



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN**

**GENERACIÓN DE UNA NUEVA ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DE  
LIXIVIADOS CON QUITOSÁN**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA:**

**CHRISTOPHER RAFAEL TORRES ALVAREZ**

**EDGAR EDUARDO SANDOVAL ESPINOSA**

**ASESOR: DRA. SUSANA PATRICIA MIRANDA CASTRO**

**COASESOR: I.Q. GRACIELA RUTH DELGADILLO GARCIA**

**CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.**

**2012**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **Agradecimientos**

Primero que nada agradecer por la realización de este proyecto a mis padres Rafael Ubaldo Torres Sevilla y Pilar Alvarez Ronces ya que ellos son la parte más importante en mi vida, por creer en mí y darme la oportunidad de realizarme en esta profesión que sin ellos jamás hubiese podido conseguir lo que hasta ahora, ya que me han guiado por buen camino. Su tenacidad y lucha insaciable han hecho de ellos el gran ejemplo a seguir y destacar, no solo para mí, sino para mis hermanos y familia en general.

A mis hermanos: Montserrat y Daniel por estar siempre que los necesite a su comprensión y apoyo en las buenas y en las malas por no solo ser mis hermanos también por ser mis mejores amigos.

A Carla Sahagún my compañera inseparable por estar a mi lado, por el conocimiento y el apoyo que me brindaste durante este tiempo por la paciencia y el cariño que me brindaste siempre, “que sea eterno mientras dure”.

A Edgar Sandoval por estar conmigo a lo largo de la carrera como amigo y estar siempre cuando lo necesitaba por ayudarme a culminar este trabajo con su ayuda con sus conocimientos y su entera dedicación para que la tesis resultara, por ser un gran amigo.

A todos mis amigos, compañeros de la carrera, en cada uno de ustedes hay una persona muy especial. He aprendido y disfrutado de ustedes mis horas de estudio de fiesta, gracias por la ayuda cuando en ocasiones me he sentido perdido y por una amistad sincera.

A mis primos tíos y abuelos por su apoyo incondicional amor y cariño, gracias por ser parte de mi gran familia.

A la UNAM, la máxima casa de estudios, la cual abre sus puertas a jóvenes como nosotros para prepararnos académicamente para un futuro competitivo y formándonos como personas de bien, su alto nivel académico por el soporte institucional por los espacios brindados y equipos para la investigación y experimentación como lo fue el laboratorio de Biotecnología en donde se realizo la tesis.

A ellos este proyecto, que sin ellos, no hubiese podido ser

Christopher Rafael Torres Alvarez.

### **A mis padres:**

Siempre he admirado la pasión con la que tantos años me han apoyado a medida de lo que está a su alcance y todo incondicionalmente, ustedes son parte primordial en mi vida, siempre, me han brindado de su amor, cariño, paciencia, experiencias, regaños, orgullo en fin no acabaría. Siempre indicándome el camino correcto con un buen consejo, espero esto los llene de satisfacción, por lo cual les dedico este proyecto.

### **A mis hermanos**

- *Julio:* A quien es dedicado, responsable, constante, tomando las cosas siempre en serio y con buen humor, tú siempre fuiste mi ejemplo a seguir
- *Norma:* No cabe duda que si se trata de perseverancia y de autoestima son las palabras indicadas para describirte y de que a pesar de las adversidades impuestas por la vida tú pones una sonrisa para seguir adelante
- *Lupe:* Si se trata de travesuras de necedad y de ver la vida con un buen humor eres tú, nunca dejas pasar nada por alto, siempre con la chispa adecuada espero puedas enfocarlo hacia algo bueno
- *Malus:* A la niña que es tierna e inocente y que ve todo de color de rosa siempre cuidando los más mínimos detalles
- *Juan y angelito:* A los dos niños que llegaron para llenar la casa de alegría, espontaneidad, cariño y juguetes

### **A mi novia**

*Sol:* Quien llegó a mi vida para revolucionarla, enseñarme que no hay mejor forma que planear, hacer las cosas con cariño detalle dedicación y mucha disciplina, que no existen barreras para realizar las cosas, además de ver las cosas con realidad, gracias por compartir esta etapa tan importante a tu lado.

### **A mis amigos de la universidad**

*Christopher* Tu mi inseparable amigo el incondicional el que siempre me escucho para darme un consejo, Gracias a tu ayuda logramos construir este proyecto con tu dedicación, constancia, conocimiento y esfuerzo.

A *Alonso, Batman, Bolillo, Carlita, Carla, Citlalli, Daniel, Efrén, Gaby, Pablo, Paco, Karakol, Space,* etc. Por cada una de las vivencias, desveladas, tristezas, fracturas, fracasos, triunfos en fin vivimos muchas cosas que nunca se me olvidaran y que perduraran por siempre...

Gracias a la **Universidad Nacional Autónoma de México** por cada uno de sus conocimientos que he adquirido, por elegirme y formar parte de la máxima casa de estudios de la cual me siento orgulloso.

Este proyecto se los ofrezco de corazón a ustedes que me han nutrido de su compañía y cualidades a lo largo de mi vida.

La presente Tesis es un esfuerzo en el cual participaron de forma directa o indirecta leyendo, opinando y corrigiendo, teniendo la suficiente paciencia y siempre dándonos ánimos.

Agradecemos

A la Dra. Susana Patricia Miranda Castro por el voto de confianza que nos ofreció, la vasta paciencia además de la dirección del trabajo y por otorgarnos el proyecto.

A la Profesora Graciela Delgadillo García, por los consejos y el apoyo que nos brindó durante la elaboración del proyecto siempre con su entera disposición.

A los Profesores:

- Araceli Gaspar Medina
- Mercedes Montemayor García
- Claudia Pérez Garrido
- Julio Cesar Morales Mejía

Por su atenta lectura del trabajo, por los comentarios realizados en todo el proceso de elaboración de la tesis y sus atinadas correcciones

Agradecemos

A la Comisión de aguas del Estado de México (CAEM) por su completa disposición al brindarnos del espacio y equipos para la experimentación con los lixiviados en su laboratorio. Además de compartir su conocimiento para tener un campo más amplio sobre la realización del proyecto.

De manera atenta a los siguientes colaboradores:

- María de Jesús Camarillo Robles
- Leonel Salas Cortes
- Ricardo A. Porras Rangel
- Francisco Mariaca Aguilar
- Omar A. Olivares Estrada
- Eduardo Camacho Guerrero
- María B. Orozco Villanueva

# Índice general

---

<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>OBJETIVOS</b>	
1. Objetivo general	3
1.1. Objetivos particulares	3
<b>MARCO TEÓRICO</b>	
2. Contaminación del agua	4
2.1. Clasificación de contaminantes presentes en el agua y en los lixiviados	4
2.2. Parámetros de medición de contaminantes físicos del agua y lixiviados	5
2.2.1. Conductividad	6
2.2.2. Turbiedad	6
2.2.3. Color	6
2.2.4. Olor	6
2.3. Parámetros de medición de contaminantes químicos del agua y lixiviados	6
2.3.1. pH	7
2.3.2. Metales	7
2.4. Parámetros de medición de material orgánico del agua y lixiviados	8
2.4.1. Oxígeno disuelto	8
2.4.2. Materia Orgánica	9
2.4.3. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	10
2.4.4. Demanda química de oxígeno (DQO)	11
2.4.5. Grasas y Aceites	12
2.5. Parámetros de medición de contaminantes biológicos del agua y lixiviados	12
2.5.1. Coliformes fecales	13
2.5.2. Helmintos	13
2.6. Sitios de disposición final de residuos sólidos	13
2.6.1. Tiraderos a cielo abierto	13
2.6.2. Relleno sanitario	14
2.6.3. Relleno Metanogénico biorreactor	15
2.7. Lixiviados	19
2.7.1. Índice de Biodegradabilidad	19
2.7.2. Tratamientos de lixiviados	21
2.7.3. Contaminación química en lixiviados	22
2.8. Procesos de Oxidación Avanzados	24
2.8.1. Proceso Fenton	24
2.8.2. Parámetros que influyen en el proceso	25
2.8.3. Influencia del pH	26
2.9. Quitosán	26
2.9.1. Generalidades del Quitosán	30

## **METODOLOGÍA**

3. Muestreo de lixiviados	31
3.1. Caracterización del lixiviado	31
3.2. Tratamiento con quitosán al 1 %	47
3.2.1. Caracterización del lixiviado con un tratamiento de quitosán al 1% con pruebas fisicoquímicas y microbiológicas	49
3.3. Tratamiento de quitosán al 2 %	50
3.3.1. Caracterización del lixiviado con un tratamiento de quitosán al 2 % con pruebas fisicoquímicas y microbiológicas	51
3.4. Tratamiento con el proceso Fenton	51
3.4.1. Caracterización del lixiviado con el procedimiento Fenton con pruebas fisicoquímicas y microbiológicas	53

## **RESULTADOS**

4. Muestreo de lixiviados	54
4.1. Tratamiento con Quitosán al 1 %	55
4.1.1. Prueba de jarras	56
4.2. Tratamiento con Quitosán al 2 %	58
4.2.1. Prueba de jarras	58
4.3. Tratamiento mediante Proceso Fenton	60

## **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

4.4. Comparación entre los tratamientos	63
4.5. Calificación de los lixiviados tratados	79

## **CONCLUSIONES**

## **REFERENCIAS**

## **ANEXOS**



# INTRODUCCIÓN

---

En México las prácticas más comunes para disponer los residuos sólidos urbanos o municipales en el suelo son los sitios de disposición final (SDF) como son los siguientes: Tiradero a Cielo Abierto (TCA), Relleno Controlado (RC), Relleno Sanitario (RS) y Relleno Metanogénico (RM) o biorreactor (Gomez *et. all*, 2010).

El lixiviado que se utilizó en este trabajo fue muestreado en el relleno sanitario que se encuentra en Tlalnepantla de Baz a cargo de la compañía Proactiva Medio Ambiente México especializada en la gestión integral de agua y residuos sólidos urbanos y sistemas integrales y parciales de aguas.

Los SDF se crearon como una solución al problema de los residuos domiciliarios se convirtieron con el correr de los años, en un nuevo problema que amerita una discusión profunda sobre cuáles deberían ser las verdaderas estrategias para encarar la gestión de los residuos sólidos.

En los SDF hay contaminantes que, a través de los líquidos que se forman de la descomposición de la basura, migran del S.DF. hacia el suelo. Éstos líquidos son conocidos como lixiviados, se producen por la descomposición de la materia orgánica y la filtración del agua que entra al SDF por precipitación. Al fluir los lixiviados, disuelven sustancias y arrastran partículas contenidas en los residuos. La composición de los lixiviados proviene de desechos heterogéneos en composición y arrastran todo tipo de contaminantes, muchos de ellos en concentraciones elevadas, por lo que son catalogados como uno de los residuos más complejos y difíciles de tratar. Los lixiviados contienen concentraciones elevadas de contaminante orgánicos e inorgánicos, incluyendo ácidos húmicos, nitrógeno amoniacal, metales pesados y sales inorgánicas (Lopes, 2005)

Debido a la composición de los lixiviados se requiere de un pretratamiento para disminuir la alta carga de contaminantes para posteriormente ser reutilizados o descargados al drenaje. Con el fin de preservar el medio ambiente a través de la utilización de un biopolímero biodegradable (quitosán), a diferentes concentraciones y otro tratamiento por medio del proceso Fenton.

Los dos tratamientos evaluados para el lixiviado fueron quitosán al 1% y 2 % y el proceso Fenton. El proceso Fenton se utilizó ya que es uno de los tratamientos utilizados para los lixiviados este se manejó como un parámetro de comparación con el tratamiento del quitosán, y así evaluar cual de los dos concentraciones de quitosán tiene más capacidad para remover la mayor cantidad de contaminantes y determinar cuál es la más eficaz en cuanto al tiempo.

El tratamiento que se realizó en este trabajo se basó en las normas de la SEMARNAT la Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal y la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se rehúsen en servicio al público, ésto quiere decir que el lixiviado se trató como una agua residual con base en las normas.

Este trabajo servirá como fundamento para las próximas investigaciones acerca de la utilización de quitosán para el tratamiento de lixiviados y de aguas residuales.

# OBJETIVOS

---

## 1. OBJETIVO GENERAL.

Evaluar el uso del quitosán a dos concentraciones como un tratamiento acondicionador en lixiviados teniendo como parámetro de comparación el proceso Fenton.

### 1.1. OBJETIVOS PARTICULARES

- Caracterizar fisicoquímica y biológicamente los lixiviados.
- Establecer las condiciones de tratamiento acondicionador de los lixiviados con quitosán variando pH y concentración.
- Determinar la dosis óptima de quitosán en función de pH y concentración.
- Comparar un proceso de oxidación avanzada con el tratamiento del quitosán.
- Calificar el lixiviado tratado de acuerdo con las normas, NOM-002-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano y municipal. para la reutilización del agua en servicios al público, y la NOM-003-SEMARNAT-1997 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se rehúsen en servicios al público.

# MARCO TEÓRICO

---

## 2. Contaminación del agua

La acción y el efecto de introducir materias o formas de energía, o inducir condiciones en el agua que de modo directo o indirecto impliquen una alteración perjudicial de su calidad en relación con los usos posteriores o con su función ecológica. (Crites, Tchobanoglous. 2000).

La contaminación del agua puede estar producida por:

- Compuestos minerales: pueden ser sustancias tóxicas como los metales pesados (plomo, mercurio, etc.), nitratos, nitritos. Otros elementos afectan a las propiedades organolépticas (olor, color y sabor) del agua como lo son el cobre, el hierro, etc. Otros producen el desarrollo de las algas y la eutrofización (disminución de la cantidad de O<sub>2</sub> disuelto en el agua) como el fósforo.
- Compuestos orgánicos (fenoles, hidrocarburos, detergentes, etc.). Producen también eutrofización del agua debido a una disminución de la concentración de oxígeno, ya que permite el desarrollo de los seres vivos y éstos consumen O<sub>2</sub>.
- La contaminación microbiológica es producida por microorganismos (parásitos, hongos, bacterias o virus) presentes, se mide en UFC.
- La contaminación térmica provoca una disminución de la solubilidad del oxígeno en el agua.

### 2.1. Clasificación de contaminantes presentes en el agua y en los lixiviados

Se distinguen los contaminantes en químicos, biológicos y físicos.

- Contaminantes químicos.

Principalmente provienen de los drenados de minas, desechos solubilizados de la agricultura, derrames de petróleo, pesticidas, aguas residuales municipales, desechos líquidos industriales y compuestos radioactivos. Producen efectos diversos y pueden ser de origen natural o sintético. Algunos son desechados directamente, otros se forman por la reacción entre diferentes compuestos en el agua y por último una pequeña fracción se forma durante el tratamiento del agua. Entre éstos últimos se encuentran los organoclorados (tetracloruro de carbono y cloroformo, principalmente) que se forman durante la desinfección del agua con el cloro.

- Contaminantes biológicos.

Son seres vivos que provocan enfermedades en el hombre u otras especies, los más comunes en el humano son la tifoidea, la salmonelosis, disentería, cólera y helmintiasis. Los agentes que las causan entran al agua a través de las heces fecales de seres humanos o animales. Para tener una idea de la magnitud de este problema, se estima que el 80% de todas las enfermedades y más de un tercio de los fallecimientos en países en vías de desarrollo se debe al consumo de agua contaminada.

- Contaminantes físicos.

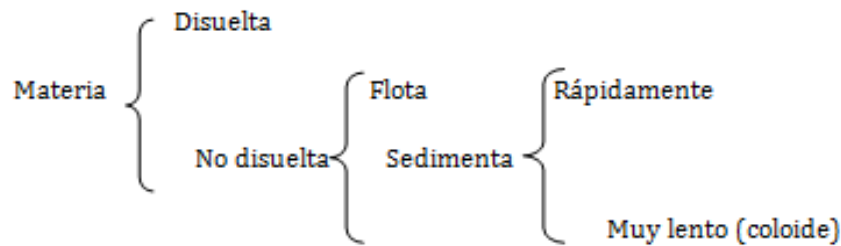
Son alteraciones de las propiedades físicas del agua tales como la temperatura, color, etc.

Afectan el aspecto del agua y cuando flotan o se sedimentan interfieren con la flora y fauna acuáticas. Son sólidos de origen natural y diversos productos sintéticos que son arrojados al agua como resultado de las actividades del hombre (Jiménez, 2001).

## 2.2. Parámetros de medición de contaminantes físicos en el agua y en lixiviados

### 2.2.1. Sólidos

Se entiende por sólido todo residuo que queda después de la evaporación (a 103°C).



**Fig.1.** Diferentes formas en las cuales se pueden encontrar sólidos en el agua.

La prueba de sólidos evalúa compuestos muy variados, por lo cual es considerada una prueba global. Los sólidos incluyen tanto a las sales inorgánicas (carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, fosfatos y nitratos de sodio, potasio, calcio, magnesio y fierro), como a la materia orgánica.

La determinación de los sólidos se emplea también para el seguimiento de procesos biológicos y fisicoquímicos; frecuentemente es un parámetro contenido en la reglamentación de descargas (Crites, Tchobanoglous. 2000).

### **2.2.2. Conductividad**

Representa la capacidad de una solución para transmitir una corriente eléctrica, su valor depende del tipo de iones involucrados, concentraciones, estado de oxidación de los mismos, así como de la concentración relativa de cada uno y la temperatura. En general, las soluciones de ácidos, bases y sales son buenas conductoras pero las de compuestos orgánicos lo son escasa o nulamente (Jiménez, 2001).

### **2.2.3. Turbiedad**

Es una medida de las propiedades de dispersión de la luz de las aguas, es otro parámetro usado para indicar la calidad de las aguas naturales y las aguas residuales tratadas con la relación al material residual en suspensión coloidal. La medición de la turbiedad se realiza por comparación entre la intensidad de luz dispersa en una muestra y la luz dispersa por una suspensión de referencia bajo las mismas condiciones. Los resultados de las mediciones de turbiedad se dan en unidades nefelométrías de turbiedad (UNF) (Jiménez, 2001).

### **2.2.4. Color**

El color en aguas residuales es causado por sólidos suspendidos, material coloidal y sustancias en solución. El color causado por sólidos suspendidos se llama color aparente mientras que el color causado por sustancias disueltas y coloidales se denomina color verdadero. En forma cualitativa, el color puede ser usado para estimar la condición general del agua residual (Jiménez, 2001).

### **2.2.5. Olor**

La determinación de olor es cada vez más importante en la medida en que el público se ha interesado más por la propia operación de las instalaciones del tratamiento de aguas residuales. El olor de un agua residual fresca es en general inofensivo, pero una gran variedad de compuestos malolientes son liberados cuando se produce la degradación biológica bajo condiciones anaerobias de las aguas residuales (Jiménez, 2001).

## **2.3. Parámetros de medición de contaminantes químicos en el agua y en los lixiviados**

Los constituyentes químicos de las aguas residuales son con frecuencia clasificados en inorgánicos y orgánicos. Los inorgánicos incluyen:

- 1) Elementos individuales como calcio (Ca), cloruro (Cl), hierro (Fe), cromo (Cr) y zinc (Zn)
- 2) Una amplia variedad de compuestos como nitratos (NO<sub>3</sub>), y sulfatos (SO<sub>4</sub>).

En la tabla 1 se muestran los parámetros de medición de contaminantes químicos del agua.

**Tabla1.** Parámetros de medición de contaminantes químicos del agua.

Prueba	Abreviatura / Definición	Uso o significado del resultado
Alcalinidad	$\sum (HCO_3^- + CO_3^{2-} + OH^- - H^+)$	Medida de la capacidad amortiguadora del agua residual
Oxígeno disuelto	O.D.	Presencia o ausencia de un gas específico
pH	$pH = \log 1/[H^+]$	Medida de la concentración de iones hidronio en una solución acuosa
Metales	As, Cd, Ca, Cr, Co, Cu, Pb, Mg, Hg, Mo, Ni, Se, Na, Zn	Estimar la posibilidad de reutilizar el agua residual y los posibles efectos tóxicos.

(Crites, Tchobanoglous. 2000).

### 2.3.1.pH.

La evaluación del pH se emplea para caracterizar un agua, dar seguimiento a un proceso (neutralización, biológico, anaerobio, corrosión), o bien para controlar las condiciones de operación (precipitación, floculación, sistemas biológico anaerobios, desinfección) ya que la velocidad de las reacciones depende de él.

### 2.3.2.Metales.

Todos los organismos vivos requieren para su uso adecuado crecimiento de elementos como hierro, cromo, cobre, zinc, cobalto, en cantidades diferentes (cantidades macro y micro). Aunque las cantidades macro y micro de metales son esenciales para un normal desarrollo de la vida biológica, éstos elementos pueden llegar a ser tóxicos cuando se presentan en cantidades elevadas. Cuanto más se utilicen las aguas residuales tratadas para riego agrícola y de zonas verdes, una gran variedad de metales se debe determinar para estimar los efectos adversos que puedan ocurrir. Los elementos calcio, magnesio y sodio son importantes para la determinación de la relación de absorción de sodio (RAS), usada para estimar la posibilidad de emplear efluentes tratados en riego agrícola. En lugares donde se disponen los lodos estabilizados por compostaje sobre suelos agrícolas, es conveniente

determinar elementos como arsénico, cadmio, cobre, plomo, mercurio, molibdeno, níquel, selenio y zinc en lodos. (Crites, Tchobanoglous. 2000).

La determinación de metales se puede realizar por absorción atómica, plasma acoplado por inducción o colorimétricamente (con menor precisión)

- Metales disueltos son aquellos metales presentes en muestras no acidificadas que pasan a través de un filtro de membrana 0.45µm.
- Metales suspendidos son aquellos metales presentes en muestras sin acidificar, que son retenidas en un filtro de membrana de 0.45 µm.
- Metales totales que corresponden a la suma de los metales disueltos y los metales suspendidos o la concentración de metales determinados en una muestra sin filtrar después de la digestión.
- Metales extractables en ácido son aquellos que permanecen en solución después de que una muestra sin filtrar se trata con un ácido mineral diluido en caliente (Crites, Tchobanoglous. 2000).

#### **2.4. Parámetros de medición de material orgánico en el agua y en los lixiviados.**

Los constituyentes orgánicos de mayor interés en las aguas residuales y en los lixiviados se clasifican como individuales y agregados. Los constituyentes orgánicos agregados comprenden un número de compuestos que no pueden ser distinguidos en forma separada; de gran interés en el tratamiento, vertimiento y reutilización de los mismos como se observa en la tabla 2. Parámetros de medición de materia orgánica.

##### **2.4.1. Oxígeno disuelto**

La concentración de oxígeno disuelto (OD) es un parámetro importante para evaluar tanto la calidad del agua como la calidad de los lixiviados. Sirve como indicador del efecto producido por los contaminantes oxidables, de la aptitud del agua para mantener vivos peces u otros organismos aerobios y de la capacidad autodepuradora de un cuerpo receptor. El oxígeno disuelto afecta principalmente las reacciones en las que participan el hierro, manganeso, cobre y los compuestos que contienen nitrógeno y azufre.

En aguas residuales, la ausencia de oxígeno genera olores desagradables debido a la descomposición anaerobia de la materia orgánica; en cambio, en aguas de abastecimiento, el exceso de oxígeno provoca corrosión (Crites, Tchobanoglous. 2000).



**Tabla 2.** Parámetros de medición de materia orgánica

Prueba	Abreviatura / Definición	Uso o significado del resultado
Demanda Química de Oxígeno	DQO	Usada como frecuencia como sustituto de DBO
Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO	Medida de la cantidad de oxígeno requerido para estabilizar biológicamente un residuo
Carbono Orgánico Total	COT	Usada como frecuencia como sustituto de DBO
Grasas y aceites	—	Estimar la necesidad de medidas especiales en el diseño para su remoción.
Compuestos y clases de compuestos orgánicos específicos	—	Determinar la presencia de compuestos orgánicos específicos
Amonio libre	$\text{NH}_4^+$	Usado como medida de nutrientes y para establecer el grado de descomposición del agua residual las formas oxidadas pueden tomarse como una medida del grado de oxidación
Nitrógeno orgánico	N-org	
Nitrógeno total Kjeldhal	NTK (N-org+ $\text{NH}_4^+$ )	
Nitritos	$\text{NO}_2^-$	
Nitratos	$\text{NO}_3^-$	
Fósforo inorgánico	P inorg.	
Fósforo total	PT	
Fósforo orgánico	P org.	

Fuente: Crites, Tchobanoglous. 2000.

#### 2.4.2. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

Se define como la cantidad de oxígeno que los microorganismos, especialmente bacterias (aeróbicas o anaerobias facultativas: *Pseudomonas*, *Escherichia*, *Aerobacter*, *Bacillus*), hongos y plancton, consumen durante la degradación de las sustancias orgánicas contenidas en la muestra de agua.

(Seoanez, 2004) este parámetro es importante para el tratamiento de agua residual, los resultados se utilizan para:

- Determinar la cantidad aproximada de oxígeno requerida para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente.
- En el diseño de las instalaciones de tratamiento de agua residual.
- Medir la eficiencia de algunos procesos de tratamiento.

#### 2.4.3. Demanda química de oxígeno (DQO)

Este método pretende medir principalmente la concentración de materia orgánica, sufre interferencias por la presencia de sustancias inorgánicas susceptibles de ser oxidadas sulfuros, sulfitos, yoduros etc. Cuando se vierte el conjunto en un curso o a una masa de agua, captan parte del oxígeno existente debido a la presencia de sustancias químicas reductoras estas necesidades de O<sub>2</sub> al margen de todo proceso biológico (Seoanez, 2004).

La DQO no siempre guarda relación con la DBO aunque generalmente es mayor, por ejemplo, los desechos de la industria del papel contienen valores superiores de DBO ya que la celulosa (compuesto orgánico) es muy poco biodegradable. Sin embargo en países en vías de desarrollo se continúan realizando, con frecuencia, tanto la DQO como la DBO para análisis de rutina. (Crites, Tchobanoglous. 2000).

#### Relación entre DBO DQO

Los valores de la relación DBO/DQO en aguas residuales municipales no tratadas oscilan entre 0.3 y 0.8. Si la relación DBO/DQO para aguas residuales no tratadas es mayor que 0.5 los residuos se consideran fácilmente tratables mediante procesos biológicos. Si la relación DBO/DQO es menor que 0.3 el residuo puede contener componentes tóxicos o se pueden requerir microorganismos aclimatados para su estabilización, las relaciones antes mencionadas se pueden encontrar en la tabla 3. (Crites, Tchobanoglous. 2000).

**Tabla 3.** Comparación de relaciones de DBO/DQO varios parámetros utilizados para caracterizar aguas residuales.

Tipo de agua residual	DBO/DQO
No tratada	0.3-0.8
Después de la sedimentación primaria	0.4-0.6
Efluente final	0.1-0.3

Fuente: Crites, Tchobanoglous. 2000.

#### 2.4.4. Grasas y Aceites

La grasa animal y los aceites son ésteres compuestos de alcohol o glicerol (glicerina) y ácidos grasos. Los ésteres de ácidos grasos, que son líquidos en las temperaturas ordinarias, se llaman aceites y los que son sólidos se llaman grasas. Ambos son químicamente muy semejantes ya que se componen de carbono, hidrógeno y oxígeno, en diversas proporciones. Las grasas son de los compuestos orgánicos más estables y no se descomponen fácilmente por la acción de las bacterias. Sin embargo, los ácidos minerales y el hidróxido de sodio las atacan, dando como resultado la formación de glicerina y ácido graso o sus sales alcalinas (Crites, Tchobanoglous. 2000).

#### 2.5. Parámetros de medición de contaminantes biológicos en el agua y lixiviados.

El análisis para la evaluación de la calidad biológica del agua y de los lixiviados consiste, generalmente, en la determinación de los indicadores bacteriológicos y no de organismos patógenos como tales, en la tabla 4 se observan los parámetros de medición de contaminantes biológicos que se encuentran presentes en el agua y en los lixiviados. Tradicionalmente, los grupos de bacterias considerados como indicadores, son los coliformes totales y coliformes fecales. El indicador ideal es el que se encuentra presente cuando existen bacterias patógenas de origen fecal y cuyo número está relacionado directamente con el grado de contaminación. El indicador tradicional de la calidad microbiológica son las bacterias del grupo de las coliformes fecales, especialmente *Escherichia coli*; sin embargo, este presenta poco significado sanitario en aguas residuales. (Crites, Tchobanoglous. 2000).

**Tabla 4.** Parámetros de medición de contaminantes biológicos

<b>Prueba</b>	<b>Abreviatura / Definición</b>	<b>Uso o significado del resultado</b>
Organismos coliformes	UFC/100mL	Estimar la presencia de bacterias patógenas y la eficiencia del proceso de desinfección.
Microorganismos específicos	Bacterias, protozoos, helmintos, virus	Estimar la presencia de organismos específicos y la reutilización del agua.
Toxicidad	U.T. <sub>A</sub> y U. T. <sub>C</sub>	Unidad toxica aguda, unidad toxica crónica.

(Crites Tchobanoglous 2000).

### 2.5.1. Coliformes fecales

Son componentes normales de la flora y fauna del intestino humano, donde se encuentran en grandes cantidades ya que la mayoría no son patógenos. El grupo de coliformes fecales constituye aproximadamente el 90 % de los coliformes totales en las excretas humanas e incluye *Escherichia coli* y algunas cepas de *Klebsiella pneumoniae*. Son microorganismos indicadores por que su presencia revela la contaminación del agua con heces fecales y por lo tanto la posible existencia de patógenos (Jiménez, 2001).

### 2.5.2. Helmintos

El término “helminto” se aplica a los parásitos con forma de lombriz que pertenecen principalmente a tres grupos biológicos: nemátodos (nematelmintos o gusanos redondos), tremátodos (dístomas o duelas) y céstodos (tenias). Para comprender el papel que desempeñan las aguas residuales en la transmisión de los helmintos, se debe considerar primero la manera en que éstos se diseminan y como sobreviven, ya que en muchos casos no incluye la ruta fecal (Jiménez, 2001).

La técnica recomendada para la determinación y cuantificación de los huevos de helmintos corresponde a la presentada en el anexo de la NOM O001-ECOL/96, la cual es aplicable para muestras de afluentes y efluentes (Jiménez, 2001).

Se estima que en el año 2008 en México se reutilizaron 5, 051 millones de metros cúbicos. De los cuales, la agricultura ocupa el primer lugar en el rehúso de aguas municipales; la industria el segundo sitio y las termoeléctricas el tercer lugar. En el rehúso de agua de origen industrial (no municipal) destacan las aguas residuales de los ingenios azucareros en el cultivo de la caña, principalmente en el estado de Veracruz.

En 2008, el agua residual municipal generada fue de 235.8 m<sup>3</sup>/s; mientras que el agua residual municipal colectada fue de 208 m<sup>3</sup>/s. La meta establecida para el año 2012 es tratar el 60% del volumen total de aguas residuales colectadas en los sistemas de alcantarillado.

En 2008, las 1 833 plantas municipales en operación dieron tratamiento a 83.6m<sup>3</sup>/s, que representan 40.2% de los 208 m<sup>3</sup>/s recolectados en los sistemas de alcantarillado. En este mismo año la industria trató 33.8 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales en 2,174 plantas industriales (2,082 en operación).

Aunque en los últimos 11 años el volumen de agua tratada casi se ha triplicado, 61.7% del caudal recolectado aún es depositado en los cuerpos receptores sin tratamiento alguno. El 22.7% de las plantas de tratamiento en operación se encuentran en Durango, Chihuahua, Sinaloa y Aguascalientes. (CONAGUA 2008).

## **2.6. Sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos**

Los residuos sólidos urbanos según la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, son los “generados en casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de sus productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías públicas y lugares públicos”.

En México las prácticas más comunes para disponer los residuos sólidos urbanos o municipales en el suelo son: Tiradero a Cielo Abierto (TCA), Relleno Controlado (RC), Relleno Sanitario (RS) y Relleno Metanogénico (RM) o biorreactor(Gomez *et. all*, 2010 ).

### **2.6.1. Tiraderos a Cielo Abierto**

Consiste en verter los residuos directamente al suelo en forma diaria sin cubrirlos con tierra. Esta práctica no es adecuada debido a los problemas sanitarios y ambientales que provoca, pero es la más utilizada en el país debido a que es la más económica y fácil de operar para los municipios, la mayoría de los TCA son clandestinos, ocupan cañadas, caminos, lotes baldíos y cuerpos de agua, pueden ser familiares o municipales. Por su diversidad e irregulares no se tiene un registro de la mayor parte de dichos sitios. (Gomez *et. all*, 2010).

### **2.6.2. Relleno controlado**

Sitio inadecuado de disposición final que cumple con las especificaciones de un relleno sanitario en cuanto a obras de infraestructura y operación, no obstante no cumple con las especificaciones de impermeabilización ni con las condiciones y requerimientos técnicos conforme las disposiciones legales y sanitarias vigentes estipuladas en la NOM-083-SEMARNAT-2003. La INEGI, reporta 23 de este tipo hasta el 2006, no se tiene ningún dato más reciente (INEGI, 2010).

### **2.6.3. Relleno Sanitario**

Obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de los RSU y de manejo especial, con el fin de controlar, a través de la compactación e infraestructura adicional, los impactos ambientales un relleno de este tipo debe de cumplir cabalmente con la normatividad mencionada anteriormente. La INEGI, reporta 104 hasta el 2006 (INEGI, 2010), para el 2008 la SEMARNAT reporta 262 (SEMARNAT, 2008).

#### 2.6.4. Relleno Metanogénico o biorreactor

Es muy semejante a la del RS convencional, aunque conlleva como requerimiento obligatorio, la recirculación de lixiviados previamente inoculados con agentes enzimáticos; lo cual permitirá acelerar el proceso de descomposición en su etapa metanogénica, aumentar el tiempo de retención celular y reducir las necesidades de estabilización de los residuos. Al respecto, la experiencia a nivel nacional es aún limitada, no hay suficiente información que permitan determinar la factibilidad técnica y económica para su implementación (Sánchez, 2004).

Los tipos de sitios de disposición final es relativa al vertido de residuos, establece una clasificación muy genérica de los residuos que van a ser depositados en ellos.

- Residuo peligroso: Residuos que por su naturaleza son inherentemente peligrosos de manejar y/o disponer y pueden causar muerte, enfermedad; o que son peligrosos para la salud o el medio ambiente cuando son manejados en forma inapropiada.
- Residuo inerte: Residuo estable en el tiempo, el cual no producirá efectos ambientales apreciables al interactuar en el medio ambiente.
- Residuo no peligroso: Ninguno de los anteriores.

Los sitios de disposición final de residuos no peligrosos pueden utilizarse:

- Para residuos municipales.
- Para residuos no peligrosos de cualquier otro origen que cumplan los criterios permanentes de admisión de residuos en vertederos para residuos no peligrosos.
- Para residuos no reactivos peligrosos estables (por ejemplo solidificados o vitrificados) cuyo comportamiento de lixiviación sea equivalente al de los residuos no peligrosos, dichos residuos no se depositarán en compartimientos destinados a residuos no peligrosos biodegradables.

Depende del tipo y del carácter de los materiales contenidos en las basuras, y las condiciones ambientales (humedad, oxígeno disponible, temperatura, pH, etc.).

Al colocar los desechos en un SDF éstos están sometidos a importantes cambios biológicos, químicos o físicos simultáneos. Los siguientes procesos son los más importantes:

- La descomposición de la materia orgánica en estado de putrefacción, ya sea en condiciones aerobias o anaerobias, con la generación de gases y líquidos.
- La oxidación química de los materiales.

- El escape de gases del sitio de disposición final y la difusión de gases a través de mismo.
- El movimiento del líquido producido por la diferencia de presiones.
- La disolución y lixiviado de materiales orgánicos e inorgánicos por el agua y el lixiviado que se mueve a través del terreno.
- El movimiento del material disuelto por gradientes de concentración y ósmosis.

Las reacciones químicas y biológicas aumentan con la temperatura y la humedad presentes hasta alcanzar en cada caso un límite de presión.

La descomposición de los desechos se inicia tan pronto como son colocados los residuos. Inicialmente la descomposición bacteriana ocurre en condiciones aerobias. Esto se debe a la cantidad de oxígeno que queda atrapada en el vertedero. Sin embargo muy pronto se agota el oxígeno atrapado en los espacios intersticiales, dando paso a una descomposición bajo condiciones anaerobias. Las basuras están compuestas en parte por carbohidratos, grasas y proteínas. Los elementos más comunes en los residuos orgánicos son: carbono, oxígeno, hidrógeno y azufre. Los principales responsables de la descomposición son los microorganismos contenidos en el suelo y en los residuos. (Izquierdo y Mendoza 2010).

## **2.7. Lixiviados**

Uno de los aspectos más engorrosos en la gestión integral de los residuos sólidos urbanos en un SDF o una instalación de tratamiento de los mismos es el lixiviado. Este líquido procede principalmente de la degradación de la materia orgánica contenida en los residuos, a lo que se suman otros líquidos presentes en los residuos, envases con líquido, agua de lluvia, etc. (Izquierdo y Mendoza, 2010)

En México, las observaciones acerca de la composición química de los lixiviados arrojan como resultado el pH de 9 y la presencia de gran cantidad de sales, lo que se refleja en una alta conductividad, ausencia de oxígeno y alto contenido de metales pesados, cuyas concentraciones rebasan los límites de toxicidad (Jiménez, 2001). Su aspecto es negro, de olor fuerte y penetrante, fluido y en zonas de acumulación y/o estancamiento, presenta una capa superficial de varios centímetros de espuma.

La composición media de éstos líquidos varía considerablemente según las áreas geográficas, edad del sitio de disposición final y tipo de residuo depositado en el mismo, pero todos coinciden en una alta carga orgánica (DQO y DBO). Los parámetros básicos de caracterización de un lixiviado serán,

además de los dos citados la concentración de sólidos disueltos y en suspensión, dureza, concentración en fosfatos y nitratos, etc.

El volumen de lixiviado que se produce en un sitio de disposición final es muy variable según las condiciones medioambientales del entorno, tipo de residuo, etc. Dos aspectos importantes que inciden en la generación de lixiviados son la humedad de los residuos y la cantidad de lluvia. No se debe olvidar que el agua de lluvia mezclada con lixiviado es considerada como lixiviado.

Actualmente en muchos sitios de disposición final los lixiviados no son controlados de un modo exhaustivo. A pesar de contar con balsas, canalizaciones y otros medios de control, una fracción se filtra en el terreno, contaminando el suelo. Como las velocidades de migración suelen ser muy lentas, es después de algunos años cuando surge algún tipo de impacto ambiental, la contaminación puede afectar a los acuíferos. Otra posibilidad de contaminación es de las aguas superficiales; arroyos, ríos y otros causes superficiales debido a fugas y desbordamientos de los demás sistemas previstos para su almacenamiento.

Diversos estudios sobre lixiviados indican una amplia variación en su composición química y bioquímica de sitio a sitio, con el tiempo e incluso con el lugar de muestreo en la tabla 5 se muestra la variación de las características del lixiviado en función de la edad del sitio de disposición final.



**Tabla 5.** Variación de las características del lixiviado en función de la edad del sitio de disposición final.

<b>Variación de los lixiviados con la edad del vertido</b>				
<b>CONTAMINANTE</b>	<b>Concentración en mg/L</b>			
	1 año	2 años	3 años	4 años
DBO	446	1300	1135.9	1090.7
DQO	1121	2003.2	2183.6	1853.3
Sólidos disueltos	1119	1415.4	1318.1	1302.9
pH	7.1	6.6	7.3	6.9
Alcalinidad (CaCO <sub>3</sub> )	568.5	562	483	540.4
Dureza (CaCO <sub>3</sub> )	511.6	498.6	313.5	465.2
Calcio	651	894	725	818
Magnesio	652	454	250	453
Fosfatos	3	3	3	3
Sulfatos	114	683	428	462
Cloruros	481.6	439.5	310.1	424
Sodio	117.7	138.6	145.7	135.4
Potasio	969	950	968	961
Cadmio	0.04	0.09	0.1	0.09
Cromo	0.16	0.43	0.22	0.28
Cobre	0.44	0.39	0.32	0.39
Hierro	254	378	176	312
Níquel	0.53	1.98	1.27	1.55
Zinc	8.7	31	11	21
Mercurio	0.007	0.005	0.011	0.007

(Izquierdo y Mendoza, 2010)

En la tabla 6, se expresan los valores típicos de algunos parámetros según la composición media de los lixiviados generados en un relleno sanitario.

**Tabla 6.** Composición media de los lixiviados de rellenos sanitarios.

PARÁMETRO	INTERVALO DE VALORES (g/L salvo otra indicación)
pH (unidades)	3.7-8.5
Conductividad (µS/cm)	2810-16800
DQO (g O <sub>2</sub> /L)	0.04-89.5
DBO (g O <sub>2</sub> /L)	0.04-33.4
Materia seca (total)	0-59.2
Dureza (CaCO <sub>3</sub> )	0-22.8
Fosfato (total)	0-0.13
Ca	0.05-7.2
Na	0-7.7
K	0.028-3.77
Mn	9x10 <sup>-5</sup> -0.0125
Mg	0.017-15.6
Fe	0-2.82
Zn	0-0.037
Cu	0-9.9x10 <sup>-3</sup>
Cd	<3x10 <sup>-5</sup> -1.7x10 <sup>-2</sup>
Pb	<1x10 <sup>-5</sup> -2x10 <sup>-3</sup>
Cloruros	4.7x10 <sup>-3</sup> -2.467
Sulfatos	1.10-1.558

(Orta *et al.*, 2006).

En un relleno sanitario se pueden clasificar a los lixiviados en tres tipos, ésto en función del contenido de materia orgánica (DBO y DQO), grado de estabilización y edad del relleno. La variación de los lixiviados con la edad del vertido se muestra en la tabla siguiente.

**Tabla 7.** Principales tipos de lixiviados.

Parámetro de referencia	Edad del relleno (años) y tipo de lixiviado		
	< 5 (Joven) I (Biodegradable)	5 - 10 (Medio) II (Intermedio)	> 10 (Viejo) III (Estabilizado)
pH	< 6.5	6.5 - 7.5	> 7.5
DQO (g/L)	> 20	3 - 15	< 5
DQO/COT	< 2.7	2.0 - 2.7	> 2.0
DBO/DQO	< 0.5	0.1 - 0.5	< 0.1
AGV (%COT)	> 70	5 - 30	< 5
Metales pesados (g/L)	2		< 50 mg/L

(Orta *et al.*, 2006).

La concentración de Ácidos Grasos Volátiles (AGV) para el lixiviado joven representa más del 80% de la carga orgánica y para el lixiviado intermedio del 20 al 30%. La relación DBO/DQO establece el contenido de materia orgánica (biodegradable y recalcitrante) y el grado de estabilización del lixiviado. Un valor de esta relación  $>0.3$  indica un lixiviado joven y presencia de material biodegradable; a una relación  $\leq 0.1$  indica un lixiviado estabilizado con contenido de compuestos recalcitrantes.

En México, las observaciones acerca de la composición química de los lixiviados arrojan como resultado un pH de 9 y la presencia de gran cantidad de sales, lo que se refleja en una alta conductividad, ausencia de oxígeno y alto contenido de metales pesados, tales como cadmio, cromo, cobre, hierro y zinc, cuyas concentraciones rebasan los límites de toxicidad (Jiménez, 2001).

### 2.7.1. Índice de Biodegradabilidad

La carga orgánica medida como DBO y DQO son dos de ellos, y básicamente la relación que existe entre ambos define en gran medida la biodegradabilidad del lixiviado.

**Tabla 8.** Índice de Biodegradabilidad de acuerdo a la relación entre DBO/DQO

Rango DBO/DQO	Tipo
DBO/DQO $>0.4$	Biodegradable
$0.2 < \text{DBO/DQO} < 0.4$	Medianamente biodegradable
DBO/DQO $>0.2$	No muy poco biodegradable

(Wang *et. al.*, 2006)

### 2.7.2. Tratamientos de lixiviados

Está claro que la solución medioambientalmente correcta es el tratamiento de los lixiviados antes de su eliminación. Estos métodos son muy parecidos o casi los mismos que los aplicados a la depuración de las aguas residuales, los lixiviados tienen unas características adicionales principalmente la altísima carga orgánica que contienen.

Los sistemas más simples están basados en la evaporación natural o forzada. Ambos pueden ser aplicados en zonas calurosas y con baja tasa de precipitación pluvial anual.

En la práctica, el tratamiento de los lixiviados no es muy eficaz debido a la variación de su composición. Los lixiviados en ocasiones tienen DBO muy alta, y otras veces es muy alta la DQO. Algunos métodos de uso corriente consisten en recircular el lixiviado mediante bombeo dentro del relleno. Con esto, una parte de su volumen se reduce, por evaporación y el resto provoca un

aumento en la producción de gases. Otra alternativa consiste en acumular los lixiviados en una laguna anaerobia, para regular el volumen de los líquidos presentes en el relleno y aumentar el número de microorganismos y nutrientes en el lixiviado; de modo que, al recircular dentro del relleno, constituye un inóculo muy efectivo para el proceso de digestión.

Los tratamientos fisicoquímicos son más caros que los anteriores, pero para resultados similares o mejores requieren de instalaciones más pequeñas y sencillas, con menor sensibilidad a las variaciones de las condiciones del medio. Las técnicas más empleadas son precipitación química, oxidación química, adsorción y ósmosis inversa.

La precipitación consiste en agregar agentes coagulantes y floculantes como cal, alúmina, cloruros, etc. para potenciar la decantación de los sólidos en suspensión. Se consigue reducir la DQO en un 40 % como máximo, los sólidos en suspensión y el color la oxidación química consiste en añadir agentes oxidantes para degradar los compuestos orgánicos presentes en el lixiviado. Pueden alcanzarse rendimientos de reducción de la DQO de hasta un 50 %.

El grado de depuración es muy bueno, hasta el 80 % pero es un sistema costoso. Por último, la ósmosis consiste en filtrar el líquido a través de membranas bajo el efecto de diferencia de presiones. Este tratamiento se emplea como paso secundario de proceso combinado, normalmente biológico y fisicoquímico; para conseguir el mejor tratamiento posible, siendo este en muchas ocasiones la combinación de dos o tres de los anteriormente citados. Los lixiviados se presentan, así pues, como el principal problema que, los vertederos acarrear al medio ambiente.

Otros métodos empleados en la depuración de lixiviados son:

- Tratamientos fisicoquímicos con absorción, oxidación, precipitación o coagulación-floculación.
- Percolación sobre escoria de incineración de los residuos urbanos.
- Transferencia a sistemas de depuración de aguas residuales urbanas.
- Evaporación-destilación.
- Sistemas mixtos.

En general, de acuerdo con Giraldo (2001) las tecnologías disponibles en el tratamiento de lixiviados pueden dividirse en procesos anaerobios, aerobios, sistemas naturales, sistemas de membranas, sistemas avanzados de oxidación, lagunas de evaporación y recirculación. Los primeros dos sistemas son por naturaleza empleados para la remoción de materia orgánica. Los sistemas naturales, se emplean como etapas de depuración, cuando el lixiviado ya ha recibido un pretratamiento, o bien, se encuentra diluido.

Por lo que toca a los sistemas avanzados de oxidación, éstos se han probado con eficiencias buenas cuando la materia orgánica contenida en el lixiviado es poco biodegradable (Wang *et al.* 2003; Deng y Englehardt 2007; Primo *et al.* 2008). La evaporación y recirculación- constituyen prácticamente los únicos sistemas que se utilizan en los rellenos sanitarios del territorio nacional. Son sistemas relativamente fáciles de operar, sin embargo, en el sistema de evaporación por lagunas se demandan superficies considerables, pudiendo presentarse serios problemas durante la época de lluvias debido a una sobreproducción en los lixiviados. Asimismo, durante el proceso de evaporación sobre las plataformas de residuos, algunos contaminantes -compuestos orgánicos volátiles se emiten a la atmósfera

Con lo antes expuesto, puede observarse que prácticamente todas las tecnologías conocidas para el tratamiento de aguas residuales se han probado para el tratamiento de lixiviados de SDF de residuos sólidos, por lo que existe suficiente literatura técnica sobre las aplicaciones de las diferentes tecnologías para el tratamiento de éstos líquidos. Sin embargo, la tratabilidad de ellos depende de su composición y características (Primo *et al.* 2008), lo que propicia que no exista un determinado tren de tratamiento que garantice eficiencias aceptables en la remoción de contaminantes para cualquier lixiviado.

En lo relacionado específicamente a la tratabilidad de lixiviados viejos, los procesos avanzados de oxidación y otros fisicoquímicos han demostrado ser muy eficientes, tal y como lo manifiestan (Primo *et al.*, 2008) probando con un proceso integrado (Reacción Fenton-Ultrafiltración), donde se alcanzaron remociones del 80% de DQO. Por su parte (Zhang *et al.*, 2005), a través del proceso Fenton, reportaron eficiencias de remoción de DQO del orden del 60%. De igual manera, (Deng, 2007) probó la remoción de contaminación por materia orgánica medida como DQO usando un proceso de oxidación vía Fenton, reportando eficiencias arriba del 60%. Finalmente, (Deng y Englehardt, 2007) pronosticaron a la oxidación electroquímica como una tecnología promisoría y poderosa para el tratamiento de lixiviados. En el caso de procesos fisicoquímicos como el de coagulación-floculación, (Aziz *et al.*, 2007) reportaron remociones altas de sólidos suspendidos (95%) y de color (90%), y regulares en DQO (43%), con el uso de tres tipos de coagulantes: sulfato de aluminio, cloruro férrico y sulfato ferroso.

### **2.7.3. Contaminación química en lixiviados**

Los residuos sólidos contienen aproximadamente un 45 % de materia orgánica en estado de putrefacción y descomposición debida a la acción de artrópodos, bacterias y hongos, causando los malos olores típicos de basura. Esta descomposición provoca una disociación de las macromoléculas orgánicas a formas más sencillas que no tienen estados líquidos o pueden ser

fácilmente arrastradas por el agua, formando los lixiviados y diversos compuestos de nitrógeno y fósforo procedentes de la mineralización de esta materia orgánica.

Este tipo de contaminación se produce al aumentar el contenido de nutrientes en el agua como nitrógeno y fósforo que da lugar a una eutrofización de la masa acuosa, pudiendo afectar totalmente el ecosistema.

Además de los compuestos orgánicos, se encuentran también diversos metales tóxicos liberados de algunos dispositivos como acumuladores de energía como el Fe, Cd, Pb, Cu, Zn, Ag, Mn, Ni, Hg, Cr, etc., que pueden acumularse sobre los suelos al ser pocos móviles y poder retenerse por fenómenos de intercambio iónico, o bien pueden llegar a masas acuosas superficiales y subterráneas. (Izquierdo y Mendoza 2010)

Los contaminantes bacteriológicos se pueden filtrar después de varios metros de viaje a través del suelo; a diferencia de los cloruros, nitratos y sólidos suspendidos que después de un largo flujo de lixiviados pueden contaminar un acuífero. Se cree que con el tiempo decrece la cantidad de contaminantes en un lixiviado. Con respecto al movimiento del flujo de los lixiviados, diversos estudios concuerdan en que la distancia recorrida por los contaminantes depende de la composición y permeabilidad del suelo, así como del tipo de contaminante. Los contaminantes orgánicos biodegradables no viajan mucho, al contrario de los orgánicos resistentes e inorgánicos. En algunos casos, la velocidad es tan baja que durante años el impacto no se nota

En general los componentes orgánicos son menos solubles que los inorgánicos. Los compuestos orgánicos solubles son aquellos que tienen un grupo funcional hidrofílico tal como  $-\text{COOH}$ ,  $-\text{OH}$ ,  $-\text{SO}_3\text{H}$  o algún otro. Se considera que éstos compuestos tienen tres mecanismos de solubilización: (Trejo 1994)

- Disolución en agua por ionización.
- Disolución en agua por formación de puentes de hidrógeno.
- Hidrólisis.

## **2.8. Procesos de oxidación avanzados**

Los procesos de oxidación avanzados (POAs) muestran gran potencial en las tecnologías de tratamiento de aguas y aguas residuales. Estos procesos utilizan oxidantes químicos para reducir niveles de DQO/DBO y para eliminar componentes inorgánicos y orgánicos oxidables. Estos sistemas oxidan la materia orgánica a  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , entre los oxidantes más utilizados se encuentran el permanganato de potasio y el peróxido de hidrógeno.

Crecientemente, se está recurriendo en los países industrializados al uso de las llamadas tecnologías o procesos oxidación avanzada (POAs), en la tabla 8 se observan los tipos de proceso de oxidación avanzada.

Los POAs son procesos muy poco aplicados y, peor aún, menos difundidos en los países de economías emergentes como los de América Latina. La mayoría de las POAs puede aplicarse a la remediación y destoxificación de aguas especiales, generalmente en pequeña o mediana escala.

Los cuales son métodos catalíticos químicos o fotoquímicos que involucran la generación y uso de especies transitorias poderosas, como el radical hidroxilo (HO•), el cual posee alta efectividad para la oxidación de la materia orgánica. También se caracterizan por la baja selectividad de ataque, que es una característica útil para un oxidante utilizado en el tratamiento de aguas residuales.

**Tabla 9.** Tipos de proceso de oxidación avanzada

<b>Procesos no fotoquímicos</b>	<b>Procesos fotoquímicos</b>
Ozonización en medio alcalino (O <sub>3</sub> /OH <sup>-</sup> )	Oxidación en agua sub/y supercrítica
Ozonización con peróxido de hidrógeno (O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	Procesos fotoquímicos
Procesos Fenton (Fe <sup>2+</sup> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) y relacionados	Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío (UVV)
Oxidación electroquímica	UV/peróxido de hidrógeno
Radiólisis y tratamiento con haces de electrones	UV/O <sub>3</sub>
Plasma no térmico	Foto-Fenton y relacionadas
Descarga electrohidráulica - Ultrasonido	Fotocatálisis heterogénea

(Domenech, 1998)

Dentro de las ventajas de los POAs (Domenèch, 1998), se pueden mencionar las siguientes:

- No sólo cambian de fase al contaminante (como ocurre en el arrastre con aire o en el tratamiento con carbón activado), sino que lo transforman químicamente.
- Generalmente se consigue la mineralización completa (destrucción) del contaminante. En cambio, las tecnologías convencionales, que no emplean especies muy fuertemente oxidantes, no alcanzan a oxidar completamente la materia orgánica.
- Sirven para tratar contaminantes a muy baja concentración (por ejemplo, ppb).
- No se forman subproductos de reacción, o se forman en baja concentración.

- Son ideales para disminuir la concentración de compuestos formados por pretratamientos alternativos, como la desinfección.
- Generalmente, mejoran las propiedades organolépticas del agua tratada.

En muchos casos, consumen mucho menos energía que otros métodos (por ejemplo, la incineración), y permiten transformar contaminantes refractarios en productos tratables luego por métodos más económicos, como el tratamiento biológico.

La oxidación química catalizada mediante el reactivo de Fenton ha mostrado una gran eficacia para la destrucción total de contaminantes cuando se utiliza en combinación con el criterio de intensificación en la concepción y diseño del proceso. Sin embargo, su difusión a escala industrial se ha visto limitada por barreras que están relacionadas con el enfoque desde los paradigmas tradicionales vigentes en el ámbito de la ingeniería química. Por lo tanto, los obstáculos que impiden la aplicación efectiva de este tipo de tratamiento químico en una gran variedad de industrias pueden ser superados mediante un cambio radical en el enfoque del diseño de procesos.

El POAs que se utilizó en este trabajo es de tipo no fotoquímico el cual fue proceso Fenton.

#### **2.8.1. Proceso Fenton**

El proceso Fenton es un sistema catalítico homogéneo en el cual una sal de hierro, habitualmente  $\text{FeSO}_4$ , interacciona con peróxido de hidrógeno (típicamente a presión atmosférica, temperatura entre  $20\text{ }^\circ\text{C}$  y  $40\text{ }^\circ\text{C}$  y condiciones ácidas), ésto implica la generación y subsecuente reacción con los radicales hidroxilo, que son las especies oxidantes.

Entre los procesos fisicoquímicos de oxidación, el proceso Fenton es uno de los procesos de oxidación avanzada más antiguos que se utiliza con éxito, ya que es relativamente barato y fácil de manejar.

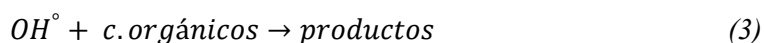
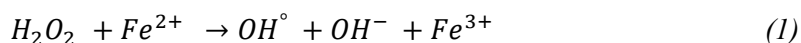
#### **2.8.2. Parámetros que influyen en el proceso**

La eficacia del proceso depende de las concentraciones de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y de  $\text{Fe}^{2+}$ , así como del pH de la reacción, cuyo valor debe estar en el rango de 3-5.

Los conocidos ensayos de Fenton de fines del siglo XIX demostraron que las soluciones de peróxido de hidrógeno y sales ferrosas eran capaces de oxidar los ácidos tartárico y málico, y otros compuestos orgánicos. Más tarde, Haber y Weiss en 1934. Sugirieron que se formaba  $\text{HO}^\circ$  por la reacción.



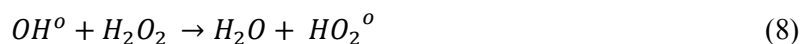
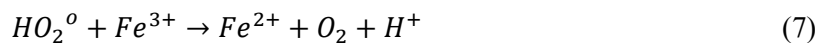
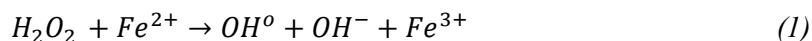
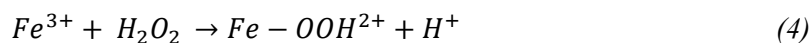
Los radicales hidroxilo pueden reaccionar con los iones ferroso y convertirse en iones férricos o reaccionar con la materia orgánica



### 2.8.3. Influencia del pH

La velocidad de la reacción es máxima en un pH próximo a 2.8; a pH alto la velocidad disminuye debido a la precipitación de hierro en forma de  $Fe(OH)_3$ .

A  $pH < 3$ , la reacción es autocatalítica, ya que el  $Fe^{3+}$  descompone  $H_2O_2$  en  $O_2$  y  $H_2O$  a través de un mecanismo en cadena:



El proceso es potencialmente útil para destruir contaminantes, ya que es muy efectivo para la generación de  $OH^\circ$ , pero un exceso de  $Fe^{2+}$ , puede atraparlos (reaccion2), al igual que el mismo  $H_2O_2$  o el radical hidropéroxido, tal como se muestra en la reacción 9.



La reacción Fenton es una oxidación simple y efectiva para diferentes tipos de contaminantes de origen orgánico, donde se produce una cantidad poco significativa de hidróxido férrico que necesita ser separado y gestionado.

## 2.9. Quitosán

### 2.9.1. Generalidades del quitosán

El quitosán es un derivado de la modificación química (desacetilación) de la quitina (del griego tunic, envoltura) la cual se encuentra distribuida ampliamente en la naturaleza y después de la celulosa (materia base de papel), es el segundo polisacárido en abundancia; sus fuentes principales son el exoesqueleto (caparazón) de muchos crustáceos, alas de insectos (escarabajos, cucarachas), paredes celulares de hongos, algas, etc. En la tabla 10 se observan los porcentajes de quitina que se pueden encontrar en los antes mencionados.

Fue descubierta por Braconot en 1811 cuando estudiaba sustancias derivadas del *agaricus volvaceus* y otros hongos. Posteriormente Odier, en un artículo sobre insectos reportó que encontró en algunos insectos la misma sustancia que formó la estructura de las plantas, llamándola “Quitina”. Payen, en 1943, inició una controversia sobre la diferencia de la quitina y la celulosa, en parte porque se pensaba que la presencia de nitrógeno reportada en algunas investigaciones se debía a residuos de proteínas que no podían ser completamente eliminados de las muestras. (Larez, 2003)

Químicamente se describe como  $\beta$  (1-4)-2-acetomido-2-desoxi-D-glucosa o  $\beta$  (1-4)- N -acetil-D-glucosamina. En la naturaleza se encuentran distintas configuraciones ( $\alpha$ ,  $\beta$ , y quitina), siendo la más abundante la  $\alpha$ -quitina (RU-KE BAL, 1988)

Entre los desechos de crustáceos se encuentra el caparazón, el cual está constituido principalmente de: 30-40% de proteína, 30-50% de carbonato de calcio., 20-30% de quitina-quitosán. Estas proporciones varían dependiendo de la especie de crustáceo, insecto, hongo, y molusco. Como se muestra en la tabla 10.

**Tabla 10.** Porcentaje de quitina en crustáceos, insectos, hongos, y partes de moluscos.

Especie	Porcentaje de Quitina	Especie	Porcentaje de Quitina
Cangrejo cáncer, Crustáceo	72.1c	Insectos Cucaracha periplaneta	2 a
Cangrejo carcinus, Crustáceo	0.4 -0.3 a 8.29 b 64.20 c	Cucaracha blatella	18.4c 10b 35c
Cangrejo King, Crustáceo	35b	Escarabajo coléoptera	5-15b 27-35
Cangrejo azul	14 a	Escarabajo may	16b

Crustáceo			
Cangrejo rojo Crustáceo	1..3-1.8 b	Escarabajo tenebrio	2.1 a 4.9b 31.3
Camarón crangon	5.8b 69.1 c	Mosca verdadera deptera	54.8c
Camarón Alaska	28d	Mariposa ozufre priris	64c
Langosta de nephrops	69.8c 6.7b	Saltamontes	2-4 a 20c
Langosta homarus	60.8- 70c	Gusano de ceda bombyx	44.12
Percebe lepas	58.3c	Gusano de cera calleria	33.7c
Hongos aspergillus niger	42 e	Partes de moluscos Concha de almeja	6.1
Penicillum notatum	18.5e	Concha de ostra	3.6
Penicillum chrysogenuim	20.1e	Esqueleto de calamar	41
Saccharomyces cerevisiae	2.9e		
Mucor rouxii	44.5		
Lactarius vellerius	19		

(Knorr, 1984.)

- a: peso de cuerpo húmedo
- b: peso de cuerpo seco
- c: peso cutícula orgánica
- d: peso total de la cutícula seca

En México se capturan durante el año una importante cantidad de langostinos y camarones cuyos caparazones, pese a constituir una excelente materia prima, son por el momento un serio residuo contaminante, representando un negativo impacto ambiental en el país. Ésto, unido a su lenta capacidad de degradación, ha estimulado una intensa actividad investigadora centrada en la determinación de los posibles usos de esta sustancia con una doble finalidad:

- Por un lado la eliminación de un problema medioambiental.
- Por otro la búsqueda de una explotación económica benéfica.

México es uno de los países con mayor producción de camarones al ocupar el séptimo lugar a nivel mundial (casi 100 mil toneladas de peso vivo durante 2001, según datos de Sagarpa).

También se producen, en promedio, 20 mil toneladas anuales de jaiba, tres mil 500 de langostino y casi tres mil toneladas de langosta (todos en peso vivo). Es posible capturar estas especies en la región comprendida del Atlántico, la península de Yucatán y el Golfo de México. En la región al este de la República se ha reportado la producción de una langostilla que, debido a su tamaño

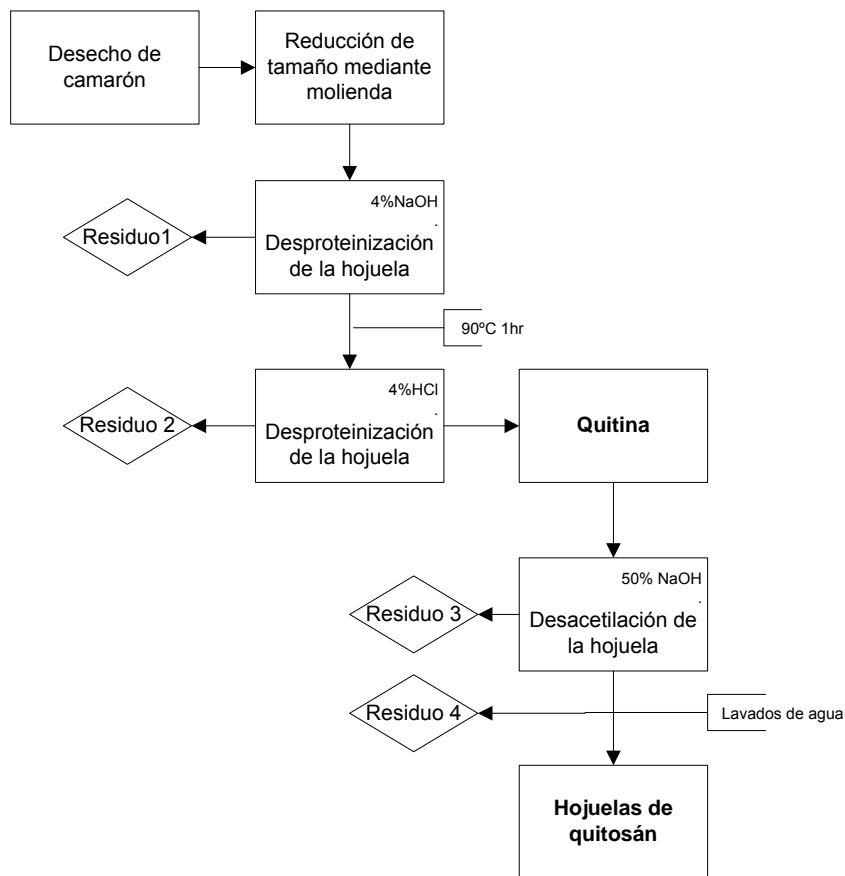
pequeño, no sirve para consumo y se considera más una plaga al ser capturada junto con el camarón y causar un sobrepeso que rompe las redes. Esta langostilla no se ha aprovechado ampliamente (sólo se le utiliza para la creación de harina para granjas camaroneras), sin embargo, se ha calculado que tiene una producción anual de 250 mil toneladas que se queda varada en las costas originando un verdadero problema ambiental. Sería ideal utilizarla para producir quitina.

En USA, la quitina y el quitosán son comúnmente producidos a partir de camarón y cangrejo de Alaska y México (Muzarelli, 1982).

La producción de quitina y quitosán está basada en caparazón de cangrejo y camarón de industrias que se ubican en China, Oregon, Washington, Japón. Muchos países tienen fuentes considerables sin explotar como Noruega, México y Chile. (Arévalo, 1996) A nivel mundial en 1996 de capturaron 3 millones de toneladas de camarón de las cuales 1.9 millones de toneladas fueron capturadas en el mar y 891,000 fueron cultivadas, éste producto es una de las principales fuentes de obtención de quitina y quitosán (FAO 1996).

En México en el año 2000 se produjeron 95, 611 toneladas de camarón de las cuales el 85% son desechos y son considerados como contaminantes, por el cual de la captura total solo se extrae el 1% de quitina-quitosán del total de toneladas de camarón (Arévalo 1996; INEGI, 2000), ésto nos indica que en México podrían producirse solo a partir de residuos de camarón 95.611 toneladas de quitina o a su vez quitosán, lo cual le daría un valor agregado a los desperdicios de camarón y crustáceos, al mismo tiempo que un producto que podría ser vendido y ampliamente utilizado en la industria de los alimentos, tratamiento de aguas, captación de metales, área médica, agricultura, etc.

Desde el punto de vista químico, los procesos para obtener la quitina y el quitosano son relativamente sencillos. En la figura 2 podemos observar un esquema simplificado para la obtención de quitina y quitosano, aunque el tratamiento con álcali concentrado a temperaturas relativamente altas implica riesgos importantes para los operadores de las plantas de producción y hostilidad hacia el ambiente



R1, R2, R3 y R4= Neutralizar y desechar a la tarja

**Figura 2.** Esquema simplificado para la obtención de quitina y quitosano a partir de caparazón de crustáceos.

La desacetilación completa de la quitina produce un material totalmente soluble en medio ácido conocido como quitano sin embargo, cuando la desacetilación del material de partida es incompleta se crea una mezcla de cadenas que tiene distintas proporciones de unidades  $\beta$  (1-4)-2-acetomido-2-desoxi-D-glucosa y  $\beta$  (1-4)2-amino-2-desoxi-D-glucosa, cuya relación depende de las condiciones de reacción que obviamente, genera materiales con distintas propiedades denominadas quitosanos. La diferencia en las propiedades de éstos materiales puede llegar a ser notable como por ejemplo la distinta solubilidad en medio acuoso que puedan llegar a tener (Larez, 2003).

El quitosán es un electrolito a pH ácidos. Presenta una alta densidad de carga por unidad de glucosalina. Por su carga interactúa fuertemente con muchos materiales que portan cargas negativas (proteínas, polisacáridos aniónicos, ácidos nucleicos, etc.) dando una neutralidad eléctrica.

### 2.9.2. Aplicaciones del quitosán

El quitosán es un excelente floculante debido a su gran número de grupos  $\text{NH}_3^+$  que pueden interactuar con los coloides cargados negativamente. Se adhieren fácilmente a polímeros naturales semejantes al pelo y a la piel, los cuales están compuestos de mucopolisacáridos y proteínas cargadas negativamente. Los complejos formados con quitosán y muchos iones de metal son usados en la quelación de hierro, cobre y magnesio; también pueden ser usados para remover iones de metales pesados tóxicos como: plata, cromo, mercurio, cadmio y plomo (Knorr, 1984).

La quitina es un producto de desecho de la industria de mariscos con caparazón (cangrejos) que tiene una capacidad natural de adsorber metales pesados. Este producto puede transformarse por hidrólisis parcialmente en glucosalina o quitosano. El quitosano es barato y abundante, adsorbente importante de metales pesados. Así quelatos metálicos del quitosano capturan de 5 a 6 veces más metales que la quitina, debido a los grupos amino expuestos durante la desacetilación. El quitosano ha demostrado tener mayores capacidades de adsorción que el poliaminoestireno, componente habitual de resinas de intercambio catiónico. El comparativo del quitosán con glutaraldehído, si bien reduce su capacidad de adsorción, aumenta su estabilidad cuando el porcentaje de desacetilación es 50 % (Cuaderno de Pesquisa, Sér. Bio. 2009).

El quitosán y sus derivados han sido efectivos en el tratamiento de agua con altos contenidos de ácidos húmicos, en la remoción de turbidez de suspensiones de partículas coloidales, como látex y caolinita, para remover aceite de pescado, metales y surfactantes. Se ha demostrado su efectividad como coagulante en variedad de aguas residuales industriales tales como las avícolas, lácteas, industrias de alimentos y cárnicas, así como también en aguas naturales con diferentes valores de turbidez. Sin embargo, son pocas las investigaciones sobre su uso en aguas complejas como las aguas de producción de petróleo (Yaxcelys, 2009).

Entre otras aplicaciones se destacan la biomedicina, biotecnología, medicina, tratamiento de aguas industriales alimenticias, agricultura, fabricación de papel, y cosmética además tiene propiedades antifúngicas y antibacteriales.

# METODOLOGÍA

---

## 2. Muestreo de lixiviados

El lixiviado se obtuvo del relleno sanitario de Tlalnepantla de Baz, con dirección Camino viejo a las minas s/n, col. San Pedro Barrientos, Tlalnepantla, Estado de México, C.P. 54010. El muestreo se realizó en la entrada de la laguna, en un solo punto para no tomar del lixiviado que ya se encuentra en reposo.

- El traslado de las muestras de lixiviado se realizó en envases de polietileno, se llevó una hielera para preservarlas en un ambiente frío para su posterior tratamiento.
- Las muestras se analizaron lo más pronto posible para que los cambios tanto biológicos como fisicoquímicos no se alteraran.
- Se tomó la temperatura de las muestras en el sitio de disposición final como cuando las muestras llegaron al laboratorio para su análisis.

### 2.1. Caracterización del lixiviado

Se llevó a cabo la caracterización de dicho lixiviado con base en las siguientes pruebas:

1. Sólidos totales
  - Sólidos totales
  - Sólidos totales volátiles
  - Sólidos totales fijos
  - Sólidos suspendidos totales
  - Sólidos suspendidos volátiles
  - Sólidos suspendidos fijos
  - Sólidos sedimentables
2. Turbidez
3. pH
4. Conductividad
5. Grasas y aceites
6. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
7. Demanda química de oxígeno (DQO)
8. Metales
9. Coliformes totales y fecales
10. Huevos de helminto

Los análisis antes realizados para la caracterización de los lixiviados y sus distintos tratamientos fueron realizados mediante las normas mexicanas establecidas en la siguiente.

**Tabla11.** Método analítico bajo el cual fue realizada la prueba.

<b>Parámetro</b>	<b>Método analítico</b>
DBO	NMX-AA-028-SCFI-2001
DQO	NMX-AA-030-SCFI-2001
Grasas y aceites	NMX-AA-005-SCFI-2001
Sólidos Sedimentables	NMX-AA-004-SCFI-2001
Sólidos	APHA Standards methods
Cianuros	NMX-AA-058-SCFI-2001
Cromo hexavalente	NMX-AA-044-SCFI-2001
Arsénico	NMX-AA-051-SCFI-2001
Cadmio	NMX-AA-051-SCFI-2001
Mercurio	NMX-AA-051-SCFI-2001
Cobre	NMX-AA-051-SCFI-2001
Níquel	NMX-AA-051-SCFI-2001
Plomo	NMX-AA-051-SCFI-2001
Zinc	NMX-AA-051-SCFI-2001

Análisis microbiológicos

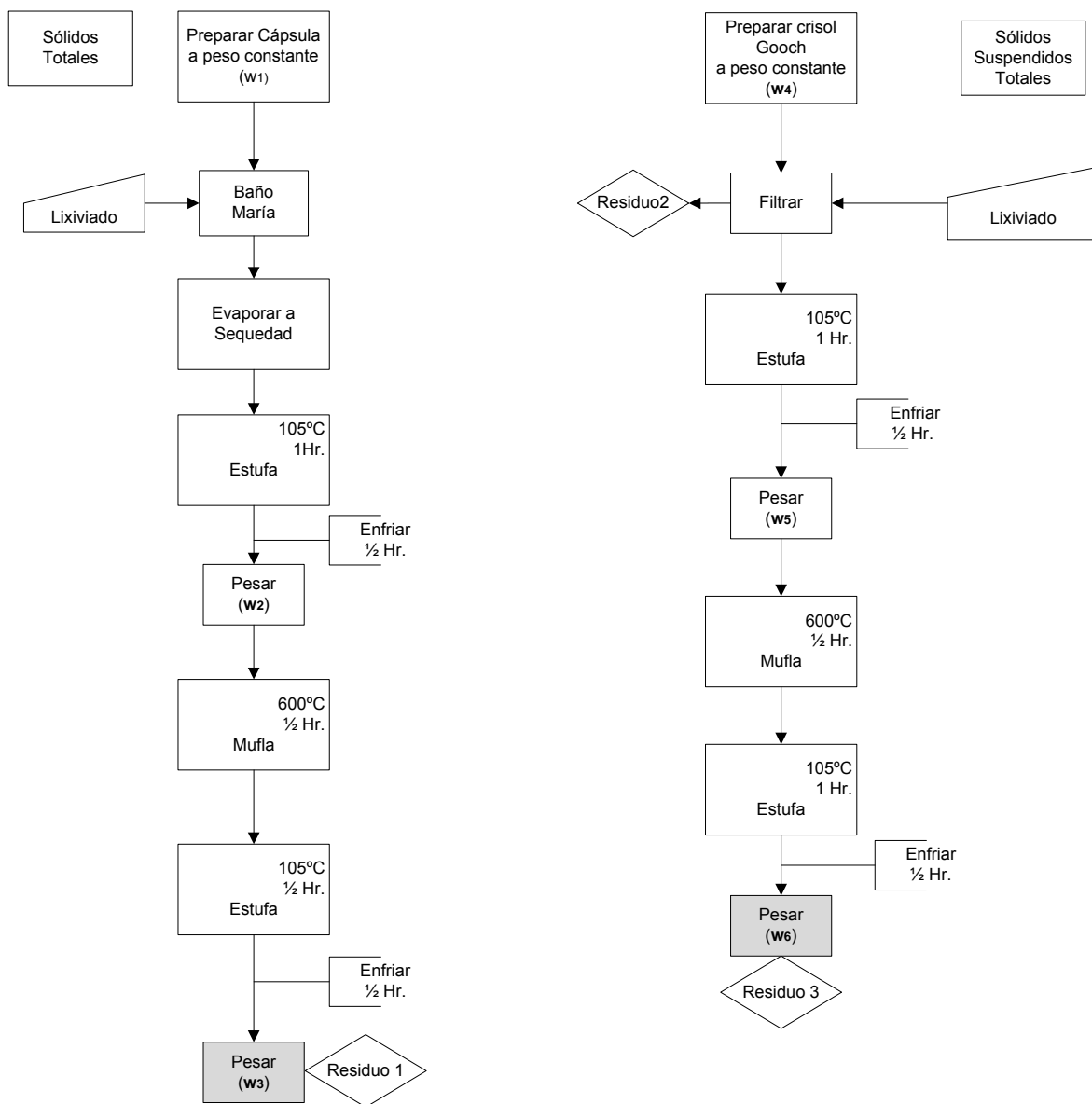
**Tabla12.** Método analítico bajo las cuales fueron realizadas las pruebas microbiológicas.

<b>Parámetro</b>	<b>Método analítico</b>
Coliformes totales (UFC/100mL)	NMX-AA-102-SCFI-2006
Coliformes fecales (UFC/100mL)	NMX-AA-102-SCFI-2006
Huevos de helminto (HH /L)	NMX-AA-113-SCFI-1999



## Sólidos totales

La determinación de sólidos totales se llevó a cabo conforme al esquema de la fig.4.



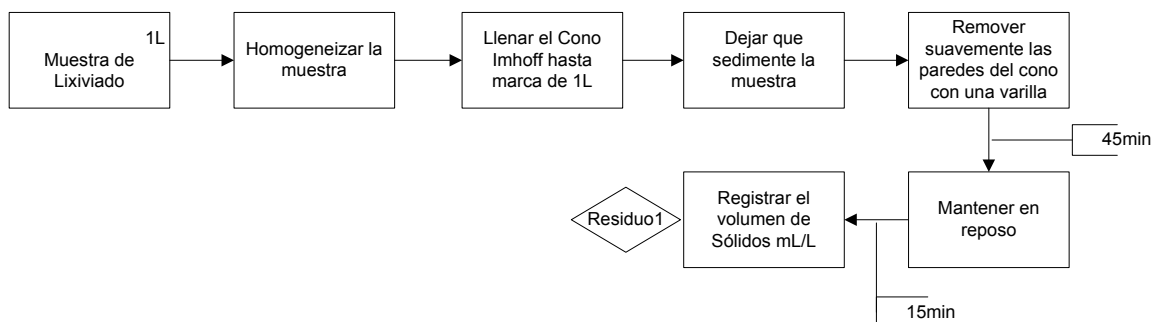
R1, R2, R3=Desechar en la basura

**Fig. 4.** Diagrama de cuantificación de sólidos

Con base en las figuras anteriores se obtuvieron los sólidos necesarios para calificar el lixiviado

## Sólidos sedimentables

La determinación de sólidos sedimentables se llevo a cabo como en el esquema de la fig. 5, con ésto se cuantifico la cantidad de sedimentación con los sólidos arrastrados por el lixiviado.

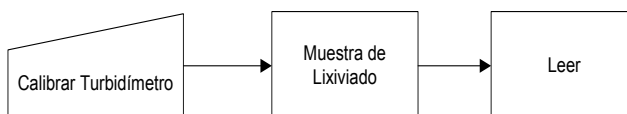


R1, = Filtrar y desechar en la basura

**Fig.5.** Diagrama de cuantificación de sólidos sedimentables.

## Turbidez

El procedimiento a seguir está descrito en la figura 6.



**Fig. 6.** Determinación de Turbidez.

El parámetro de la turbidez se realizó de acuerdo a las especificaciones del equipo

- Se calentó el equipo por 15 minutos.
- Se calibró con agua desionizada, introduciendo el electrodo dentro de la misma.
- Se tomó la medición estándar del agua.

En la fotografía 1 se observa el turbidímetro utilizado para este trabajo.



**Fotografía 1.** Turbidímetro E.S.&D. Modelo Tur 800 2160.

## pH

La medición del pH se llevó a cabo mediante el diagrama esquematizado en la figura 7, para lo cual se utilizó un pH-metro y se revisó lo siguiente:

- Condición del electrodo.
- Calibración en solución buffer



**Fig. 7.** Determinación de pH.

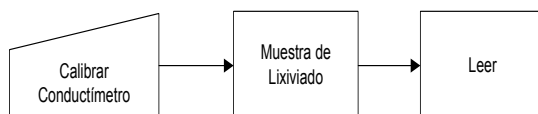
En la fotografía 2 se observa el pH-metro utilizado para este trabajo.



**Fotografía 2.** pH- metro Horizon Ecology Co. Modelo. 5997-20

## Conductividad

De acuerdo al esquema (figura 6) se elaboró la medición de conductividad contenida muestra de lixiviado fresco.



**Fig. 12.** Determinación de conductividad.

El parámetro de conductividad se realizó de acuerdo a las especificaciones del equipo.

- Se calentó el equipo por 15 minutos
- Se calibró con agua desionizada, introduciendo el electrodo dentro de la misma
- Se tomó la medición estándar del agua

En la fotografía 7. Se muestra el conductímetro utilizado en el trabajo.

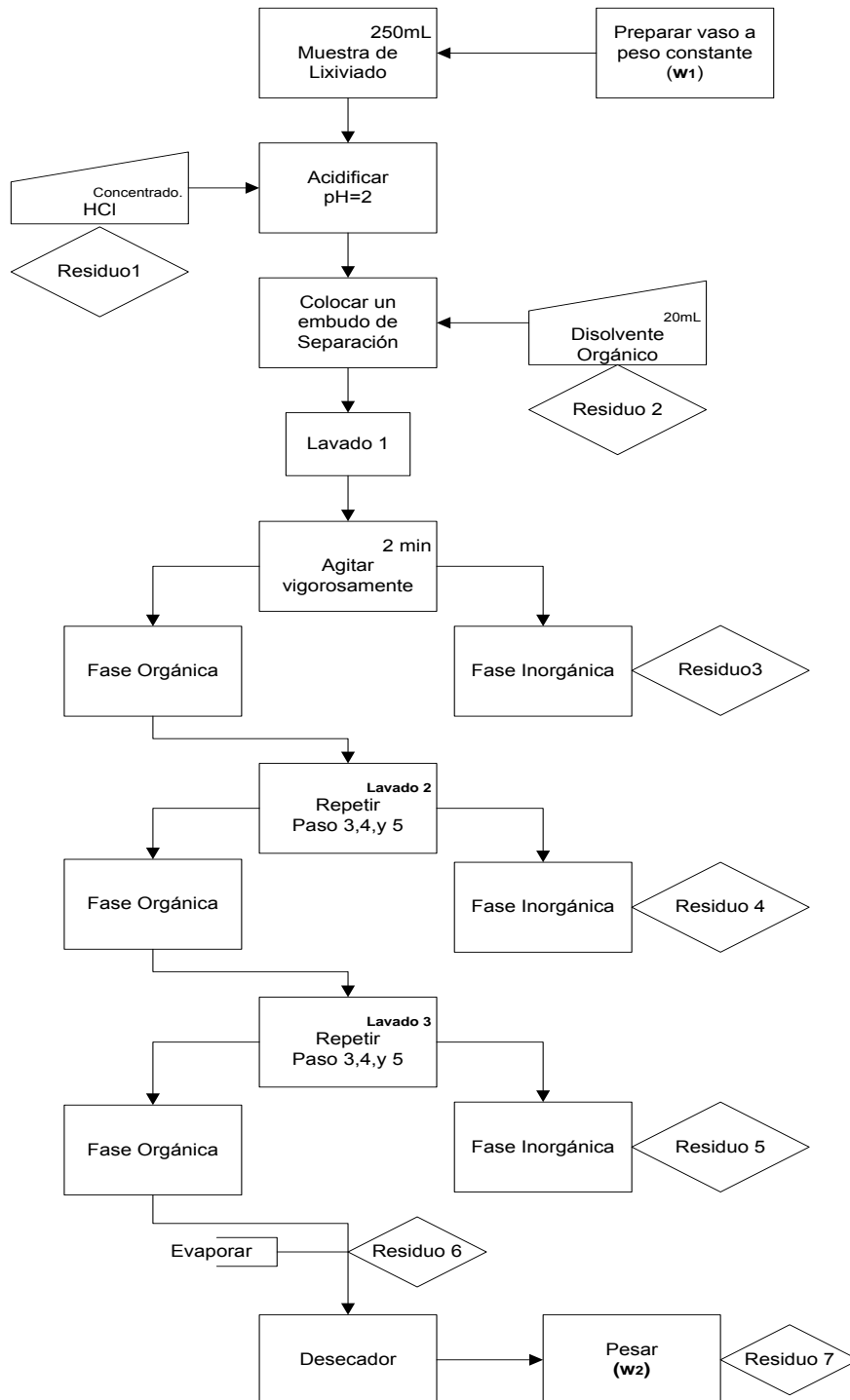


**Fotografía 7. Conductímetro marca YSI conductivity bridge modelo 31.**

### **Grasas y aceites**

La prueba de Grasas y Aceites se llevó a cabo por el procedimiento mostrado en la figura 8, tomando en cuenta las condiciones necesarias:

- Se realizó la prueba con una muestra fresca.
- Se trabajó a una misma temperatura (25°C).



R1, R2 = Guardar reactivos sobrantes en sus respectivos frascos etiquetados  
 R3, R4, R5 = Filtrar y guardar en su respectivo frascos etiquetado  
 R6 = Desechar en la campana  
 R7 = Lavar el vaso y desechar el residuo en la basura

**Fig. 8.** Diagrama de cuantificación de grasas y aceites.

Con base en el procedimiento experimental anterior se determinó grasas y aceites para determinar que tan posible es que se formen películas e interfieran con la vida biológica. En la fotografía 3 se muestra el método por el cual se realizó la técnica de grasas y aceites.



**Fotografía 3.** Obtención de grasas y aceites

### **Metales**

La prueba de metales fue aplicada de acuerdo a la norma NMX-AA-051-SCFI-2001- análisis de agua, determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas método prueba.

Esta norma mexicana establece el método de espectrofotometría de absorción atómica para la determinación de metales disueltos, totales, suspendidos y recuperables en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas.

Para la determinación de metales (arsénico, cadmio, cobre, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plomo, zinc.) se llevaron a cabo mediante la colaboración del laboratorio de la comisión de aguas del Estado de México (CAEM) ubicado en la Colonia el Parque., Naucalpan, C.P. 53390.

### **Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)**

Se llevó a cabo mediante la cuantificación de la diferencia entre la concentración del oxígeno disuelto inicial y la concentración después de cinco días de incubación a  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ , con base en procedimiento experimental esquematizado en la figura 9 se determinó la DBO.

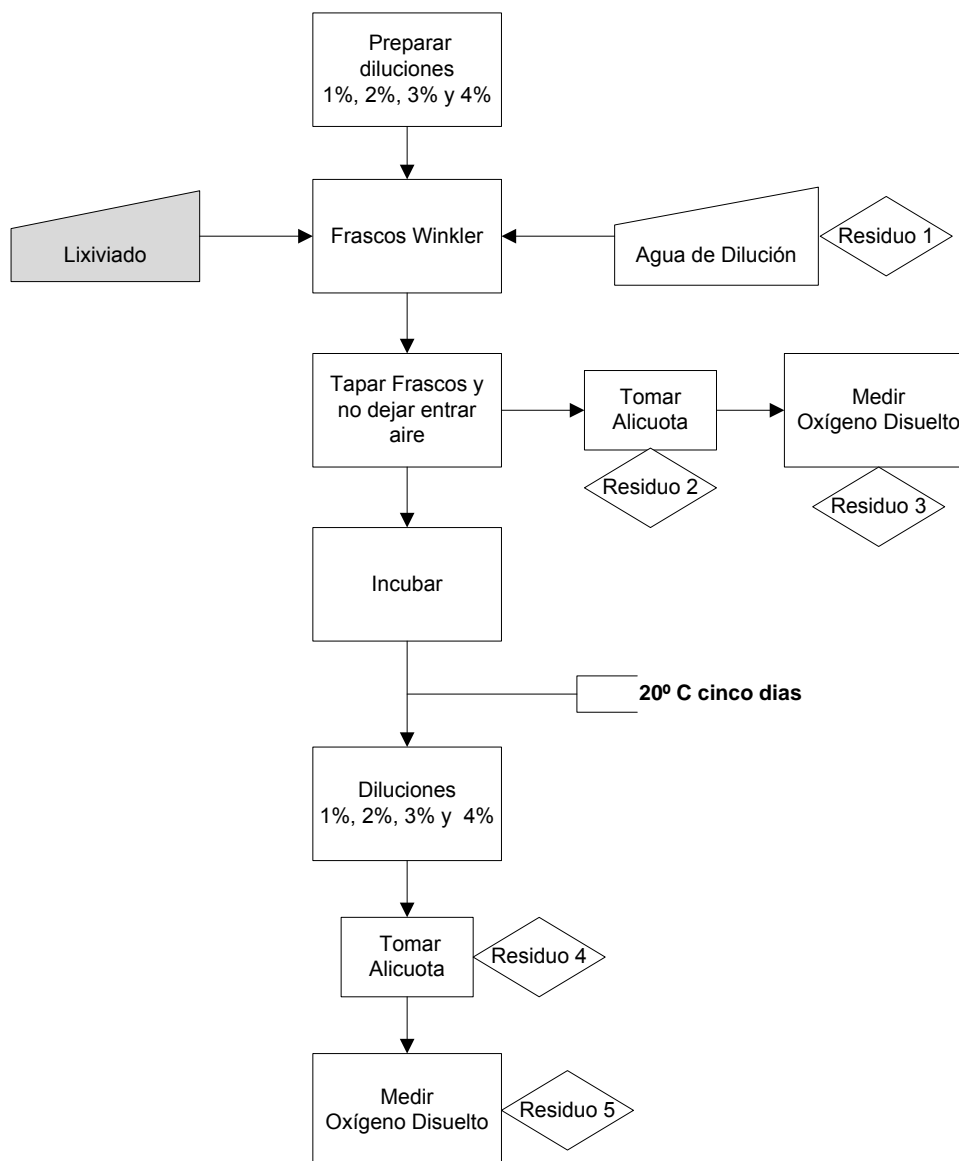
La medición de demanda bioquímica de oxígeno por cinco días se llevó a cabo mediante el siguiente procedimiento y bajo las condiciones necesarias:

- Se realizó la prueba con una muestra fresca
- Se trabajó a la misma temperatura
- Se calibró el equipo de oxígeno disuelto.

En la fotografía 4 se muestran algunos materiales para la elaboración de la técnica de DBO como es el garrafón con solución nutritiva con una bomba para saturar el agua con oxígeno, frascos Winkler, aparato de oxígeno disuelto marca YSI modelo 54 A y el electrodo marca YSI 5905/ 5010.



**Fotografía 4.** Materiales usados para la técnica de DBO.



R1, R2, R3, R4, R5 =Desechar en la tarja agregando bastante agua

**Fig. 9.** Diagrama para la medición de demanda bioquímica de oxígeno.

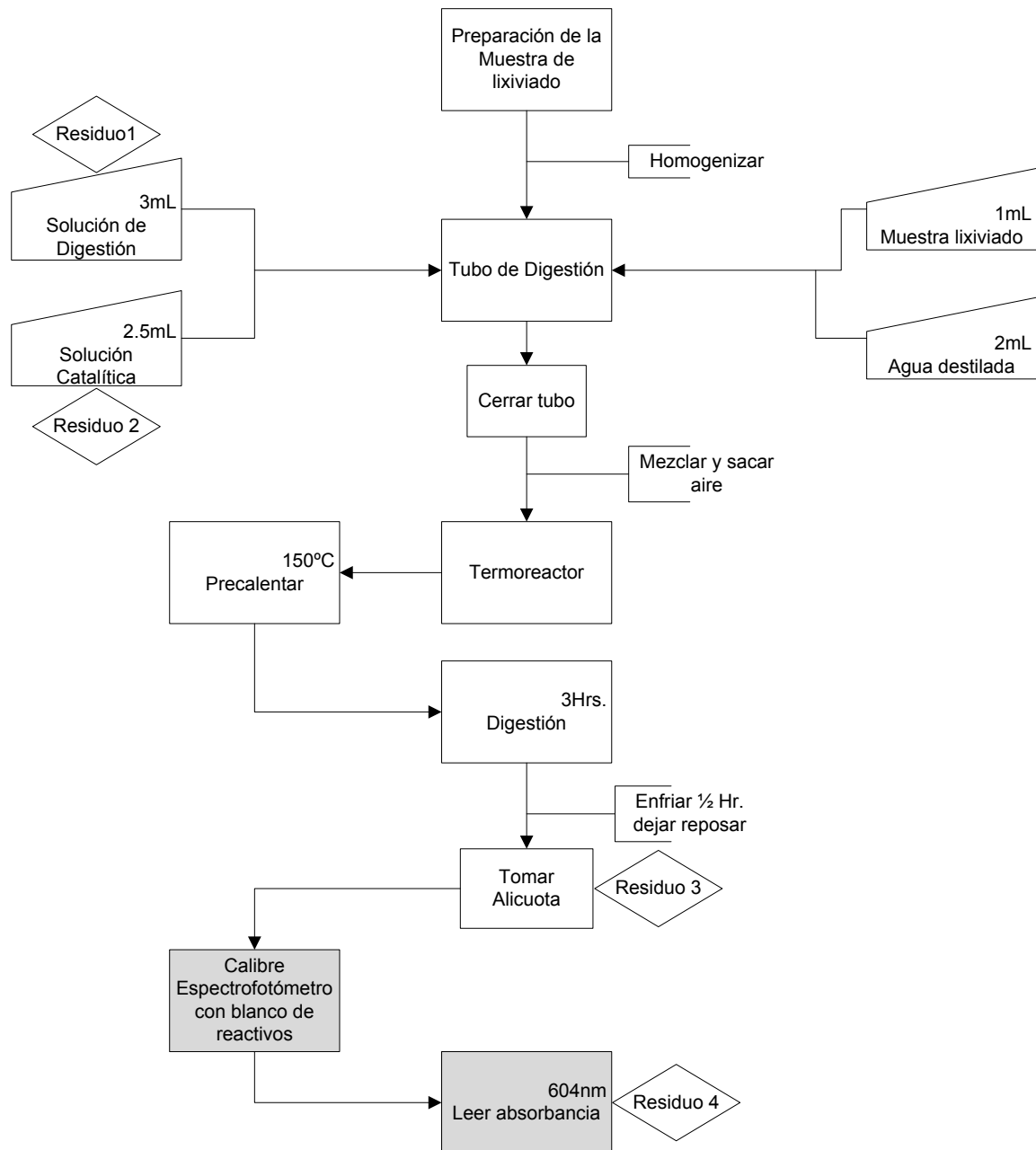
### **Demanda química de oxígeno (DQO)**

Fue cuantificada utilizando el método de reflujo cerrado, digstando la muestra a 150 °C por 2 horas, se leyó la absorbancia de la muestra de lixiviados en un espectrofotómetro GENESYS modelo. 4001/4, a 605 nm. Este análisis se llevó a cabo siguiendo la norma y los métodos normalizados adaptados a las particularidades de los lixiviados. La prueba de demanda química de oxígeno se llevó a cabo por el procedimiento representado en la figura 10, tomando en cuenta las condiciones necesarias:

- Se realizó la prueba con una muestra fresca.



- Se realizó la curva patrón.
- Se calibró el espectrofotómetro con un blanco y bajo la longitud de onda necesaria.



R1, R2, = Guardar los reactivos sobrantes en sus respectivos frascos etiquetados.  
 R3, R4, = Guardar en frascos para su confinamiento

**Fig. 10.** Diagrama para determinar la demanda química de oxígeno.

En la fotografía 5 se muestra la digestión de las muestras para la determinación del DQO.

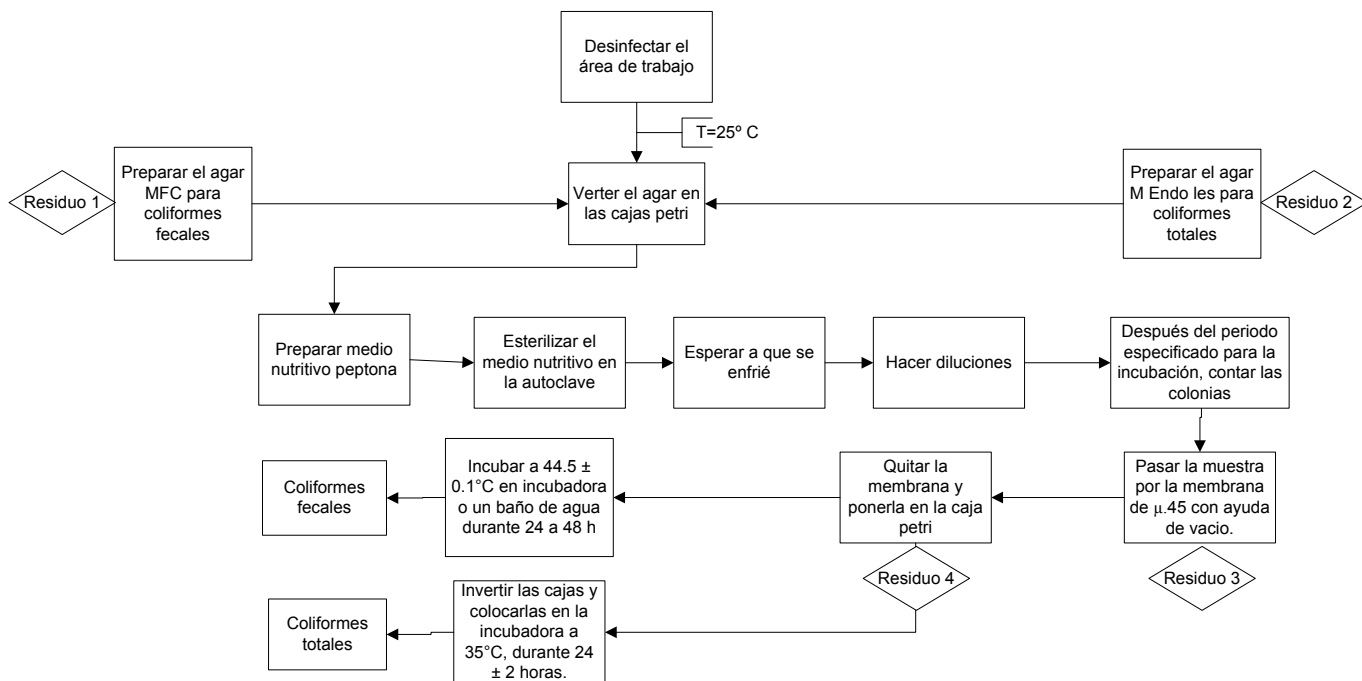


**Fotografía 5.** Muestras de lixiviado en digestión en el reactor HACH mod 45600-00, para la determinación de DQO.

### Coliformes totales y fecales

El análisis microbiológico en el laboratorio para la determinación de coliformes totales y fecales se basó en la norma mexicana NMX-AA-102-SCFI-2006, calidad del agua-detección y enumeración de organismos coliformes, organismos coliformes termotolerantes y *Escherichia coli* presuntiva-método de filtración de membrana.

Siguiendo el proceso descrito en la figura 11.



R1, R2= Guardar los reactivos sobrantes en sus respectivos frascos etiquetados.

R3=Neutralizar y desechar a la tarja

R4=Desechar a la basura

**Fig. 11.** Diagrama para la determinación de coliformes totales y fecales

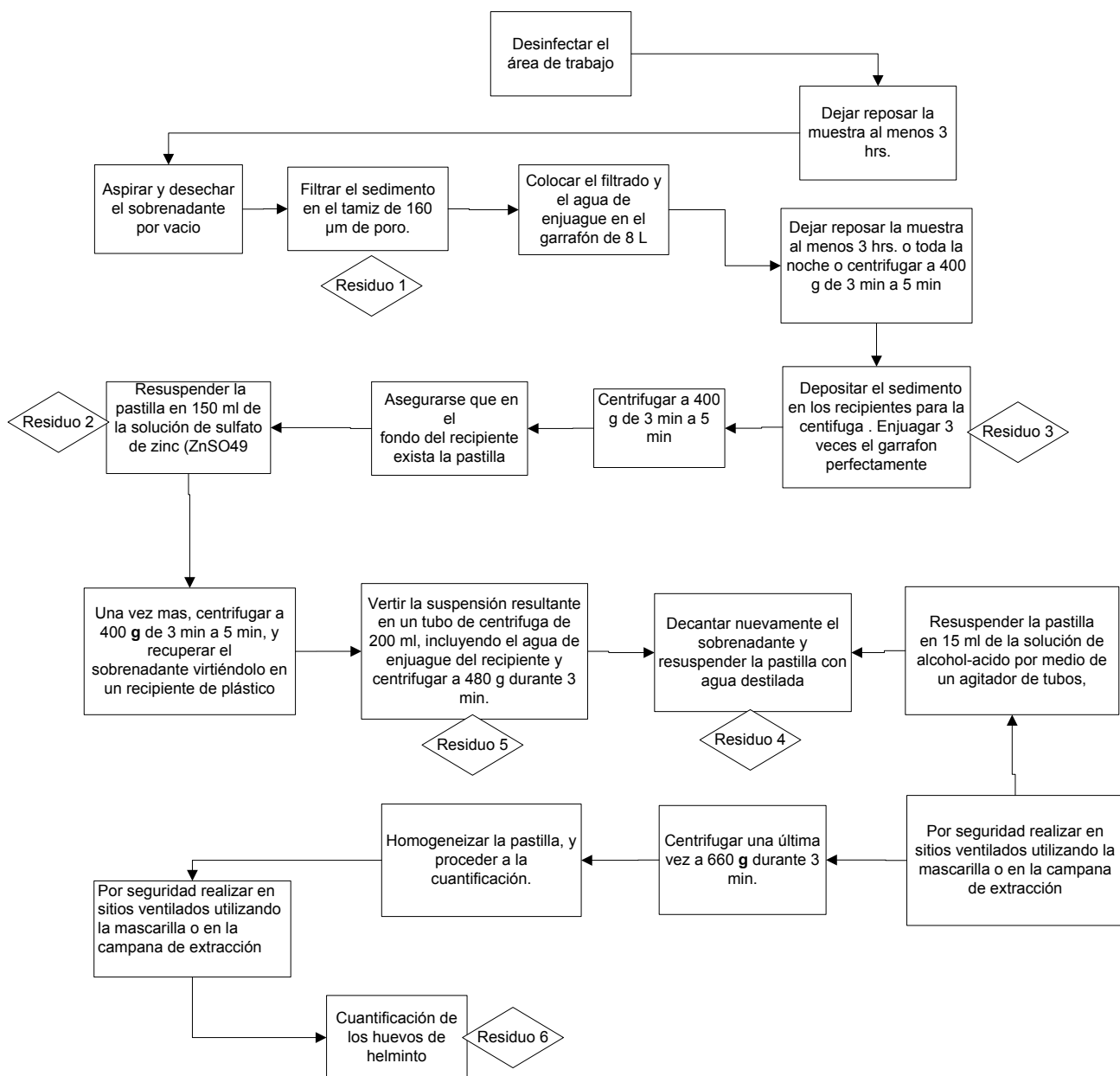
En la fotografía 6 se muestran los materiales utilizados para la técnica de coliformes totales y coliformes fecales.



**Fotografía 6.** Materiales utilizados para la técnica de coliformes totales.

## Huevos de helmintos

La identificación del análisis de huevos de helminto se realizó de acuerdo a la NMX-AA-113-SCFI-1999 Análisis de agua – Determinación de huevos de helminto. De acuerdo con el procedimiento experimental representado en la figura 13 se determinó la existencia de huevos de helminto en el lixiviado.



R1, R6=Desechar a la basura

R2=Guardar los reactivos sobrantes en sus respectivos frascos etiquetados.

R3, R4, R5= Neutralizar y desechar a la tarja

**Fig. 13.** Proceso de determinación de huevos de Helminto.

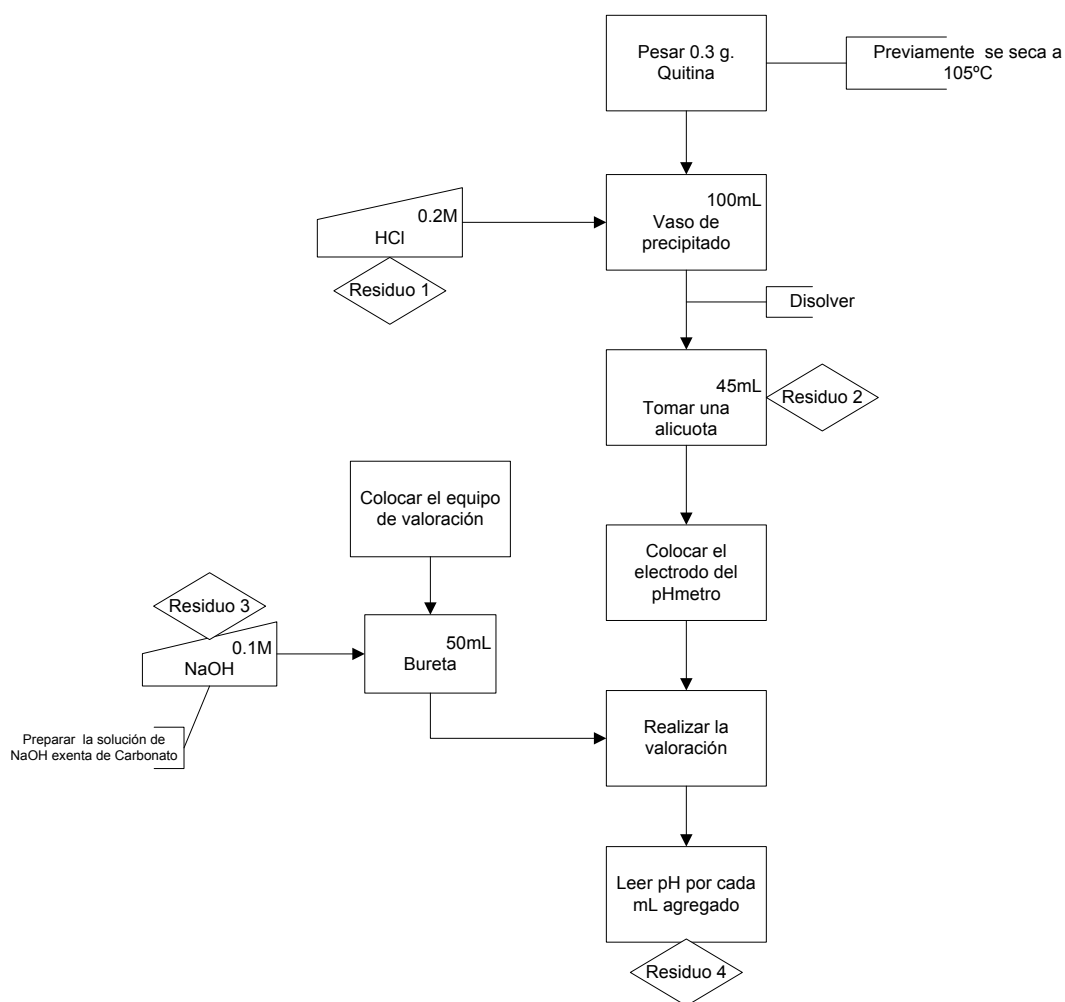
## Quitosán

El quitosán que se ocupó en este trabajo fue preparado a partir de caparazón de camarón de acuerdo con la técnica establecida en el laboratorio de biotecnología en la sección de posgrado de la UNAM Cuautitlán Fes campo 1. Miranda Castro S.P. (2000).

Se caracterizó el quitosán con el grado de desacetilación y el peso molecular viscosimétrico de acuerdo con las figura 14 y la figura 15, estos parámetros se realizaron para el quitosán al 1% y el quitosán al 2%.

### Grado de desacetilación

Para la determinación de este parámetro se realizó una valoración ácido-base de acuerdo a la figura 14.



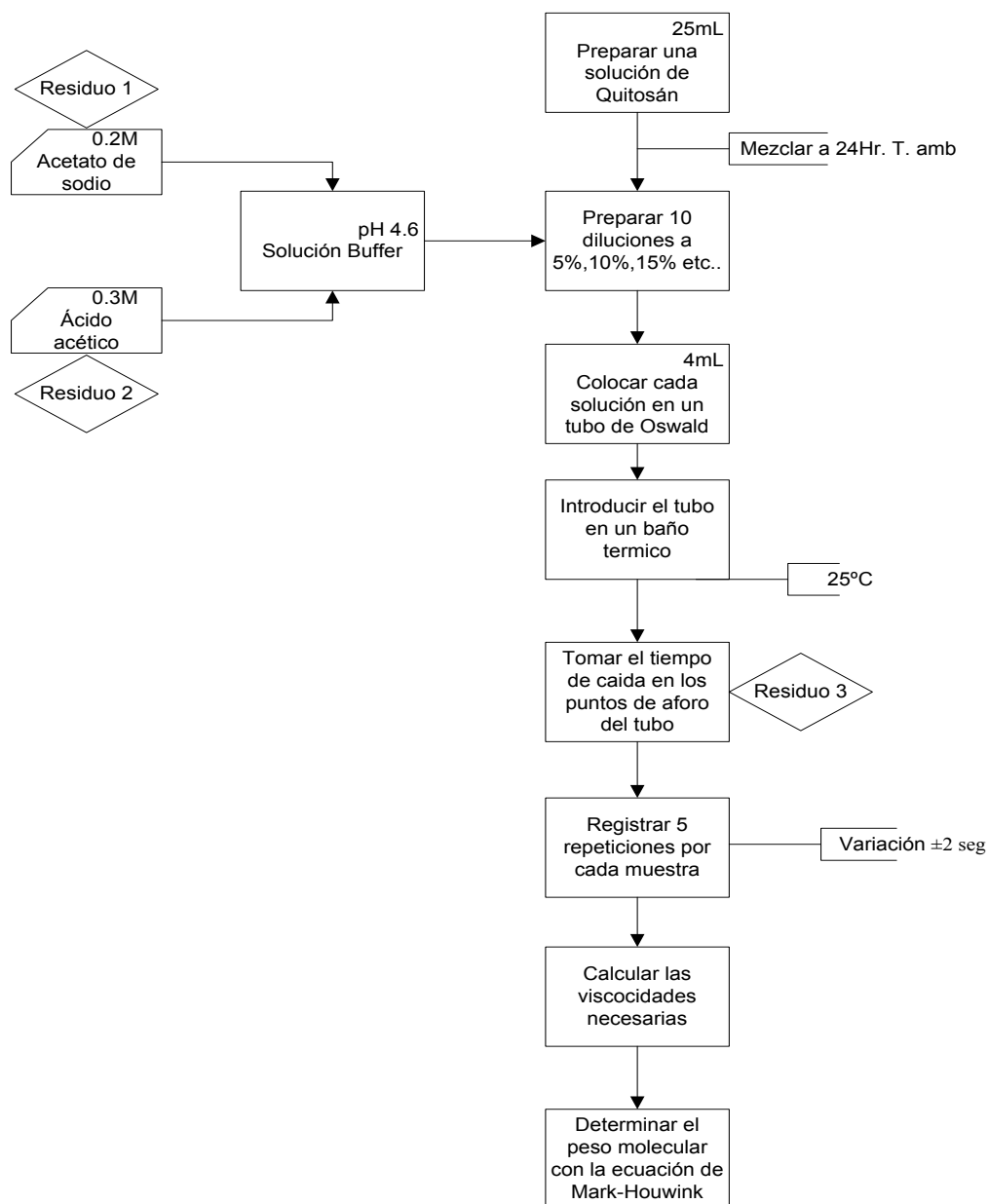
R1, R2= Guardar los reactivos sobrantes en sus respectivos frascos  
R3, R4=Neutralizar y desechar a la tarja

**Fig. 14 Grado de desacetilación**

De acuerdo al diagrama se realizaron los cálculos necesarios para cuantificar el grado de desacetilación con el que cuenta el quitosán como se muestra en el anexo “A”

### Peso molecular viscosimétrico

Para la determinación de este parámetro se realizaron los cálculos necesarios de las viscosidades para calcular el peso molecular del quitosán al 1% como se muestra en la figura 15.



R1, R2= Guardar los reactivos en sus respectivos frascos etiquetados  
 R3=Neutralizar y desechar en la tarja

**Fig. 15.** Peso molecular viscosimétrico.

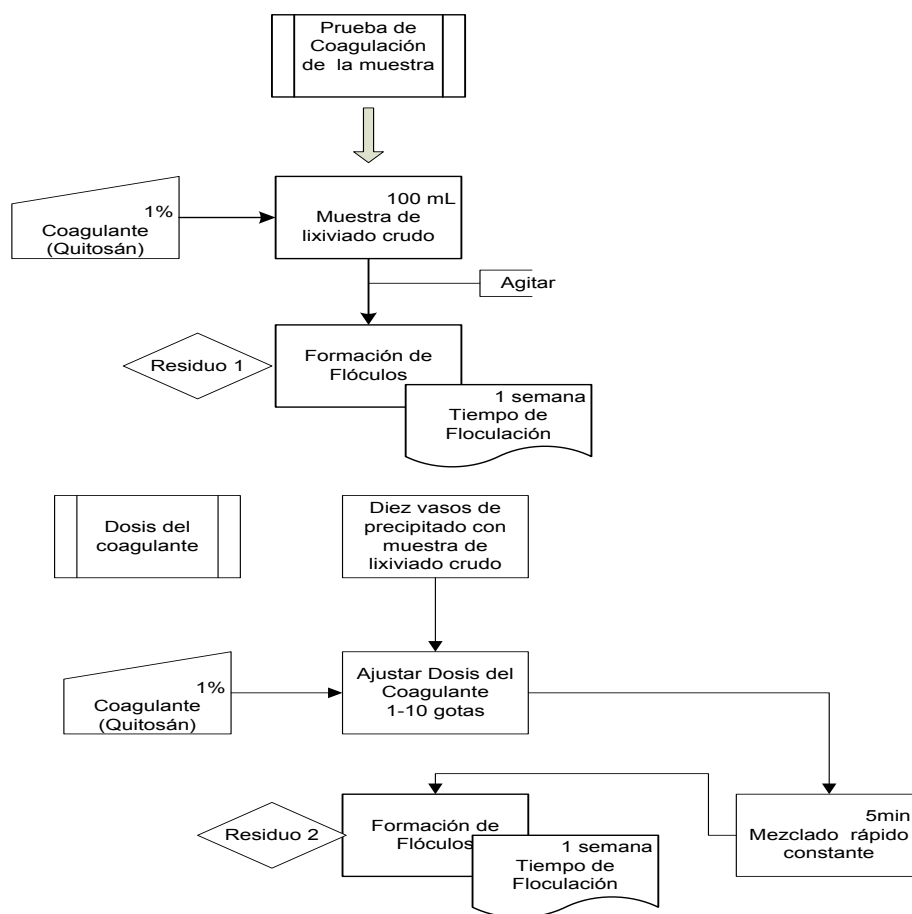
Fotografía 8. Se muestra la técnica para determinar el peso molecular en el quitosán



Fotografía 8. Técnica para determinar PM.

## 2.2. Tratamiento del lixiviado con quitosán al 1 %

Se realizó una prueba de jarras para encontrar la dosis requerida del quitosán como se muestra en la figura 16.



R1, R2= Filtrar y desechar en la basura

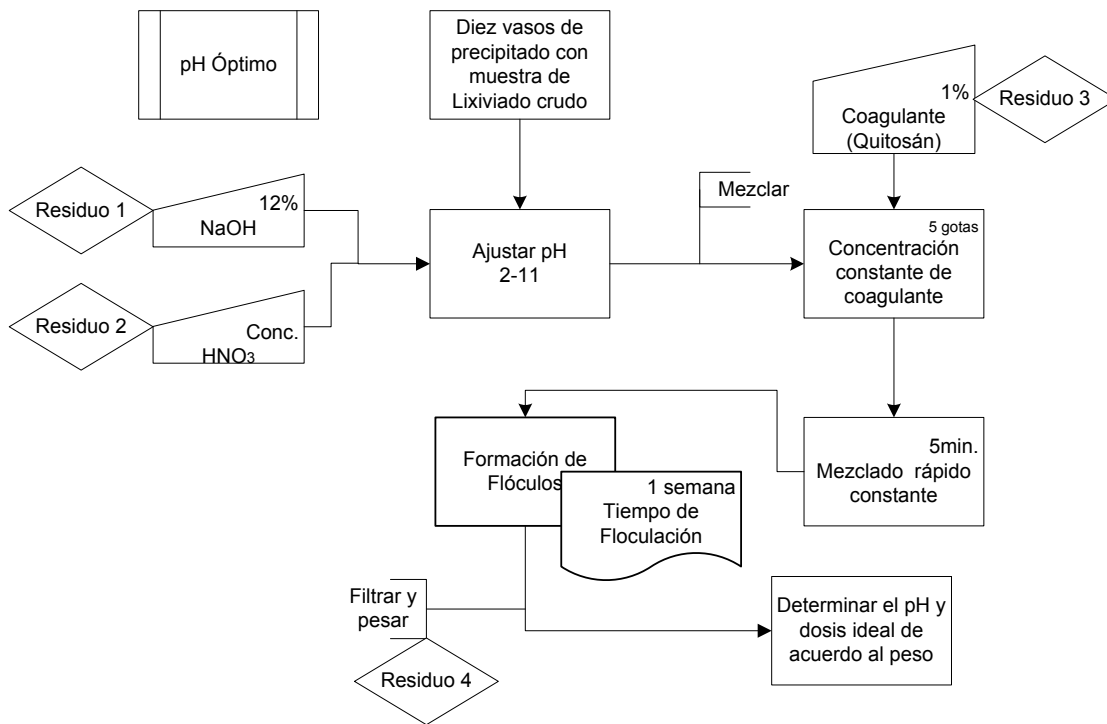
Fig. 16. Determinación de dosis de quitosán al 1% como coagulante.

En la fotografía 9 se muestra la prueba de jarras empleada para la determinación de la dosis óptima del quitosán al 1 %



**Fotografía 9.** Prueba de jarras para la dosis óptima del quitosán al 1%

Teniendo en cuenta la dosis del coagulante se procedió a encontrar el pH óptimo con el que se trabajó el coagulante, con base en la figura 17 se encontró el pH óptimo y la dosis del coagulante con la que se trabajó el tratamiento.



R1, R2, R3= Guardar los reactivos sobrantes en sus respectivos frascos etiquetados  
 R4= Desechar en la basura

**Fig. 17.** Determinación del pH de trabajo para quitosán al 1%.



En la fotografía 10 se muestran los papeles filtros con los que se determinó el pH. óptimo con éstos papeles filtro se realizó un estudio gravimétrico para saber cuál de éstos arrastró mas materia y a que pH.



**Fotografía 10.** Prueba gravimétrica para la obtención del pH. óptimo.

### **2.2.1. Caracterización del lixiviado con un tratamiento de quitosán al 1% con pruebas fisicoquímicas y microbiológicas**

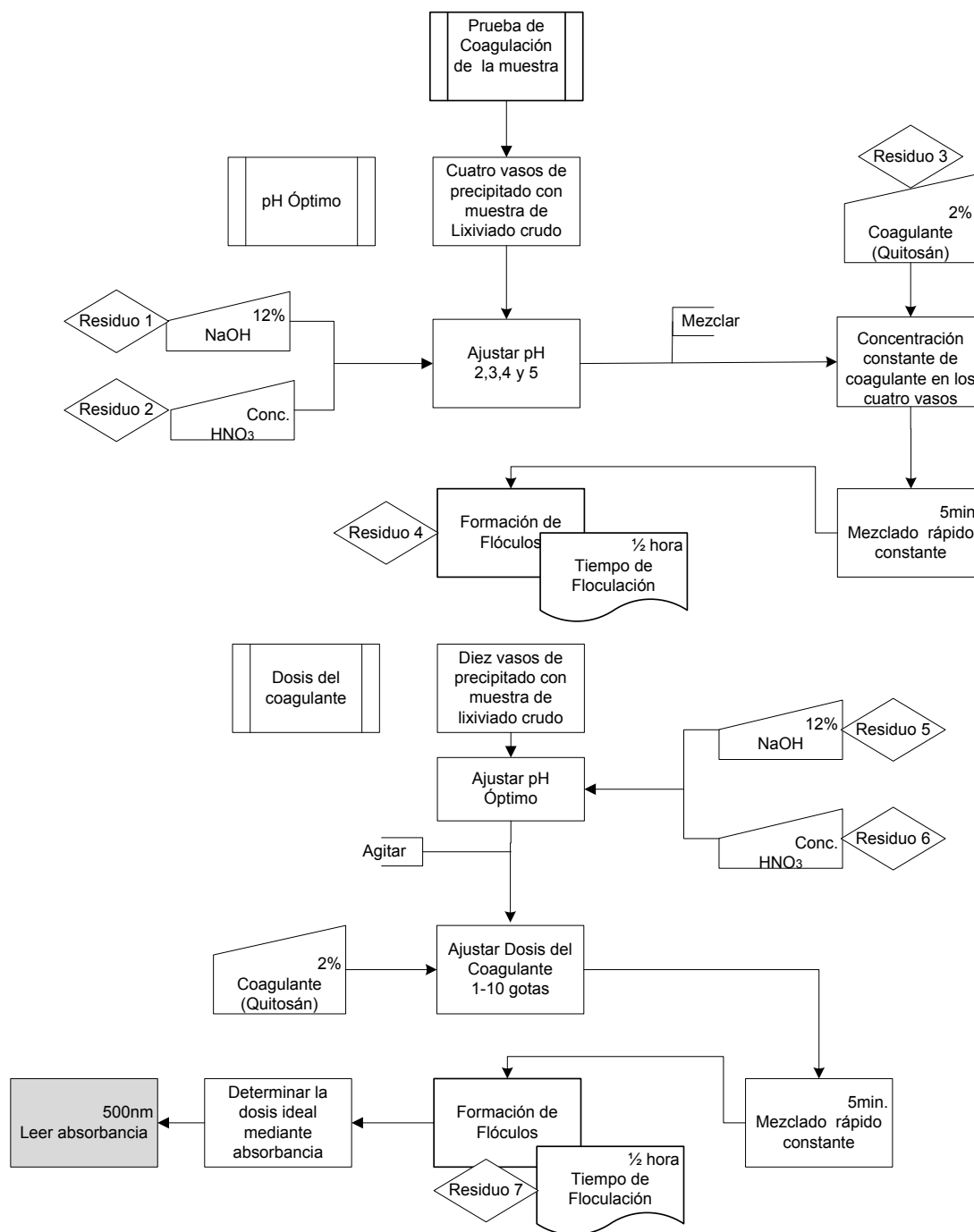
Se llevó a cabo la caracterización de dicho tratamiento con base en la determinación de los siguientes parámetros:

- Sólidos totales
- Turbidez
- Conductividad
- DBO
- DQO
- Grasas y aceites
- Metales
- Biológicas

Dicha caracterización se realizó de la misma forma en la que se puede observar en el apartado 3.1 Caracterización de lixiviado.

### 2.3. Tratamiento de quitosán al 2 %

Se realizó una prueba de jarras para encontrar la dosis requerida del quitosán como se muestra en la figura 18 determinación de pH y dosis óptima para el tratamiento.



R1, R2, R3, R5, R6= Guardar los reactivos sobrantes en sus respectivos frascos etiquetados  
 R4, R7= Filtrar y desechar en la basura

**Fig. 18.** Determinación del pH y dosis, como coagulante quitosán al 2%

En la Fotografía 11 se puede observar la prueba de jarras que se realizó para encontrar el pH óptimo y la dosis del coagulante con la que se trabajó en el tratamiento.



**Fotografía 11.** Prueba de jarras para el tratamiento del quitosán al 2 %.

### **2.3.1. Caracterización del lixiviado con un tratamiento de quitosán al 2 % con pruebas fisicoquímicas y microbiológicas.**

Se llevó a cabo la caracterización de dicho tratamiento con base en las siguientes pruebas:

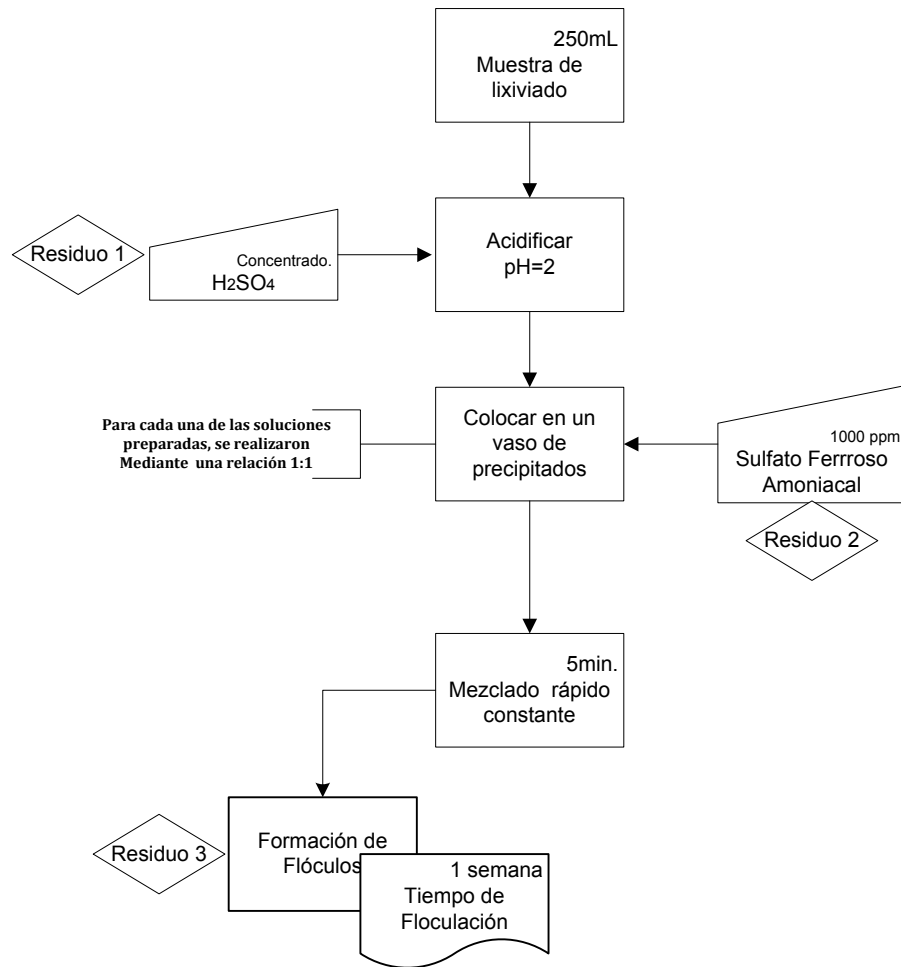
- Sólidos totales
- Turbidez
- Conductividad
- DBO
- DQO
- Grasas y aceites
- Metales
- Biológicas

Dicha caracterización se realizó de la misma forma en la que se puede observar en el apartado 3.1 Caracterización de lixiviado

### **2.4. Tratamiento con el proceso Fenton**

Para el siguiente tratamiento se buscó la mejor concentración a emplear en el proceso Fenton (solución sulfato ferroso amoniacal).

Se prepararon diferentes soluciones de sulfato ferroso amoniacal  $[\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$  a diferentes concentraciones, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500 ppm., posteriormente se llevó a cabo con el proceso Fenton para cada una de las soluciones preparadas con una relación 1:1. El procedimiento es el descrito en la figura 19.



R1, R2= guardar los reactivos sobrantes en sus respectivos frascos etiquetados  
 R3= Filtrar y desechar en la basura

**Fig. 19.** Determinación de la concentración de sulfato ferroso amoniacal.

Este procedimiento se repitió para cada una de las concentraciones preparadas de sulfato ferroso amoniacal que fueron 8 las de 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500 ppm en la fotografía 12 se muestran tubos de ensaye con la muestra de las concentraciones de sulfato ferroso amoniacal de 1000 a 1500 ppm.

Después de siete días, se oxido la mayor cantidad de materia orgánica, posteriormente se filtro la solución.



**Fotografía 12.** Concentraciones de sulfato ferroso amoniacal a diferentes concentraciones.

#### **2.4.1. Caracterización del lixiviado con el procedimiento Fenton con pruebas fisicoquímicas y microbiológicas**

Se llevó a cabo la caracterización de dicho tratamiento con base en las siguientes pruebas:

- Sólidos totales
- Turbidez
- Conductividad
- DBO
- DQO
- Grasas y aceites
- Metales
- Biológicas

Dicha caracterización se realizó de la misma forma en la que se puede observar en el apartado 3.1.  
Caracterización de lixiviado

# RESULTADOS

---

## 3. Muestreo de lixiviados

El muestreo se realizó por las mañanas, en un solo punto (en la entrada de la laguna de lixiviados) ver fotografía 13, con el fin de tomar lixiviado fresco. Dando como resultados los datos de la tabla.

**Tabla 13.** Muestreo de lixiviado.

Toma de Muestra	Mes	pH	Temperatura
1	Febrero	8.5	24°
2	Abril	8.6	25°
3	Mayo	8.5	26°
4	Junio	8.4	25°
5	Agosto	7.8	24°



**Fotografía 13.** Muestreo de lixiviado en la laguna de evaporación.

En el último muestreo hubo un cambio de pH debido a que la laguna estaba a su máximo nivel, éste es atribuido a los largos períodos de lluvia en la zona metropolitana en el mes de Agosto del 2011.

Los resultados promedio obtenidos de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos de las muestras de lixiviado en estudio se expresan en la tabla 14.

**Tabla 14.** Caracterización del lixiviado crudo.

<b>Parámetro</b>	<b>Lixiviado crudo</b>
Sólidos totales	22864 mg/L
Sólidos totales volátiles	10340 mg/L
Sólidos totales fijos	12524 mg/L
Sólidos suspendidos totales	204 mg/L
Sólidos suspendidos volátiles	76 mg/L
Sólidos suspendidos fijos	128 mg/L
Sólidos sedimentables	0.5 mL / L
Turbidez	27.7 UNT
pH	8.2
Conductividad	2000 mS/cm
DBO	449 mg/L
DQO	5702 mg/L
Grasas y aceites	2.12 mg/L
Cianuros	0.17 mg/L
Cromo hexavalente	<0.0007 mg/L
Arsénico	<0.0005 mg/L
Cadmio	0.015 mg/L
Mercurio	<0.0002 mg/L
Cobre	0.260 mg/L
Níquel	0.26 mg/L
Plomo	0.289 mg/L
Zinc	0.985 mg/L
Coliformes totales	1.5X10 <sup>3</sup> UFC/100 mL.
Coliformes fecales	2X10 <sup>2</sup> UFC/100 mL.
Huevos de helminto	ND

### **3.1. Tratamiento con quitosán al 1 %.**

En el tratamiento para identificar las condiciones del quitosán al 1% se realizó conforme al análisis descrito en el anexo “A”.

Obteniéndose como resultado lo siguiente:

**Grado de desacetilación: 97.28%**

**Peso Molecular Viscosimétrico: 19.4020 KDa**

### 3.1.1. Prueba de jarras

De acuerdo a la técnica de prueba de jarras como se muestra en la tabla 15 se identifica la diferencia de pesos que se arrastró con el quitosán. El volumen de lixiviados fue de (100ml) y el tiempo que tardo el tratamiento fue de 7 días.

**Tabla 15.** Diferencia de pesos obtenida en el filtrado de la prueba de jarras.

<b>pH</b>	<b>Diferencia de pesos (gramos)</b>	<b>pH</b>	<b>Diferencia de pesos (gramos)</b>
1	0.05	6	0.8
2	0.1	7	0.03
<b>3</b>	<b>0.19</b>	8	0.01
4	0.07	9	0.02
5	0.11	10	0.05

En el pH =3 se encontró un mayor peso en el análisis gravimétrico con respecto a los demás esto debido a una mayor remoción de materia en el papel filtro, es decir, a pH de 3 con 5 gotas de quitosán al 1 % en 100 ml de lixiviado la remoción es mayor.

Se realizó una caracterización del lixiviado después del tratamiento con quitosán dando como resultados los valores promedio mostrados en la tabla 16 y 17.



**Tabla 16.** Caracterización del lixiviado con el tratamiento con quitosán al 1 % para sólidos.

<b>Parámetro</b>	<b>Lixiviado con quitosán 1 %</b>
Sólidos totales	47360 mg/L
Sólidos totales volátiles	28840 mg/L
Sólidos totales fijos	18520 mg/L
Sólidos suspendidos totales	400 mg/L
Sólidos suspendidos volátiles	320 mg/L
Sólidos suspendidos fijos	80 mg/L
Sólidos sedimentables	8 mL / L

Los parámetros de sólidos se tomaron del sobrenadante de la muestra ya sedimentada, esto fue ya que el lixiviado contenía partículas muy finas difíciles de filtrar.

**Tabla 17.** Caracterización del lixiviado con el tratamiento con quitosán al 1 % clarificado.

<b>Parámetro</b>	<b>Lixiviado con quitosán 1 %</b>
Turbidez	12.3 UNF
pH	3
Conductividad	40000mS/cm
DBO	337 mg/L
DQO	2167 mg/L
Grasas y aceites	2.95 mg/L
Cianuros	0.13 mg/L
Cromo hexavalente	<0.0007 mg/L
Arsénico	<0.0005 mg/L
Cadmio	<0.005 mg/L
Mercurio	<0.0002 mg/L
Cobre	0.206 mg/L
Níquel	0.13 mg/L
Plomo	0.249 mg/L
Zinc	0.735 mg/L
Coliformes totales	ND
Coliformes fecales	ND
Huevos de helminto	ND

ND= No detectables

Las pruebas mencionadas en la tabla 17 se realizaron después de las siguientes operaciones unitarias sedimentación centrifugación y filtración. La sedimentación tardó 7 días, la centrifugación se llevo a cabo a 7000 rpm. Con una duración de 10 min.

### **3.2. Tratamiento con quitosán al 2 %.**

En el tratamiento para identificar las condiciones del Quitosán al 2% se realizo conforme al análisis descrito en el Anexo “A”

Obteniéndose como resultado lo siguiente:

**Grado de desacetilación: 100%**

**Peso Molecular Viscosimétrico: 251,553 KDa**

Para esta parte del trabajo se ocupó un quitosán al 2 % se usó con un grado de desacetilación mas alto y con un peso molecular mayor.

#### **3.2.1. Prueba de jarras**

Debido a los estudios antes realizados se sabe que el pH de trabajo para el quitosán en el tratamiento de lixiviados es de 3, con base en ésto se realizó una prueba de jarras para saber la dosis de coagulante en 50 ml.

La prueba de jarras no se realizó como para la del quitosán al 1 % que fue una prueba gravimétrica, aquí en ésta se ocupó la lectura de absorbancias después del filtrado de cada una de las muestras ésto con el fin de escoger la muestra que tenga la menor absorbancia para encontrar la dosis óptima para este tratamiento.

En la tabla 17 se muestran las absorbancias que se obtuvieron en el tratamiento de lixiviado con quitosán al 2 %, la longitud de onda a la que se midió fue de 500 nm se ocupó esta longitud de onda ya que se realizó un barrido de la muestra para encontrar la longitud como se muestra en el Anexo “B”

**Tabla 18.** Absorbancia de las muestras del lixiviado en la prueba de jarras con el quitosán al 2%

<b>Gotas de quitosán</b>	<b>Absorbancias</b> $\lambda=500$ nm	<b>Gotas de quitosán</b>	<b>Absorbancias</b> $\lambda=500$ nm
1	0.05	6	0.085
2	0.05	7	0.1
3	.025	8	0.12
<b>4</b>	<b>0.02</b>	9	0.14
5	0.05	10	0.14

Se observó que con 4 gotas hubo mayor remoción en 50ml se optó por esta dosis de coagulante ya que a menor cantidad de luz absorbida, menor fue la absorbancia del cuerpo y mayor cantidad de luz fue transmitida por dicho cuerpo.

Se realizó una caracterización del lixiviado después del tratamiento con quitosán al 2% dando como resultados los valores promedio mostrados en la tabla 18.

**Tabla 19.** Caracterización del lixiviado con el tratamiento con quitosán al 2 % para sólidos.

<b>Parámetro</b>	<b>Lixiviado con quitosán 1 %</b>
Sólidos totales	90800 mg/L
Sólidos totales volátiles	28400 mg/L
Sólidos totales fijos	62400 mg/L
Sólidos suspendidos totales	566 mg/L
Sólidos suspendidos volátiles	394 mg/L
Sólidos suspendidos fijos	112
Sólidos sedimentables	190 mL/L

Los parámetros de sólidos se tomaron del sobrenadante de la muestra ya sedimentada, ésto fue ya que el lixiviado contenía partículas muy finas difíciles de filtrar.

**Tabla 20.** Caracterización del lixiviado con el tratamiento con quitosán al 2 % clarificado.

<b>Parámetro</b>	<b>Lixiviado con quitosán 2%</b>
Turbidez	7.4 UNF
pH	3
Conductividad	50000 mS/cm

DBO	359 mg/L
DQO	2053 mg/L
Grasas y aceites	1.92 mg/L
Cianuros	0.13 mg/L
Cromo hexavalente	<0.0007 mg/L
Arsénico	<0.0005 mg/L
Cadmio	<0.005 mg/L
Mercurio	<0.0002 mg/L
Cobre	0.145 mg/L
Níquel	0.11 mg/L
Plomo	0.163 mg/L
Zinc	0.337 mg/L
Coliformes totales	ND
Coliformes fecales	ND
Huevos de helminto	ND

Las pruebas mencionadas en la tabla 17 se realizaron después de las siguientes operaciones unitarias sedimentación centrifugación y filtración. La sedimentación tardó 7 días, la centrifugación se llevo a cabo a 5000 rpm. Con una duración de 5 min.

### 3.3. Tratamiento mediante proceso Fenton

Para establecer que parámetro era necesario para elegir la concentración ideal de sulfato ferroso amoniacal, se procedió a tomar la turbidez de las soluciones tratadas a diferentes concentraciones conforme al análisis descrito en el anexo “C”; arrojando los siguientes datos:

**Tabla 19.** Porcentaje de disminución de color mediante el proceso Fenton.

Concentración de Sulfato Ferroso Amoniacal(ppm)	Turbidez(UNF)	Porcentaje de reducción de color %
800	4.05	85.37
900	3.46	87.50
<b>1000</b>	<b>1.12</b>	<b>95.95</b>
1100	1.05	96.20
1200	1.03	96.28
1300	0.99	96.42
1400	0.8	97.11
1500	0.76	97.25

Como se puede observar en la tabla 19, los mayores porcentajes de reducción son dependientes de la concentración del sulfato ferroso amoniacal, dado que el lixiviado crudo dio una turbidez inicial de 27.7 UNF, por lo tanto la reducción de color fue considerable, en 1000-1500 ppm las lecturas de turbidez fueron proporcionales en cuanto a la concentración.

De acuerdo con los resultados obtenidos se ocupó la concentración de 1000 ppm ya que no hay grandes cambios de la concentración de 1000 a la de 1500 ppm como se puede observar el en Anexo “C”.

Cuando la turbidez es baja el porcentaje de reducción es también es bajo ya que en la solución se oxido la materia orgánica y por ende el color baja.

Se realizó una caracterización al tratamiento mediante el proceso Fenton dando como resultados los valores promedio expresados en la tabla 20:

**Tabla 20.** Caracterización del lixiviado tratado mediante el proceso Fenton.

Parámetro	Lixiviado/ Fenton
Sólidos totales	11920 mg/L
Sólidos totales volátiles	7960 mg/L
Sólidos totales fijos	3960 mg/L
Sólidos suspendidos totales	40 mg/L
Sólidos suspendidos volátiles	160mg/L
Sólidos suspendidos fijos	35 mg/L
Sólidos sedimentables	12 mL / L
Turbidez	4.2 UNF
pH	2
Conductividad	60000 mS/cm
DBO	314.3 mg/L

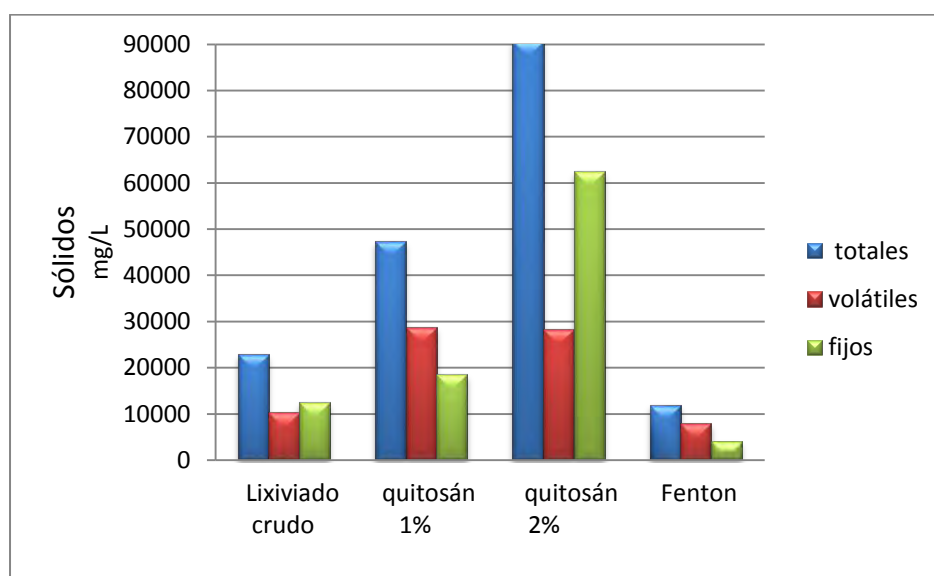
DQO	1710.6 mg/L
Grasas y aceites	0.2 mg/L
Cianuros	0.038 mg/L
Cromo hexavalente	<0.0007 mg/L
Arsénico	<0.0005 mg/L
Cadmio	<0.005 mg/L
Mercurio	<0.0002 mg/L
Cobre	0.252 mg/L
Níquel	0.089 mg/L
Plomo	0.249 mg/L
Zinc	0.962 mg/L
Coliformes totales	ND
Coliformes fecales	ND
Huevos de helminto	ND

# Análisis de Resultados

## 3.4. Comparación entre los tratamientos

En este apartado se comparará el lixiviado con los tres tratamientos realizados.

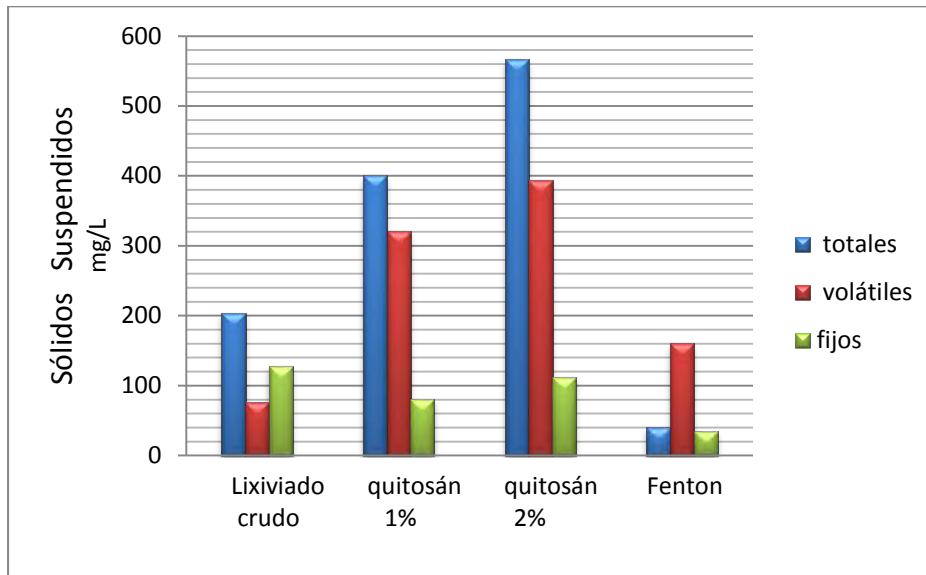
En el gráfico 1 se indica la concentración de ST, STV, STF.



**Gráfico1.** Comparación de sólidos totales para los tres tratamientos.

La cantidad de sólidos totales encontrados en el lixiviado crudo se deben a la recirculación de ellos sobre el relleno sanitario es por eso que se encontraron en gran cantidad, después de realizar los tratamientos con el quitosán tenían la particularidad de generar partículas muy finas difíciles de filtrar, por lo tanto al tomar la muestra del sobrenadante se arrastro parte de ellos dando así un incremento considerable, sin embargo se puede indicar que el tratamiento realizado con el polímero aglomero gran parte del material localizado en el lixiviado crudo, en contraparte con el proceso Fenton que degradó la mayor parte de ellos.

En el gráfico 2 se indica la concentración de SST, SSV, SSF.

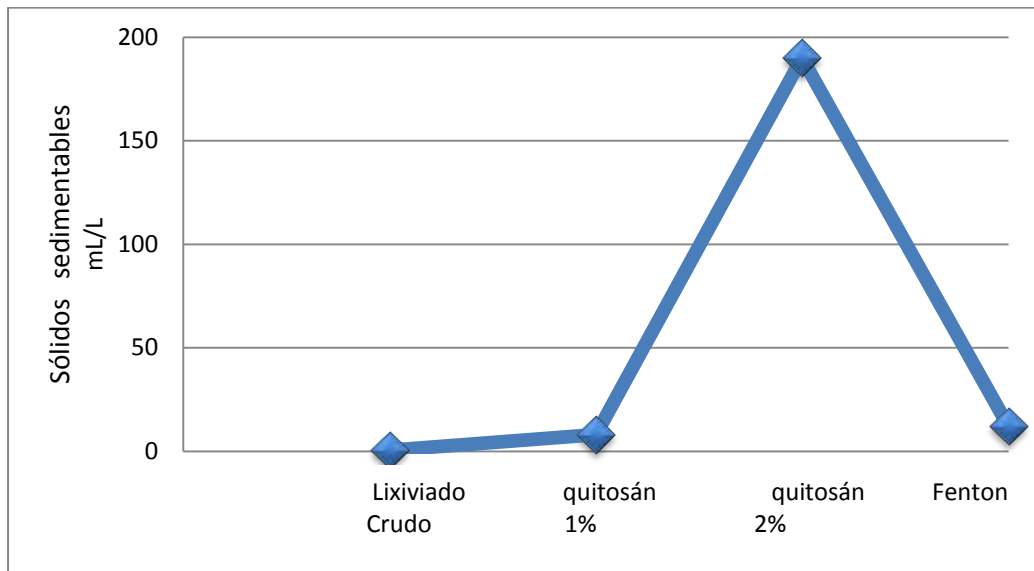


**Gráfico 2.** Comparación de los parámetros de sólidos suspendidos totales.

Los tratamientos realizados con el quitosán generaban sólidos de aspecto muy fino, por lo cual al realizar la prueba el papel filtro no era capaz de retener la mayoría de éstos hasta el punto de tapar el filtro. Después se optó por tomar el sobrenadante de los tratamientos correspondientes pero de igual forma al muestrear se tomaron sólidos suspendidos que aglomero el mismo polímero, dando así los resultados obtenidos; con el proceso Fenton no hubo mayor problema ya que la degradación redujo la cantidad de partículas en el lixiviado



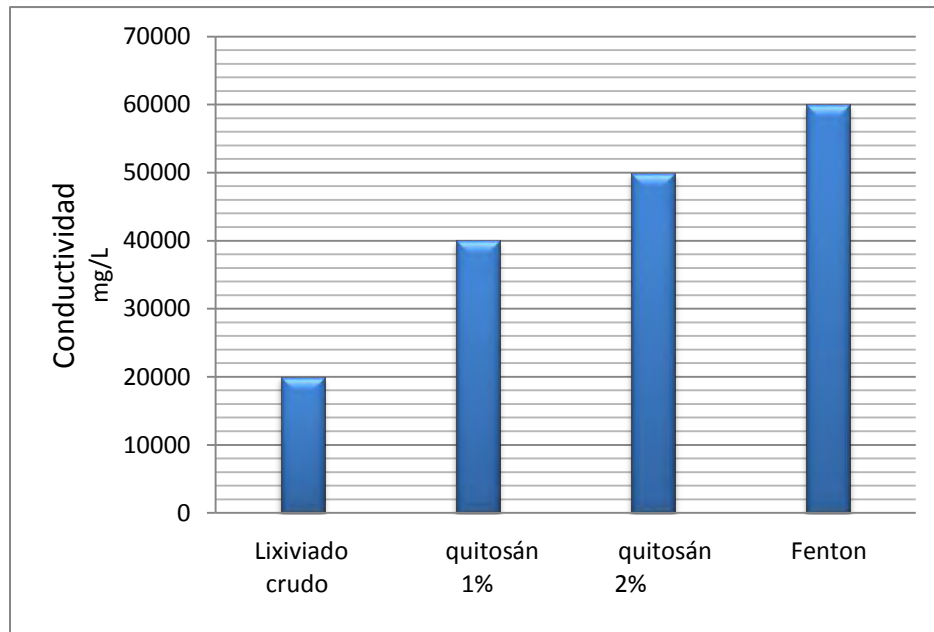
En el gráfico 3, se indica la concentración de sólidos sedimentables presentes tras los tres tratamientos.



**Gráfico 3.** Comparación de la cantidad de sólidos sedimentables.

Al cotejar los resultados obtenidos en esta prueba se observó que el lixiviado crudo no contuvo gran cantidad debido al lugar donde se realizó el muestreo siendo en el punto de entrada a la laguna, pero al realizar el tratamiento con el polímero a la concentración del 2% se elevó ya que se llevó a cabo con los sólidos aglomerados por el mismo polímero en el proceso de la coagulación sin ser retirados previamente, en cuanto a los demás tratamientos las partículas se presentaron en suspensión.

En el gráfico 4, se muestra la conductividad que se encontró tanto en el lixiviado crudo como en los tres tratamientos.

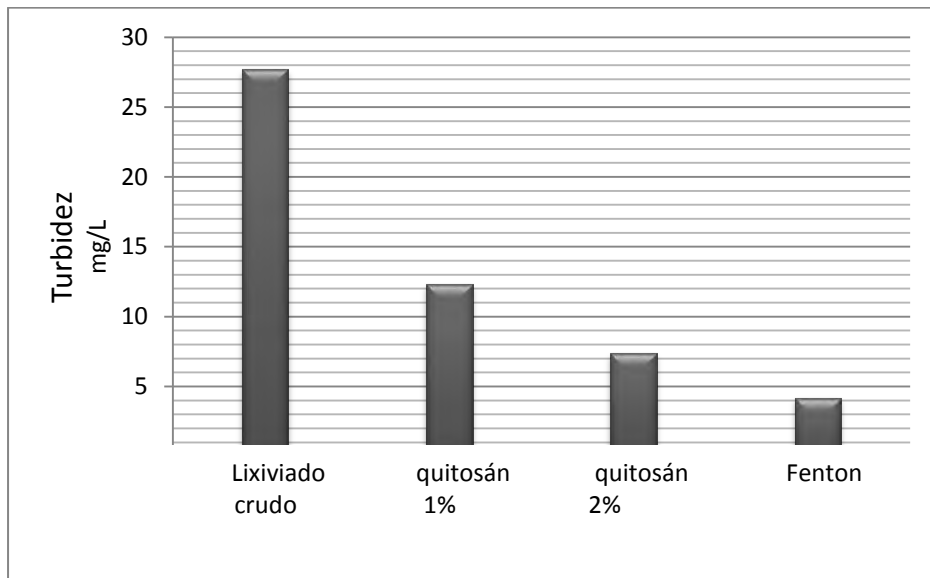


**Gráfico 4.** Comparación de la conductividad.

La conductividad se vio en aumento en los tres tratamientos debido a que el quitosán genera sales minerales (Rinaudo et al, 2006) por ésto el valor de la conductividad aumenta, la conductividad del quitosán al 1 % es menor a la de 2 % ya que en el tratamiento se ocupó mayor dosis del quitosán al 2 % es por eso el aumento de la conductividad.

En cuanto al aumento de la conductividad del proceso Fenton se ve reflejado debido a los ajustes de pH y la adición de los reactivos en el proceso Fenton.

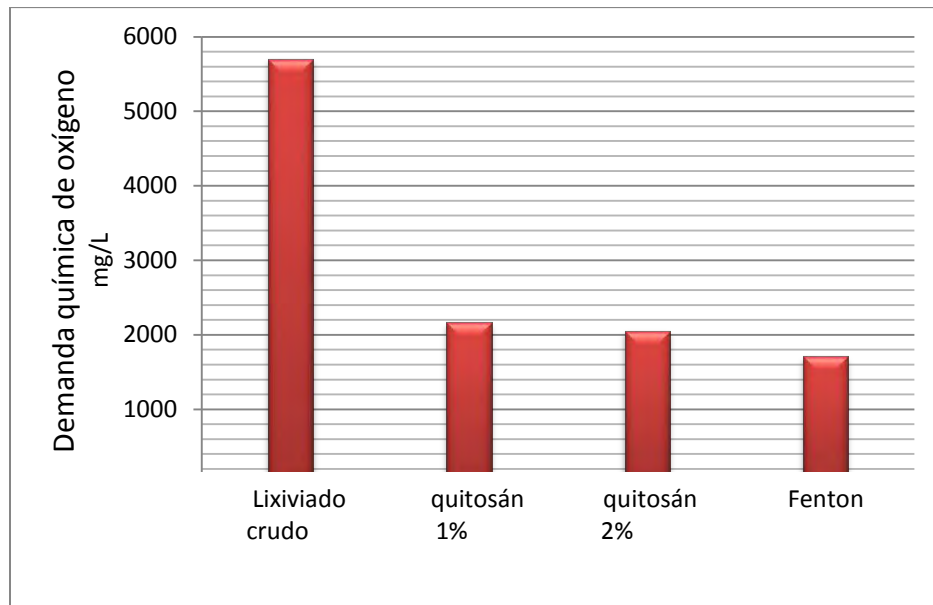
En el gráfico 5, se observan los valores de turbidez que se obtuvieron en el lixiviado crudo y con los 3 tratamientos:



**Gráfico 5.** Comparación de la turbidez.

La turbidez que presentó el lixiviado crudo fue debido a la cantidad de partículas suspendidas, o a las arcillas arrastradas por la recirculación del mismo en el relleno sanitario; en cuanto al desarrollo de los tratamientos realizados se encontró una remoción de estas partículas y del color de forma gradual, conforme aumentó la concentración de quitosán éste actuó de mejor forma y el proceso Fenton presentó una mayor disminución de partículas suspendidas por realizar un proceso de oxidación, este parámetro es un gran indicativo de la remoción de color que realizaron los tres tratamientos.

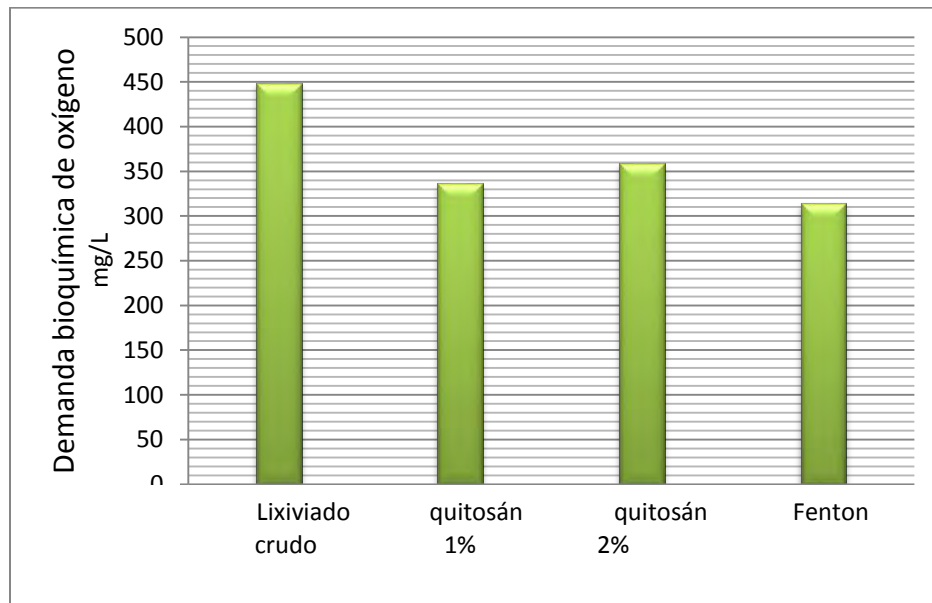
En el gráfico 6, se muestra la comparación de la Demanda Química de Oxígeno entre los diferentes tratamientos.



**Gráfico 6.** Comparación de la DQO.

Al cuantificar la demanda química de oxígeno encontramos gran cantidad de material orgánico e inorgánico presente en el lixiviado crudo debida al material que se encuentra en el relleno sanitario, al realizar el tratamiento con quitosán al 1% hubo una remoción considerable ya que disminuyó al 62%, con el quitosán al 2% la reducción fue de 64%, y con respecto al proceso Fenton fue de 70%, por lo tanto el índice de remoción entre los tratamientos dados al lixiviados para disminuir la DQO son aceptables si lo comparamos con los resultados obtenidos por (García, 2006) en la etapa de optimización de las relaciones del proceso Fenton .

En el gráfico 7 se muestra la comparación de la demanda bioquímica de oxígeno entre los diferentes tratamientos.



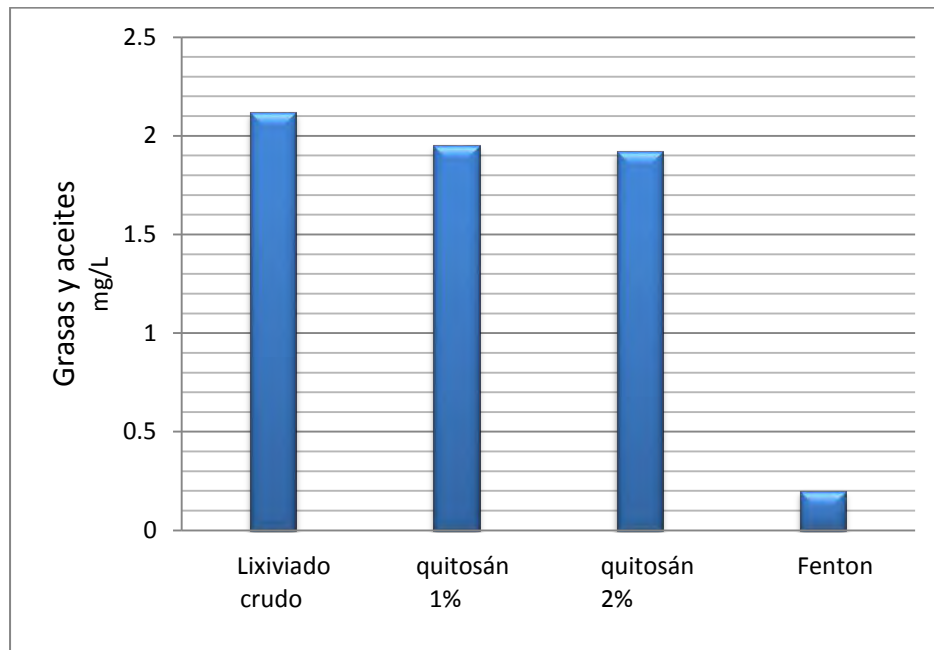
**Gráfico 7.** Comparación de la DBO.

Para la determinación de demanda bioquímica de oxígeno se presentó de forma baja en el lixiviado crudo debido al bajo índice de material biodegradable.

El lixiviado tratado mediante el quitosán no mostró gran diferencia disminuyó debido a la acción del polímero el cual tiene una actividad antimicrobiana por lo cual afectó los microorganismos presentes aunado a esto el bajo pH de trabajo al cual se realizaron los tratamientos, Lo mismo sucedió con el proceso Fenton al realizarse mediante un pH bajo y con la misma oxidación de la materia orgánica presente destruyendo parte de los microorganismos presentes.

En cuanto a la relación de DBO/DQO presentó al inicio un índice de biodegradabilidad de 0.078 esto quiere decir que es muy poco biodegradable. (Wang et. al. 2006), pero al realizar los tratamientos con quitosán al 1% ,2% sube a 0.15, 0.17 respectivamente, de igual forma sucedió con el proceso Fenton a 0.18 siguieron siendo poco biodegradables, debido al valor de DQO.

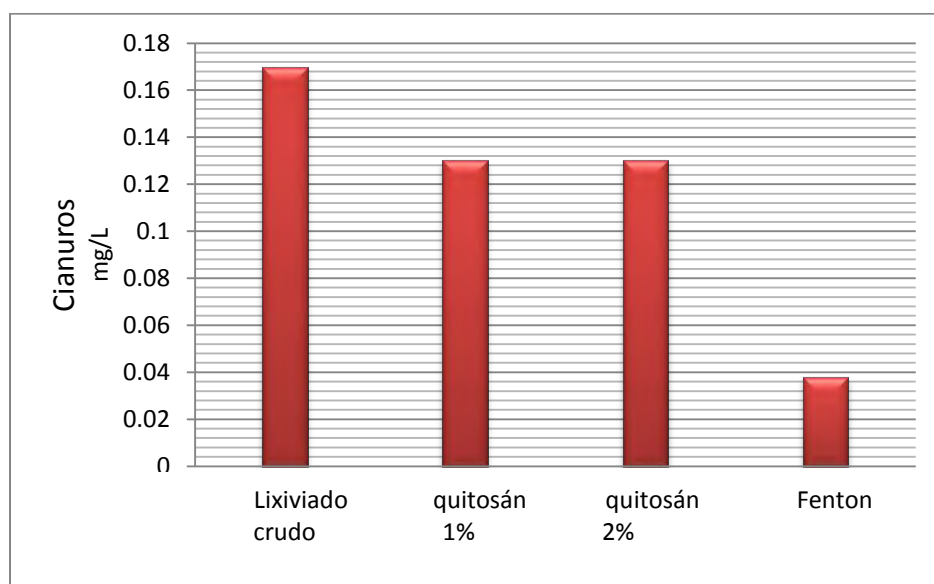
En el gráfico 8, se indica la concentración de grasas y aceites que se obtuvieron con el lixiviado crudo y los tres tratamientos.



**Gráfico 8.** Comparación de grasas y aceites.

La cantidad de grasas y aceites que presentó la muestra de lixiviado crudo fue muy baja debido a al material que se deposita en el relleno sanitario pues no presenta grandes cantidades, por lo tanto no hay mayor problema para cumplir con la NOM 003, la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se rehúsen en servicios al público, en cuanto a los tratamientos con quitosán tuvo una remoción lo que no con un coagulante tradicional, ésto gracias a la acción de remover grasas por parte del polímero, pero no comparable con el proceso Fenton ya que las degrado por ser un proceso de oxidación avanzada.

En el gráfico 9, se indica la concentración de cianuros que se obtuvieron con el lixiviado crudo y los tres tratamientos.

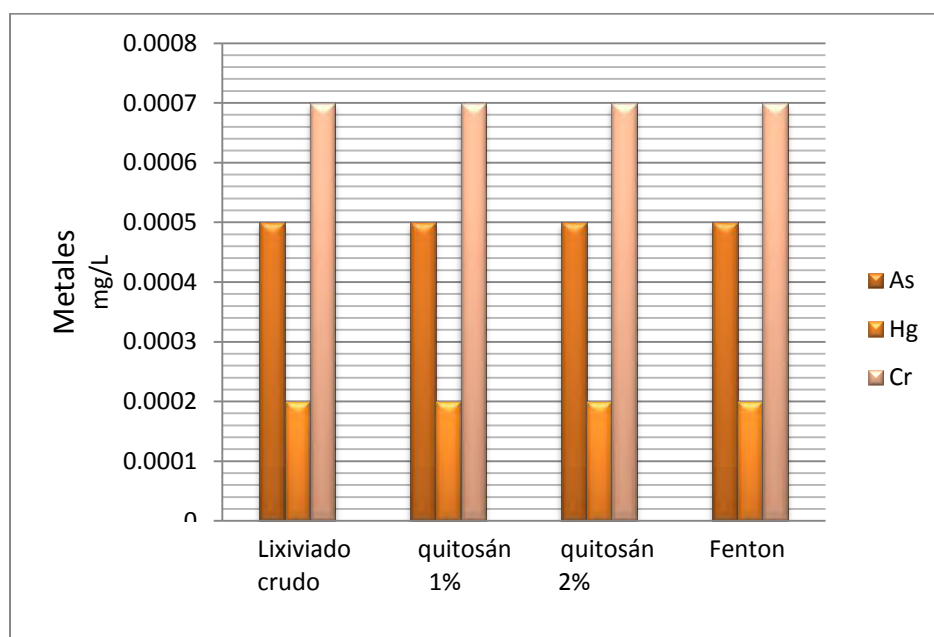


**Gráfico 9.**Comparación de cianuros.

Para el resultado obtenido en el lixiviado crudo se encontró que el quitosán removió un poco los cianuros ésto es porque el ion cianuro es capaz de formar compuestos estables con casi cualquier metal pesado en bajas concentraciones. Ésto nos dice que ya que se acomplejó el cianuro con metales, el quitosán pudo remover dichos complejos y es por eso que hubo una remoción de dicho ion.

En el caso del Fenton hubo una mayor remoción ésto debido a la oxidación que dicho proceso genera.

En el gráfico 10, se realizó una comparación de arsénico, mercurio y cromo hexavalente que se obtuvieron con el lixiviado crudo y los tres tratamientos.



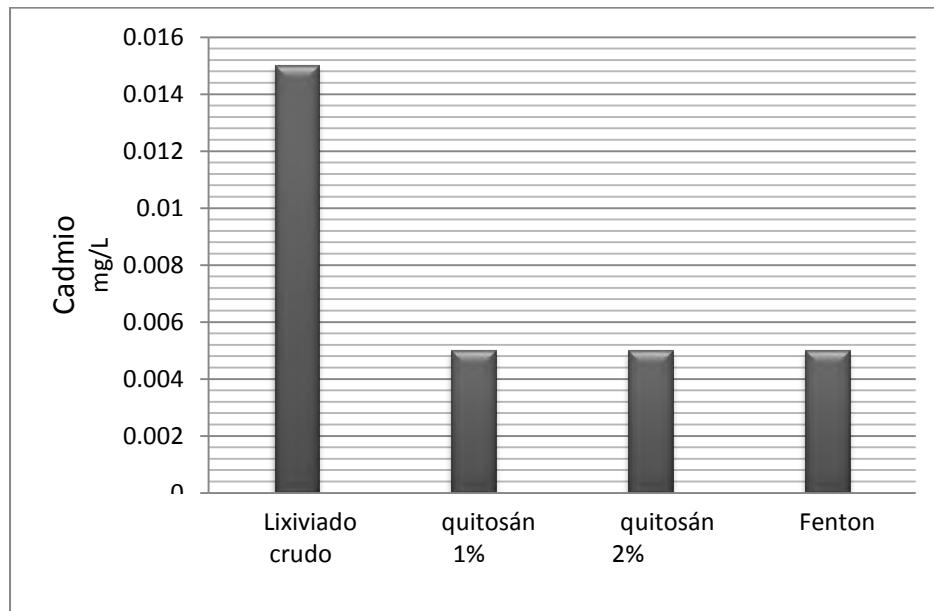
**Gráfico 10.** Comparación de arsénico, mercurio y cromo hexavalente.

Al analizar éstos metales en los distintos tratamientos realizados se encontraron en mínimas proporciones no habiendo cambio alguno.

Una causa pudo haber sido que en el relleno sanitario los materiales compactados en el mismo presentan trazas de éstos metales, lo que hace que se encuentren en concentraciones imperceptibles.



En el gráfico 11, se indica la concentración de cadmio que se obtuvo con el lixiviado crudo y los tres tratamientos.

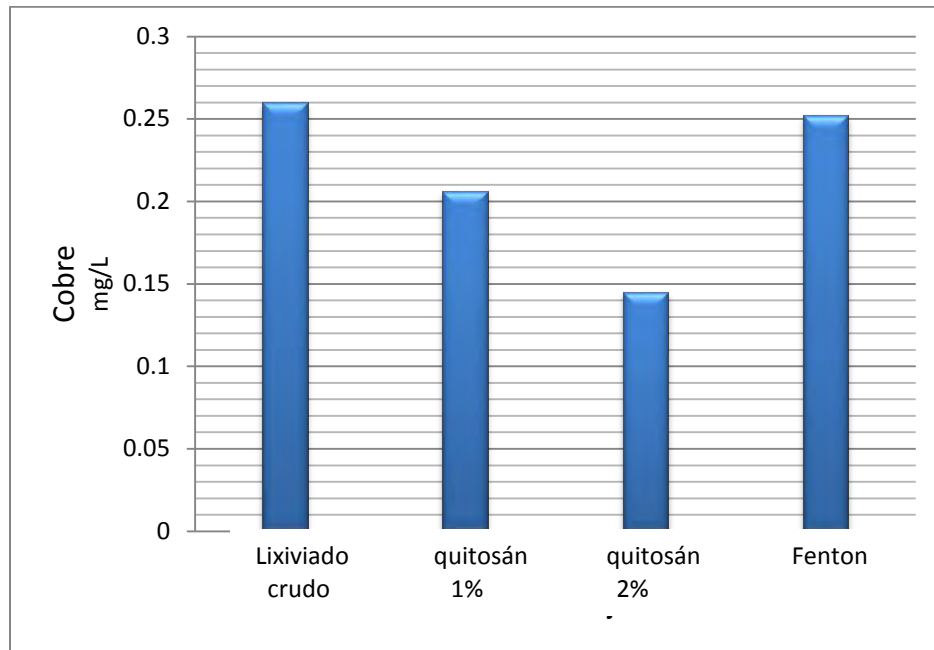


**Gráfico 11.** Comparación de cadmio

Para el valor de cadmio presente en el lixiviado crudo, se encontró por debajo del nivel de concentración en comparación con el estudio realizado por (Izquierdo y Mendoza 2010) debido a que es un elemento escaso en la corteza terrestre.

Los tratamientos con quitosán 1%, 2% y con Fenton no se detectó ni la concentración mínima detectable en el equipo de absorción atómica con lo que se puede explicar que el polímero es bueno removiendo iones de metales pesado como el cadmio de acuerdo a (Knorr, 1984) y que el proceso Fenton lo reduce con su oxidación.

En el gráfico 12, se indica la concentración de cobre que se obtuvo con el lixiviado crudo y los tres tratamientos.

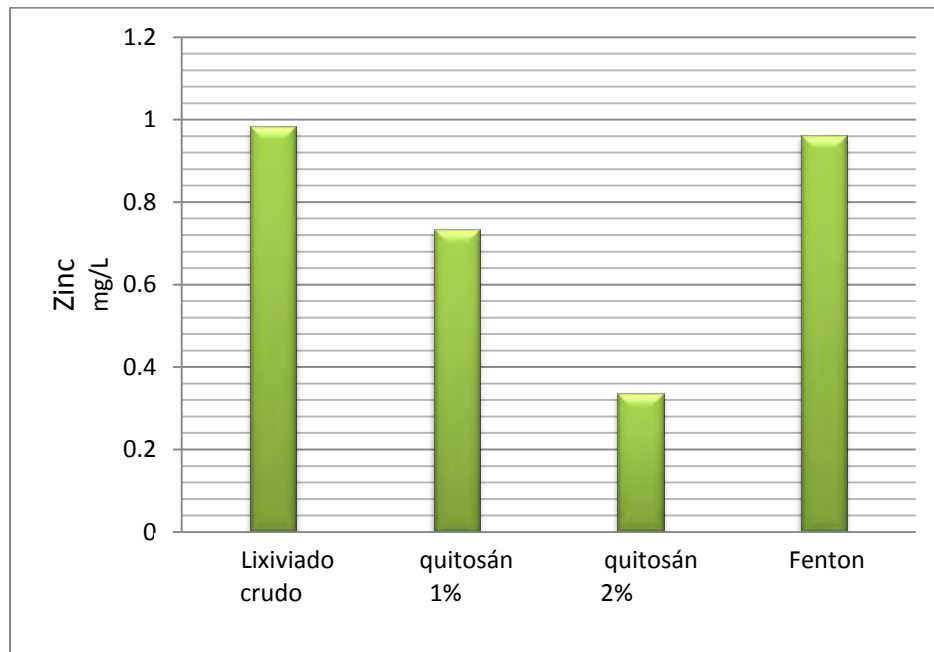


**Grafico 12.** Comparación de cobre.

En el lixiviado crudo se encontró una concentración baja de cobre comparado con el estudio de (Izquierdo y Mendoza, 2010), al realizar el tratamiento de lixiviado con quitosán al 1% se observó un porcentaje de remoción del 20.76 %, con el quitosán al 2 % observó un porcentaje de remoción del 44.23%, con el proceso Fenton no hubo gran remoción de dicho metal ya que se observó porcentaje de remoción del 3.07%.

Lo que podemos decir en cuanto al quitosán en general que se ve una reducción del metal en el lixiviado por parte del polímero gracias a que forma complejo con este metal de acuerdo a (Knorr, 1984) y el proceso Fenton no colaboró mucho a su eliminación.

En el gráfico 13, se indica la concentración de zinc que se obtuvo con el lixiviado crudo y los tres tratamientos.

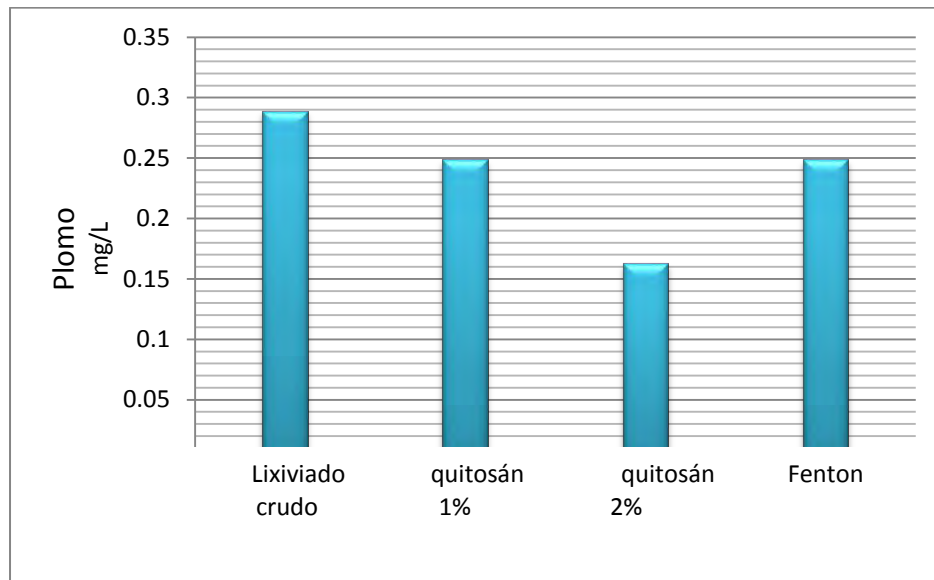


**Gráfico 13.** Comparación de zinc

En la determinación de zinc en el lixiviado crudo salió por debajo de lo antes encontrado en el estudio de (Izquierdo y Mendoza, 2010) Esto se debió a que el metal se encuentra combinado con minerales por lo tanto hay una escasa presencia de zinc en el relleno sanitario.

En la comparación con el tratamiento con el quitosán disminuyó de forma relevante con la concentración de quitosán al 2 %, una causa de este hecho pudo haber sido el grado de desacetilación y el peso molecular del polímero removiendo iones de metales pesados siendo más eficiente de la remoción del Zinc; lo que no sucedió con el proceso Fenton dado que no redujo la cantidad de zinc disuelta en el lixiviado.

En el gráfico 14, se indica la concentración de plomo que se obtuvo con el lixiviado crudo y los tres tratamientos.

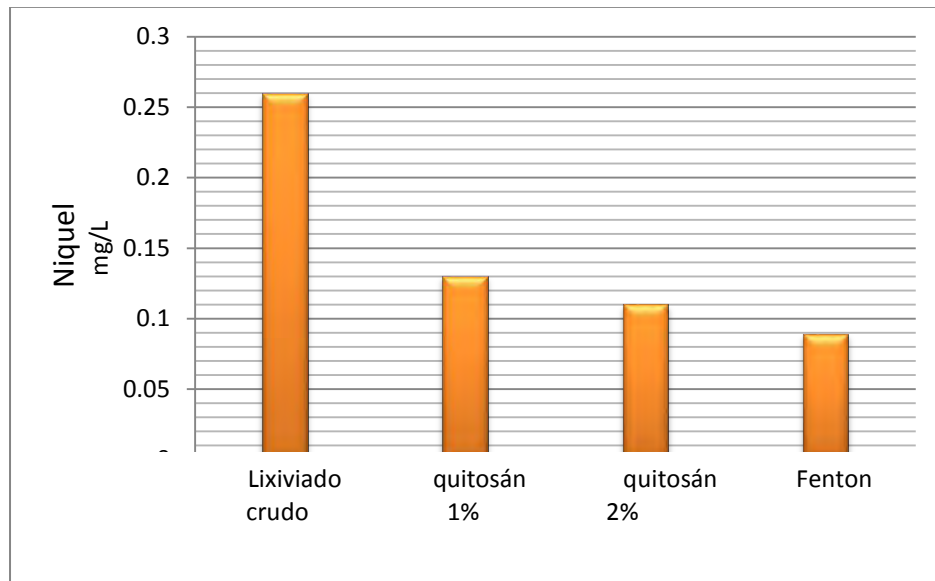


**Gráfico 14.** Comparación de plomo

La concentración del plomo que se encontró en el lixiviado crudo fue alta en comparación a lo encontrado en (Orta *et al.*, 2006). Al realizar el tratamiento con el quitosán al 1% se encontró una disminución pero no tan relevante como lo fue al 2% esto gracias al peso molecular y al grado de desacetilación del polímero por lo cual actúa de mejor forma removiendo iones de metales pesados como lo es el Plomo (Knorr, 1984).

El material que se encuentra compactado en el relleno sanitario, contiene grandes cantidades de plomo por lo tanto el lixiviado generado lo contiene, por lo contrario el proceso Fenton no removió mucho de este metal.

En el gráfico 15, se indica la concentración de Níquel que se obtuvo con el lixiviado crudo y los tres tratamientos.



**Gráfico 15.** Comparación de níquel.

La concentración que presentó el níquel en el lixiviado crudo es muy baja con respecto a lo reportado en (Izquierdo y Mendoza, 2010). Este metal se muestra combinado con minerales diversos, con lo cual en el lugar donde se encuentra situado el relleno sanitario, hay una escasa presencia de níquel.

Al realizar el tratamiento con quitosán al 1% disminuyó de forma importante al igual que del quitosán 2% y aunque no fue mucha la diferencia se puede explicar que funcionó mejor al aumentar la concentración; El proceso Fenton redujo más la cantidad del metal por su acción de oxidación.

#### Análisis microbiológico

En la tabla 21 se realizó una comparación de coliformes totales, fecales y huevos de helminto para el lixiviado crudo y los tres tratamientos.

**Tabla 21.** Comparación de las pruebas microbiológicas entre los diferentes tratamientos

<b>Parámetro</b>	<b>Lixiviado crudo</b>	<b>Lixiviado con Quitosán</b>	<b>Lixiviado con Quitosán 2%</b>	<b>Lixiviado con Fenton</b>
<b>Coliformes totales</b>	1.5X10 <sup>3</sup> UFC/100 mL.	ND	ND	ND
<b>Coliformes fecales</b>	2X10 <sup>2</sup> UFC/100 mL.	ND	ND	ND
<b>Huevos de helminto</b>	ND	ND	ND	ND

ND: No Detectado

En cuanto a la prueba de coliformes sólo se encontraron en el lixiviado crudo y no en gran cantidad ésto es por los tipos de residuos que son depositados en el SDF y a las condiciones en las que proliferan estas especies.

Al realizar la prueba de coliformes totales y fecales con los diferentes tratamientos no se detectó ésto debido al bajo pH de trabajo de cada uno de los tratamientos.

Con respecto a la prueba de huevos de helminto no se detectó en el lixiviado crudo y por ende en los demás tratamientos debido a las condiciones necesarias que para subsistir tiene este parásito.

### 3.5. Calificación de los lixiviados tratados

Con los valores obtenidos en la caracterización de los lixiviados se calificó el tratamiento con los tres procesos con base en las NOM 002, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, y la NOM 003, la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se rehúsen en servicios al público.

En la tabla 22 se muestra la comparación de la NOM 003 para así poder calificar el lixiviado obtenido de los tres tratamientos.

**Tabla 22.** Comparación con la NOM 003 con los tres tratamientos realizados al lixiviado.

Parámetros	*Servicios al público		Lixiviado quitosán 1%	Lixiviado quitosán 2 %	Lixiviado Fenton
	Con contacto directo	Con contacto indirecto u ocasional			
<b>Coliformes fecales</b> NMP/100 ml	240	1000	ND	ND	ND
<b>Huevos de helminto</b> (hl)	≤1	≤5	ND	ND	ND
<b>Grasas y aceites</b> mg/L	15	15	1.95	1.92	0.2
<b>DBO<sub>5</sub></b> mg/L	20	30	336.75	359.2	314.3
<b>SST</b> mg/L	20	30	400	566	40

En la tabla 23 se muestra la comparación de lo obtenido en los tratamientos de lixiviado con la NOM 002.

**Tabla 23.** Comparación con la NOM 002 con los tres tratamientos realizados al lixiviado.

<b>Parámetros</b>	<b>Instantáneo</b>	<b>Lixiviado Quitosán 1%</b>	<b>Lixiviado Quitosán 2%</b>	<b>Lixiviado Fenton</b>
<b>Grasas y aceites mg/L</b>	100	1.95	1.92	0.2
<b>Sólidos Sedimentables ml/L</b>	10	8	190	12
<b>Arsénico total mg/L</b>	1	<0.0005	<0.0005	<0.0005
<b>Cadmio total mg/L</b>	1	<0.0005	<0.0005	<0.0005
<b>Cianuro total mg/L</b>	2	0.13	0.13	0.038
<b>Cobre total mg/L</b>	20	0.206	0.145	0.252
<b>Cromo hexavalente mg/L</b>	1	<0.0007	<0.0007	<0.0007
<b>Mercurio total mg/L</b>	0.02	<0.0002	<0.0002	<0.0002
<b>Níquel total mg/L</b>	8	0.13	0.11	0.089
<b>Plomo total mg/L</b>	2	0.249	0.163	.249
<b>Zinc total mg/L</b>	12	0.735	0.337	0.962



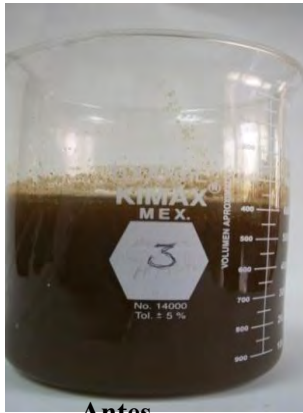
Resultados obtenidos en la caracterización sobre el lixiviado crudo y con los tratamientos realizados con quitosán al 1%, 2% y con el proceso Fenton.

**Tabla 24.** Resultados de la caracterización de los diferentes tratamientos

<b>Parámetro</b>	<b>Lixiviado crudo</b>	<b>Lixiviado con quitosán 1 %</b>	<b>Lixiviado con quitosán 2%</b>	<b>Lixiviado/ Fenton</b>
Sólidos totales	22864 mg/L	47360 mg/L	90800 mg/L	11920 mg/L
Sólidos totales volátiles	10340 mg/L	28840 mg/L	28400 mg/L	7960 mg/L
Sólidos totales fijos	12524 mg/L	18520 mg/L	62400 mg/L	3960 mg/L
Sólidos suspendidos totales	204 mg/L	400 mg/L	566 mg/L	40 mg/L
Sólidos suspendidos volátiles	76 mg/L	320 mg/L	394 mg/L	160mg/L
Sólidos suspendidos fijos	128 mg/L	80 mg/L	112	35 mg/L
Sólidos Sedimentables	0.5 mL / L	8 mL / L	190 mL/L	12 mL / L
Turbidez	27.7 UNF	12.3 UNF	7.4 UNF	4.2 UNF
pH	8.2	3	3	2
Conductividad	mS/cm	40000mS/cm	50000 mS/cm	60000 mS/cm
DBO <sub>5</sub>	449 mg/L	336.75 mg/L	359.2 mg/L	314.3 mg/L
DQO	5702 mg/L	2166.76 mg/L	2052.72 mg/L	1710.6 mg/L
Grasas y aceites	2.12 mg/L	2.95 mg/L	1.92 mg/L	0.2 mg/L
Cianuros	0.17 mg/L	0.13 mg/L	0.13 mg/L	0.038 mg/L
Cromo hexavalente	<0.0007mg/L	<0.0007mg/L	<0.0007mg/L	<0.0007mg/L
Arsénico	<0.0005 mg/L	<0.0005 mg/L	<0.0005 mg/L	<0.0005 mg/L
Cadmio	0.015 mg/L	<0.005 mg/L	<0.005 mg/L	<0.005 mg/L
Mercurio	<0.0002 mg/L	<0.0002 mg/L	<0.0002 mg/L	<0.0002 mg/L
Cobre	0.260 mg/L	0.206 mg/L	0.145 mg/L	0.252 mg/L
Níquel	0.26 mg/L	0.13 mg/L	.11 mg/L	0.089 mg/L

Plomo	0.289 mg/L	0.249 mg/L	0.163 mg/L	0.249 mg/L
Zinc	0.985 mg/L	0.735 mg/L	0.337 mg/L	0.962 mg/L
Coliformes totales	1.5X10 <sup>3</sup> UFC/100 mL.	ND	ND	ND
Coliformes fecales	2X10 <sup>2</sup> UFC/100 mL.	ND	ND	ND
Huevos de helminto	ND	ND	ND	ND

Las siguientes fotografías muestran los resultados de los tratamientos dados al lixiviado:



**Antes**



**Después**

**Fotografía 17.** Tratamiento con quitosán al 1%

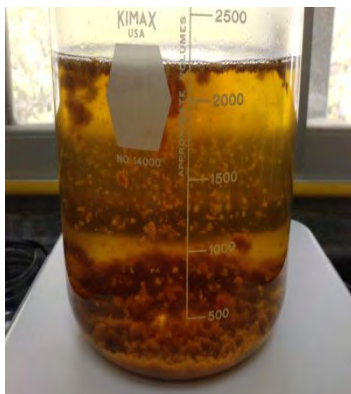


**Antes**



**Después**

**Fotografía 18.** Tratamiento con quitosán al 2%



**Antes**



**Después**

**Fotografía 19.** Tratamiento con Fenton

# Conclusiones

---

- Se realizó experimentalmente la caracterización a un lixiviado de un relleno sanitario y después un tratamiento utilizando quitosán para reducir la concentración de contaminantes encontrados y a su vez se comparó con un proceso de oxidación avanzada (Fenton) utilizado comúnmente como pretratamiento en los lixiviados.
- El trabajo demostró que el proceso de coagulación con el quitosán puede ser aplicado como un pretratamiento para los lixiviados ya que representa evaluar el uso potencial de coagulantes orgánicos de bajo costo, como alternativa al uso tradicional de coagulantes inorgánicos, que representan un problema con los residuos generados en el tratamiento de lixiviados, el quitosán destaca siendo un polímero biodegradable.
- El proceso de coagulación aplicado a los lixiviados, demostró ser efectivo en la remoción de carga orgánica medida como DQO cuando se empleó quitosán al 1% y 2%, como coagulante, obteniéndose una remoción de 62 y 64% respecto a pH 3 y a una dosis de 5 gotas/100mL y 8 gotas/100mL respectivamente.
- El proceso de oxidación avanzada utilizado resultó más eficiente para la remoción de materia orgánica de lixiviados ya que se obtuvo una remoción del 70 % de DQO.
- La evaluación de la biodegradabilidad del lixiviado crudo fue de 0.078, ésto debido a la concentración de materia orgánica, la capacidad de biodegradación es muy baja, lo cual lo hace un lixiviado difícilmente biodegradable, por lo tanto al realizar el tratamiento con quitosán al 1% y 2%; se incrementó a 0.15, 0.17 respectivamente, el proceso Fenton presentó un índice de biodegradabilidad de 0.18 con lo cual de igual forma sigue bajo y por consiguiente los procesos biológicos no serán muy efectivos.
- Al calificar el agua dentro de las Normas Mexicanas 002 y 003-SEMARNAT 1996, Los tres tratamientos no cumplen con los lineamientos de la Norma NOM 002 SEMARNAT 1996 ya que su DBO es muy alta; los Sólidos Suspendidos Totales resultaron altos ya que la mayor parte de los sólidos aglomerados en el lixiviado se encuentran en forma suspendida de tamaño pequeño ( $< 45 \mu\text{m}$ ), lo que propicia que las eficiencias de procesos de clarificación del tipo coagulación sean bajas; con el proceso Fenton aunque hubo una degradación pero aun así no cumplió.
- Con relación a la Norma NOM 003 SEMARNAT 1996, cumplieron lo correspondiente a los niveles de concentración de metales y aunque el lixiviado crudo no excedió los límites con la norma podemos destacar la remoción que realizó el quitosán en metales de casi el 50%.

# Referencias

---

APHA Standards methods for the examination of water and wastewater 20<sup>ed</sup>, American Public Health Association. Washington, EUA 1985.

Arévalo, N.K. *Elaboración de plásticos biodegradables a partir de polisacáridos y su estudio de biodegradabilidad a nivel laboratorio y campo*. Tesis de Doctorado (Biotecnología). Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, México 1996.

Aziz, H., S. Alias, F. Assari and M. Adlan, *The use of alum, ferric chloride and ferrous sulfate as coagulants in removing suspended solids, color and COD from semi-aerobic landfill leachate at controlled pH*. *Waste Man.* Universiti Sains Malaysia. N° 25 2007. pag.556-565.

Comisión Nacional del Agua. (Conagua) *Estadísticas del Agua en México* 2005. Elaboración propia con datos de:CNA. Gerencia de Planeación Hidráulica. Subdirección General de Planeación. México. 2005.

Comisión Nacional del Agua (Conagua). *Estadísticas del Agua en México* Edición 2008. México, D.F. 2008.

Cuaderno de Pesquisa Sér. Bio., Santa Cruz do Sul, Vol. 21, No. 3, Sept-Dec, 2009, pág. 9,22.

Deng, Y. and J. Englehardt, *Treatment of landfill leachate by the Fenton process*. *Water*. N°40. University of Miami, FL 33146, USA, 2007. pág. 3683-3694.

Domenech Xavier, Wilson F. Jardim y Martha I. Litter. *Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes*. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el desarrollo (CYTED), Buenos aires, 1998.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) *Fisheries Aquaculture Production Statistics*, Circular No. 815, Revision 10, Rome, 1996.

García R.B. *Remoción de materia orgánica en lixiviados usando el proceso de oxidación Fenton y coagulación-floculación*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Yucatán, México. (2006)

Giraldo, E. *Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: avances recientes*. Revista de Ingeniería. 2001, núm. 14, pág. 44-55.

Gómez Ramos J. M., Nájera Aguilar., Rojas Valencia M.N., García Lara C., Gutiérrez Hernández R. 2010. (*Manejo de biogás y lixiviados en relleno sanitario del centro de México un programa general*. LACANDONIA Revista de Ciencias de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. año 4, vol. 4, No. 2 diciembre 2010).

Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática (INEGI). *Relleno sanitario por entidad federativa* 2010.

Jiménez Cisneros Blanca Elena *La contaminación ambiental en México* Limusa, Noriega editores, México D.F. 2001

Knorr Dietrich, “*Recovery and utilization of chitin and chitosan in food processing waste management*”. *Food technology*, Vol. 45, (1), Chicago, January 1991, No. 114.

Knorr Dietrich, *Use of chitinous polymers in food*. *Food technology*, Chicago, January, 1984, V.38, No.1, pág.85-97.

Larez, Velázquez Cristóbal;”*Algunos usos de quitosán en sistemas acuosos* revista iberoamericana de polímeros; 2003 volumen 4 (2), No. Abril.

Lopes, J., y Peralta, P.. *Use of advanced oxidation processes to improve the biodegradability of mature landfill leachates*. *Journal of Hazardous Materials*. (2005) B123. 181-186.

Mendoza Francisco José, Gallardo Izquierdo Antonio, *Tratamiento y gestión de residuos sólidos* Limusa 2010 Universidad Politécnica de Valencia

Miranda Castro S. P. (2000). *Proceso de extracción de quitina a partir de caparzones y su conversión a quitosán*. Patente en trámite, Instituto Mexicano de la propiedad industrial en México Numero de expediente 005444. Número de folio 1175930-5

Muzarelli; R.C; *Jeuniaux Charles and Gooday G. W. “Chitin nature and technology”*, Plenum press N.Y., 1986

Orta de Velásquez Ma. T., Ma. N. Rojas-Valencia, I. Yañez, I. Monje, W de J. Londoño *Alternativa de tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios en plantas de aguas residuales urbanas*. Vol.1, México D.F., 2006

Primo, O., A. Rueda, M. Rivero and I. Ortiz. *An Integrated process, Fenton reaction – ultrafiltration, for the treatment of landfill leachate: Pilot plant operation and analysis*. *Ind. Engineering Chemical Research*.2008 47. 946-952.

Rinaudo, Marguerite; “*Chitin and Chitosan: properties and applications*”. Prog. Polym. Sci; 2006, No. 31, pp 603-632.

Ron Crites/George Tchobanoglous *Tratamientos de aguas residuales en pequeñas poblaciones* Mc Graw Hill Interamericana Editores S.A de C.V 2000 776 páginas

Ru-Ke Bal.; “*Selective permeabilities of chitosan – acetic acid complex membrane and chitosan polymer complex membranes for oxygen and carbon dioxide*”. Polymer Bulletin. 1988, No 20, pag. 83-88

Sánchez Gómez Jorge *Biorrelenos metanogénicos opción sustentable para la disposición final de los residuos sólidos sistemas de ingeniería y control ambiental* S.A de C.V, 2004

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) *La vida útil del relleno sanitario del bordo poniente ha concluido*, Comunicado de prensa No.155/08. 2008.

Seoanez Calvo Mariano. *Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y bajo costo (2004)* Colección: Ingeniería medioambiental, 2da. Edición revisada. España. Ediciones Mundi-Prensa.

Trejo Vázquez Rodolfo *Procesamiento de la basura urbana* Ed. trillas México D.F:1994.

Universidad del Zulia, Facultad Experimental de Ciencias, Dpto. de Biología, Maracaibo, Venezuela. Uso del quitosano obtenido de *Litopenaeus schmitti* (Decapoda, Penaeidae) en el tratamiento de agua para consumo humano Vol. 8, N° Extraordinario, 2008 (281 - 287) ISSN 1317-2255 / Dep. legal pp. 200002FA828

Wang X, Chen S., Gu X., Wang K. (2009). *Pilot study on the advanced treatment of landfill leachate using combined coagulation, Fenton oxidation and biological aerated filter process. Waste management*, 29, 1354, 1358.

Wang, F., D. Smith and M. El-din, *Application of advanced oxidation methods for landfill leachate treatment – A review*, *Environmental Eng. Sci.* 2: 413.127 (2003).

Yaxcelys Caldera, Nikceli Clavel, Douglas Briceño, Asdrubal Nava, Edixon Gutierrez y Zula Marmo. *La Transversalidad Curricular y la Enseñanza de la Educación Ambiental* Año 2, N°. 4, 2006, págs. 39-59

Zhang, H., H. Choi and C. Huang, *Optimization of Fenton process for the treatment of landfill leachate*. *J. Hazard. Mater.* B125. 166-174 (2005).

# Anexos

---

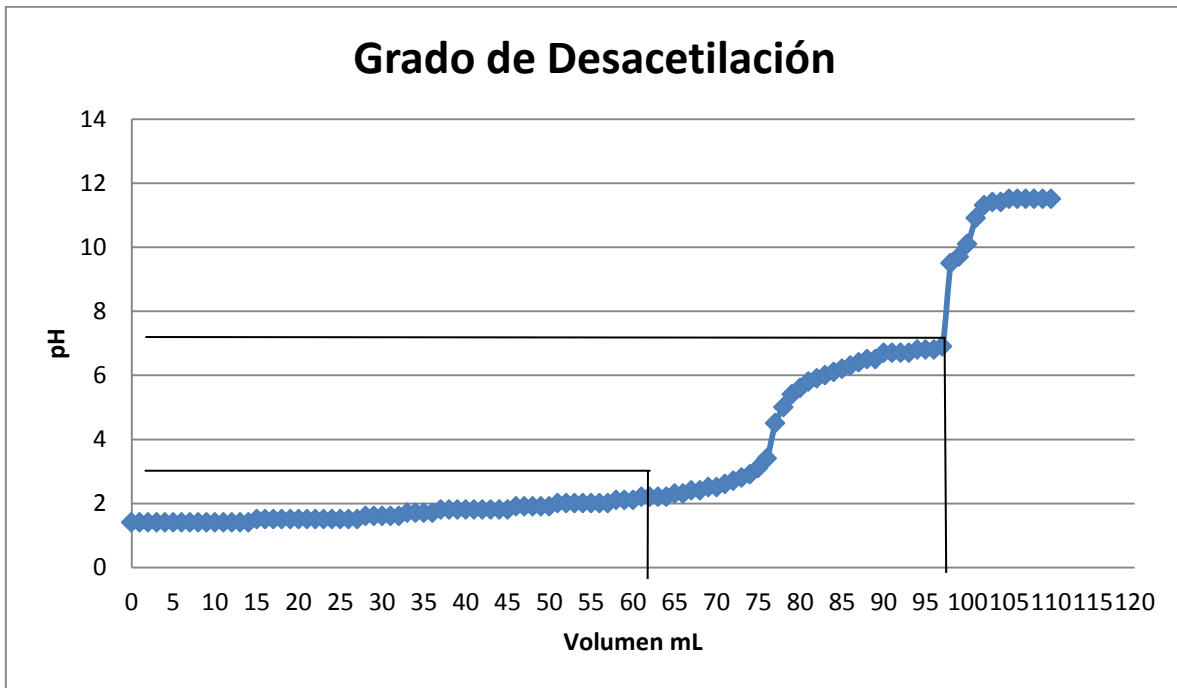
## ANEXO “A”

Con respecto al quitosán a utilizar, se realizaron las pruebas de Grado de Desacetilación y Peso Molecular para definir las condiciones iniciales del polímero, originando los datos representados en la grafica 16.

Se determinó el grado de Desacetilación del quitosán que se utilizo en el 1% para ver el grado de pureza que contiene la quitina.

**Grafica 16.** Representación de los datos obtenidos en la valoración ácido-base





La siguiente grafica muestra los dos puntos de equivalencia necesarios para el cálculo del grado de Desacetilación.

Se calculó el volumen gastado

$$Vol.promedio (mL) = \frac{Vol.equivalencia\ 2 - Vol.equivalencia\ 1}{2}$$

$$Vol.promedio (mL) = \frac{97mL - 61mL}{2} = 18mL$$

$$Vol.gastado (L) = \frac{Vol.promedio}{1000}$$

$$Vol.gastado (L) = \frac{18mL}{1000} = 0.018L$$

Posteriormente se calculó la masa en equivalentes

$$Meq = \frac{m(g)}{[NaOH] \times Vol.gastado(L)}$$

Donde:

Meq= masa (equivalentes)

M= masa de quitosán (g.)

[NaOH]= Concentración de Hidróxido de sodio (N)

Vol. Gastado= Volumen final (L)

$$\text{Meq} = \frac{.30\text{g}}{[0.1\text{N}](0.018\text{L})} = 166.66 \text{ meq ó mili equivalentes}$$

Al final obteniendo la masa en equivalentes se calculó el grado de Desacetilación

$$\%DA = \frac{203}{\text{Meq} + 42} \times 100$$

$$\%DA = \frac{203}{166.66 \frac{\text{m}}{\text{eq}} + 42} (100) = 97.28\%$$

El grado de Desacetilación = **97.28%**

### Peso Molecular Viscosimétrico

El peso molecular del polímero es importante porque determina muchas propiedades físicas, propiedades mecánicas como la rigidez, dureza, y la viscosidad.

La secuencia de cálculo para determinar el peso molecular fue por viscosimetría intrínseca.

**Tabla 25.** Registro de tiempos de cada solución de quitosán.

Quitosán	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	Sol. 7	Sol. 8	Sol. 9	Sol. 10
Tiempo	5.21	3.39	2.59	2.59	1.42	1.03	1.09	0.47	0.43	0.42
segundos	5.2	2.4	3	3	1.41	1.04	1.08	0.46	0.44	0.43
	5.17	2.43	2.59	2.59	1.43	1.04	1.08	0.47	0.43	0.43
Promedio	5.19	2.74	2.73	2.73	1.42	1.04	1.08	0.47	0.43	0.427

En el siguiente paso se determino la viscosidad relativa y especifica

$$\eta_{rel} = \frac{t_M}{t_0}$$
$$\eta_{rel} = \frac{5.19}{0.4} = 12.98$$

Donde:

$\eta_{rel}$  = Viscosidad relativa

$\eta_{esp}$  = Viscosidad especifica

$t_M$  = Tiempo de la muestra de B a C (seg.)

$t_0$  = Tiempo del solvente de B a C (seg.)

$$\eta_{esp} = \eta_{rel} - 1$$
$$\eta_{esp} = 12.98 - 1 = 11.98$$

Con los siguientes datos se obtuvo la viscosidad específica reducida e intrínseca

$$\eta_{red} = \frac{\eta_{esp}}{[\text{Quitósán}]}$$
$$\eta_{red} = \frac{11.98}{[0.2]} = 59.92$$

Donde:

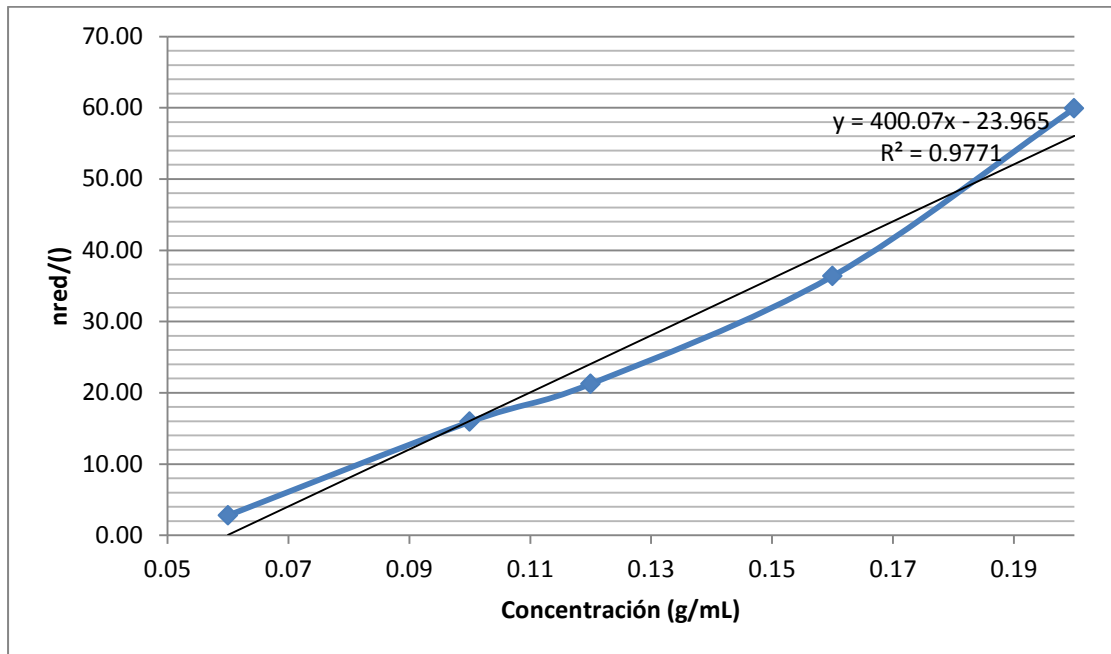
$\eta_{red}$  = Viscosidad especifica reducida

$\eta_{esp}$  = Viscosidad especifica

$[\text{Quitósán}]$  = Concentración de Quitósán ( $\frac{g}{mL}$ )

La determinacion de la viscosidad intrínseca se obtuvo a partir de una regresión lineal como se muestra en la grafica 17.

**Grafica 17.** Viscosidad reducida de las muestras de quitósán con respecto a la variación de la concentración.



A partir de los cálculos realizados y de la construcción de la grafica de la viscosidad reducida específica en función de la concentración del quitosán se obtiene una tendencia lineal de la cual con la ecuación de la regresión lineal  $y=mx+b$  se determina que  $b$  es igual a la viscosidad intrínseca.

Para establecer el cálculo del peso molecular se realizó mediante la ecuación de Mark-Houwink

$$\text{LogPM} = \frac{\text{Log}(A/K)}{a}$$

$$\text{LogPM} = \frac{\text{Log}(23.96/0.076)}{0.76} = 3.2878$$

$$\text{PM} = 10^{3.2877} = 1939.67\text{Da}$$

Donde

$K$  = Constante del solvente  $\text{dLg}^{-1}$  (Rinaudo 1993.)

$A$ =Ordenada al origen

$a$  =Constante del polímero (Rinaudo 1993.)

*Peso molecular del Quitosán al 1% = 19.4020 KDa*

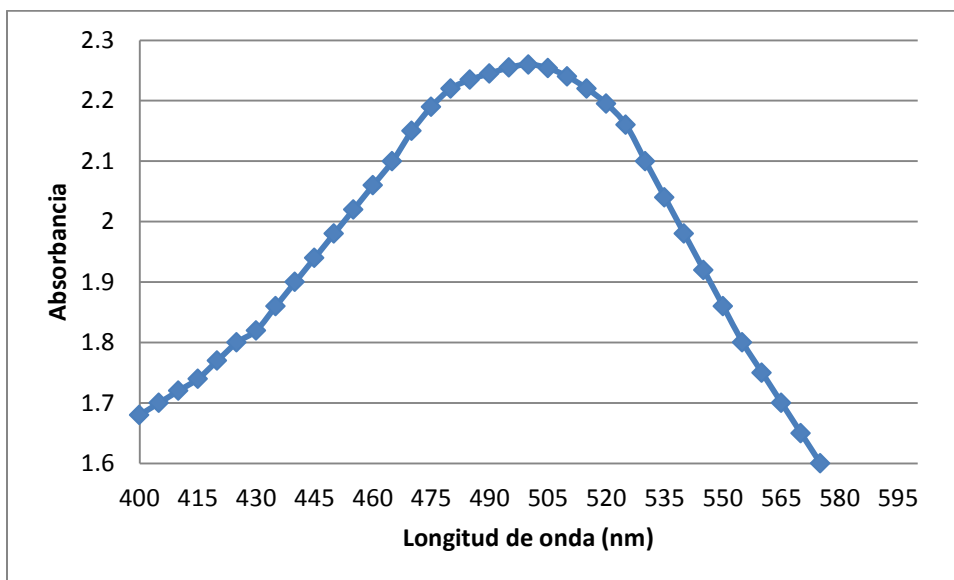
## ANEXO "B"

Se procedió a realizar un barrido de la muestra de 2 gotas de quitosán a pH 3, en este caso se determino que fue de 500nm. Para comprobar el dato se realizo un segundo barrido con la muestra de 4 gotas de quitosán a pH 3 y el resultado fue el mismo.

Una vez establecida la longitud de onda en las que se leyeron las muestras se procedió a medir la absorbancia de las muestras de la prueba de jarras a diferentes dosis.

La determinación de la Longitud de onda máxima para la muestra de 2 gotas de quitosán a pH=3 como se muestra en la grafica 18.

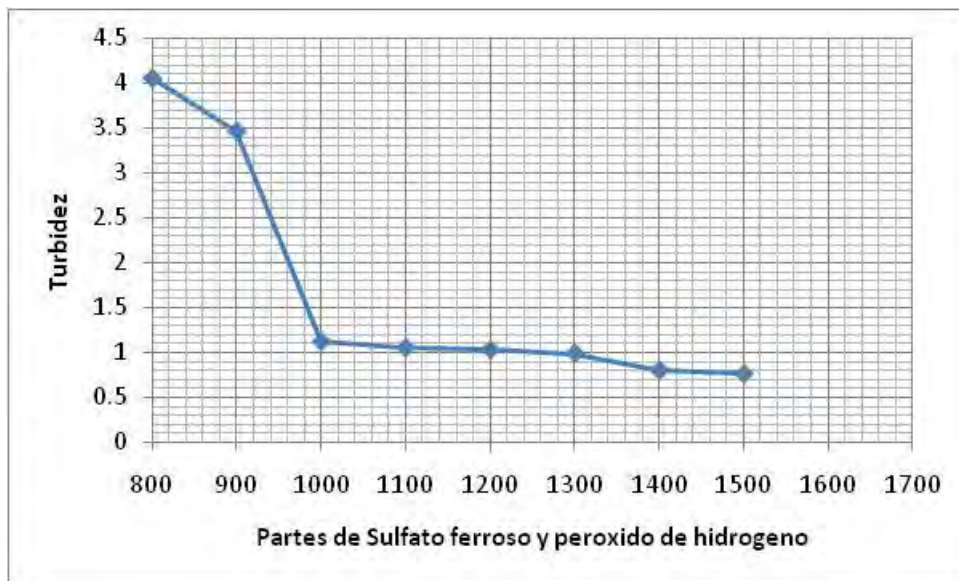
**Grafica 18.** Determinación de la longitud de onda máxima para la muestra de 4 gotas de Quitosán



## ANEXO "C"

En la grafica 19 se representa la turbidez para cada una de las concentraciones de sulfato ferroso amoniacal.

**Grafica 19.** Turbidez del lixiviado al utilizar peróxido de hidrógeno y solución de sulfato ferroso como catalizador a condiciones ácidas.



En la grafica 4 se muestra que a una concentración de 1000 ppm la tendencia de la dispersión de la luz en relación a la degradación del material coloidal permaneció constante y por lo tanto no fue necesario trabajar con dosis más elevadas de peróxido de hidrógeno ni del catalizador sulfato ferroso amoniacal.