



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Facultad de Ingeniería Química

Obtención de los parámetros biocinéticos para la obtención de biomasa en un reactor biológico de lodos activados, caso de estudio planta tratadora de aguas residuales (PTAR) San Pedrito, Pátzcuaro Michoacán México.

T E S I S

Para Obtener el Título como:
Licenciatura en Ingeniería Química

Presenta:
PIQ Alejandra Domínguez Núñez

Director de Tesis:
Dr. Roberto Guerra González

Co- Asesor de Tesis:
Ing. Virgilio Ledesma Yturry



Agradecimientos

Agradecimientos principalmente, a los pilares de mi vida, y por el cual yo estoy aquí, a mis padres Víctor Domínguez Santana y Maricela Núñez Vargas. Por permitirme estudiar esta carrera que me apasiona tanto, por no cuestionar mis decisiones y siempre apoyarme en todo momento. Por hacer de mi vida más fácil, y enseñarme todo lo que soy. Esto es por ello y para ellos, por educarme, y hacer que pudiera estudiar y alcanzar mi título como profesional. Les estaré eternamente agradecida en toda mi vida.

A mis hermanas, Kariely y Lupita por estar cuando llore, me enoje, reí, dormí, etc., por dedicarme palabras de alivio para poder seguir en este camino. Siempre con ellas en todo momento.

A mis amigos y compañeros de carrera que aportaron un grano o muchos en este camino para hacerlo más fácil. Especialmente a Mónica, Norma, Lupita, Diana, Mauricio, Paco, Alejandro, Renato, por hacer mis días más fáciles, por aceptarme y aguantarme, en sus equipos, por su compañía en todo momento de locuras, estudios, pláticas, etc. Es la familia que elegí y que voy a querer por siempre.

Al Ing. Virgilio Ledesma Yturry por tenerme la confianza y hacerme parte de su equipo, por acompañarme en este trabajo, y enseñarme todo lo que sé, simplemente sin él no habría sido posible esto. Es un gran ejemplo para mí. Y le estaré eternamente agradecida, por compartir conmigo todo su conocimiento y tiempo, nos conocimos bastante y le tengo un gran cariño. Por guiarme en esto que hoy fue posible realizar.

Al Dr. Roberto Guerra González, por haberme apoyado en el momento que más lo necesite, y ayudarme a seguir con este trabajo. Por todo el tiempo y paciencia brindada, por guiarme cuando más perdida estaba y darme alivio. Por ayudarme también hacer esto posible.

Al Organismo operador de agua potable, alcantarillado y saneamiento de Ooapas, Planta San Pedrito, Pátzcuaro, Mich., por habernos permitido hacer este trabajo en sus instalaciones y dejarnos las puertas abiertas cuando lo necesitamos, especialmente a Anahí por haber sido tan flexible en los horarios y colaboración en su laboratorio e instalaciones.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y a la Facultad de Ingeniería Química por haberme aceptado en sus instalaciones y hacerme parte de su equipo, para hacer de este mi sueño realidad. Por toda la formación académica recibida y a sus profesores que hicieron de mí una profesional.

Contenido

Resumen.....	5
ABSTRACT.....	5
1. Introducción.....	6
1.1 Justificación	7
1.2 Objetivo	8
1.2.1 General	8
1.2.2 Objetivos específicos.....	8
1.3 Hipótesis.....	8
2. Marco Teórico	9
2.1 Tratamientos de aguas residuales	10
2.2 Proceso de los lodos activados.....	11
2.2.1 Etapas del proceso de lodos activados.	11
2.3 Parámetros principales de operación del reactor biológico.	13
2.3.1 Concentración de los lodos.....	13
2.3.2 Nivel de carga de la planta.....	13
2.3.3 Tiempo de retención.....	13
2.4 Características de los lodos.....	14
2.4.1 Floculación	14
2.5 Clases de reactores	14
2.5.1 Reactor de tanque agitado con flujo continuo.	15
3. Metodología.....	18
3.1 Caracterización del agua residual de entrada a la planta.....	18
3.1.1 Parámetros fisicoquímicos del agua	18
3.1.2 Determinación de Sólidos Totales (ST).....	19
3.1.3 Determinación de formas nitrogenadas	19
3.1.3.1 Determinación de Nitratos	19
3.1.3.2 Nitrógeno total kjeldahl.....	19
3.1.4 Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno, DBO ₅	21
3.1.5 Determinación de la demanda química de oxígeno, DQO	22

Índice

3.2 Caracterización del reactor biológico.....	23
3.2.1 Parámetros Fisicoquímicos del agua.....	23
3.2.2 Determinación de oxígeno disuelto (OD)	24
3.2.3 Determinación de sólidos Totales (ST), Sólidos fijos (SFT) y Sólidos Volátiles (SVT)	24
3.2.4 Determinación de la demanda química de oxígeno (DQO)	25
3.3 Caracterización del agua tratada o efluente	26
3.3.1 Parámetros fisicoquímicos	26
3.3.2 Determinación de Sólidos Suspendidos Totales (SST)	27
3.3.3 Determinación de nitratos	27
3.3.4 Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅).....	27
3.3.5 Determinación de la demanda química de oxígeno (DQO)	27
3.4 Pruebas de consumo de oxígeno por biodegradabilidad.....	28
4. Resultados.....	30
4.1 Caracterización del afluente.....	30
4.2 Parámetros fisicoquímicos.....	32
4.2.1 Registro de pH.....	32
4.2.2 Registro de Conductividad eléctrica (CE)	35
4.2.3 Registro de Temperatura.....	38
4.2.4 Registro de sólidos.....	41
4.3 Registro de DBO ₅ y DQO	44
4.4 Consumo de oxígeno por biodegradación.....	49
4.5 Registro del oxígeno suministrado al reactor.....	51
4.6 Parámetros biocinéticas calculados	53
4.6.1 Metabolismo celular.....	53
4.6.2 Biomasa producida por consumo de sustrato.....	54
5. Conclusiones.....	56
5.1 Recomendaciones	57
6. Referencias.....	58
Apéndice I.....	59
Apéndice II.....	11

Resumen

En México existen plantas tratadoras de aguas residuales (PTARs) de diferentes tipos, uno de ellos es el tratamiento biológico con lodos activados con aireación, en este tipo de tratamiento se produce material celular (biomasa o lodo) y se degrada la materia orgánica a formas más simples y estables. En la actualidad el control de la operación de estas plantas tratadoras se basa en la medición de parámetros normados en la NOM-001-SEMARNAT 1996 y la experiencia personal de los operadores y encargados de las plantas.

Uno de los aspectos importantes a cuidar en este tipo de plantas, es la generación de nuevo material celular y el tiempo de vida del mismo, estos parámetros no se evalúan ni se analizan de ninguna forma lo que conlleva al funcionamiento inestable y discontinuo de las plantas.

Este trabajo de tesis pretende establecer y analizar pruebas de laboratorio simples que nos permitan conocer la producción y la calidad de la biomasa en función de la calidad del agua tratada, lo cual contribuirá a la mejor operación de la planta y a la buena toma de decisiones en cuanto operación.

PALABRAS CLAVE, PRODUCCION DE LODOS, CUANTIFICACIÓN, CARACTERIZACIÓN, CALIDAD, APROVECHAMIENTO

ABSTRACT

In Mexico there are wastewater treatment plants (PTARs) of different types, one of them is the biological treatment with activated sludge with aeration, in this type of treatment cellular material is produced (biomass or sludge) and the organic matter is degraded to forms more simple and stable.

At present, the control of the operation of these treatment plants is based on the measurement of parameters regulated in NOM-001-SEMARNAT 1996 and the personal experience of the operators and managers of the plants.

One of the important aspects to care for in this type of plants, is the generation of new cellular material and the life time of it, these parameters are not evaluated or analyzed in any way what leads to the unstable and discontinuous functioning of plants.

This thesis work aims to establish and analyze simple laboratory tests that allow us to know the production and quality of the biomass according to the quality of the treated water, which will contribute to the best operation of the plant and good decision making in how much operation.

1. Introducción

Existe una preocupación generalizada por los efectos a la salud humana por la contaminación de aire, suelo y agua debida a la descarga de residuos industriales, urbanos y de actividades humanas. Aunque existen muchos avances en los tratamientos de aguas, estos suelen ser insuficientes para que el agua sea propicia para su uso en el empleo de actividades agrícolas, pesquera o potabilizarse. La problemática del tratamiento de aguas residuales es preocupante ya que cada vez hay menos cantidad de agua para el consumo humano y sus actividades.

Los métodos de tratamiento para las aguas residuales, consisten en diferentes técnicas según el nivel de descontaminación que se desee proporcionar al agua acorde al uso que se desee destinar. La mayoría de las plantas de tratamiento de aguas residuales consisten en procesos fisicoquímicos y bioquímicos que aceleren la descontaminación del agua.

En México se realizan principalmente métodos biológicos, que involucran procesos aerobios o anaerobios dependiendo de las características de la planta de tratamiento, siendo las más comunes las que realizan procesos de purificación a través de la técnica conocida como lodos activados, que utiliza una técnica biológica. (Ceac, 2014).

En el municipio de Pátzcuaro, Michoacán, se cuenta con tres plantas de tratamiento de aguas residuales, las cuales su cuerpo receptor es el lago de Pátzcuaro. La primera, se llama “Isla de Janitzio” y está instalada en Janitzio, la segunda “Las Garzas” y la tercera “San Pedrito” ubicadas en el municipio de Pátzcuaro. Nuestro caso de estudio será enfocado a la planta de tratamiento de aguas residuales “San Pedrito”, que utiliza el tratamiento de lodos activados, diseñada para tratar un caudal máximo de 105 lps, sin embargo, solamente se tratan en promedio 50 lps de agua cruda. (Inventario de CONAGUA, 2015).

La presente investigación tiene como propósito el obtener los parámetros biocinéticos en el reactor biológico de la planta tratadora “San Pedrito”, y con esto determinar la biomasa producida, utilizando técnicas simples para analizar el funcionamiento del reactor biológico.

1.1 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. Para esto es necesario obtener información de un estudio de laboratorio exhaustivo, para conocer el comportamiento de los parámetros.

En la actualidad las plantas tratadoras de aguas residuales que utilizan el proceso de lodos activados, no evalúan la generación de nuevo material celular (biomasa) ni el tiempo de vida del mismo, lo que lleva al funcionamiento inestable de la planta. Por ello, nos dimos a la tarea en este trabajo evaluar la biomasa producida y la constante cinética para la degradación de materia orgánica propuesta según la bibliografía.

1.2 Objetivo

1.2.1 General

Obtener los parámetros biocinéticos para la obtención de biomasa en un reactor biológico de lodos activados para analizar el funcionamiento del reactor, caso de estudio planta tratadora de aguas residuales (PTAR) San Pedrito, Pátzcuaro, Michoacán, México.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar los parámetros fisicoquímicos y químicos de los lodos del reactor biológico.
2. Implementar una técnica utilizando el método respirométrico para determinar la cinética de degradación de la materia y el parámetro biocinético (Y) para la obtención de la producción de biomasa.
3. Definir las condiciones de operación del proceso de lodos activados para eficientar el sistema.

1.3 Hipótesis

Los análisis químicos y fisicoquímicos de parámetros de control en el laboratorio (SS, DQO, DBO_5 , Nitrógeno, etc.), proporcionaran información útil para la evaluación y obtención de la constante de biodegradación. Los valores de los parámetros biocinéticos, permitan llevar un control y mejora en la operación del proceso de lodos activados, logrando un mejor funcionamiento de la planta y tomar decisiones de carácter operativo más confiables.

2. Marco Teórico

El 70.8% de la superficie terrestre está ocupada por agua, pero solo un 2.5% es utilizable para consumo y actividades humanas. Más de un 80% de los desechos peligrosos del mundo se producen en los países industrializados, mientras que en las naciones en vías de desarrollo un 70% de los residuos que se generan en las fábricas se vierten al agua sin ningún tipo de tratamiento previo, contaminando así el agua disponible para consumo y actividades humanas. Las causas de contaminación son variadas; por incremento de sales, eutrofización, vertidos industriales, diversidad de actividades humanas, eventos naturales, etc., destacando la contaminación por materia orgánica, procedente de vertidos urbanos, actividades ganaderas, agrícolas o industriales con manipulación de compuestos orgánicos (Revista Ambientum, Junio 2015).

En nuestro país, se clasifica el uso del agua en 4 diferentes sectores: uso agrícola, abastecimiento público, generación de energía eléctrica y abastecimiento a la industria. En la figura 2.1 se muestran los porcentajes de agua, usados en cada sector.

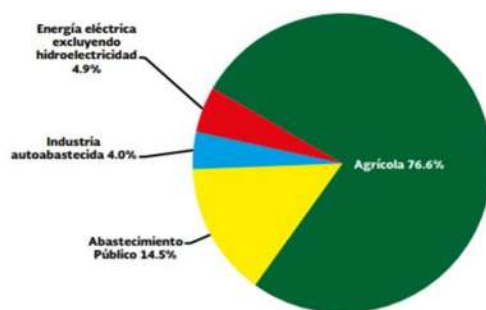


Figura 2.1 Porcentajes de uso de agua en cada sector, empleado en México. (CONAGUA. Subdirección General de Administración del Agua, 2013.)

En México, a finales del año 2015, las plantas de tratamiento de aguas residuales registradas fueron 2477 instalaciones, con una capacidad instalada de 177 973.58 lps y un caudal tratado de 120 902.20 lps, esto permite un tratamiento de aguas residuales municipales del país del 57.0% (Inventario de CONAGUA, Diciembre 2015).

En Michoacán, se localizan 53 plantas de tratamientos de aguas residuales construidas y 30 por concluir. De las cuales 34 están en operación, esto equivale al 64.15% del total de las plantas tratadoras totalmente construidas (Ceac, German Tena, 2016), de ellas 13 plantas operan por el proceso de lodos activados con un caudal de operación de 2308.3 lps.

El municipio de Pátzcuaro, Michoacán, cuenta con 3 instalaciones para el tratamiento de aguas residuales las cuales vierten sus aguas al lago de Pátzcuaro. Una de ellas se ubica en Janitzio llamada “Isla de Janitzio” y tratan 1 lps por el tratamiento de lodos activados. La segunda se encuentra en el municipio de Pátzcuaro, llamada “Las Garzas” y se tratan 15 lps por el tratamiento de zanjas de oxidación. La tercera se ubica municipio de Pátzcuaro, llamada “San Pedrito”, y trata 50 lps por el tratamiento de lodos activados.

2.1 Tratamientos de aguas residuales

Existen variados tratamientos para un agua residual, en México, los métodos de tratamiento de aguas residuales son principalmente del tipo biológicos, los cuales pueden clasificarse como aerobios y anaerobios, dependiendo de las características de la planta de tratamiento y el uso que se desee destinar.

Las etapas generalizadas de los tratamientos de agua residuales se clasifican en:

- a) **Pretratamiento.** Consiste en eliminar los sólidos, tales como arenas y aceites.
- b) **Tratamiento Primario.** Asentamiento de sólidos presentes.
- c) **Tratamiento Secundario.** Tratamientos biológicos de la materia orgánica disuelta presente en el agua residual, transformándola en sólidos suspendidos que se eliminan con mayor facilidad.
- d) **Tratamiento Terciario.** Pasos adicionales como lagunas, micro filtración o desinfección.

Algunos de los métodos de tratamientos biológicos de aguas residuales son los siguientes: lodos activos, lechos bacterianos, filtros verdes, digestión anaeróbica, biodiscos, biocilindros, electrocoagulación, electrooxidación, reactor biológico de membrana, etc.

Los objetivos principales del tratamiento biológico aplicado al agua residual, son: transformar materia biodegradable disuelta y particulada en productos finales (CO_2 , H_2O , lodos de desecho), remover sólidos suspendidos y coloidales, principalmente la biomasa encargada de degradar la materia orgánica, transformar o remover nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, y en algunos casos remover trazas de compuestos orgánicos específicos (Metcalf y Eddy, 2003). En nuestro país el tratamiento más utilizado es el de lodos activados (Documentos de CONAGUA, 2010).

2.2 Proceso de los lodos activados

El proceso de lodos activados se basa en el aprovechamiento de la capacidad de los microorganismos para eliminar por asimilación y descomposición la materia orgánica biodegradable presente en las aguas residuales. Los procesos se llevan a cabo en reactores biológicos. Han surgido variaciones del sistema básico del proceso durante algunos años.

En la figura 2.2 se muestra una relación del número de plantas en el país clasificadas por el tipo de proceso que utilizan.

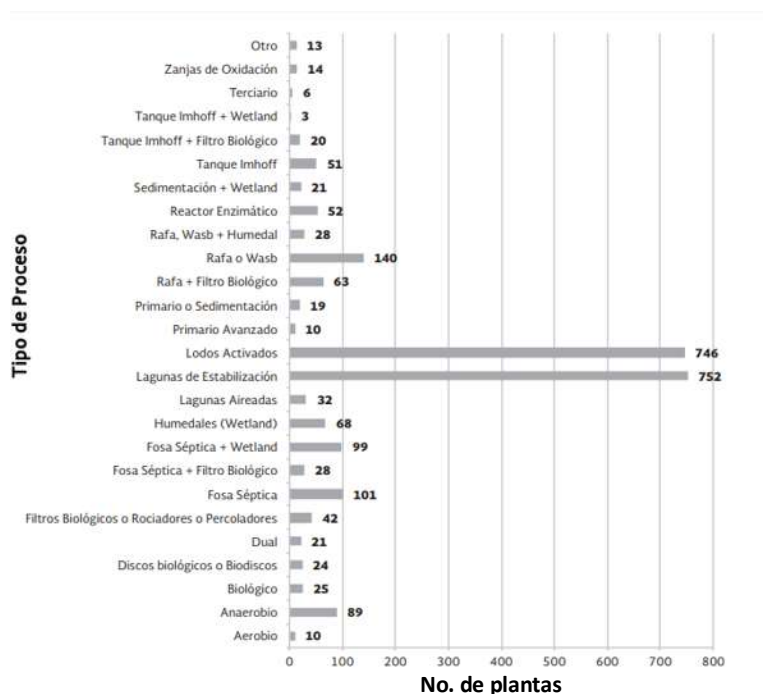


Figura 2.2 Tabla de relación de número de plantas de acuerdo al proceso que utilizan para el tratamiento de aguas residuales en México.

El principio básico del proceso consiste en poner en contacto las aguas residuales con una población microbiana mixta en forma de suspensión floculenta en un sistema aireado y agitado. La materia orgánica en suspensión y la coloidal se eliminan rápidamente de las aguas residuales por adsorción y aglomeración en los flóculos microbianos.

2.2.1 Etapas del proceso de lodos activados.

- Estabilización.** La materia orgánica y los nutrientes disueltos se descomponen lentamente por el metabolismo microbiano.
- Mineralización.** Parte del material nutriente se oxida a sustancias más simples como el anhídrido carbónico, agua, y compuestos nitrogenados (nitratos).

- c. **Asimilación.** Otra parte, se convierte en masa celular microbiana nueva (lodos o biomasa).
- d. **Respiración endógena.** Ocurre una auto-oxidación después del agotamiento de las reservas de alimento (materia orgánica); los microorganismos metabolizan su propio material celular sin reposición, ocurriendo una destrucción de las células y una sucesión de nuevas especies.

En el proceso oxidativo se suministra la energía necesaria para la etapa de adsorción y asimilación. Una vez que se alcanza el grado deseado de tratamiento del agua, la masa microbiana floculenta conocida como “lodo”, se separa del agua residual por sedimentación, esta etapa de separación se conoce también como “clarificación”, “asentamiento”. El sobrenadante de la etapa de separación resulta, el agua residual tratada y debe estar libre de sólidos suspendidos. La mayor parte del lodo asentado se regresa al sistema de aireación para mantener la concentración de estos lodos en el reactor. La otra parte de los lodos se extrae para su descarga y se conoce como “lodos activados desechados o excedentes”. Estos lodos desechados representan la cantidad neta de masa microbiana producida por asimilación en la etapa de aireación y es el “concentrado de contaminación” del sistema. Entonces las características de los floculos de lodos activados resultan importantes para la absorción de las materias coloidales, iónicas y en suspensión dentro del agua residual, y para la separación rápida, eficiente y económica de la masa microbiana del agua residual tratada.

Una planta de tratamiento que opere en condiciones favorables para el crecimiento microbiano, eliminará los nutrientes de una manera efectiva, precipitándolos en forma de biomasa. Solo una proporción de los microorganismos presentes en los lodos es viable y generará nueva masa celular. Ciertamente la parte que no se reproduce, conserva características favorables para la actividad bioquímica, utilizando nutrientes para proporcionar energía de mantenimiento.

Existen diferentes adaptaciones del proceso de lodos activados. Las características principales del proceso son una etapa de aireación, una etapa de separación y un sistema de reciclaje de los lodos (figura 2.3).

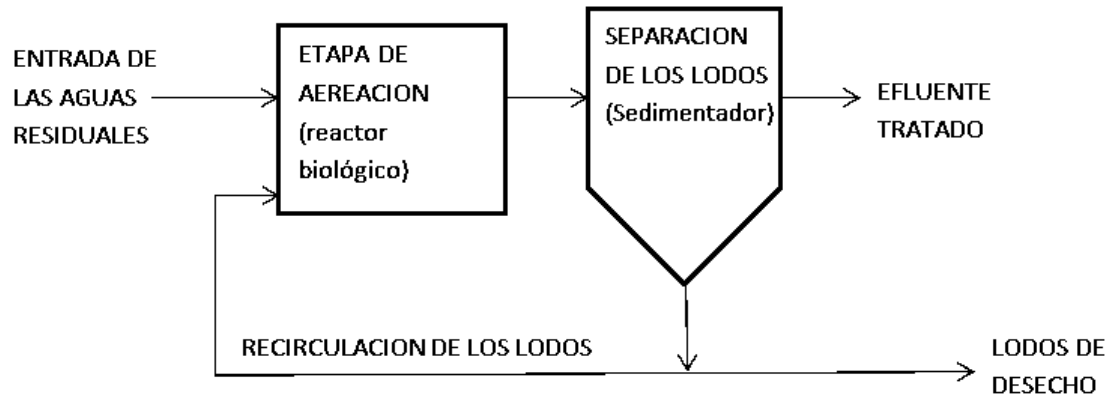


Figura 2.3 Esquema de las características principales de los procesos de lodos activados.

Los sistemas de aireación, que se pueden usar son sistema con burbujas, o con “difusores”, o sistemas mecánicos de aireación. El modo de operación es usualmente continuo.

2.3 Parámetros principales de operación del reactor biológico.

2.3.1 Concentración de los lodos.

La concentración de los lodos se puede representar como una concentración de sólidos en suspensión, de modo que la concentración en el tanque de aireación se puede mencionar en términos del valor de los “sólidos suspendidos en el licor mezclado” (SSLM). Sin embargo este término también hace referencia a sólidos en suspensión inorgánicos, por lo que más adecuadamente un parámetro más usual es el contenido del material volátil presente, conocido como “sólidos suspendidos volátiles” (SSV), como una indicación de la concentración microbiana.

2.3.2 Nivel de carga de la planta

La carga de la planta está expresada por varios parámetros que se basan en la relación con la que los nutrientes orgánicos entran al sistema, expresada como la cantidad de demanda de oxígeno por unidad de tiempo.

Uno de los más significativos parámetros es el “factor de carga de los lodos” o “relación de alimento a microorganismos” (relación F/M), donde la carga orgánica está relacionada con la cantidad de lodos en la etapa de aireación.

2.3.3 Tiempo de retención

El tiempo de retención, t_r , es el tiempo promedio empleado por el líquido en la etapa de aireación y es, por tanto, el tiempo de contacto entre los lodos y las aguas residuales. Tomando esto es un sistema continuo, será, el volumen del reactor dividida entre el caudal de entrada a la planta.

2.4 Características de los lodos

Se consideran como si fuera un sistema homogéneo de crecimiento biológico o un catalizador inorgánico, y su material no es de composición constante. Es un sistema formado por diversos microorganismos, junto con material inerte, orgánico e inorgánico.

Las características esenciales de un lodo especifican que debe contener una población microbiana capaz de descomponer una proporción tan grande como sea posible de los nutrientes en las aguas residuales que se purifican, y que debe flocular con facilidad. La población microbiana tendrá la tendencia a adaptarse por sí sola a los nutrientes disponibles, a menos que haya un desbalance nutritivo.

2.4.1 Floculación

El crecimiento de los lodos (flóculo) es importante, para la adsorción y aglomeración de materias iónicas, coloidales y en suspensión presentes en las aguas residuales, además para la rápida, eficiente y económica separación de los lodos procedentes de las aguas residuales tratadas.

Se trata de un proceso de autorregulación, ya que los lodos asentados consisten en tener un lodo con características favorables y los organismos dispersos se llevan fuera del sistema por el sobrenadante de la etapa de separación. Tench en 1979 noto que, un lodo con buenos flóculos en un sistema agitado está en un estado de equilibrio dinámico entre la tendencia de los flóculos de agregarse en flóculos mayores y el efecto de desfloculación del cortante turbulento que rompe los flóculos en unidades más pequeñas. (Eckenfelder, 1970).

2.5 Clases de reactores

En el tratamiento de las aguas residuales se emplean reacciones químicas y biológicas que transcurren bajo condiciones controladas en el interior de unidades o tanques llamados *reactores*. Las principales clases de reactores actualmente empleados son: 1) reactor de flujo intermitente, también llamado reactor batch; 2) reactor de flujo pistón, conocido también como reactor de flujo tubular; 3) reactor de mezcla completa, también conocido como reactor de tanque agitado con flujo continuo; 4) reactores de mezcla completa conectados en serie; 5) reactor de lecho empacado; 6) reactor de lecho fluidizado; y 7) reactor de manto de lodos con flujo ascendente. (Metcalf & Eddy, 1995).

En la planta de tratamiento de aguas residuales “San Pedrito”, se emplea un reactor biológico de mezcla completa, conocido también como reactor de tanque agitado con flujo continuo.

2.5.1 Reactor de tanque agitado con flujo continuo.

La mezcla completa se produce cuando las partículas que entran al tanque se dispersan de manera inmediata. Las partículas salen del tanque en proporción a su distribución estadística. La mezcla completa se puede tener en tanques circular o cuadrados si el contenido del tanque se distribuye en forma uniforme y continua (R. S. Ramahlo, 1983).

Considérese el reactor biológico continuo que opera bajo régimen estacionario y mezcla completa, representado en la Figura 2.4.

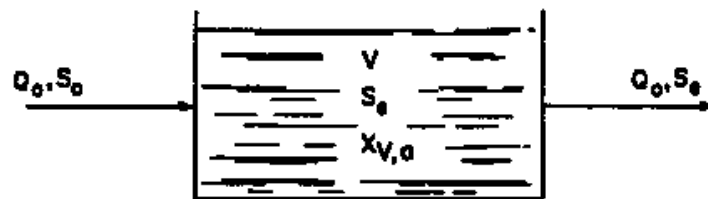


Figura 2.4. Fuente: R.S.Ramahlo, 1983. Diagrama simplificado del reactor continuo

El balance de materia del sustrato que entra y abandona el reactor puede escribirse como sigue:

$$\begin{aligned}
 &[\text{Velocidad neta de cambio en el reactor}] \\
 &= [\text{velocidad a la que el sustrato entra en el reactor (afluente)}] \\
 &- [\text{velocidad a la que el sustrato abandona el reactor (efluente)}] \\
 &- [\text{velocidad a la que el sustrato se oxida en el reactor}]
 \end{aligned}$$

Considerando régimen estacionario, la concentración de sustrato en el reactor permanece constante y por tanto el primer miembro de la ecuación desaparece. Los términos de la derecha se definen como:

$$\left[\begin{array}{l} \text{Velocidad a la que entra el sustrato} \\ \text{en el reactor (en el efluente)} \end{array} \right] = Q_o S_o$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{Velocidad a la que el sustrato} \\ \text{abandona el reactor (en el efluente)} \end{array} \right] = Q_o S_e$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{Velocidad a la que el sustrato se oxida} \\ \text{en el reactor} \end{array} \right] = \left(\frac{dS}{dt} \right)_a V$$

En este caso, podemos escribir la ecuación del balance como sigue:

$$0 = Q_o S_o - Q_e S_e - \left(\frac{dS}{dt}\right)_a V$$

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_a = \frac{Q_o(S_o - S_e)}{V}$$

Para la aplicación de esta ecuación, es necesario decidir qué modelo cinético se va a utilizar para $(dS/dt)_a$. se supondrá que el consumo de sustrato sigue la cinética de primer orden, esto es:

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_a = K S_e$$

Esta suposición es válida a bajas concentraciones de sustrato, que es normalmente el caso del reactor biológico continuo en condiciones de mezcla completa. El estudio de la cinética del tratamiento biológico aerobio conduce a determinar la velocidad a la cual los microorganismos degradan un residuo específico.

En las tablas 2.1 a 2.3 se muestran valores de referencia teóricos de los parámetros fisicoquímicos y biocinéticos de diferentes tipos de aguas residuales.

Tabla 2.1 Valores medios de los parámetros referentes al oxígeno en aguas residuales (AR) como porcentaje de la demanda teórica de oxígeno.

PARAMETRO	PORCENTAJE (%)
Demanda teórica de oxígeno (DTeO)	100
Demanda total oxígeno (DTO)	92
Demanda química de oxígeno (DQO) método normalizado	83
Demanda química de oxígeno (DQO) método rápido	70
Demanda biológica de oxígeno (DBO₂)	
Con nitrificación	65
Eliminando la nitrificación	55
Demanda biológica de oxígeno (DBO₅)	
Con nitrificación	58
Eliminando la nitrificación	52

Tabla 2.2 Relación entre demanda de oxígeno y carbono total para algunos compuestos orgánicos.

COMPUESTO	DTeO / COTe	DQO / COT
Acetona	3.56	2.44
Etanol	4.0	3.35
Fenol	4.12	2.96
Benceno	3.34	0.84
Piridina	3.33	-----
Ácido salicílico	2.86	2.83
Metanol	4.0	3.89
Acido benzoico	2.86	2.90
Sucrosa	2.67	2.44

Tabla 2.3 Parámetros biocinéticos típicos para distintas aguas residuales.

Agua Residual	k	Y	k _d	a
Urbana	0.017-0.03	0.73	0.075	0.52
Refinería	0.074	0.49-0.62	0.10-0.16	0.40-0.77
Química y petroquímica	0.0029-0.018	0.31-0.72	0.05-0.17	0.31-0.76
Cervecería	-----	0.56	0.10	0.48
Farmacéutica	0.018	0.72-0.77	-----	0.46
Proceso Kraft y blanqueado	-----	0.5	0.08	0.65-0.8

3. Metodología

Las actividades se realizaron para la determinación de la constante de biodegradación del reactor y la producción de biomasa, se analizaron dando seguimiento a la norma NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en la descarga de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

3.1 Caracterización del agua residual de entrada a la planta

La caracterización del afluente a la planta del agua residual de la entrada (figura 3.1), se realizó tomando un volumen representativo de 5 L en cada muestreo. Estos muestreos se realizarán por un periodo de 1 año en las diferentes temporadas. Estas muestras se evaluarán en planta y en los laboratorios de Análisis Instrumental y de Ingeniería Ambiental y de Servicios de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, para determinar los parámetros fisicoquímicos y biológicos.



Figura 3.1 Agua de entrada a la planta (afluente)

3.1.1 Parámetros fisicoquímicos del agua

Para determinar los parámetros fisicoquímicos del agua, se cuantifica el pH, conductividad eléctrica (CE) y temperatura con el equipo multiparamétrico Hach modelo 97130, para verificar que estos afluentes cumplan con los límites permisibles establecidos en las normas NMX-AA-007-SCFI-2013, NMX-AA-008-SCFI-2016 y NMX-AA-093-SCFI-2000.

Metodología

3.1.2 Determinación de Sólidos Totales (ST)

Los sólidos totales se determinan siguiendo la norma NMX-AA-034-SCFI-2001, para ello, se tomarán 50 mL de muestra, se llevan a evaporación en una capsula de porcelana, se enfría y se determinará la cantidad de los sólidos por diferencia de peso. Este parámetro está relacionado con la CE del agua residual, la cual es más fácil de medir que cuantificar los sólidos disueltos por evaporación. Después del tratamiento del agua, la materia orgánica estabilizada se convierte en formas solubles ionizables, lo cual va a impactar en el valor de la CE.

Se calcula los sólidos totales (mg/L), con la siguiente ecuación:

$$ST = \frac{(G1 - G) * 1000000}{V}$$

Donde:

G = peso de la capsula vacía, en g.

G1 = peso de la capsula con el residuo, después de la evaporación, en g.

V = volumen de muestra tomada, en mL.

3.1.3 Determinación de formas nitrogenadas

Para la determinación de las formas nitrogenadas, se determinan nitratos y nitrógeno total kjeldahl (Nitrógeno amoniacal y Nitrógeno orgánico).

3.1.3.1 Determinación de Nitratos

Con el fin de comparar nitratos entre el afluente y efluente se da seguimiento a la norma NMX-AA-082-1986, para la determinación de nitratos, se tomó 100 mL de muestra, previamente filtrada, adicionando 1 mL de HCl concentrado, reposando por 10 minutos la solución para medir absorbancias, para medir estas, se empleó el espectrofotómetro ultravioleta UV-visible, como patrón de referencia se empleara el agua destilada.

3.1.3.2 Nitrógeno total kjeldahl

Se determina la materia orgánica contenida en el agua residual en sus formas nitrogenadas como nitrógeno amoniacal y nitrógeno orgánico que son factibles de degradar por este tipo de tratamiento, para ello se sigue la norma NMX-AA-026-SCFI-2001, la determinación de nitrógeno amoniacal se lleva a cabo tomando un volumen de muestra de 250 mL en un matraz kjeldahl, ajustando a un pH de 9 para poder proceder a su destilación (figura 3.2). Se recolectan 300 mL en una solución de ácido bórico (figura 3.3) y se titula con ácido sulfúrico. Tomando como patrón de referencia agua destilada.

Metodología

La determinación del nitrógeno orgánico, se realizó con el residuo contenido en el matraz kjeldahl, adicionando 50 mL de solución digestora en condiciones neutras, y se lleva a cabo a digestión hasta aparición de humos blancos (figura 3.4), se enfría y se adiciona 500 mL de agua destilada y se procede a destilar. La muestra recolectada, se titula con ácido sulfúrico.



Figura 3.2. Destilación de afluente y patrón de referencia.



Figura 3.3. Destilado de afluente y patrón de referencia.



Figura 3.4. Digestión para determinar Nitrógeno orgánico.

Metodología

Para el cálculo, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$N_{\text{NH}_3} = \frac{(A - B) * N * 14 * 1000}{V}$$

$$N_{\text{org}} = \frac{(A - B) * N * 14 * 1000}{V}$$

$$N_T = N_{\text{org}} + N_{\text{NH}_3}$$

Donde:

N_{NH_3} = nitrógeno amoniacal, expresado en mg/L.

N_{org} = nitrógeno orgánico, expresado en mg/L.

N_T = nitrógeno total Kjeldahl, expresada en mg/L.

A = mL de ácido sulfúrico gastados en la titulación de la muestra.

B = mL de ácido sulfúrico gastados en la titulación del blanco.

N = normalidad del ácido sulfúrico.

14 = peso equivalente del nitrógeno.

V = volumen de muestra, mL.

3.1.4 Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno, DBO_5

El oxígeno presente en el agua residual es necesario para que los microorganismos presentes lleven a cabo la descomposición de la materia orgánica por reacciones bioquímicas, por lo cual se determina siguiendo la norma NMX-AA-028-SCFI-2001. Se tomó una muestra de agua residual (% de dilución) en una botella tipo winkler (figura 3.5) la cual se llena con agua saturada de oxígeno y nutrientes, incubándose a 20°C por 5 días. Pasado este tiempo se cuantifica el oxígeno disuelto remanente por titulación utilizando el método de winkler modificado.



Figura 3.5 Botellas Winkler para DBO_5 con agua del afluyente.

Metodología

La DBO_5 (mg/L) se determina utilizando la siguiente ecuación:

$$DBO_5 = OD_i - OD_5 / (\% \text{ dilucion})$$

Donde:

OD_i = oxígeno disuelto inicial, expresada en mg/L.

OD_5 = oxígeno disuelto al quinto día, expresada en mg/L.

El cálculo del oxígeno disuelto (mg/L), se determina usando la siguiente ecuación:

$$OD = \frac{N * mL \text{ de tiosulfato} * n * 1000}{Vr}$$

Donde:

N = normalidad de la solución de tiosulfato de sodio.

N = gramos/equivalente de oxígeno que equivale a 8.

Vr = volumen corregido por el desplazamiento de los reactivos agregados, en nuestro caso equivale a 98.7 ya que se utilizó la botella tipo winkler.

3.1.5 Determinación de la demanda química de oxígeno, DQO

La DQO se determina para cuantificar la materia orgánica carbonosa factible de degradar en condiciones oxidantes fuertes, que permitirá cuantificar de manera indirecta la cantidad de biomasa formada en el reactor biológico bajo condiciones aerobias. Además, indicará los requerimientos de oxígeno necesario que deberán ser suministrados en el reactor biológico para la estabilización de la materia orgánica en compuestos más simples. Esta determinación se hace por el método de reflujo cerrado, se prepara un lote de viales previamente, siguiendo con la norma NMX-AA-030/2-SCFI-2011, se tomarán 2 mL de muestra de agua y se procede a su digestión, en un termoreactor marca HACH modelo DR-200 por 2 horas, posteriormente se determina su concentración por medio espectrofotométrico en un espectrómetro DR-5000 y volumétrico con una solución de sulfato ferroso amoniacal.

El cálculo de la DQO (mg/L), por método volumétrico, se determina con la siguiente ecuación:

$$DQO = \frac{8000 * N * (V_1 - V_2)}{V_0}$$

Metodología

Donde:

N = normalidad de sulfato de amonio y hierro (II) utilizada en la medición.

V_o = volumen de la porción de prueba antes de dilución (si la hay), expresada en mL.

V_1 = volumen de sulfato de amonio y hierro (II) usado en la titulación contra el blanco, expresado en mL.

V_2 = volumen del sulfato de amonio y hierro (II) usado en la titulación contra la porción de prueba, expresada en mL.

8000 = masa molar de medio mol de oxígeno, expresada en mg/mol.

3.2 Caracterización del reactor biológico

3.2.1 Parámetros Fisicoquímicos del agua

La determinación de los parámetros fisicoquímicos del agua del reactor (figura 3.6), se realiza con un equipo multiparamétrico Hach modelo 97130, midiendo el pH, CE y temperatura, con la finalidad de verificar que cumpla con los límites establecidos en las normas NMX-AA-007-SCFI-2013, NMX-AA-008-SCFI-2016, NMX-AA-093-SCFI-2000.



Figura 3.6. Reactor biológico con sistema de aireación superficial de la planta tratadora de aguas residuales “San Pedrito”, Pátzcuaro, Mich.

Metodología

3.2.2 Determinación de oxígeno disuelto (OD)

Se determina el oxígeno disuelto que es vital en procesos aerobios para la actividad microbiana, es necesario cuantificarlo y monitorearlo diariamente para el control y suministro del oxígeno por lo aireadores, ya que en caso de no tenerlo o que este baje a condiciones críticas se volverá un proceso anaerobio, se determina siguiendo la norma NMX-AA-012-SCFI-2001, se cuantificará por el método Winkler modificado, la muestra que se requiere deberá tener un tratamiento previo que permita obtener un agua con la menor cantidad de sólidos suspendidos posibles.

Calcular el oxígeno disuelto (mg/L), con la siguiente ecuación:

$$OD = \frac{N * mL\ de\ tiosulfato * n * 1000}{Vr}$$

Donde:

N = normalidad de la solución de tiosulfato de sodio.

n = gramos/equivalente de oxígeno que equivale a 8.

Vr = volumen corregido por el desplazamiento de los reactivos agregados, en nuestro caso equivale a 98.7 ya que se utilizó la botella tipo winkler.

3.2.3 Determinación de sólidos Totales (ST), Sólidos fijos (SFT) y Sólidos Volátiles (SVT)

La determinación de estos parámetros nos permite conocer la cantidad de biomasa existente en el reactor así como el incremento de biomasa al degradar la materia orgánica, para cuantificarlos se da seguimiento a la norma NMX-AA-034-SCFI-2001, los sólidos totales se determinan al igual como en el punto 3.1.1 (figura 3.7). Los sólidos volátiles se determinaron con el residuo llevándolo a calcinación, se enfría y se cuantifica por diferencia de pesos.



Metodología

Figura 3.7. Evaporación de sólidos totales de agua del reactor.

Calcular los sólidos con las siguientes ecuaciones:

$$ST = \frac{(G1 - G) * 1000000}{V}$$

$$SVT = \frac{(G - G2) * 1000000}{V}$$

$$SFT = ST - SVT$$

Donde:

ST = sólidos totales, expresados en mg/L.

SVT = sólidos volátiles totales, expresados en mg/L

SFT = sólidos fijos totales, expresados en mg/L.

G1 = peso de la capsula con el residuo, después de la evaporación, en g.

G = peso de la capsula vacía, en g.

V = volumen de muestra tomada, en mL.

G2 = peso de la capsula con el residuo después de la calcinación, g.

3.2.4 Determinación de la demanda química de oxígeno (DQO)

Se determina la demanda química de oxígeno en el reactor, que nos indicará la cantidad de oxígeno que debe suministrarse para mantener los niveles adecuados para que la población microbiana, lleve a cabo sus actividades bioquímicas de degradación de la materia, la determinación se realizó igualmente que para el afluente descrita en el punto 3.1.5 (figura 3.8).



Figura 3.8. Muestra de agua del reactor en vial para DQO.

Calculo de la DQO (mg/L), por procedimiento de titulación:

$$DQO = \frac{8000 * N * (V_1 - V_2)}{V_0}$$

Donde:

DQO = concentración de masa de DQO, expresada en mg/L.

N = normalidad del sulfato de amonio y hierro (II) utilizada en la medición.

V_o = volumen de la porción de prueba antes de dilución (si la hay), expresada en mL.

V₁ = volumen de sulfato de amonio y hierro (II) usado en la titulación contra el blanco, expresado en mL.

V₂ = volumen del sulfato de amonio y hierro (II) usado en la titulación contra la porción de prueba, expresada en mL.

8000 = masa molar de medio mol de oxígeno, expresada en mg/mol.

3.3 Caracterización del agua tratada o efluente

3.3.1 Parámetros fisicoquímicos

Los parámetros fisicoquímicos del efluente (figura 3.9) que se determinaron fueron el pH, CE y temperatura con el equipo multiparamétrico Hach modelo 97130, para verificar que el efluente cumpla con los límites establecidos en las normas NMX-AA-007-SCFI-2013, NMX-AA-008-SCFI-2016, NMX-AA-093-SCFI-2000.



Figura 3.9. Sedimentador o Clarificador de la planta de tratamiento de aguas residuales “San Pedrito”, Pátzcuaro, Mich.

Metodología

3.3.2 Determinación de Sólidos Suspendidos Totales (SST)

A fin de comparar los niveles de sólidos entre el agua del reactor y el efluente, se determinarán los sólidos suspendidos totales del efluente siguiendo la norma NMX-AA-034-SCFI-2001, para ello, se filtra una muestra de agua en papel de fibra de vidrio marca Whatman (GFA) previamente pesado, y se llevan a calcinación. Se enfría y se determinan por diferencia de pesos.

Los SST (mg/L), se calculan utilizando la siguiente ecuación:

$$SST = \frac{(G4 - G3) * 1000000}{V}$$

Donde:

G4 = peso del papel Whatman, g.

G3 = peso del papel Whatman y el residuo seco, g.

V = volumen de la muestra, mL.

3.3.3 Determinación de nitratos

Esta determinación nos permitirá comparar los niveles de nitratos entre el afluente y efluente, y se determinan igual que el punto 3.1.3.1 descrito anteriormente.

3.3.4 Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)

Para la determinación de DBO₅ se procede a realizarla como en el punto 3.1.4 descrito anteriormente.

El cálculo de DBO₅ (mg/L), se determina utilizando la siguiente ecuación:

$$DBO_5 = OD_i - OD_5$$

Donde:

OD_i = oxígeno disuelto inicial, en mg/L.

OD₅ = oxígeno disuelto al quinto día, en mg/L.

3.3.5 Determinación de la demanda química de oxígeno (DQO)

Esta determinación se realiza igualmente que en el punto 3.1.5 del afluente descrita anteriormente.

Calculo de la DQO (mg/L), por procedimiento de titulación, utilizar la siguiente ecuación:

$$DQO = \frac{8000 * N * (V_1 - V_2)}{V_0}$$

Donde:

N = normalidad de sulfato de amonio y hierro (II) utilizada en la medición.

V_o = volumen de la porción de prueba antes de dilución (si la hay), expresada en mL.

V₁ = volumen de sulfato de amonio y hierro (II) (FAS) usado en la titulación contra el blanco, expresado en mL.

V₂ = volumen del sulfato de amonio y hierro (II) (FAS) usado en la titulación contra la porción de prueba, expresada en mL.

8000 = masa molar de medio mol de oxígeno, expresada en mg/mol.

3.4 Pruebas de consumo de oxígeno por biodegradabilidad

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es una prueba que se realiza a 20 °C en un ambiente controlado, usualmente se realiza en 5 días (DBO₅); esta prueba mide el oxígeno consumido por las bacterias que oxidan la materia orgánica mediante reacciones bioquímicas.

La demanda bioquímica de oxígeno utilizando el método respirométrico (figura 3.10) es una alternativa al método normalizado de dilución comúnmente utilizado.

En el método respirométrico la muestra se mantiene agitada en todo momento, durante el tiempo de la prueba, lo que permite que la prueba se asemeje a las condiciones naturales, en el método de dilución no se le agrega oxígeno adicional a la muestra lo que conlleva a una gran reducción en el porcentaje de oxígeno y un retardo en las reacciones bioquímicas que se realizan.

En el método respirométrico el bióxido de carbono producido durante la oxidación de la materia orgánica es removido continuamente mediante un proceso de absorción con hidróxido de potasio, lo que controla la diferencia de presión, la cual a su vez es proporcional a la cantidad de oxígeno usado.

En el método respirométrico el oxígeno consumido por las bacterias se reabastece con el aire que se encuentra encima de la muestra y que teóricamente contiene 21% de oxígeno, esto se realiza por medio de la agitación constante, con esto el oxígeno del aire pasa a la muestra asemejando las condiciones naturales.

Los cambios de presión (presión atmosférica) en el sistema respirométrico, se previenen mediante el sellado de la muestra y sensores de presión controlan la presión del aire en el interior de la botella de la prueba.

Metodología

Entre las ventajas del método respirometrico en relación con el método de dilución podemos mencionar las siguientes:

- 1.- El método respirometrico es fácil de monitorear.
- 2.- Disminución del tiempo total de la prueba.
- 3.- Menor tiempo utilizado en la preparación de la muestra.
- 4.- Resultados comparativos con el método de dilución (DBO_5) en 2 o 3 días.
- 5.- No se requiere calibración ni medición de oxígeno disuelto.



Figura 3.10. Equipo BOD Track II marca Hach, método respirométrico para pruebas de consumo de oxígeno por biodegradabilidad.

4. Resultados

De los muestreos realizados en la planta tratadora de aguas residuales y una vez efectuados los análisis químicos correspondientes, los resultados obtenidos para los diferentes parámetros analizados fueron los siguientes:

4.1 Caracterización del afluente

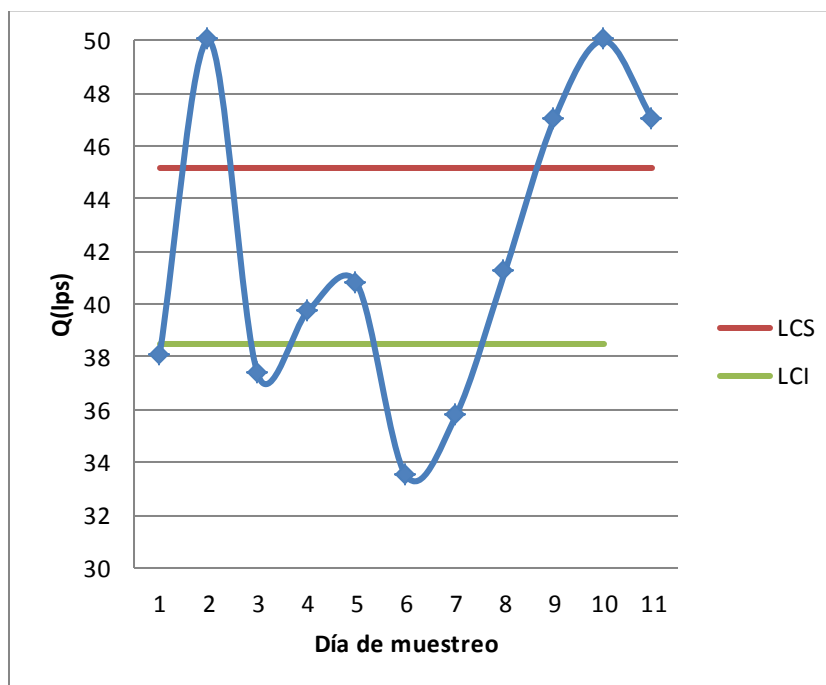
El resultado generalizado de los parámetros para la caracterización del afluente se presenta en la tabla 4.1, estos valores son un promedio de los resultados obtenidos. El caudal registrado en cada muestreo (Tabla 4.2) variaba dependiendo el día y la hora por lo que, se tomaron en cuenta valores dentro del rango de 30-50 lps que es el rango más representativo de operación en la mayoría de los muestreos, este caudal nos indica la variación en los resultados, ya que los podemos relacionar con este parámetro. La gráfica 4.1 indica que el caudal empleado oscila 38 a 45 lps.

Tabla 4.1. Parámetros para la caracterización del afluente

Parámetro	Resultado
pH	6.8
CE	800 microsiemes/cm
T	20°C
N _{orgánico}	29 ppm
N _{amoniaco}	4 ppm
N _{T KJELDAHL}	33 ppm
Nitratos (NO ₃ ⁻)	26 ppm
Sólidos totales (ST)	680 ppm
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	190 ppm
Demanda química de oxígeno (DQO)	260 ppm
Caudal	30-50 lps

Tabla 4.2. Registro del caudal en un rango de 30-50 lps.

Día de muestreo	Q (lps)
1	38
2	50
3	37
4	40
5	41
6	34
7	36
8	41
9	47
10	50
11	47



Gráfica 4.1. Muestreo del Caudal.

4.2 Parámetros fisicoquímicos

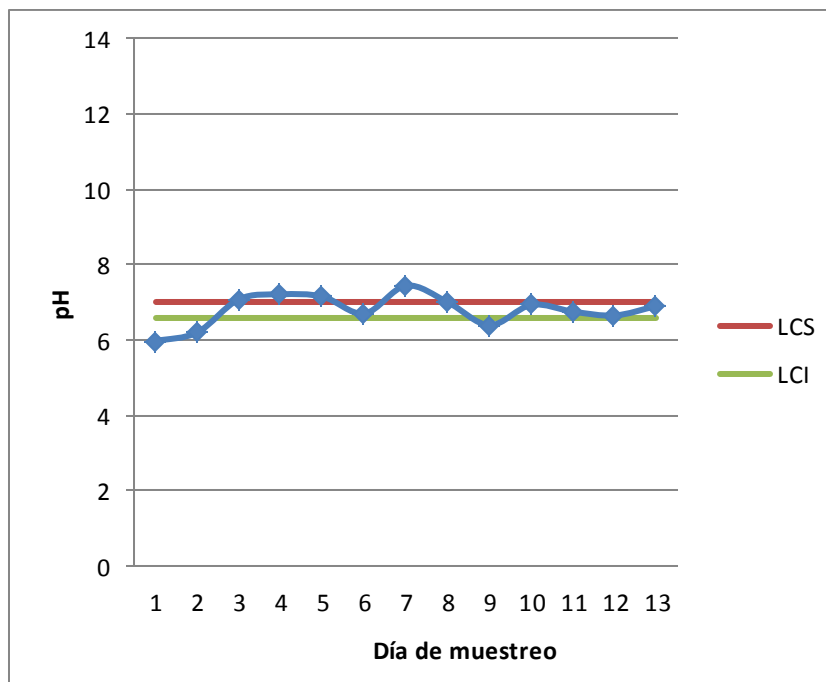
Los resultados experimentales obtenidos en cada uno de los parámetros fisicoquímicos utilizados en la caracterización del agua residual de la planta tratadora de aguas residuales “San Pedrito”, se encuentran distribuidos en las tablas 4.3 a 4.8, con la determinación de estos parámetros se obtiene información general sobre la composición más común del agua residual.

4.2.1 Registro de pH

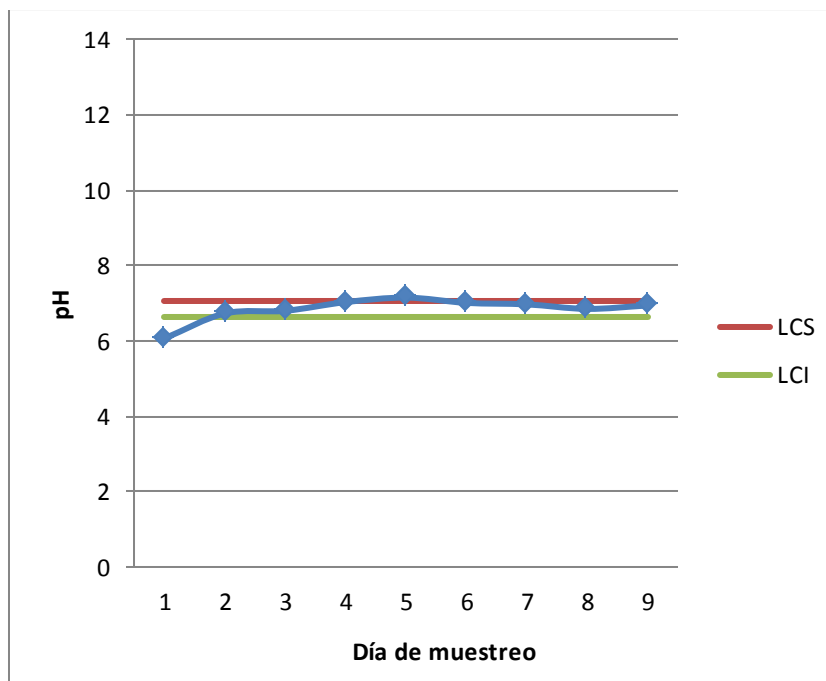
En la tabla 4.3 se muestran los resultados del pH del afluente y agua de recirculación más afluente (agua mixta), donde este oscila entre 6.6 a 7 y por otra parte este mismo parámetro oscila entre 7.1 a 7.5 para el efluente y para el reactor de 6.6 a 7.2, esto nos indica que el pH del afluente y del efluente se encuentran en un pH aceptable para su tratamiento y no requiere de ningún tratamiento químico para su ajuste y vertido a al lago de Pátzcuaro de acuerdo a lo establecido en la norma NOM-001-SEMARNAT-1996. Estos comportamientos se pueden apreciar en las gráficas 4.2 a 4.5.

Tabla 4.3. Registro de pH para los diferentes puntos de muestreo.

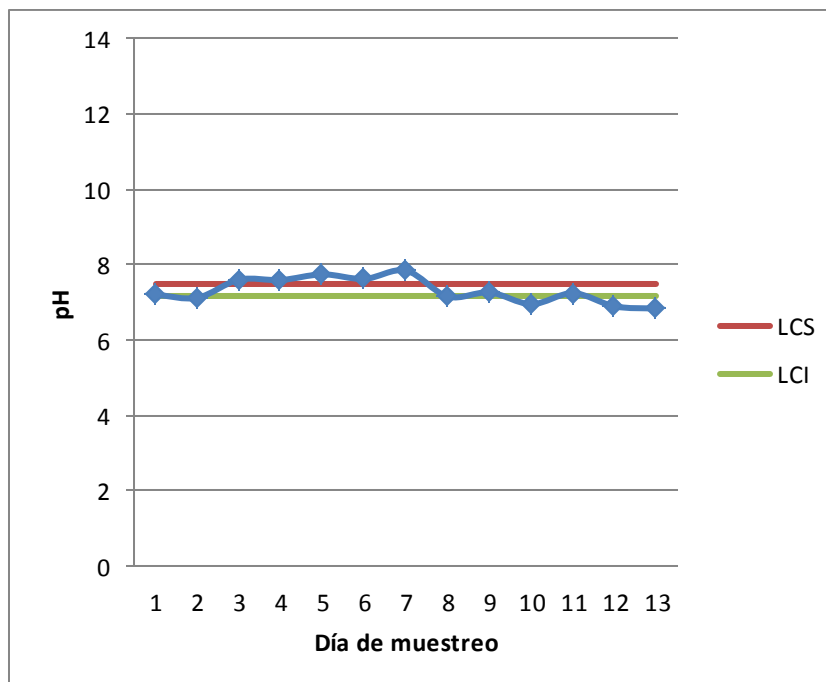
Muestreo	Afluente	Agua mixta	Efluente	Reactor
1	5.97	6.07	7.2	6.54
2	6.2	6.73	7.33	6.57
3	7.08	6.8	7.54	7.54
4	7.21	7.03	7.59	7.19
5	7.15	7.15	7.74	7.32
6	6.7	7.01	7.62	6.65
7	7.44	6.97	7.84	7.98
8	7	6.85	7.15	6.26
9	6.39	6.94	7.26	7.1
10	6.93		6.95	6.8
11	6.75		7.24	6.61
12	6.65		6.89	6.34
13	6.9		6.83	6.85



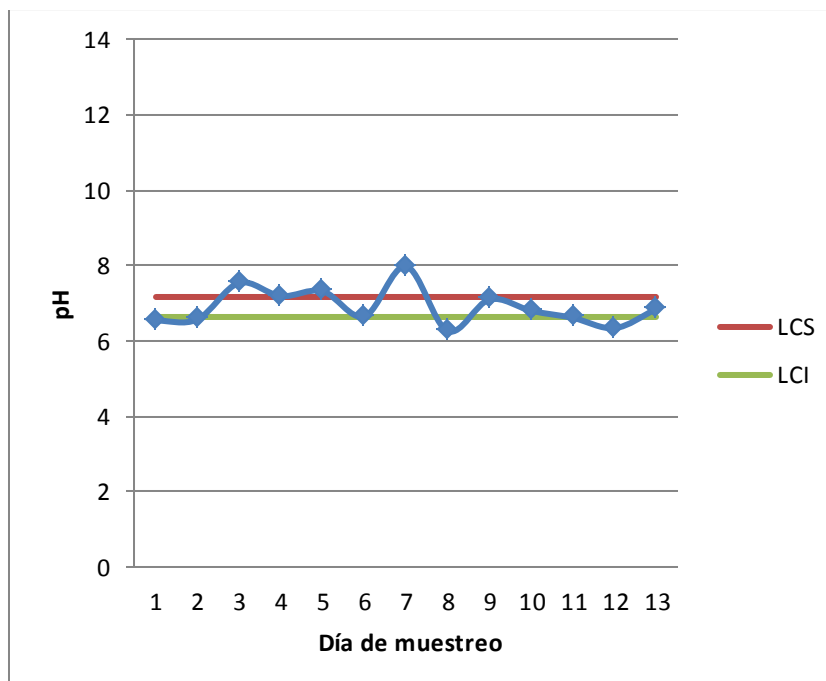
Gráfica 4.2. Muestreo del pH del afluente.



Gráfica 4.3 Muestreo del pH del agua mixta.



Gráfica 4.4. Muestreo del pH del efluente.



Gráfica 4.5. Muestreo del pH del reactor.

4.2.2 Registro de Conductividad eléctrica (CE)

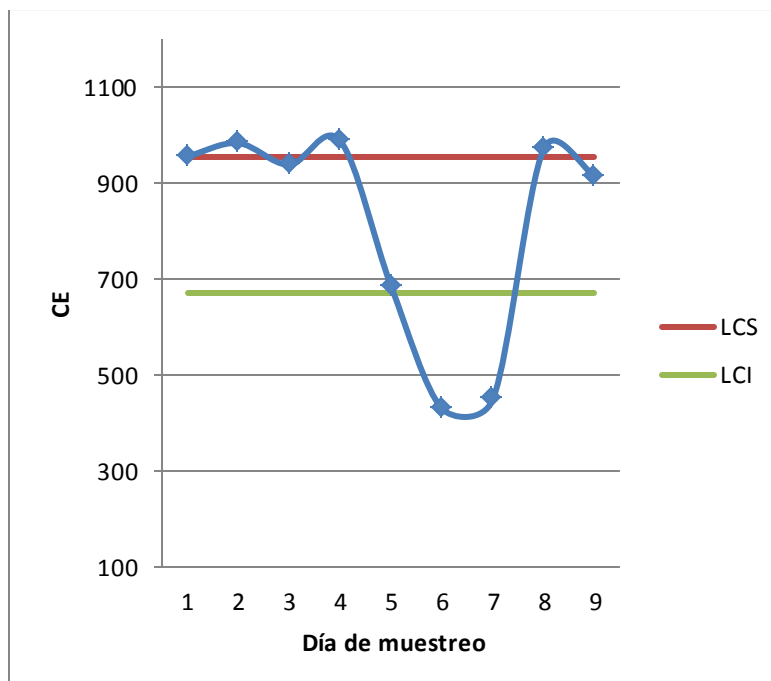
En la tabla 4.4 se presentan los resultados de la CE del afluente, agua mixta, efluente y reactor que oscilan entre 650 a 870, 670 a 950, 600 a 790, 670 a 950 $\mu\text{S/cm}$, respectivamente. Los valores correspondientes al afluente y el reactor son muy parecidos en virtud de que mantienen sus características iniciales antes del proceso, en cambio se observa una ligera disminución en el efluente, esto tal vez debido a la formación de compuestos orgánicos e inorgánicos estables que no tienen la capacidad de ionizarse. Estos comportamientos se pueden apreciar en las gráficas 4.6 a 4.9.

Tabla 4.4. Registro de CE para los diferentes puntos de muestreo.

Muestreo	Afluente	Agua mixta	Efluente	Reactor
1	919	956	908	883
2	992	984	762	807
3	1086	939	891	846
4	988	989	864	806
5	570	686	809	853
6	448	430	324	352
7	465	450	297	337
8	848	973	710	640
9	682	915	801	791
10	966		672	720
11	541		730	828
12	576		626	774
13	815		791	735



Gráfica 4.6. Muestreo de la CE del afluente.



Gráfica 4.7. Muestreo de la CE del agua mixta.



Gráfica 4.8. Muestreo de la CE del efluente.



Gráfica 4.9. Muestreo de la CE del reactor.

Análisis y discusiones de resultados

4.2.3 Registro de Temperatura.

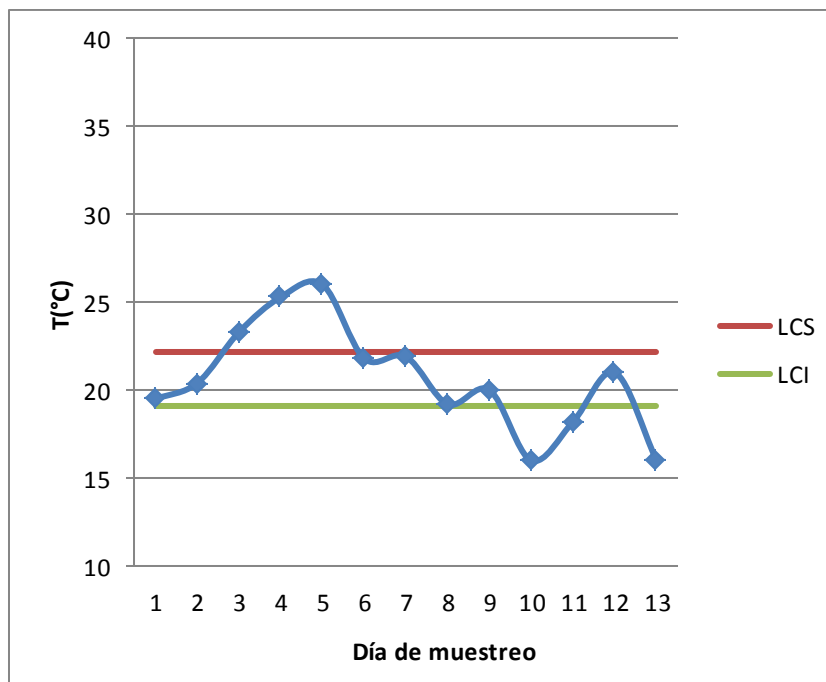
En la tabla 4.5 se presentan los resultados obtenidos para los diferentes puntos de muestreo, donde la temperatura fluctúa entre 26 y 25 °C en la planta, estos fueron los datos de mayor valor, mientras que a temperaturas de menor valor fueron entre 15 y 16 °C. El comportamiento de este parámetro para el afluente, reactor, agua mixta y efluente se muestran en las gráficas 4.10 a 4.13.

Se observa que la temperatura del afluente a la planta se encuentra por debajo de los 20 °C que es una temperatura recomendable, sin embargo esta caída de temperatura se debe a las condiciones climáticas y geográficas de la localidad en donde se encuentra la planta. Si bien es cierto, este descenso de temperatura podría minimizar y retardar las reacciones bioquímicas (catabólicas y anabólicas) que realizan las bacterias, pero se observó que esta temperatura se recupera en el transcurso del día y se mantiene estable en la mayor parte del tiempo del proceso.

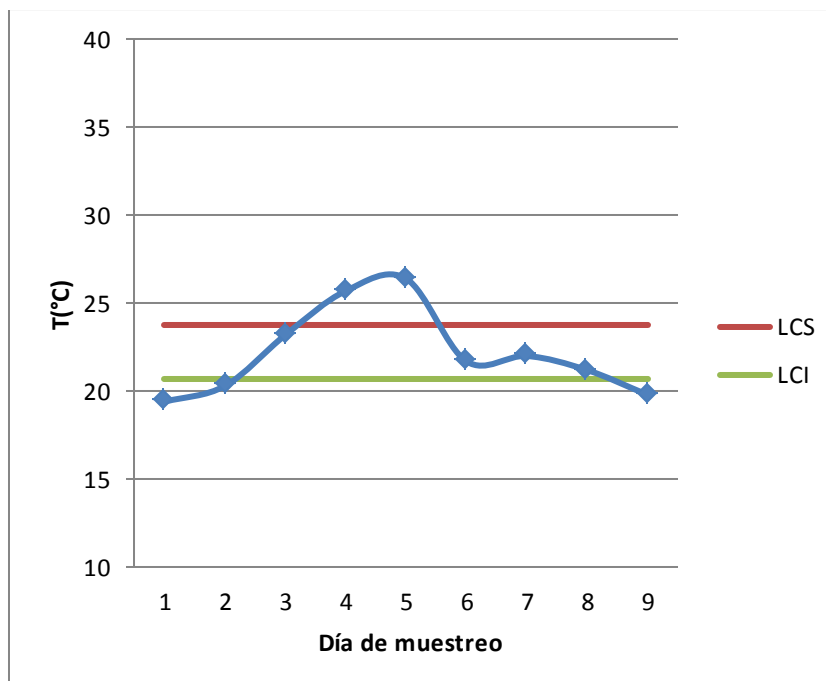
El límite máximo permisible establecido por la NOM-001-SEMARNART-1996 es 40°C, por lo que se opera dentro de lo establecido.

Tabla 4.5. Registro de la temperatura (°C) para los diferentes puntos de muestreo.

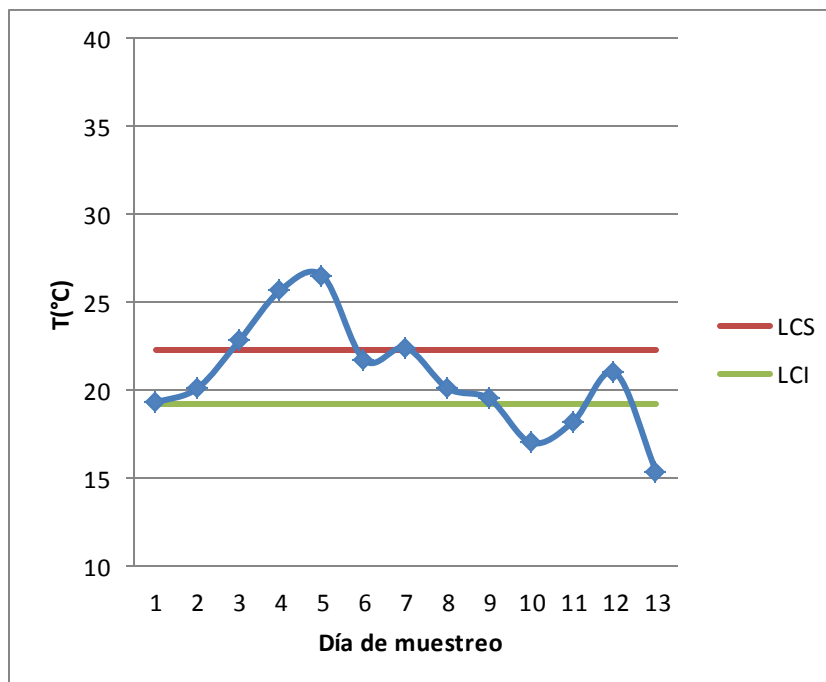
Muestreo	Afluente	Agua mixta	Efluente	Reactor
1	19.5	19.4	19.5	21.1
2	20.4	20.3	20.1	20.1
3	23.3	23.2	21.9	21.9
4	25.3	25.7	25.7	25.4
5	26	26.4	26.5	24.7
6	21.8	21.7	21.7	21.8
7	21.9	22	22.4	22.1
8	19.2	21.2	20.1	20
9	20	19.8	19.5	18.9
10	16		17	16.3
11	18.2		18.2	18.7
12	21		21	21
13	16		15.3	15



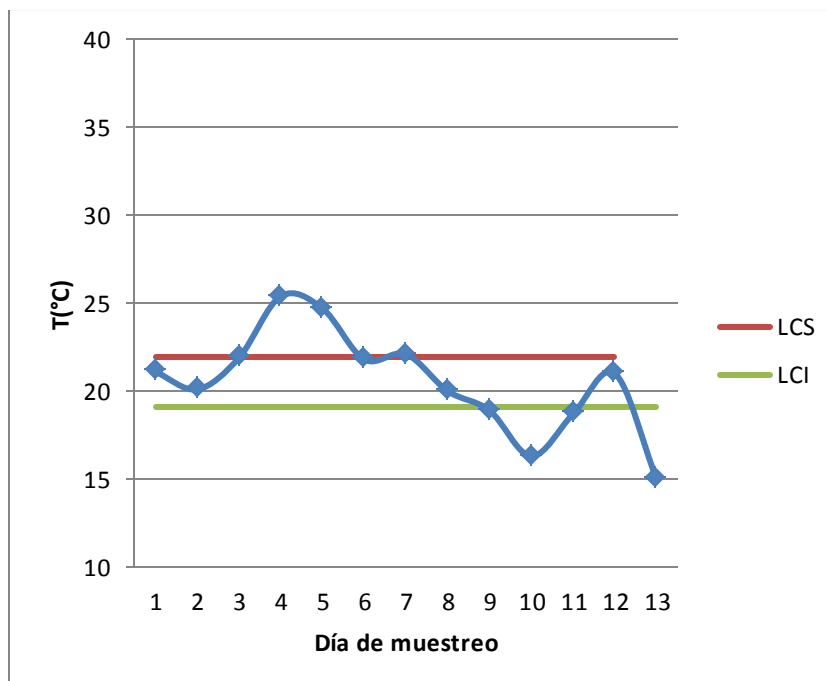
Gráfica 4.10 Muestreo de la temperatura del afluente.



Gráfica 4.11. Muestreo de la temperatura del agua mixta.



Gráfica 4.12. Muestreo de la temperatura del efluente.



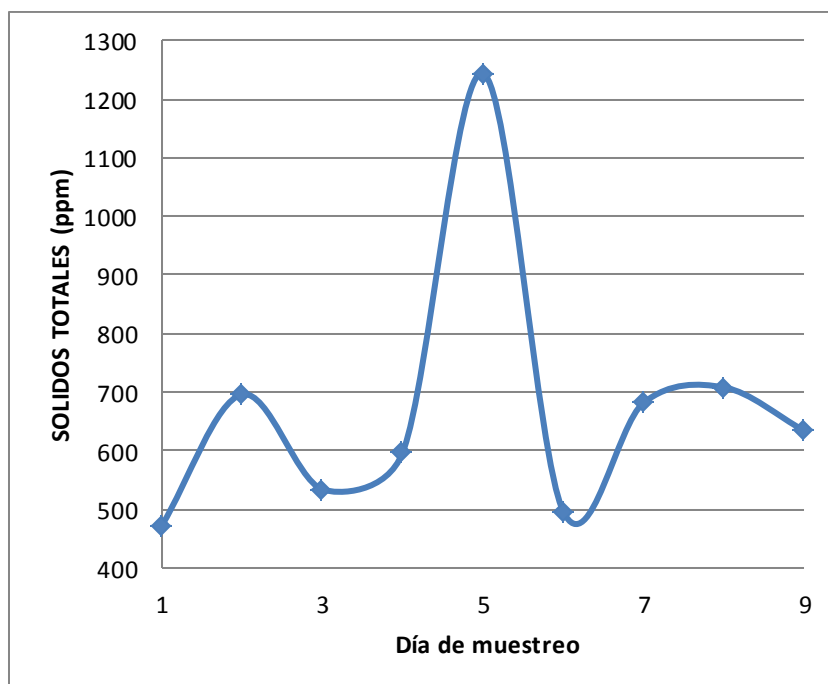
Gráfica 4.13. Muestreo de la temperatura del reactor.

4.2.4 Registro de sólidos.

En la tabla 4.6 se presentan los resultados de este parámetro que oscilan entre 400 a 700 mg/L de sólidos totales en el afluente, sin embargo, cuando la planta se desestabiliza por acciones de operación o cuando no se controla el caudal de entrada a la planta estos tienden a aumentar. Los sólidos totales del reactor oscilan entre 2000-4000 mg/L (Tabla 4.7) lo que cumple con lo establecido según el proceso aerobio de lodos activados, sin embargo, también obtuvimos valores muy elevados, este comportamiento está relacionado con la cantidad de recirculación de lodos que se realiza en la operación. Los sólidos volátiles totales del reactor están dentro del rango de porcentaje de 70-95% del total de sólidos, lo que indica la presencia de mayor cantidad de materia orgánica que se relaciona con la producción de biomasa. Los sólidos suspendidos totales en el efluente oscilan entre 2 a 6 mg/L (Tabla 4.8), el límite máximo permisible establecido por la NOM-001-SEMARNAT-1996 es de 60-100 mg/L, lo que establece que se opera dentro del límite. El comportamiento de este parámetro se muestra en las gráficas 4.14 a 4.16.

Tabla 4.6. Sólidos Totales del afluente.

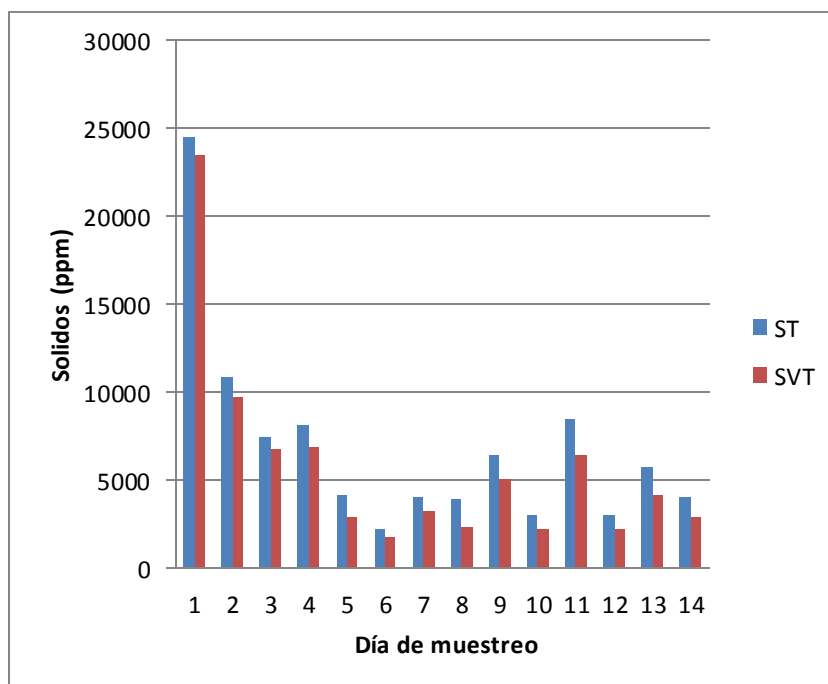
Muestreo	ST (mg/L)
1	472
2	696
3	534
4	597
5	1244
6	496
7	682
8	708
9	634



Gráfica 4.14. Muestreo de los Solidos totales del afluente.

Tabla 4.7. Registro de Sólidos en el reactor.

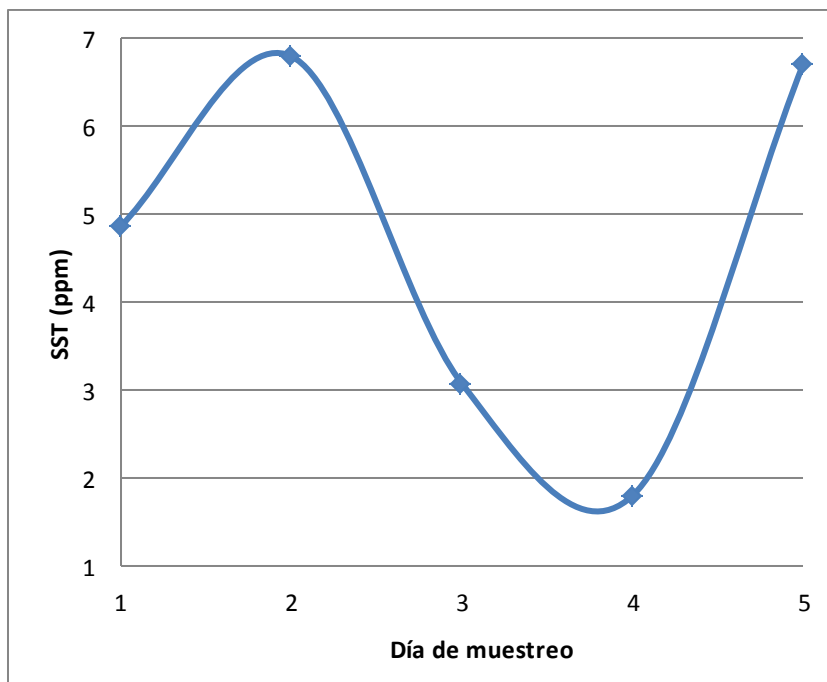
Muestreo	ST (mg/L)	SVT (mg/L)	SFT (mg/L)
1	24526	23436	1090
2	10838.33	9770	1068.33
3	7498.75	6740	758.75
4	8118.75	6875	1243.75
5	4198.75	2942.5	1256.25
6	2182	1745.6	436.4
7	4086	3268.8	817.2
8	3901.66	2351.66	1550
9	6458.33	5023.33	1435
10	3001.92	2184.61	817.30
11	8418	6406	2012
12	3036	2226	810
13	5720	4172	1548
14	4016	2880	1136



Gráfica 4.15. Muestreo de los Sólidos Totales y Sólidos Volátiles Totales del reactor.

Tabla 4.8. Registro de sólidos en el efluente.

Muestreo	SST (ppm)
1	4.8571
2	6.8
3	3.0769
4	1.8
5	6.7142



Gráfica 4.16. Muestreo de los Solidos suspendidos totales del efluente

4.3 Registro de DBO_5 y DQO

En la tabla 4.9 se presentan los resultados de la DBO_5 , del afluente y agua mixta donde oscila entre 150 a 250 mg/L, sin embargo, se muestran resultados menores lo que se puede relacionar con la cantidad de materia orgánica presente, esto debido al incremento en el caudal de entrada. El agua mixta es una parte afluente y recirculación de lodos por lo que su cantidad de materia orgánica es similar a la del afluente ya que los lodos ya no contienen materia orgánica degradable considerable. Los valores de DBO_5 para el efluente oscila entre de 14 a 20 mg/L (Tabla 4.9) lo que indica la degradación de materia orgánica en el reactor, con esto obtenemos un porcentaje de remoción mayor del 90%, sin embargo, también obtuvimos resultados que son elevados esto se debió a condiciones operativas en la planta concretamente, a la falta de remoción de solidos suspendidos en el sistema de sedimentación, trayendo como consecuencia una mayor cantidad de solidos sedimentables en el efluente. Este comportamiento se puede apreciar en las gráficas 4.17 a 4.19.

Los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996 es de 60-150 mg/L por lo que se opera dentro de los límites establecidos.

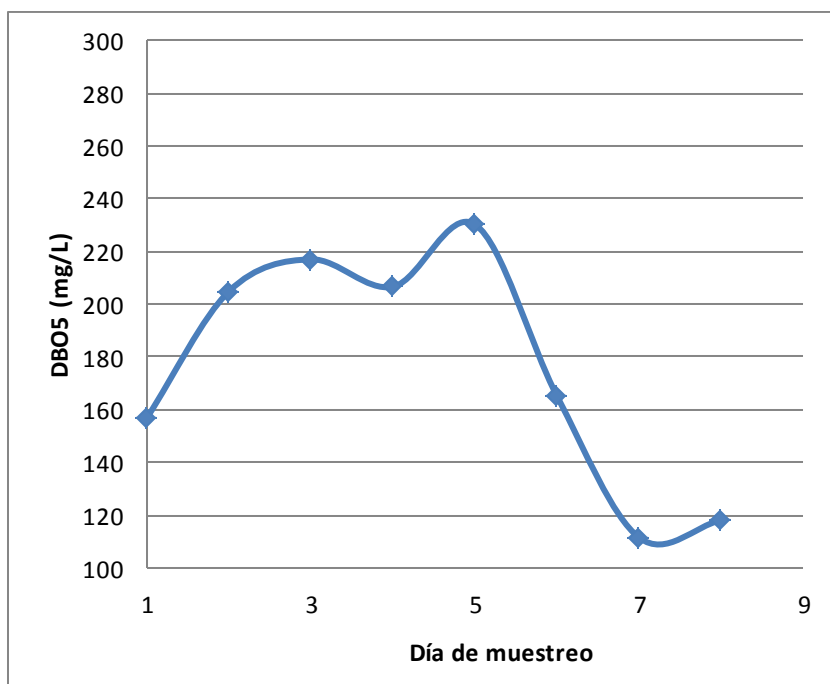
En la tabla 4.10 se presentan los valores de DQO obtenidos para afluente que oscilan entre 150 a 400 mg/L manifestado este comportamiento en relación a la carga orgánica presente en el momento, es por ello que se obtienen valores por encima de este rango. Los resultados obtenidos para el

Análisis y discusiones de resultados

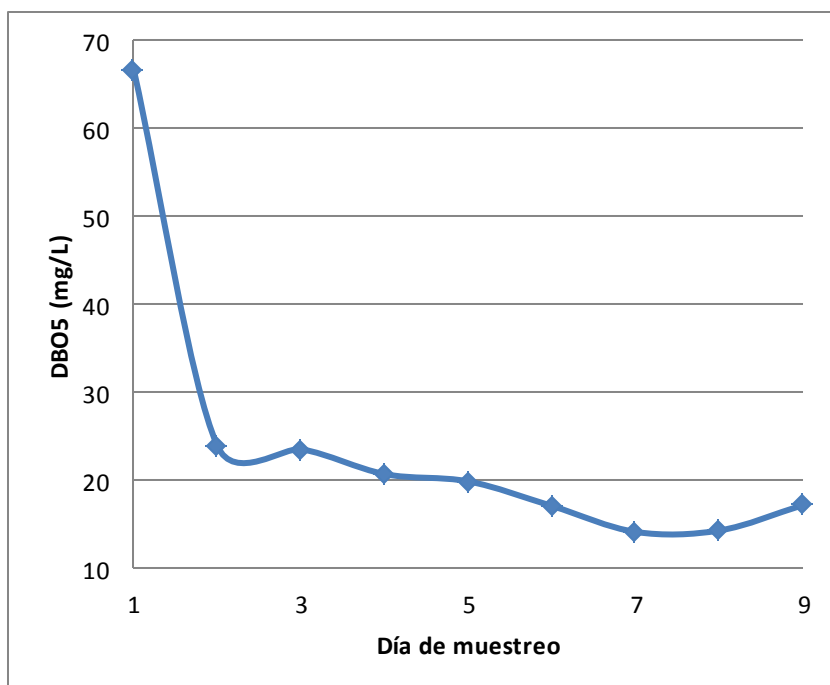
reactor oscilan entre 400 a 900 mg/L (Tabla 4.10), se obtuvieron valores por debajo y por encima de este rango lo que se relaciona con la cantidad de lodos presentes los cuales son degradables y fácilmente oxidables y la cantidad de materia orgánica de entrada. Los valores de DQO obtenidos para el efluente están oscilan entre 10 a 50 mg/L (Tabla 4.10), podemos comprobar que para el DQO también tenemos remociones cercanas al 90%, lo que se vincula con los porcentajes observados para el DBO, siendo ambos parámetros útiles para la cuantificación de la cantidad de materia orgánica presente y para el establecimiento de la eficiencia de remoción. Estos valores representan la dinámica del contenido de la materia orgánica e inorgánica cuantificada que fue susceptible de oxidación en medio ácido, por parte del dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$). Este comportamiento se puede apreciar en las gráficas 4.20 a 4.22.

Tabla 4.9. Registro de DBO_5 para los diferentes puntos de muestreo

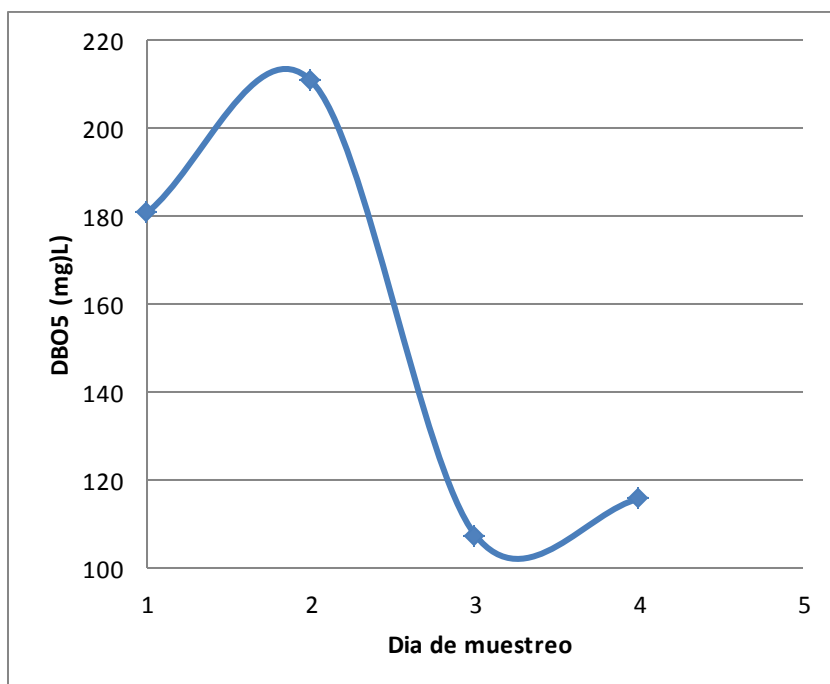
Muestreo	Afluente	Efluente	Agua mixta
1	268.5579	66.7558	
2	157.082	23.8838	180.8510
3	204.9645	23.5106	210.8206
4	217.02127	20.6686	107.4772
5	206.6869	19.8419	115.7468
6	230.1925	17.0342	
7	164.9442	14.0871	
8	111.4488	14.2654	
9	118.1357	17.1631	



Gráfica 4.17. Muestreo de la DBO₅ del afluente.



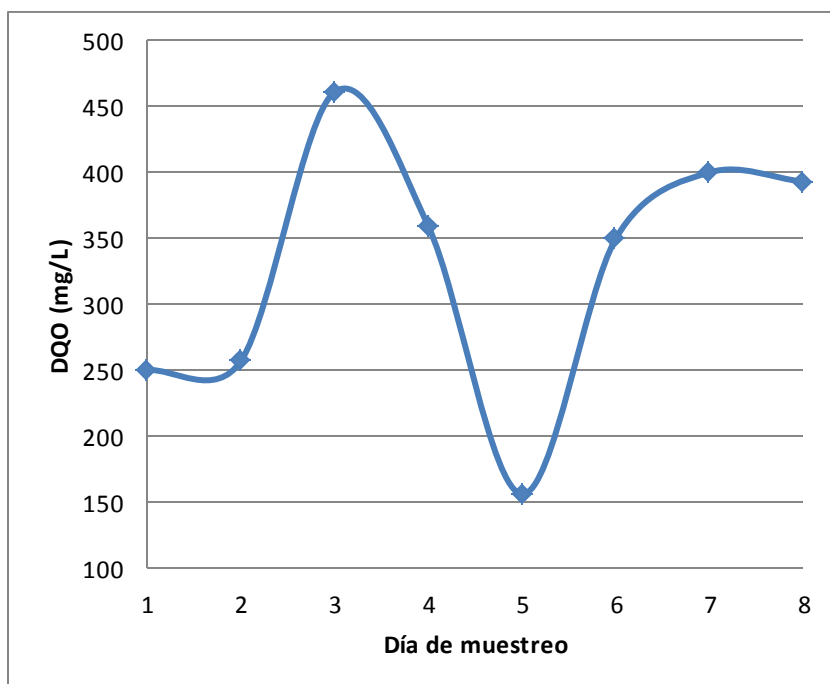
Gráfica 4.18. Muestreo de la DBO₅ del efluente.



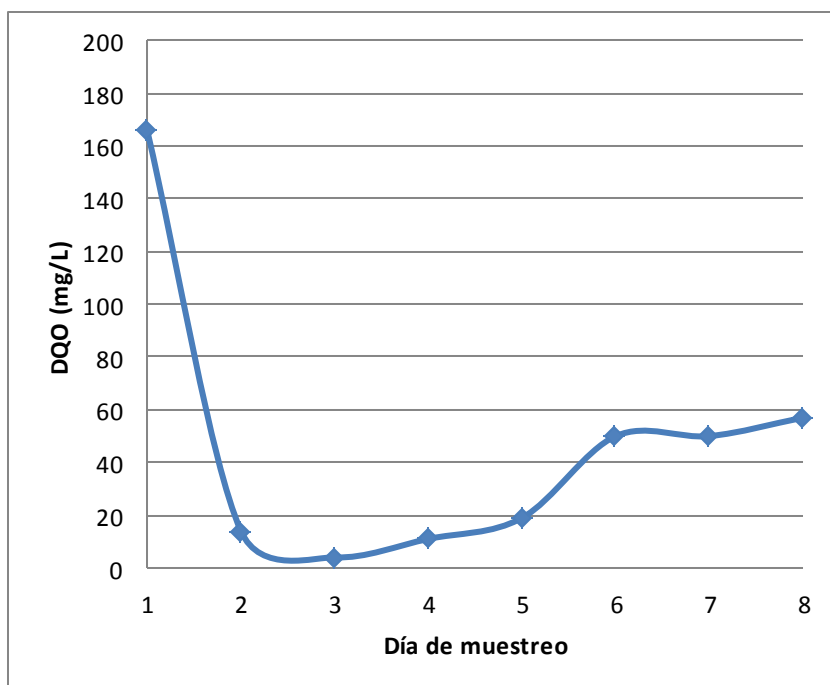
Grafica 4.19. Muestreo de la DBO₅ del agua mixta.

Tabla 4.10. Registro de DQO de los diferentes puntos de muestreo.

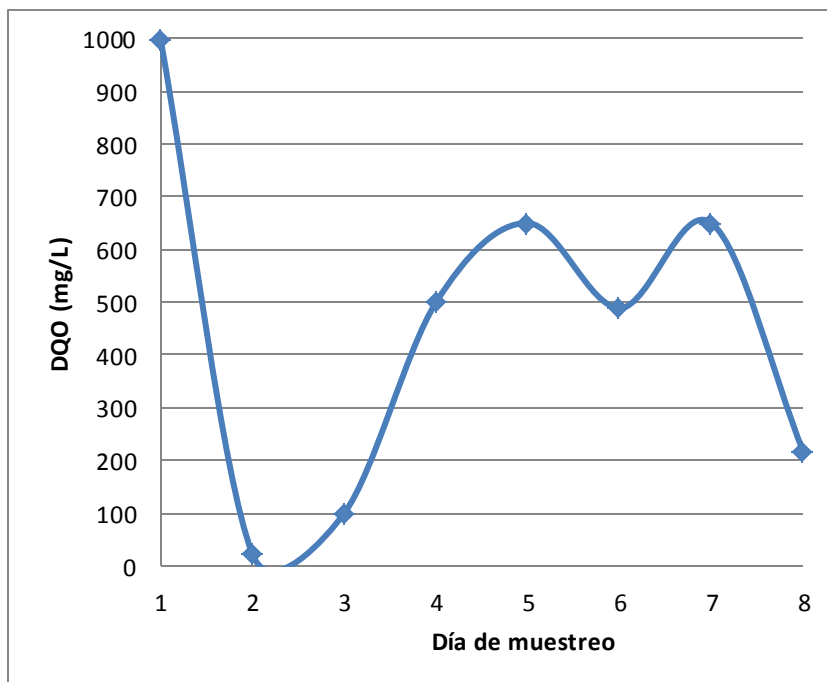
Muestreo	Afluente	Efluente	Reactor
1	250	166	998
2	257	14	22
3	461	4	100
4	359	11	500
5	156	19	650
6	350	50	489
7	400	50	650
8	393	57	216



Gráfica 4.20. Muestreo de la DQO del afluente.



Gráfica 4.21. Muestreo de la DQO del efluente.



Gráfica 4.22. Muestreo de la DQO del agua del reactor.

4.4 Consumo de oxígeno por biodegradación

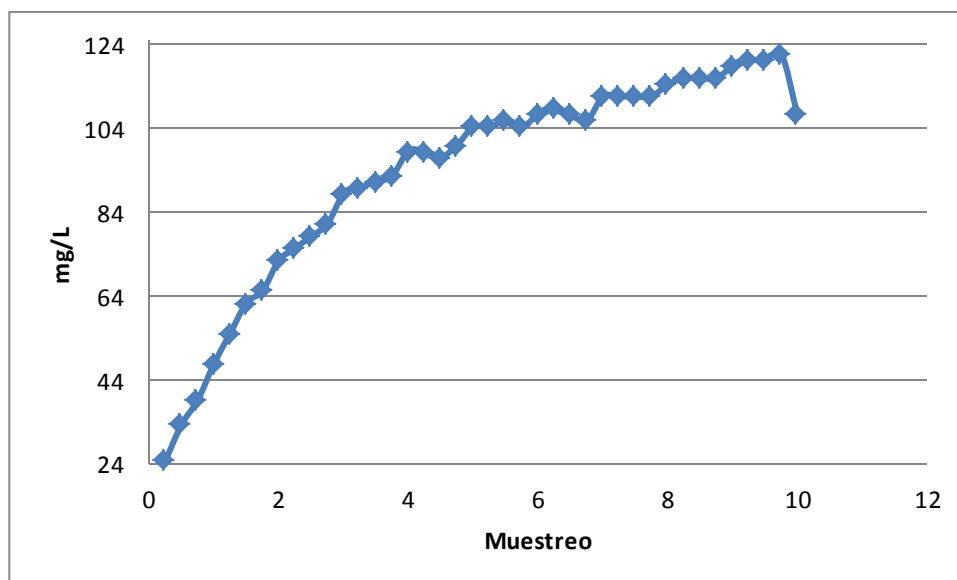
En la tabla 4.11a y 4.11b se presentan los resultados del consumo de oxígeno por biodegradabilidad que permiten obtener la constante cinética del reactor, el comportamiento se muestra en la gráfica 4.23.

Tabla 4.11a Resultados de la prueba de consumo de oxígeno por biodegradación.

Hora	Lectura (mg/L)
6	24.7
12	33.4
18	39.2
24	47.9
30	55.1
36	62.4
42	65.3
48	72.5
54	75.4
60	78.3

Tabla 4.11b Resultados de la prueba de consumo de oxígeno por biodegradación.

Hora	Lectura (mg/L)
66	81.2
72	88.5
78	90
84	91.4
90	93
96	98.7
102	98.7
108	97.2
114	100.1
120	104.4
126	104.4
132	105.9
138	104.4
144	107.3
150	108.8
156	107.3
162	105.9
168	111.7
174	111.7
180	111.7
186	111.7
192	114.6
198	116
204	116
210	116
216	119
222	120.4
228	120.4
234	121.8



Gráfica 4.23. Consumo de oxígeno por biodegradabilidad vs día.

Ecuación de la gráfica: $y = 1.7861 - 0.2357x$

De los métodos utilizados para el cálculo de la constante cinética de degradación, se utilizó el método de Thomas. Considerando que el reactor biológico continuo opera bajo régimen estacionario y mezcla completa, se sigue una orden de reacción de primer grado, la cual se comprueba con el resultado del coeficiente de correlación dando $r^2 = -0.9953$ y con la ecuación resultante de la gráfica, lo cual muestra que la cinética de primer orden es correcta ya que esta se ajusta a la curva propuesta. Se obtuvo un valor de la constante cinética de $k = -0.2357 \text{ d}^{-1}$.

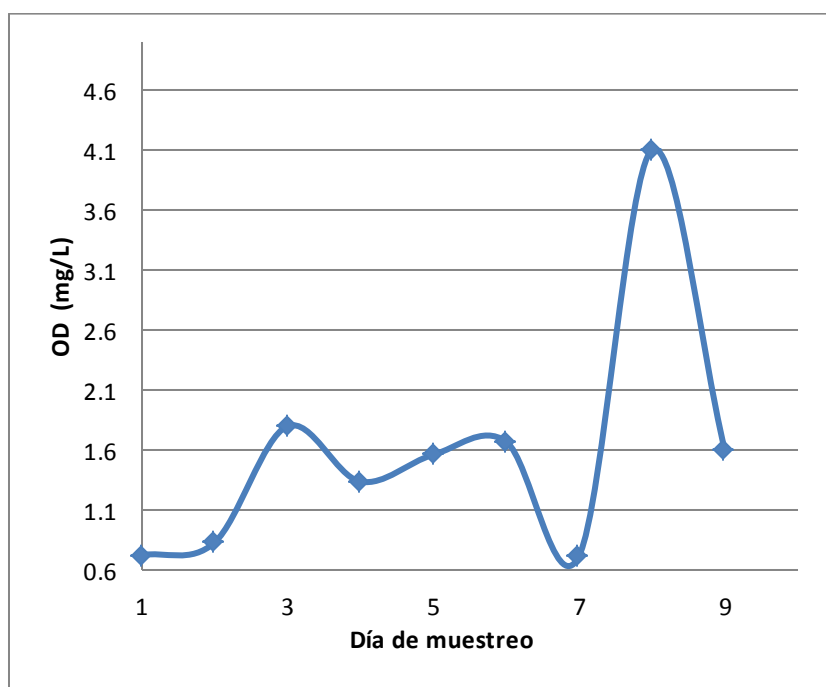
La bibliografía según Ramahlo y Metcalf & Eddy indica un valor de $k = 0.05$ a 0.3 d^{-1} dependiendo el tipo de agua residual y sus características. Comparando el valor obtenido, esto es correcto y está dentro del límite establecido. Por lo que, el reactor se encuentra en buen funcionamiento.

4.5 Registro del oxígeno suministrado al reactor.

En la tabla 4.12 se presenta el oxígeno suministrado al reactor por los aireadores, que fluctúa entre el rango de 0.8 a 1.5 mg/L, sin embargo, obtuvimos valores por encima de este rango, esto debido a la cantidad de lodos presentes en el reactor. Esto nos indica la cantidad de oxígeno que debe suministrarse para mantener condiciones aerobias en el reactor y para que las bacterias lleven a cabo sus funciones bioquímicas. El comportamiento se presenta en la gráfica 4.24.

Tabla 4.12 Registro de oxígeno disuelto en el reactor.

Muestreo	O.D (mg/L)
1	0.7578
2	0.7234
3	0.8267
4	1.7981
5	1.3373
6	1.5603
7	1.6717
8	0.7132
9	4.1013
10	1.6048



Gráfica 4.24. Muestreo del Oxígeno disuelto del reactor.

4.6 Parámetros biocinéticos calculados

Dentro de una planta de tratamiento aerobio no solamente se requiere tener altos porcentajes de remoción de materia orgánica, sino observar la producción de biomasa y a la vez tener al alcance parámetros químicos fáciles de medir que nos permitan relacionarlos de manera indirecta con la producción de biomasa.

Para este caso, este trabajo se basó en la medición del parámetro de sólidos y se relacionó de acuerdo a la bibliografía con las ecuaciones para el cálculo de:

$$Y = 6 \text{ a } 10 \text{ kg de MLVSS producido / kg total de sustrato consumido}$$

$$\text{Biomasa producida por consumo de sustrato} = 8,000 \text{ a } 17,000 \text{ kg/d de MLVSS producido}$$

Cabe mencionar que las plantas con este tipo de procesos aerobios rara vez realizan este tipo de determinaciones, que permitirían contrastar con los porcentajes de remoción obtenidos a través de la DBO₅ y DQO obteniéndose como resultado adicional el saber de antemano la biomasa producida la cual se tendrá que sedimentar y a la vez digerir para su disposición final.

4.6.1 Metabolismo celular

El parámetro de metabolismo celular (Y), representa la producción de lodo biológico por kilogramo de sustrato total consumido. El metabolismo celular se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Y = \frac{\text{kg de MLVSS producido}}{\text{kg de sustrato total consumido}}$$

Donde:

kg de MLVSS producido = kg de sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado producidos en el reactor biológico.

kg de sustrato total consumido = cantidad de materia orgánica consumida medida como DQO del afluente menos la DQO del efluente.

Tabla 4. 13 Resultados obtenidos del metabolismo celular.

Muestreo	MLVSS (mg/L)	DQO afluente	DQO efluente	Sustrato total consumido	Y
1	2942.5	461	4	457	6.43873085
2	2184	359	11	348	6.27586207
3	3036	350	50	300	10.12
4	5720	400	50	350	16.3428571
5	4016	393	57	336	11.952381

Mediante la determinación de los sólidos suspendidos volátiles se implementó una técnica para analizar el funcionamiento del reactor, obteniendo el parámetro biocinético Y, con un valor de 6 a 10 kg de MLVSS producido/ kg total de sustrato consumido, y comparándolo con la bibliografía la cual indica un valor de $Y = 0.73$ para aguas urbanas según Ramahlo, nos indica que el valor obtenido está muy por encima del valor teórico esperado, realizando un análisis de los resultados de sólidos nos encontramos que efectivamente un alto porcentaje de sólidos corresponde a material orgánico degradable, pero el muestreo se realizó considerando no solamente los sólidos producidos (biomasa) sino también los ya existentes, dando como consecuencia un alto valor de sólidos volátiles en el licor mezclado considerados, como producidos.

4.6.2 Biomasa producida por consumo de sustrato

De acuerdo a la teoría del proceso aerobio de lodos activados la materia orgánica biodegradable produce entre otras cosas nuevo material celular (biomasa), la cual se renueva constantemente en el reactor siempre y cuando existan las condiciones para ello.

De lo observado en este trabajo podemos afirmar que un alto porcentaje de los sólidos totales en el reactor corresponden a sólidos suspendidos volátiles, lo cual se interpreta como biomasa.

$$\frac{kg}{d} \text{ de MLVSS producido} = Y(S_0 - S_e)Q_0$$

Donde:

Y = metabolismo celular.

$S_0 - S_e$ = sustrato total consumido (medido como DQO del afluente menos DQO del efluente), expresada en mg/L.

Análisis y discusiones de resultados

Q_o = caudal, expresado en m^3/s .

Tabla 4.14 Resultados obtenidos de la biomasa producida.

Muestreo	So (mg/L)	Se (mg/L)	Qo (lps)	Y	mg/s	Kg/d
1	461	4	50	6.4387	147124.295	12711.5391
2	359	11	47	6.27586207	102648	8868.7872
3	350	50	47	10.12	142692	12328.5888
4	400	50	30	16.3428571	171600	14826.24
5	393	57	50	11.952381	200800	17349.12

Con la determinación del parámetro de metabolismo celular se puede determinar entonces la biomasa producida. La producción de biomasa con un valor de 8000 a 17 000 kg/d , este valor de rango tan alto no corresponde físicamente ni a la recirculación de lodos, como tampoco a los lodos descargados de la planta. Esta biomasa obtenida está directamente relacionada con el parámetro Y obtenido, por lo que el resultado también es alto.

5. Conclusiones

Mediante esta técnica pudimos obtener el parámetro biocinético, Y . Este parámetro está entre 6 a 10 kg de MLVSS producido/ kg de sustrato total consumido, el cual es muy superior a lo reportado en la bibliografía, en la cual se indica un valor de 0.73. Esto es atribuido a que en esta investigación no se consideraron solamente los MLVSS producidos sino también los ya existentes, dando como consecuencia un aumento en este parámetro.

Con la obtención del parámetro Y , se obtuvo la biomasa, la cual resultó de 8000 a 17 000 kg/d. Se observó que esto no corresponde físicamente a los lodos de recirculación ni los de descarga, esto es debido a que este parámetro es directamente proporcional a la Y , por lo que también este resultado fue muy alto.

Realizados los análisis químicos del afluente, efluente y reactor se determinó la constante cinética de degradación con un valor de $k = 0.2357 \text{ d}^{-1}$ (ver grafica 4.23), lo que nos permite relacionarla con los datos bibliográficos presentados por Ramalho y Metcalf & Eddy Inc., los cuales pueden variar dependiendo del tipo de agua residual y la operación del proceso entre 0.05 a 0.3 d^{-1} . Esto nos ilustra que la metodología utilizada y realizada para este cálculo nos proporciona valores que de acuerdo a la bibliografía se encuentran como aceptables.

La técnica puede ser implementada en otras plantas con procesos diferentes lo cual traerá como beneficio la obtención de valores de la constante de degradación para casos muy particulares de aguas residuales características. El uso y manejo de la constante de degradación obtenida y utilizada como parámetro de control en un proceso aerobio de lodos activados permitirá predecir valores de remoción de materia orgánica (expresada como DBO) en cualquier tiempo y a la vez ser referencia de la remoción obtenida mediante este proceso.

De acuerdo a lo observado, analizado y calculado durante nuestra estancia en la planta tratadora de aguas residuales “San Pedrito” del Municipio de Pátzcuaro, Mich., podemos decir que las condiciones de operación son muy variables y no por esto la eficiencia de los procesos disminuyan drásticamente, sin embargo, se mantiene una eficiencia inferior a lo que el proceso puede darnos.

Referente a esto los controles utilizados en planta únicamente evalúan las eficiencias de remoción globales y el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-1986, y no se utilizan ni se implementan para el control de procesos dentro del reactor.

Conclusiones y recomendaciones

En general, podemos decir que las condiciones de operación de oxígeno disuelto encontrado en la planta en los diferentes procesos son aceptables, la carga orgánica del afluente es una carga moderada que no implica tener o realizar adecuaciones para su suministro.

5.1 Recomendaciones

1. Se necesita tener un estricto control de flujo de alimentación a la planta tanto en estiaje como en lluvias.
2. La recirculación de lodos debe estar soportada en el cálculo de la relación F/M para lo cual este trabajo hace una aportación sustancial y no realizarla de acuerdo al flujo de la bomba utilizada.
3. Se necesita mantener un rango de valores de sólidos volátiles en el licor mezclado (ver tabla 4.7) para tener un proceso estable y condiciones de operación aceptables.
4. La mayoría de las plantas aerobias, San Pedrito no es la excepción fueron diseñadas para un caudal, un tiempo de residencia hidráulico, una carga de materia orgánica determinadas, lo cual no ocurre cuando estas ya están en operación, por que dichas condiciones se modifican en base a las necesidades que se tienen en el momento. Y esto, es un grave problema porque requiere realizar estudios específicos para poder determinar estas condiciones operativas en la planta.
5. Implementar la determinación del Índice volumétrico de lodos (IVL), mediante una adaptación particular al procedimiento normalizado y complementarla con las determinaciones de sólidos totales y sólidos volátiles en el reactor biológico.
6. La producción de lodos observada requiere de la adecuación de un sistema de secado más eficiente y no como el que actualmente se hace.
7. Respecto al costo del sistema de aireación se propone realizar pruebas de consumo de oxígeno en el reactor para establecer los tiempos críticos de aireación y así combinados con las condiciones atmosféricas del lugar establecer un programa de ahorro de energía en base a estos parámetros.
8. Implementar una técnica que nos permita relacionar la degradación realizada con el carbono orgánico, mediante la absorción con hidróxido de potasio (KOH) y determinación de alcalinidad.

6. Referencias

- American Water Works Association. 1995. *Problem organisms in water: Identification and treatment*. Manual of water supply practices. AEWWA. M7. Denver, Co. USA.
- Environmental Protection Agency EPA, Folleto informativo de tecnología de aguas residuales, Humedal de flujo libre superficial, 2000
- Himebaugh, R. R. 1981. *Microorganism inventory in activated sludge control*. Water Engineering & Management. April 30.
- 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 and Eddy. *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización*. 3a ed. Madrid: McGraw Hill, 1998. 1485 p. ISBN 9788448116071.
- Novak J. T.; Chon D. H.; Curtis B. y Doyle M., (2007). Biological Solids Reduction Using the Cannibal Process. *Water Environment Research*. 79, 12.
- Noyola-Obles, N. Vega-González, E. Ramos-Hernández, J. G., y Calderón-Mólgora, C. G. 2000. *Alternativas de tratamiento de aguas residuales*. Manuales. IMTA. México.
- Ramalho, J. S. (1991). *Tratamiento de aguas residuales*. Editorial e verté.
- 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.

Apéndice I

Normas correspondientes a las determinaciones.

1. NOM-001-SEMARNAT-1986.
2. NMX-AA-007-SCFI-2013.
3. NMX-AA-008-SCFI-2016.
4. NMX-AA-093-SCFI-2000.
5. NMX-AA-034-SCFI-2001.
6. NMX-AA-082-SCFI-1986.
7. NMX-AA-026-SCFI-2001.
8. NMX-AA-028-SCFI-2001.
9. NMX-AA-030/2-SCFI-2011.
10. NMX-AA-012-SCFI-2001.



SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

Secretaría de Economía

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEMARNAT- 1996, QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN AGUAS Y BIENES NACIONALES.

CON BASE EN EL ACUERDO POR EL CUAL SE REFORMA LA NOMENCLATURA DE LAS NORMAS OFICIALES MEXICANAS EXPEDIDAS POR LA SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, ASÍ COMO LA RATIFICACIÓN DE LAS MISMAS PREVIA A SU REVISIÓN QUINQUENAL, PUBLICADO EN EL DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN EL 23 DE ABRIL DE 2003.

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE, RECURSOS NATURALES Y PESCA.

1. OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta Norma Oficial Mexicana no se aplica a las descargas de aguas provenientes de drenajes separados de aguas pluviales.



Secretaría de Economía

**NORMA MEXICANA NMX-AA-007-
SCFI- 2013**

**ANÁLISIS DE AGUA – MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA EN AGUAS
NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE
PRUEBA**

(CANCELA LA NMX-AA-007-SCFI-2000)

**WATER ANALYSIS - DETERMINATION OF TEMPERATURE IN NATURAL
WATERS, WASTEWATERS AND TREATED WASTEWATERS – TEST METHOD**

1 OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma mexicana establece el método de prueba para la medición de la temperatura, cuando se usan instrumentos de medición directa o instrumentos que indican expansiones o fuerzas proporcionales en los cambios de temperatura, en aguas naturales crudas no salinas (epicontinentales, subterráneas y pluviales), en aguas salinas (marinas, costeras, de estuarios, esteros, marismas y subterráneas), aguas residuales crudas municipales e industriales y aguas residuales tratadas municipales e industriales en el intervalo comprendido entre 0 °C y 45 °C.

Para su uso doméstico, como fuente de abastecimiento de agua potable, público urbano, recreativo con y sin contacto directo, riego agrícola, pecuario, acuacultura, industrial y protección de la vida acuática marina y de agua dulce y descarga en cuerpos receptores y alcantarillado municipal o reúso. Es de aplicación nacional.



Secretaría de Economía

**NORMA MEXICANA NMX-AA-008-
SCFI2016**

**ANÁLISIS DE AGUA.- MEDICIÓN DEL pH EN AGUAS NATURALES,
RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS.- MÉTODO DE PRUEBA-
(CANCELA A LA NMX-AA-008- SCFI-2011).**

**WATER ANALYSIS.-MEASUREMENT OF pH IN NATURAL WATERS,
WASTEWATERS AND TREATED WASTEWATERS.- TEST METHOD.**

1 OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma mexicana es de aplicación nacional y establece el método de prueba para la medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas, en el intervalo de pH 0 a pH 14 y en un intervalo de temperatura de 0 °C a 50 °C.



Secretaría de Economía

NMX-AA-093-SCFI-2000

**ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD
ELECTROLÍTICA - MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-
AA-093-1984)**

**WATER ANALYSIS - DETERMINATION OF ELECTROLITICAL CONDUCTIVITY
- TEST METHOD**

0 OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma mexicana establece el método de prueba para la determinación de la conductividad electrolítica en agua y es aplicable para agua potable, natural, tratada, residual, salina y residual tratada.



Secretaría de Economía

NMX-AA-034-SCFI-2001

**ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS Y SALES
DISUELTAS EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES
TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LAS NMX-AA-020-
1980 Y NMX-AA-034-1981)**

**WATER ANALYSIS - DETERMINATION OF SALTS AND SOLIDS
DISSOLVED IN NATURAL, WASTEWATERS AND WASTEWATERS
TREATED - TEST METHOD**

1 OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma mexicana establece el método de análisis para la determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.



Secretaría de Economía

SECRETARIA DE COMERCIO Y

FOMENTO INDUSTRIAL

NORMA MEXICANA NMX-AA-

082-1986

**CONTAMINACION DEL AGUA-DETERMINACION DE NITROGENO DE
NITRATO-METODO ESPECTROFOTOMETRICO ULTRAVIOLETA**

*WATER CONTAMINATION-DETERMINATION OF NITROGEN
NITRATE-ULTRAVIOLET SPECTROPHOTOMETRIC METHOD*

1 OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACION

Esta Norma Oficial Mexicana establece el método para la determinación de nitrógeno de nitratos en agua, y es aplicable para agua potable que no presente turbiedad, color y con bajo contenido de materia orgánica.



Secretaría de Economía

NMX-AA-026-SCFI-2001

**ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE NITRÓGENO TOTAL
KJELDAHL EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES
TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-AA-026-
1980)**

**WATER ANALYSIS - DETERMINATION OF TOTAL KJELDAHL
NITROGEN IN NATURAL WATER, WASTEWATERS AND
WASTEWATERS TREATED - TEST METHOD**

1 OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma mexicana establece el método de prueba para la determinación de nitrógeno total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.



Secretaría de Economía

NMX-AA-028-SCFI-2001

**ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA
DE OXÍGENO EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES (DBO₅) Y
RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LA
NMX-AA-028-1981)**

**WATER ANALYSIS - DETERMINATION OF THE BIOCHEMICAL
OXYGEN DEMAND IN NATURAL, WASTEWATERS (BOD₅) AND
WASTEWATERS TREATED - TEST METHOD**

1 OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma mexicana establece el método de análisis para la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

NOTA. Se determina la cantidad de oxígeno utilizada por una población microbiana heterogénea para transformar la materia orgánica, en un periodo de incubación de 5 días a 20°C.



Secretaría de Economía

NORMA MEXICANA NMX AA- 030/2-SCFI-2011

ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA - PARTE 2 - DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO – MÉTODO DE TUBO SELLADO A PEQUEÑA ESCALA

*WATER ANALYSIS - DETERMINATION OF THE CHEMICAL OXYGEN DEMAND,
IN NATURAL, WASTEWATERS AND TREATED WASTEWATERS - TEST
METHOD - PART 1 - DETERMINATION OF THE CHEMICAL OXYGEN DEMAND
INDEX (ST-COD) – SMALL SCALE SEALED-TUBE METHOD.*

1 OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

- 1.1** Esta norma mexicana especifica un método para la determinación de la demanda química de oxígeno (DQO-TS) usando el método de tubo sellado. La prueba es empírica y aplicable a cualquier muestra acuosa, que incluye todo tipo de agua residual y de desecho industrial. Esta norma es de aplicación nacional.
- 1.2** El método es aplicable a muestras sin diluir con un valor de DQO- TS hasta 1 000 mg/L y una concentración de masa de cloruro que no exceda 1 000 mg/L. Las muestras con valores de DQO-TS mayores requieren ser diluidas previamente. Para muestras con valor bajo de DQO, la precisión de la medición se reduce y el límite de detección es afectado con una disminución en la sensibilidad del método.
- 1.3** Las muestras con una alta concentración de cloruro necesitarán ser diluidas antes del análisis para dar una concentración de masa de cloruro de aproximadamente 1 000 mg/L o menor.
- 1.4** El método oxida casi todos los tipos de compuestos orgánicos y la mayoría de los agentes reductores inorgánicos. Tiene un límite de



detección (4,65 veces la desviación estándar por lote de un blanco o de una referencia de muy bajo nivel) de 6 mg/L para detección espectrofotométrica a 600 nm, y 15 mg/L para detección de titulación como se reporta por un laboratorio cuando compara las técnicas fotométricas con las de titulación usando un equipo de prueba comercial con un intervalo de hasta 1 000 mg/L.



Secretaría de Economía

NMX-AA-012-SCFI-2001

**ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO EN
AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS -
MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-AA-012-1980)**

**WATER ANALYSIS - DETERMINATION OF DISSOLVED OXYGEN IN
NATURAL, WASTEWATERS AND WASTEWATERS TREATED - TEST
METHOD**

1 OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma mexicana establece dos métodos de prueba para la determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales y residuales utilizando las técnicas de azida modificada y la electrométrica.

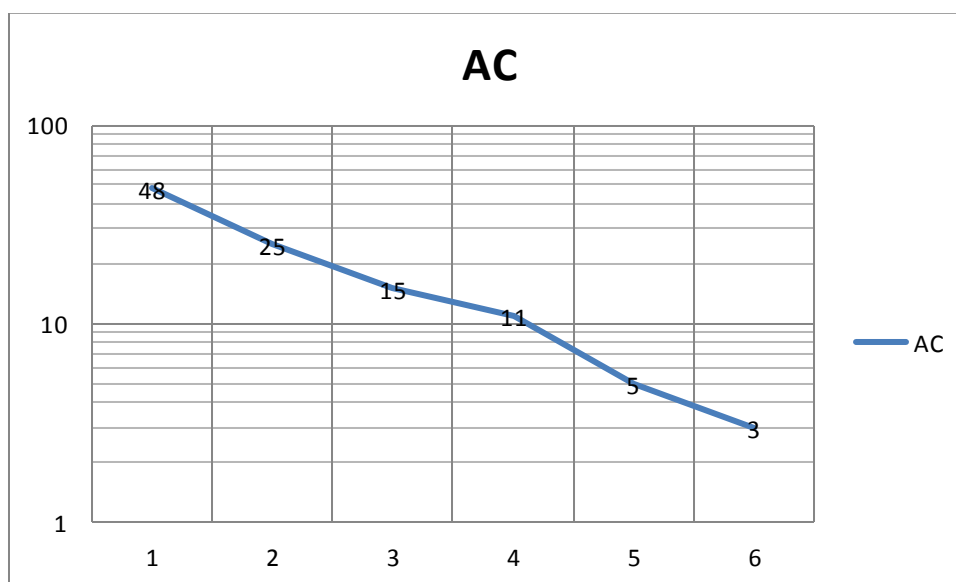
Esta norma mexicana es aplicable para el análisis de aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

Apéndice II

Calculo de la constante cinética de degradación.

Método de Thomas.

t	DBO	Δt	$\Delta y/\Delta \tau$
0			
1	48	0.5	48
2	73	1.5	25
3	88	2.5	15
4	99	3.5	11
5	104	4.5	5
6	107	5.5	3
7	111	6.5	4
8	114	7.5	3
9	119	8.5	5
10	121	9.5	2



Utilizando regresión lineal:

$a = 1.7861$
 $b = -0.2357$ d
 $r = -0.9953$

