pendientes serán graficadas para determinar el valor de b .

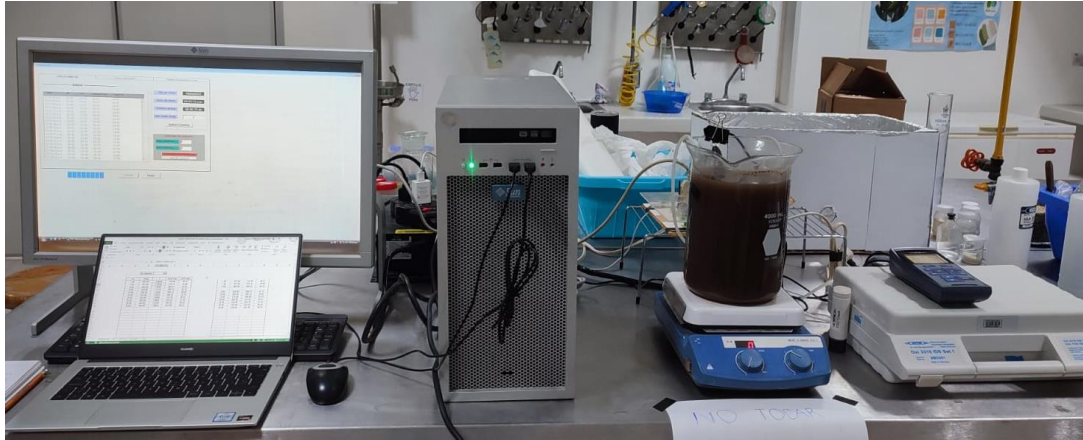


Ilustración 5. Montaje de respirometro para la determinación de la tasa de rendimiento de la biomasa heterótrofa y el coeficiente de muerte endógena

10. Resultados

Los parámetros estudiados con la metodología propuesta por (Cristina, 2005), para el grupo de bacterias heterótrofas son las siguientes:

- K_s Coeficiente de velocidad media
- Y_H Rendimiento de las bacterias heterótrofas
- b_H Tasa endógena específica de pérdida de masa

Determinación del coeficiente de velocidad media

La velocidad del consumo de oxígeno en condiciones endógenas de las bacterias heterótrofas está descrita por la siguiente ecuación:

$$OUR_{end} = \frac{1-Y_H}{Y_H} \mu_H \frac{S_{end}}{K_s+S_{end}} X_H \quad (1)$$

En donde S_{end} representa la DQO Biodegradable en el reactor asociada a la muerte y lisis de los microorganismos.

El valor de la OUR_{max} viene dado por la siguiente ecuación:

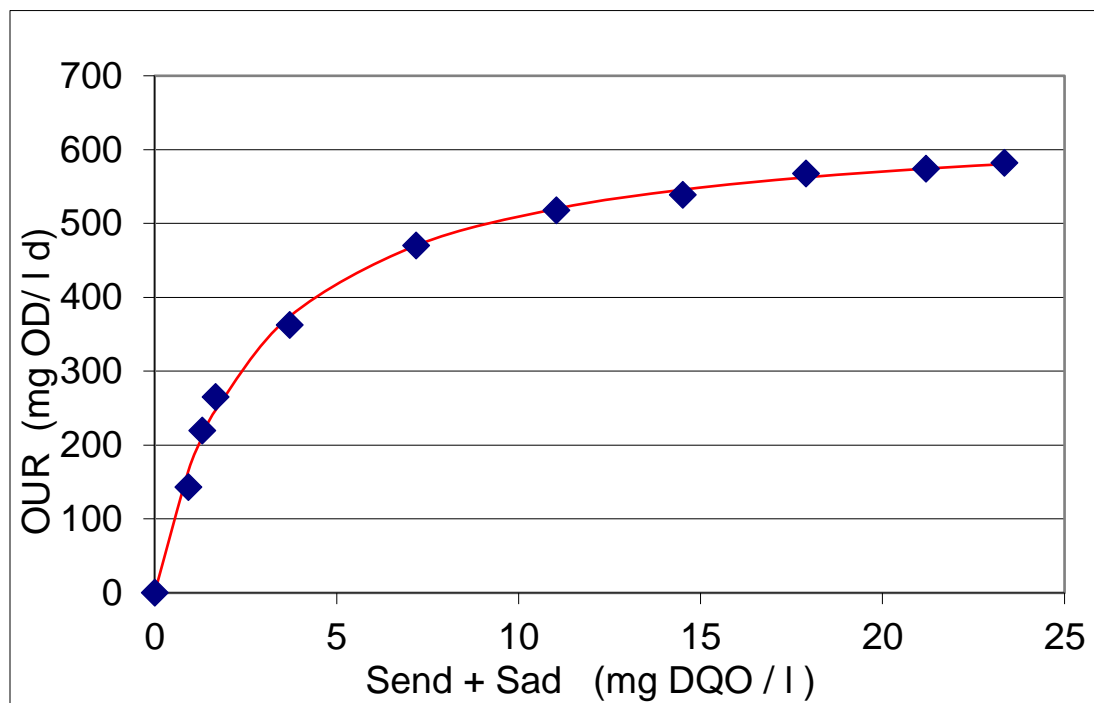
$$OUR_{max} = \frac{1-Y_H}{Y_H} \mu_H \frac{S_{end}+S_{ad}}{K_s+(S_{end}+S_{ad})} X_H \quad (2)$$

Donde S_{ad} es la DQO biodegradable añadida de valor conocido.

Sustituyendo en la ecuación 2 la expresión que queda de despejar S_{end} de la ecuación 1, la ecuación de la OUR_{max} queda en función de dos variables: K_s y el producto de $\frac{1-Y_H}{Y_H} \mu_H X_H$. De este modo será posible efectuar el ajuste por mínimos cuadrados de la curva de Monod a los datos experimentales.

Los datos experimentales obtenidos son graficados obteniéndose una serie de gráficas, de las cuales las pendientes de estas rectas graficadas serán el valor de la OUR , la pendiente que se genera antes de la adición de sustrato será la OUR_{end} , mientras que la pendiente que se sitúa después de la adición de sustrato es la OUR_{max} .

Una vez obtenida la relación de todas las pendientes, estas pendientes se grafican obteniendo la velocidad de consumo de oxígeno:



Obteniendo como resultados:

PARAMETRO	VALOR	UNIDADES
$\mu_H X_H \frac{1 - Y_H}{Y_H}$	647.84	$\frac{mgOD}{L d}$
K_s	2.71	$\frac{mg DQO}{L}$

Determinación del rendimiento de las bacterias heterótrofas Y_H

El rendimiento de las bacterias heterótrofas se define como la cantidad de biomasa producida por unidad de sustrato degradado. Las bacterias utilizan como sustrato orgánico el disponible en el medio, el cual degradan bajo condiciones aerobias. Durante el proceso de degradación parte del sustrato degradado es utilizado para generar biomasa y parte para la obtención de energía por medio de la respiración, por tanto, a partir de estas consideraciones, es posible obtener el valor de Y_H si se conoce el consumo de oxígeno necesario para la degradación de una cantidad determinada de materia orgánica.

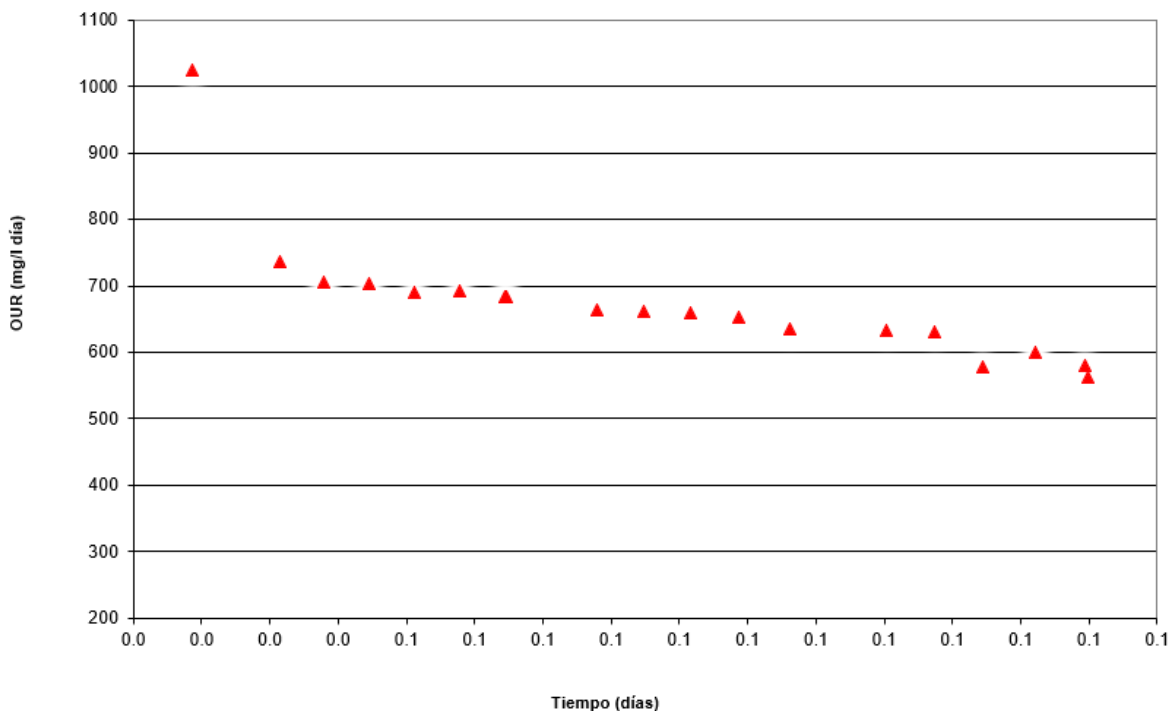


Ilustración 6. Consumo de oxígeno en la determinación de Y_H

Es notable de acuerdo a la ilustración 6 cómo evoluciona el consumo de oxígeno, en función del tiempo y de la cantidad de sustrato disponible. Ya que, al proporcionar una fuente de alimento de concentración elevada, los microorganismos presentan una alta actividad lo cual refleja un consumo de oxígeno elevado, pero conforme avanza el tiempo y disminuye el alimento disponible es evidente que el consumo de oxígeno es menor.

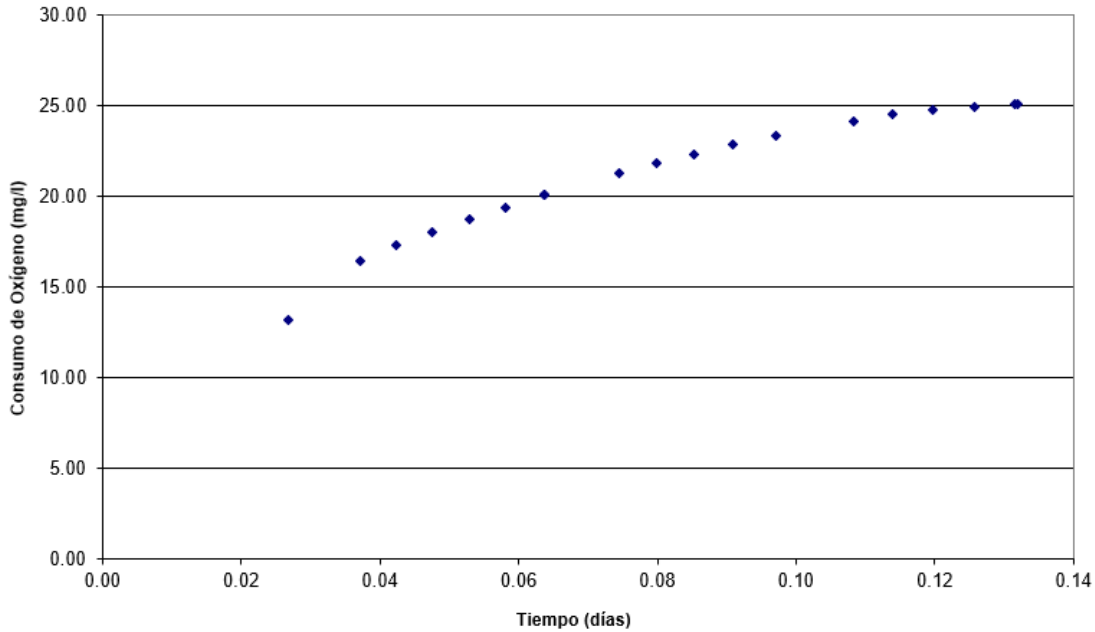


Ilustración 7. Evolución del consumo de oxígeno

La matriz estequiometría que define los procesos de bacterias heterótrofas considera que el consumo de oxígeno y la cantidad de sustrato por unidad de biomasa heterótrofa, vienen dados por:

$$S_{O_2 \text{ consumido}} = \frac{1 - Y_H}{Y_H}$$

$$S_{b \text{ degradada}} = \frac{1}{Y_H}$$

Por lo cual al calcular la relación $\frac{S_{O_2 \text{ consumido}}}{S_{b \text{ degradada}}}$ con ayuda de las expresiones anteriores, se obtiene la siguiente ecuación para la determinación de Y_H

$$Y_H = 1 - \frac{S_{O_2 \text{ consumido}}}{S_{b \text{ degradada}}}$$

Debido a que la cantidad de sustrato degradada puede ser determinada analíticamente por medio de la DQO al inicio y en la culminación de la prueba, nuestra relación se expresaría de la siguiente manera:

$$Y_H = 1 - \frac{S_{O_2 \text{ consumido}}}{DQO_i - DQO_{final}}$$

Los resultados son los siguientes:

DQOinicial=	204	mg/l
DQOfinal=	99.38	mg/l
Oxi.consumido=	25.07	mg/l
Y _H	0.76	

Determinación de la muerte endógena

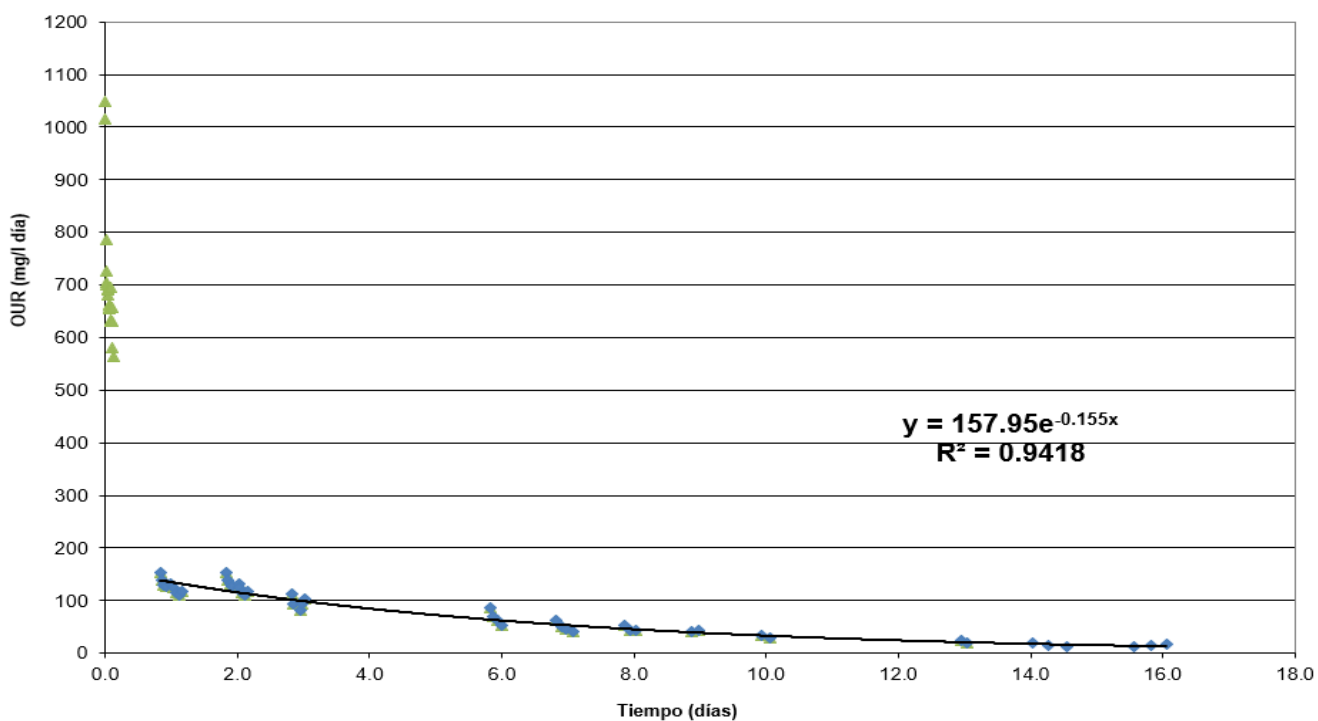


Ilustración 8. Tasa endógena específica de pérdida de masa

En la ilustración 8 se observa el consumo de masa biodegradable hasta llegar a su punto de pérdida de masa endógena o lisis celular, en otras palabras, en condiciones de consumo y muerte de materia orgánica estable.

PARAMETRO	UNIDADES	RESULTADOS EXPERIMENTALES	RESULTADOS EN LITERATURA (Henze, 1986)
Y_H		0.76	0.38-0.75
b_H	Dias ⁻¹	0.155	0.05-1.6
K_s	$\frac{mg\ DQO}{L}$	2.71	5-225

Tabla 1. Resumen de resultados obtenidos en comparación con resultados en literatura (Henze, 1986)

11. Conclusiones de proyecto

En conclusión, los parámetros biocinéticos son esenciales en el tratamiento de aguas residuales porque permiten una comprensión detallada del comportamiento de los microorganismos presentes en el agua residual y, por lo tanto, permiten un control más preciso del proceso de tratamiento. La medición y el análisis continuo de estos parámetros son importantes para garantizar la eficiencia y la sostenibilidad del tratamiento de aguas residuales.

El valor de K_s representa la cantidad de materia orgánica que se necesita como mínimo para poder alcanzar la mitad de su máxima velocidad de consumo de sustrato, es por eso que infiere que la biomasa contenida en el reactor necesita 2.71 g DQO/m³ de materia orgánica para alcanzar la mitad de su máxima velocidad de consumo de sustrato, sin embargo, de acuerdo al modelo ASM1 los valores típicos para una K_s se encuentra en un intervalo de 5 -225 mg DQO/L es por eso que se reporta como debajo de rango, llegando al punto de agotamiento de sustrato en poco tiempo.

El coeficiente estequiométrico de la biomasa heterótrofa (Y_H) indica la cantidad de biomasa producida por unidad de sustrato degradado, es decir que por cada gramo de sustrato se genera 0.76 gramos de biomasa.

De acuerdo con los resultados obtenidos se concluye que el proceso de lodos activados se encuentra dentro de rango, sin embargo, el coeficiente de velocidad media, nos indica que el proceso puede estar generando una excesiva producción de lodo. Es importante mencionar que estos resultados no son concluyentes sino hasta que se posean los datos completos, ya que en esta ocasión solo se abarcó la materia heterótrofa.

12. Competencias desarrolladas y/o aplicadas

Preparación de soluciones

Manejo de equipos oxímetros y sondas

Actividades de muestreo

Aplicación de principios básicos en programación

Análisis de parámetros en aguas residuales

13. Fuentes de información

- Alpirez, J., Avilés, K., Castillo, H., Pinzón, I., Poveda, R. M., & Vallester, E. (2017). *Evaluación de un sistema biológico de lodos activados a escala laboratorio*. Journal of Undergraduate Research.
- CONAGUA. (s.f.). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: procesos de oxidación bioquímica con biomasa suspendida*. México, D.F.
- Cristina, B. G. (2005). *Estudio de los procesos de acidogénesis en los sistemas de fangos activados. Modelación y metodología de calibración de parámetros*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Delgadillo, S. A. (1999). *Parámetros de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales*. CDMX: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Espigares García M. & Pérez López, J. (1985). *Aspectos sanitarios del estudio de las aguas*. Granada: Universidad de Granada.
- IAWPRC, Henze, M., Gujer, W., Marais, G., & Matsuo, T. (1986). *Activated Sludge Model No. 1*. Inglaterra.
- López Vázquez C. M. Menéndez Gutiérrez C., C. F. (2016). *Métodos experimentales para el tratamiento de aguas residuales*. IWA PUBLISHING.
- Manga J., F. J. (2002). *Eliminación biológica de materia orgánica y sistemas de fangos activados*. Ingeniería y desarrollo.
- Metcalf & Eddy, I. (1995). *Tratamiento, vertido y reutilización*. España: M.C. GrawHill.
- Moeller, G., & Tomasini Ortiz, A. (s.f.). *Microbiología de lodos activados*.
- Montsoriu, J. D. (1996). El blinking en sistemas de fangos activados.
- Nadal Angelica, A., Mengual Cuquerella, J., & Marco Montolio, C. (2010). *Estudio del estado del proceso de depuración de la EDAR de Cullera mediante técnicas de respirometría*. Gandia: Universidad Politécnica de Valencia.

Ramalho, R. (1983). *Tratamiento de aguas residuales*. Quebec: Reverte S.A.

Rodriguez, L. &. (2018). *Estrategias operacionales para el control de problemas de baja sedimentacion causados por bacterias filamentosas en plantas de lodos activados*. Rev. Cientifica Cienc. Ambient. Sostenibilidad CAS.

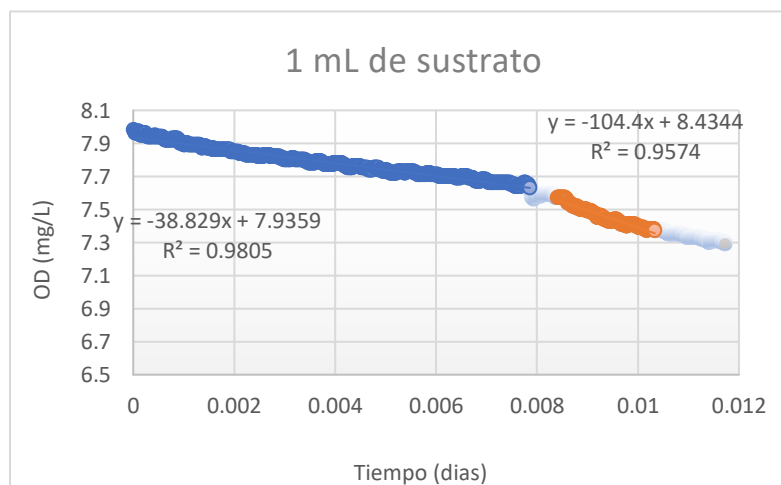
Secretaria de economia. (2013). *NMX-AA-030/2-SCFI-2011*.

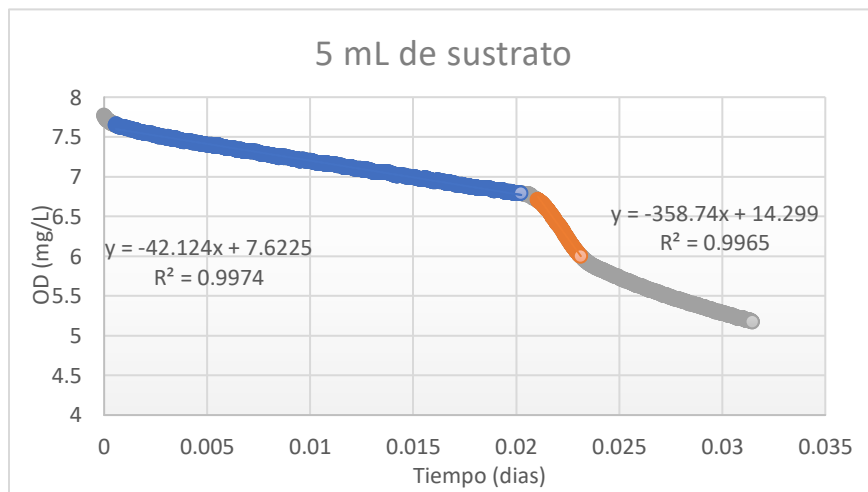
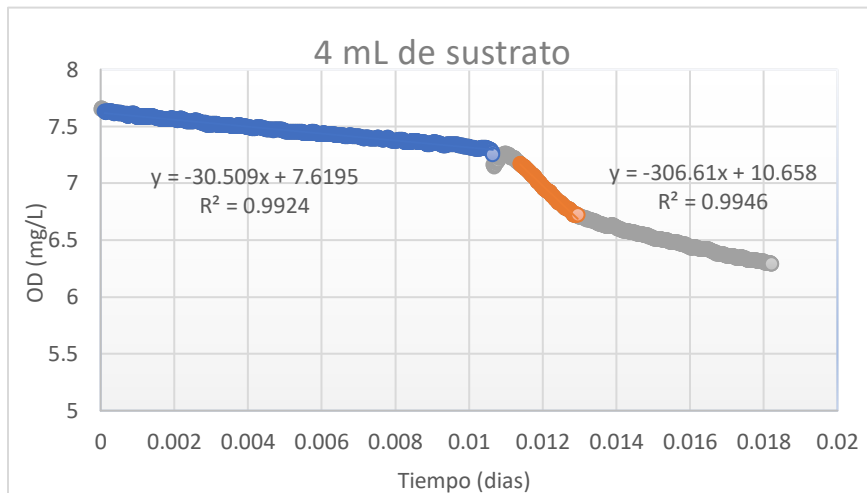
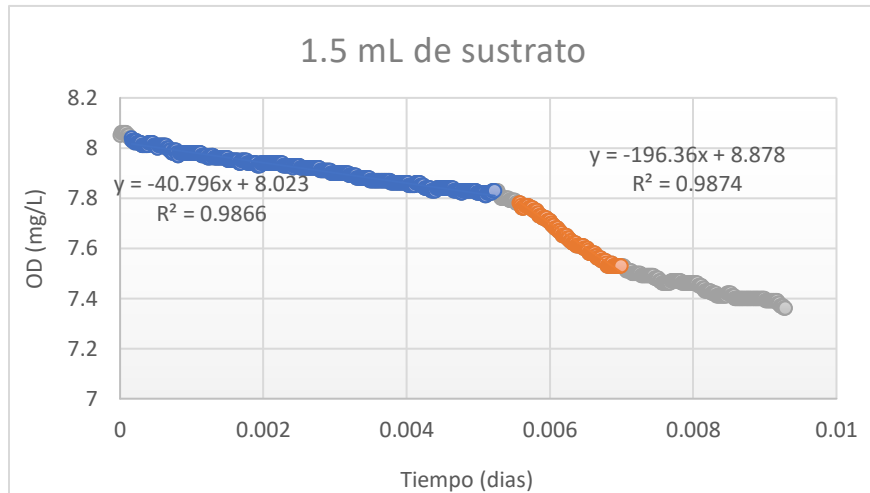
Tchobanoglous, R. C. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Santafé de Bogotá: McGrawHill.

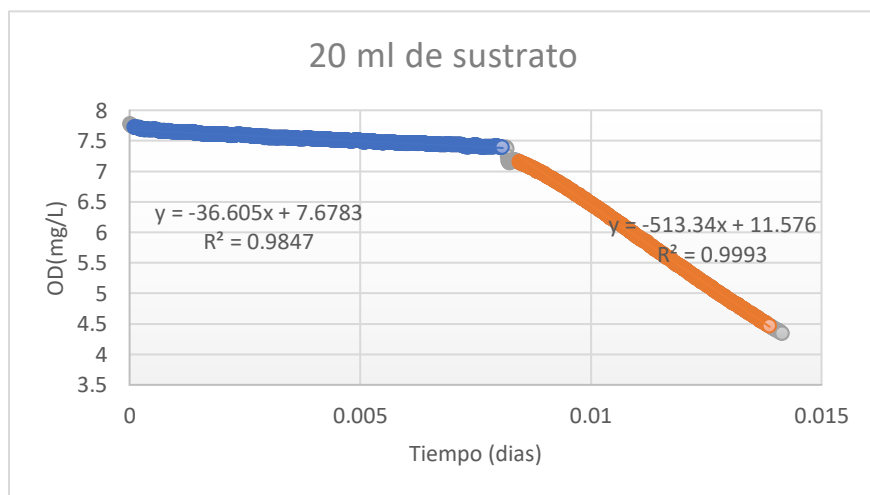
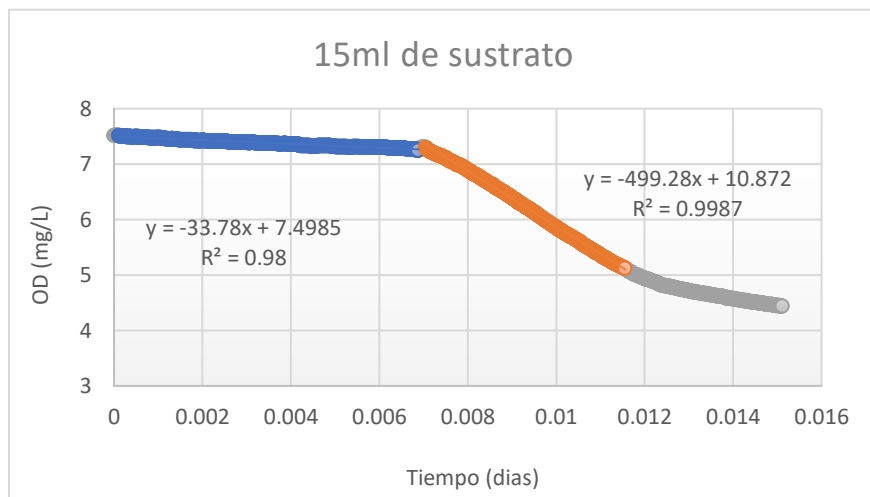
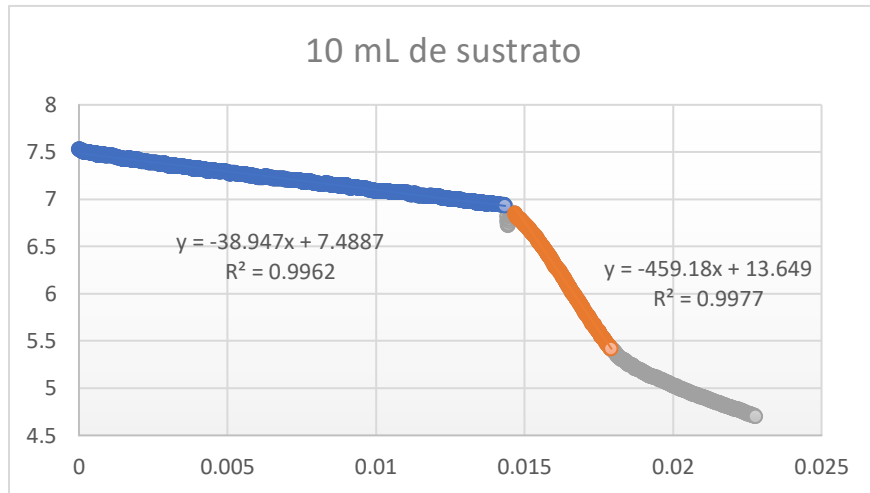
Torres De La Cruz, J. F., & Yauri Chuquimantari, D. K. (2019). *Evaluacion de parametros biocineticos mediante lodos activados a nivel de laboratorio de los efluentes de la Piscigranja de Miraflores para remoción de la carga organica*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro de Perú.

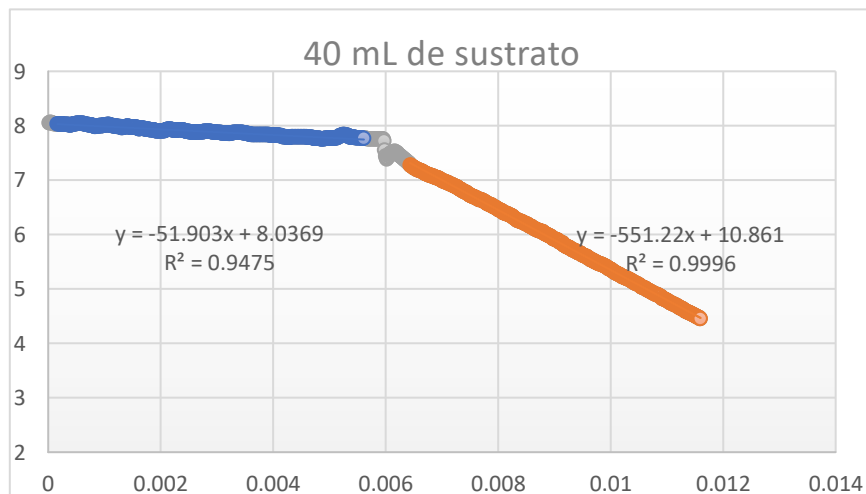
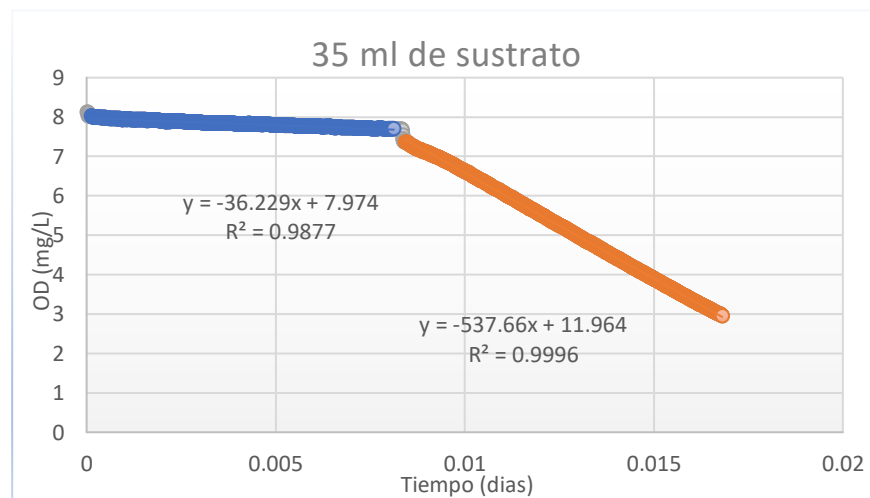
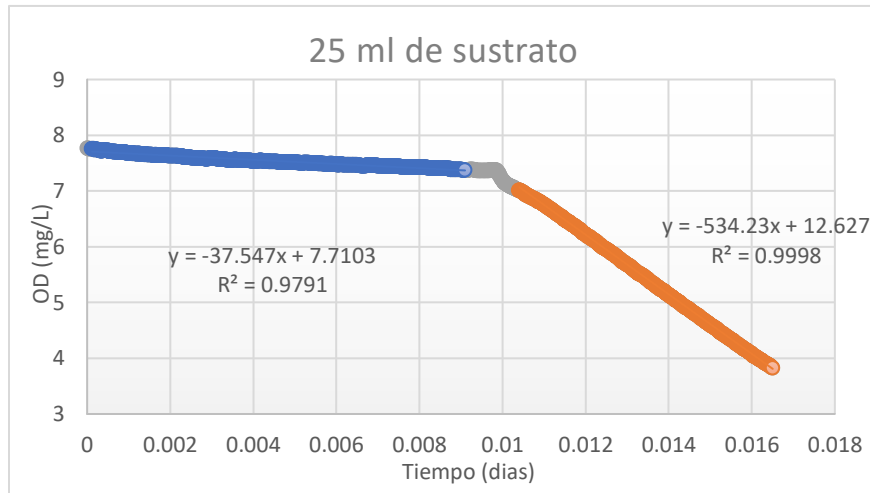
14. Anexos

Gráficas realizadas para la determinación de la K_s .









Gráficas generadas para la determinación de b_H

