



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO MEXICANO PARA LA PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA

REDUCCIÓN DE CONTAMINANTES ORGÁNICOS E INORGÁNICOS PRESENTES EN
LIXIVIADOS DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DEL RELLENO SANITARIO BORDO
PONIENTE.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

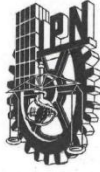
MAESTRO EN INGENIERÍA EN PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA

P R E S E N T A:

ING. MARBELLA AMADOR CRUZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. GABRIEL PINEDA FLORES



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México D.F. siendo las 10:00 horas del día 24 del mes de Noviembre del 2010 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CMPL para examinar la tesis titulada:
"Reducción de contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en lixiviados de residuos sólidos urbanos del relleno sanitario Bordo Poniente"

Presentada por el alumno:

Amador	Cruz	Marbella
Apellido paterno	Apellido materno	Nombre(s)
		B 0 7 1 3 7 2

aspirante de:

Maestría en Ingeniería en Producción más Limpia


Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.


LA COMISIÓN REVISORA

Director(a) de tesis


DR. GABRIEL PINEDA FLORES


DRA. MA. DEL CARMEN MONTERRUBIO
BADILLO


DRA. LUISA IDELRA MANZANARES
PAPAYANOPOULOS


M. EN C. PATRICIA CRUZ ORTEGA


DRA. ROCÍO SÁNCHEZ PÉREZ

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES


DR. JORGE PÉREZ





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México D.F. el día 12 del mes Noviembre del año 2010, la que suscribe Marbella Amador Cruz alumna del Programa de Maestría en Ingeniería en Producción más Limpia con número de registro B071372, adscrito a Centro Mexicano para la Producción más Limpia, manifiesta que es autora intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Gabriel Pineda Flores y cede los derechos del trabajo intitulado "Reducción de contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en lixiviados de residuos sólidos urbanos del relleno sanitario bordo poniente", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección marbella_55@yahoo.com.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Ing. Marbella Amador Cruz

DEDICATORIA

A mi *mamá*, por ver creído en mi siempre y que aunque esta en un sueño eterno siempre fué y será el motor que impulsa el logro de mis metas. A mis hermanas *Cristina* y *Estela*, a mi sobrino *Josafat* y a mi cuñado *Amancio* por su amor, paciencia y comprensión. También quiero dedicarle este trabajo a mi *papá* quien me ha enseñado cosas valiosas y por las cuales soy la mujer que soy ahora.

AGRADECIMIENTOS

*A*l Instituto Politécnico Nacional y al Centro Mexicano Para la Producción más Limpia por la educación de gran calidad que me brindaron y que me ha convertido en la profesional que soy ahora.

*U*n profundo agradecimiento al comité de becas institucionales del IPN por haberme apoyado como becaria durante mi estancia en la maestría, así como a la realización de este trabajo.

*A*l Dr. Gabriel Pineda Flores por la oportunidad y apoyo que me brindo.

A las Dras. María del Carmen Monterrubio Badillo, Luisa Idelia Manzanares Papayapuloupus, Rocío Sánchez Pérez y la M. en C. Patricia Cruz Ortega. Por sus valiosos comentarios que contribuyeron al mejoramiento de esta tesis.

*A*gradezco las facilidades proporcionadas por el Gobierno del Distrito Federal en especial al personal de monitoreo del Bordo Poniente, que me permitieron obtener muestras reales del lixiviado maduro, etapa I.

A mis compañeros y amigos de la maestría Yari, Bruno, Eduardo, Maribel, Alfredo, Rosa María, Tamara y Roberto que hicieron más agradable mi estancia aquí y con los cuales pase momentos inolvidables.

A la Dra. María Elena Navarro Clemente quien me impulso a vivir esta experiencia y que me apoyo y compartió sus valiosos conocimientos como maestra y amiga.

A la M. en C. María Carmen Fernández Martínez y el Dr. Jorge Yáñez Fernández, que creyeron en mí y me apoyaron con sus valiosos consejos y conocimientos.

A mis amigos de siempre que hacen que cualquier actividad que emprenda sea más leve a Karla, Karina, Ricardo, Bartolo, Miriam, Cristina, Luis y **Miguel Ángel**.

*F*inalmente agradezco a todos aquellos que de alguna manera contribuyeron a la realización de este proyecto.

“La vida es muy peligrosa. No por las personas que hacen el mal, sino por las que se sientan a ver lo que pasa”

Albert Einstein

ÍNDICE

ÍNDICE	I
ÍNDICE DE TABLAS	III
ÍNDICE DE FIGURAS	III
NOMENCLATURA.....	IV
GLOSARIO	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
1 INTRODUCCIÓN	1
2 ANTECEDENTES.....	4
2.1 CLASIFICACIÓN DEL LIXIVIADO	4
2.2 COMPOSICIÓN DEL LIXIVIADO	5
2.3 FORMACIÓN DE LOS LIXIVIADOS.....	6
2.3.1 <i>Importancia de la materia orgánica recalcitrante</i>	7
2.4 TRATAMIENTO PARA LOS LIXIVIADOS	8
2.5 OXIDACIÓN QUÍMICA. PROCESO FENTON.....	13
2.6 OXIDACIÓN BIOLÓGICA	19
3 JUSTIFICACIÓN.....	22
4 HIPÓTESIS	24
5 OBJETIVOS.....	25
5.1 OBJETIVO GENERAL.....	25
5.1.1 <i>Objetivos particulares</i>	25
6 MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
6.1 OBTENCIÓN DEL LIXIVIADO	27
6.2 CARACTERIZACIÓN DEL LIXIVIADO	29
6.3 OXIDACIÓN QUÍMICA (FENTON).....	32
6.4 OXIDACIÓN BIOLÓGICA	33

7	RESULTADOS	35
7.1	CARACTERIZACIÓN DEL LIXIVIADO	35
7.2	OXIDACIÓN QUÍMICA DEL LIXIVIADO (PROCESO FENTON).....	36
7.3	OXIDACIÓN BIOLÓGICA DEL LIXIVIADO PRE-TRATADO	37
7.3.1	<i>Degradación de la materia orgánica en el reactor de oxidación biológica...</i>	<i>38</i>
7.4	IDENTIFICACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA POR EL ESPECTROFOTÓMETRO UV-VIS.....	40
8	DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	44
8.1	CARACTERIZACIÓN DEL LIXIVIADO	44
8.2	OXIDACIÓN QUÍMICA DEL LIXIVIADO (PROCESO FENTON).....	46
8.2.1	<i>Degradación de la materia orgánica en el reactor de oxidación química</i>	<i>51</i>
8.3	OXIDACIÓN BIOLÓGICA DEL LIXIVIADO PRE-TRATADO	53
8.3.1	<i>Degradación de la materia orgánica en el reactor de oxidación biológica...</i>	<i>54</i>
8.4	IDENTIFICACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA POR EL ESPECTROFOTÓMETRO UV-VIS.....	55
	CONCLUSIONES.....	59
	RECOMENDACIONES PARA TRABAJO FUTURO	61
	BIBLIOGRAFÍA	63

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS LIXIVIADOS	4
TABLA 2.2. SISTEMAS DE OXIDACIÓN AVANZADA	11
TABLA 7.1. CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL LIXIVIADO CRUDO	35
TABLA 7.2. OXIDACIÓN QUÍMICA.....	36
TABLA 7.3. OXIDACIÓN QUÍMICA-BIS.....	37
TABLA 7.4. CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL LODO ACTIVADO	38
TABLA 7.5. REDUCCIÓN DE LA DQO DEL LIXIVIADO TRATADO POR OXIDACIÓN FENTON, AL APLICAR EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO.....	39
TABLA 8.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS LIXIVIADOS MADUROS EN EL MUNDO	45

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 6.1. UBICACIÓN DE LA ETAPA I DEL BORDO PONIENTE	27
FIGURA 6.2. ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	28
FIGURA 6.3. REACTOR DE VIDRIO PARA LA OXIDACIÓN QUÍMICA Y BIOLÓGICA.....	34
FIGURA 7.1. CURVA DE DEGRADACIÓN BIOLÓGICA CON LODOS ACTIVADOS.....	40
FIGURA 7.2. LIXIVIADO CRUDO, BARRIDO.....	41
FIGURA 7.3. OXIDACIÓN QUÍMICA	41
FIGURA 7.4. COMPARACIÓN DE LA OXIDACIÓN QUÍMICA Y DEL LIXIVIADO PURO.....	42
FIGURA 7.5. BIODEGRADABILIDAD VS DOSIS DE H_2O_2/Fe^{+2}	42
FIGURA 7.6. NITRÓGENO TOTAL VS DOSIS DE H_2O_2/Fe^{+2}	43
FIGURA 8.1. FORMACIÓN DE CO_2 Y HCO_3	48
FIGURA 8.2. COLOR REPRESENTATIVO DE LA OXIDACIÓN QUÍMICA	50
FIGURA 8.3. % DE REMOCIÓN DE DQO VS TIEMPO DE REACCIÓN	57

NOMENCLATURA

SH	Ácidos Húmicos y fúlvicos
POA	Procesos de Oxidación Avanzada
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno, 5 días
pH	Potencial de hidrógeno
N	Nitrógeno total
AGV	Ácidos Grasos Volátiles
UV-VIS	Espectrofotometría ultravioleta visible
UV	Radiación Ultravioleta
R·	Radicales orgánicos
RH	Substratos orgánicos

GLOSARIO

- Lixiviado: es el líquido que resulta de la percolación de agua de lluvia a través de los residuos [Renou *et al.*, 2008].
- Materia orgánica recalcitrante: materia que no es susceptible a una rápida biodegradación, está constituida de compuestos de origen natural y sintético e inhiben la biocenosis celular o son tóxicos para los microorganismos y tienden a acumularse en el ambiente [Bautista, 2006].
- Sustrato orgánico: compuestos orgánicos especialmente aquellos de alto peso molecular [Neyens *et al.*, 2003].
- Xenobioticos: compuestos químicos sintetizados por el hombre.
<http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/ContamAmbi.htm>
- Genotóxicos: compuestos o sustancias que pueden adherirse directamente al ADN o actuar indirectamente mediante la afectación de las enzimas involucradas en la replicación del ADN, causando en consecuencia mutaciones que pueden o no desembocar en un cáncer.
<http://www.greenfacts.org/es/glosario/ghi/genotoxico-genotoxicidad.htm>
- Mutagénicos: una sustancia o agente físico que altera de forma permanente el ADN de las células, causando mutaciones.
<http://www.greenfacts.org/es/glosario/mno/mutagen-mutagenico.htm>

- Disruptores endocrinos: son sustancias químicas persistentes (detergentes, pesticidas, dioxinas y furanos) que causan alteración en la homeostasis del sistema endocrino-reproductivo [Argemi *et al.*, 2005].
- Acido graso volátil: son compuestos con peso molecular menor a 120Da, estos constituyen la mayoría de la materia orgánica en el lixiviado y son fácilmente biodegradables [Kurniawan *et al.*, 2006].
- Sustancia húmica: es materia orgánica natural en descomposición que produce estructuras complejas gracias a la polimerización de ácidos orgánicos, ácidos carboxílicos y carbohidratos [Monje-Ramírez *et al.*, 2004].
- Ácido húmico y fúlvicos: son estructuras complejas formadas gracias a la polimerización de ácidos orgánicos, ácidos carboxílicos y carbohidratos [Monje-Ramírez *et al.*, 2004].
- Procesos de oxidación avanzada: procesos que generan radicales hidroxilo [Zhang *et al.*, 2005].

RESUMEN

En este trabajo se abordó lo referente al tratamiento de lixiviados provenientes del relleno sanitario “Bordo Poniente Fase I”. Los lixiviados contenidos en este relleno son una fuente de contaminación de cuerpos de aguas superficiales y subterráneas, los cuales pueden afectar la flora y fauna acuática cuando entran en contacto con estos ecosistemas. Los tratamientos para este tipo de lixiviados son diversos, y para poder decidir el método de purificación a elegir es necesario conocer factores imprescindibles como los climáticos, tipos de residuos confinados, su humedad, tiempo de permanencia de los residuos en el sitio de disposición final, entre otros. En el presente trabajo se optó por un tratamiento denominado Fenton (fisisicoquímico por oxidación), el cual será clave para continuar con un subsecuente tratamiento biológico. Se estableció la presencia de compuestos orgánicos recalcitrantes usando un espectrofotómetro UV-VIS, antes y después de someter al lixiviado a la oxidación química. Con el tratamiento Fenton se obtuvo una remoción de hasta el 92% de DQO, con un aumento de la biodegradabilidad del 80%, también se removieron contaminantes importantes como el nitrógeno, 74% y fósforo 100%. Después del tratamiento fisisicoquímico, el lixiviado oxidado químicamente se sometió a un tratamiento biológico (por lodos activados), la concentración de inóculo fue del 10% y se obtuvo una remoción de la DQO del 50%.

ABSTRACT

In this work, the problematic of leachate treatment obtained of landfill “Bordo Poniente Fase I” was studied. The leachates are wastes that have pollution potential for superficial aquatic ecosystems and groundwater ecosystems, and can produce negative impact on local flora and fauna. Different leachate treatment systems exists, and in order which to decide purification method has to be chosen choosing is necessary to know some factors such climatic, type of waste, dampness, permanency time of wastes in the landfill and others. In the present work, the Fenton treatment (physicochemical oxidation) was applied, this process will be the key to continue with a subsequent biological treatment. The organic recalcitrant compounds present in the leachate were determined used UV-VIS spectrophotometer, before and after of the Fenton process application. With the Fenton treatment, removal of 92% COD was obtained an increment of the biodegradability up to 80%, also pollutants such nitrogen and phosphorous were removed (74% and 100% respectively).

After the Fenton treatment, the leachate oxidized chemically was submitted to a biological treatment (for activated sludges). The inoculum concentration was of 10%; in these conditions approximately 50% of DQO were removed.

1 INTRODUCCIÓN

En el Distrito Federal y área conurbada se generan 23,523ton/día de residuos sólidos que son depositados en rellenos sanitarios y 12,612ton/día en sitios no controlados [INEGI, 2008]. Estos residuos en sus sitios de disposición sufren una transformación biológica y fisicoquímica generando biogás y lixiviados, siendo estos últimos los responsables de la contaminación de cuerpos de aguas superficiales y subterráneas, mayoritariamente [Robles, 2000].

Un lixiviado se define como el líquido que resulta de la percolación de agua a través de los residuos aunque algunos autores lo definen como aguas residuales altamente contaminadas [Gupta *et al.*, 2007].

Los lixiviados pueden llegar a los cuerpos de agua por medio del arrastre de la lluvia o cuando se infiltran en el subsuelo, afectando los ecosistemas acuáticos. Este hecho podría incrementar la concentración de materia orgánica particulada y disuelta en el agua y los sedimentos, causando un efecto en el balance de nutrientes y la calidad del recurso. Por otro lado, los compuestos xenobióticos presentes en los lixiviados pueden causar efectos mutagénicos y genotóxicos en la biota acuática (disrupción endocrina y problemas reproductivos en peces), estos efectos se pueden extender a los animales y humanos a través de la cadena alimenticia [Moreno, 2007; Sang *et al.*, 2006; Noaksson *et al.*, 2005].

José Perales en su artículo publicado en el diario “Cambio de Michoacán” reporta la fuga de lixiviados del área de composta perteneciente al relleno sanitario “Cerro Colorado”, en el municipio de Zamora en Michoacán y describe que estos lixiviados han causado la devastación forestal de 20 hectáreas de cultivo en uno de los ejidos pertenecientes a este municipio [Perales, 2007].

Es por esos motivos que los lixiviados representan el impacto negativo número uno de los sitios de disposición final, por lo que es necesario implementar un tratamiento que reduzca la cantidad de compuestos tóxicos y al mismo tiempo logre hacerlos más asimilables para el ecosistema, disminuyendo su impacto negativo.

El objetivo del presente trabajo fue aplicar un tratamiento a una muestra de lixiviado estabilizado por medio de un proceso físico-químico y uno biológico. La muestra de lixiviado se obtuvo del relleno sanitario Bordo Poniente, primera etapa, el objetivo es demostrar la posibilidad de purificar el efluente de la manera en que se produzca menos impactos negativos y si más degradación de los compuestos orgánicos recalcitrantes. En primera instancia podremos encontrar una breve descripción de la problemática de los lixiviados en el medio ambiente así como sus orígenes, características y los métodos de tratamiento más usuales para estos. También se adentrará al caso específico del tratamiento físico-químico denominado Fenton, se expondrá detalladamente la química de este y las diferentes formas en la que se puede emplear dentro del tren de tratamiento. De igual manera se expone los fundamentos del tratamiento biológico (lodos activados) y sus consideraciones en el tratamiento de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios.

Posteriormente encontraremos una breve descripción de la metodología empleada en el tratamiento de los lixiviados, esta incluye los pasos a seguir para la oxidación química (Fenton) y la biológica (lodos activados). Los análisis efectuados en el transcurso de estas dos oxidaciones fueron demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica, nitrógeno y fósforo totales.

Finalmente se analiza y discuten los resultados obtenidos en las oxidaciones fisicoquímicas y la biológica, se comparan los resultados obtenidos con los de otros autores, de igual forma se plasman las conclusiones obtenidas de este trabajo, las recomendaciones y el trabajo futuro en este tema.

2 ANTECEDENTES

2.1 CLASIFICACIÓN DEL LIXIVIADO

Los lixiviados se clasifican de acuerdo a su edad, en jóvenes, intermedios y maduros, en la tabla 2.1 se muestran las características generales de cada uno de ellos.

Tabla 2.1. Clasificación de los lixiviados

	Joven	Intermedios	Maduros
Edad (años)	<5	5-10	>10
pH	6.5	6.5-7.5	>7.5
DQO (mg/L)	>10,000	4,000-10,000	<4,000
DBO ₅ /DQO	>0.3	0.1-0.3	<0.1
Compuestos orgánicos	80% AGV	5-30% AGV + SH	SH
Metales pesados	Bajo-medio	No hay reporte	Bajo
Nitrógeno total (mg/L)	>4,000	>1,000	500-700

Fuente: Adaptación de la tabla 4 reportada en *Journal of Hazardous Materials*, 150(3), 468-493.

AGV: ácido graso volátil; SH: ácidos húmicos y fúlvicos.

Los ácidos grasos son de tipo saturado ($C_nH_{2n}O_2$) donde n varía de 2 a 7 [Robles, 2005].

2.2 COMPOSICIÓN DEL LIXIVIADO

La composición de los lixiviados es extremadamente variable debido a que sus características dependen de factores tales como, el tipo de residuos que se lixivian en el relleno sanitario y el tiempo de permanencia de los lixiviados; la cantidad que se forma de éstos dependen de la cantidad de agua que se percola a través de los residuos y la precipitación pluvial [Robles, 2005].

De manera general las sustancias que se pueden encontrar en los lixiviados pueden ser agrupadas en:

Fracción mineral.- Constituida principalmente de cloruros, hidrógeno-carbonatos, nitratos, iones amonio, sodio, potasio y de algunas sales metálicas. Las sales inorgánicas provienen de la mineralización bacteriana de los residuos.

Fracción orgánica fácilmente biodegradable.- Los ácidos grasos volátiles representan generalmente la mayor carga orgánica en el caso de sitios de disposición final jóvenes.

Fracción orgánica estabilizada.- Constituida principalmente de compuestos sintetizados por el hombre.

Algunos géneros de microorganismos que se pueden encontrar en los lixiviados son *Bacillus*, *Corynebacterium* y *Streptococcus sp.* Adicionalmente, se ha detectado la presencia de enterovirus y de bacterias fecales (Coliformes y Estreptococos) [Robles, 2005].

En cuanto al volumen de los lixiviados éste es siempre inferior a la cantidad total de agua introducida. La formación de lixiviados se lleva a cabo cuando el agua externa humedece los residuos sólidos, los cuales al alcanzar su máxima retención de agua origina los lixiviados. La capacidad de retención de agua varía generalmente de 0.3 a 0.4L/Kg de residuos secos. Un kilogramo de estos residuos puede absorber de 0.09 a 0.27L/Kg y en algunos casos hasta 0.65L/Kg [Robles, 2005].

También se ha determinado que la cantidad de lixiviados formados depende de la compactación de los residuos, de la siguiente forma:

Para los sitios con residuos muy compactados (con densidades mayores de 0.7ton/m³) generan de 15 a 25% de lixiviados del total de agua precipitada.

Para los sitios poco compactados (con densidades menores a 0.7ton/m³) generan de 25 a 50% de lixiviados [**Idem**].

2.3 FORMACIÓN DE LOS LIXIVIADOS

Es importante mencionar que la formación de lixiviados impacta una serie de fenómenos fisicoquímicos, que se mencionan a continuación: cambios de pH, el poder regulador (efecto buffer), la salinidad y el potencial óxido-reducción de la solución que percola a través de los residuos.

A nivel biológico se pueden llevar a cabo al mismo tiempo procesos aerobios y anaerobios, dependiendo de la disposición de oxígeno dentro del relleno sanitario donde están depositados los residuos. Los metabolitos producidos por los microorganismos reaccionan con los residuos para inducir fenómenos de disolución de minerales en medio ácido, estabilización de iones minerales en solución por efectos de complejación, precipitación de sulfuros y carbonatos, entre otros [**idem**].

Los mecanismos biológicos afectan la formación de lixiviados debido a efectos directos, como la generación de metabolitos solubles y gaseosos y por efectos indirectos, como los efectos sobre las condiciones del medio (pH), óxido-reducción, temperatura e influencias de estas condiciones del medio sobre la solubilidad de la materia sólida y la precipitación de compuestos disueltos. De igual forma las reacciones químicas y fisicoquímicas de metabolitos con el residuo o sus productos de lixiviación también afectan la formación de los lixiviados [**idem**].

La composición del lixiviado puede variar ampliamente con los sucesivos procesos aeróbicos, acetogénicos, metanogénicos y de estabilización. La relación que existe entre la edad del lixiviado y la composición de la materia orgánica puede ayudar a mejorar la identificación de tratamientos aplicables para este tipo de residuos [Renou *et al.*, 2008].

2.3.1 IMPORTANCIA DE LA MATERIA ORGÁNICA RECALCITRANTE

Los lixiviados estabilizados se caracterizan por tener altas concentraciones de materia orgánica recalcitrante. Una cantidad considerable de ésta, corresponde a las

sustancias húmicas, mientras que otra fracción pertenece a los compuestos sintéticos, como aromáticos, alifáticos, fenoles, compuestos alicíclicos (ácidos, alquilos, compuestos orgánicos con sustitución de nitrógeno y halógenos) y fosfatos esterificados [Monje-Ramírez *et al.*, 2004].

Las sustancias húmicas son sustancias orgánicas que resultan de la transformación química y microbiana de la materia orgánica. Estos compuestos tienen propiedades diferentes y su composición depende de su origen, sin embargo de manera general, se puede decir que las sustancias húmicas son especies químicas parecidas a los coloides y tienen propiedades de adsorción. La presencia de los grupos químicos (específicamente sustancias húmicas) contenidos en los lixiviados le confiere a éstos, capacidades de intercambio iónico, formación de complejos y procesos de oxidación-reducción. Ellos también contienen altas cantidades de radicales libres estables, los cuales puede reaccionar con sustancias bióticas y abióticas. Es por estos motivos que algunos autores sugieren que la presencia de sustancias húmicas inhiben la reacción Fenton, otros que no la afectan y otros reportan que dichas sustancia mejoran la eficiencia de oxidación [Lipczynska-Kochany *et al.*, 2008].

2.4 TRATAMIENTO PARA LOS LIXIVIADOS

Los tratamientos para lixiviados se pueden agrupar en tres grupos [Renou *et al.*, 2008]: transferencia, biodegradación y físico-químicos.

- Transferencia

Transferencia de lixiviados: Esta tecnología fue muy popular debido a su bajo costo de operación y mantenimiento, ésta consiste en recircular el lixiviado a través de los residuos sólidos urbanos contenidos en los rellenos sanitarios, para incrementar el contenido de humedad de los residuos, mejorar la distribución de nutrientes y enzimas, además de reducir el tiempo de estabilización o madures de los lixiviados, sin embargo se desconoce el impacto negativo que tiene la recirculación de estos, adicionalmente existen compuestos orgánicos inhibitorios de baja biodegradabilidad y metales pesados que reducen la eficiencia del tratamiento e incrementan la concentración de contaminantes del efluente.

La tecnología más representativa de éste tipo de tratamiento es el reciclado o recirculación de los lixiviados [Renou *et al.*, 2008].

- Biodegradación: procesos aerobios y anaerobios.

Son los más usados por sus características de alta efectividad y bajo costo. Se usan para remover altas concentraciones de DBO. La biodegradación es llevada a cabo por microorganismos, los cuales consumen los compuestos orgánicos hasta transformarlos en CO₂ y lodos, en condiciones aerobias y en biogás (mezcla de CO₂ y CH₄) en condiciones anaerobias. Este tratamiento se aplica para lixiviados jóvenes con biodegradabilidad alta (>0.5) [Renou y col., 2008] La presencia de compuestos refractarios limita la efectividad del tratamiento [Gogate y col., 2004].

Tratamiento aerobio: El tratamiento permite el abatimiento parcial de los contaminantes orgánicos biodegradables y también promueve la nitrificación del nitrógeno a amonio. En condiciones aerobias los procesos que pueden llevarse a cabo son: procesos de crecimiento de biomasa-suspendida: lagunas aireadas, procesos de lodos activados, reactor por lote y sistemas de crecimiento fijo: filtros percoladores, reactor de biopelícula de lecho móvil.

Tratamiento anaerobio: Este tratamiento se aplica para efluentes con alta carga orgánica, necesita poca energía y produce pocos sólidos. Este tratamiento trabaja mejor a 35°C. En condiciones anaerobias los procesos que pueden llevarse a cabo son: crecimiento de biomasa suspendida y crecimiento de biomasa fija [Renou *et al.*, 2008].

- Tratamientos físico-químicos

Los métodos físico-químicos más comunes son: oxidación química, adsorción, precipitación química, coagulación/floculación, sedimentación/flotación y separación de aire. Estos procesos incluyen la reducción de sólidos suspendidos, partículas coloidales, material de flotación, color, y compuestos tóxicos y generalmente son utilizados como pre-tratamiento de lixiviados o bien como post tratamiento para continuar su purificación [Renou *et al.*, 2008].

En este apartado resaltaremos la oxidación química, pues es la que se utilizará en el presente trabajo, por lo que a continuación describiremos algunas características importantes de ella.

Oxidación química: Este es el método más ampliamente utilizado en el tratamiento de efluentes que contienen compuestos orgánicos refractarios (p. ej. los lixiviados), estos tratamientos también pueden considerarse como procesos de oxidación avanzada (POA, por sus siglas en español), los cuales se definen como los procesos que generan radicales hidroxilo [Zhang *et al.*, 2005]. Los POA en los lixiviados estabilizados se utilizan para oxidar sustancias orgánicas, una alta oxidación puede llevar a los contaminantes orgánicos hasta CO₂ y H₂O y además mejorar la biodegradabilidad de los contaminantes orgánicos recalcitrantes [Renou *et al.*, 2008]. Los sistemas típicos de oxidación avanzada se presentan en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Sistemas de oxidación avanzada

Sistemas homogéneos	Sistemas heterogéneos	Sistemas homogéneos	Sistemas heterogéneos
Con irradiación	Con irradiación	Sin irradiación	Sin irradiación
O ₃ /ultravioleta UV	TiO ₂ /O ₂ /UV	O ₃ /H ₂ O ₂	Electro-Fenton
H ₂ O ₂ /UV	TiO ₂ /H ₂ O ₂ /UV	O ₃ /OH-	No disponible
Carga eléctrica	No disponible	H ₂ O ₂ /Fe ⁺² (Fenton)	No disponible
Ultrasonido	No disponible		
H ₂ O ₂ /ultrasonido	No disponible		
UV/ultrasonido	No disponible		
H ₂ O ₂ /Fe ⁺² /UV (foto-Fenton)	No disponible		

Algunos problemas encontrados en los procesos de oxidación avanzada (POA) anteriores se resumen a continuación [Wiszniewski *et al.*, 2006]:

O₃ y O₃/H₂O₂ Los lixiviados deben ser nitrificados para evitar el consumo de oxidantes por la oxidación de amonio.

Para mejores resultados se requiere elevar el pH (pH>8) y bajar la alcalinidad.

Se adiciona H₂O₂ después de la oxidación de compuestos altamente reactivos con O₃ únicamente.

O₃/UV- Alto consumo de energía por las lámparas de UV

O₃/UV/H₂O₂ Pobre transmisión de luz UV en el lixiviado

Concentración de iones carbonato (<1000ppm es requerido)

pH<8

UV/H₂O₂ Alto consumo de energía por las lámparas de UV

Pobre transmisión de la luz UV en el lixiviado, se requiere pH ácido (2-3).

Reactivo Fenton Producción de lodos

Alta concentración remanente de cloruros o de sulfatos

Bajo pH (cercano a 3)

Los tratamientos mencionados anteriormente son los métodos convencionales de tratamientos sin embargo en años recientes los procesos de membrana han tomado auge como alternativas altamente eficientes. Los tratamientos que pueden utilizarse son: microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa [Kurniawan *et al.*, 2006; Renou *et al.*, 2008].

2.5 OXIDACIÓN QUÍMICA. PROCESO FENTON

En este trabajo se utilizó el método de oxidación conocido como Fenton, el cual consiste en un proceso de oxidación química, el cual se considera proceso de oxidación avanzada (POA, por sus siglas en español), este método se desarrolló hace 100 años, sin embargo su aplicación para la remoción de contaminantes orgánicos fue a partir de los años 60's. Este método consiste en aplicar una mezcla de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y hierro (Fe^{+2}), donde el ion ferroso inicia y cataliza la descomposición del H_2O_2 , produciendo los radicales hidroxilos altamente reactivos de acuerdo a la reacción [Neyens *et al.*, 2003]:



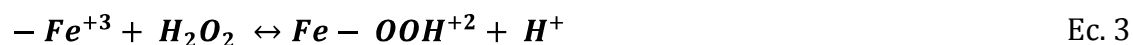
$$K_1=70M^{-1}s^{-1}$$

Esta generación de radicales involucra una compleja secuencia de reacciones en solución acuosa, generalmente ácida, la cual termina con la reacción:



$$K_2=3.2*10^8M^{-1}s^{-1}$$

Los nuevos iones férricos formados en la Ec. 2 pueden seguir catalizando el H₂O₂, descomponiéndolo en agua y oxígeno. Los iones férricos, ferrosos y los radicales son formados en las reacciones 3-7.



$$K_3= 0.001 - 0.01M^{-1}s^{-1}$$



La reacción de Fe⁺², Fe⁺³ con el H₂O₂ es conocido como la reacción Fenton y comprende la ecuación 3 y 4.



$$K_5 = 1.3*10^6M^{-1}s^{-1}, (\text{pH} = 3)$$



$$K_6 = 1.2*10^6M^{-1}s^{-1}, (\text{pH} = 3)$$



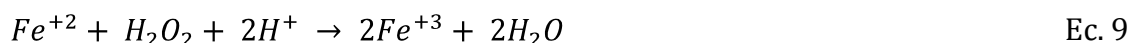
$$K_7 = 3.3*10^7M^{-1}s^{-1}$$

Los radicales hidroxilos pueden oxidar substratos orgánicos (RH) por abstracción de protones produciendo radicales orgánicos R·, los cuales son altamente reactivos y pueden ser oxidados más adelante.



Si las concentraciones de los reactantes no son limitadas, los orgánicos pueden ser completamente destoxificados hasta alcanzar la total conversión a CO₂, H₂O y en el caso de orgánicos sustituidos, sales inorgánicas si el tratamiento es continuo.

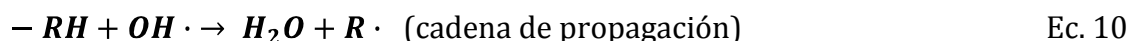
Simplificando la reacción química Fenton (Ec. 1) y considerando la disociación de ésta en agua.



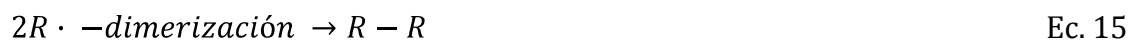
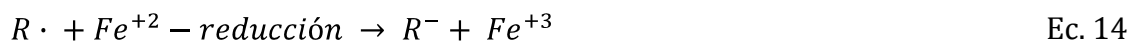
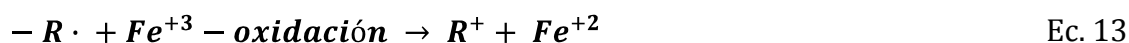
En esta ecuación se hace evidente la presencia de H⁺ para la descomposición de H₂O₂, indicando la necesidad de un ambiente ácido para producir la máxima cantidad de radicales hidroxilo. Estudios previos del método Fenton han demostrado que el pH=3 es generalmente el óptimo para la oxidación [ibid]

En la presencia de substratos orgánicos (RH), exceso del ion ferroso y bajo pH, los radicales hidroxilos pueden adherirse a anillos aromáticos o heterocíclicos (también a las ligaduras no saturadas de alquenos y alquinos).

Éstos radicales también pueden sustraer un átomo de hidrógeno, iniciando una oxidación con radicales en la cadena de reacción.

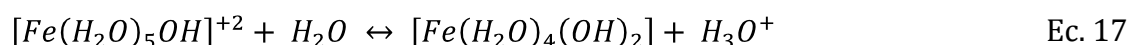
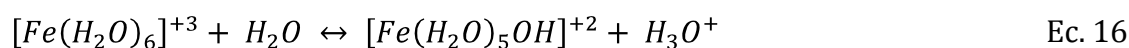


Los radicales libres orgánicos producidos en la ecuación 10, pueden ser oxidados por el Fe^{+3} , éste se redujo por el Fe^{+2} , o dimerizado de acuerdo con las siguientes reacciones.

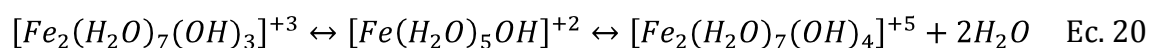
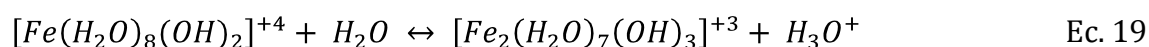
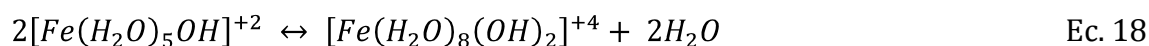


La secuencia de reacciones 1, 2, 10 y 13 constituyen las reacciones aceptadas como “cadena del reactivo Fenton”.

Los iones ferrosos generados en las reacciones redox de las Ec. 8 y 9 reaccionan con los iones hidróxido para formar complejos hidroxio férricos de acuerdo a:



Con pH de 3 y 7, los complejos anteriores se convierten en:



Las Ec. 18, 19 y 20, son importantes para que puedan coagular los reactivos Fenton.

Los sólidos suspendidos disueltos son capturados y precipitados.

Se ha reportado que grandes cantidades de pequeños flóculos son consistentemente observados en los pasos de oxidación Fenton. Estos flóculos sedimentan después de mucho tiempo, a veces necesitan hasta 8 horas, por lo que es necesaria la coagulación química usando polímeros.

El reactivo Fenton tiene diferentes funciones en el tratamiento dependiendo de la proporción H_2O_2/Fe^{+2} . Cuando la cantidad de Fe^{+2} empleado excede la cantidad de H_2O_2 el tratamiento tiende a tener el efecto de coagulación química $\frac{Fe^{+2}}{H_2O_2} > 1$. Cuando es la inversa, el tratamiento tiende a tener el efecto de oxidación química $\frac{Fe^{+2}}{H_2O_2} < 1$.

La Ec. 13 compite con la ecuación de terminación 2 y con la ecuación de propagación 10. Esta competencia por los radicales hidroxilos entre Fe^{+2} , RH y Fe^{+3} lleva a la descomposición no productiva de H_2O_2 y limita los compuestos orgánicos hidroxilatados (hidroxilados oxidados). Además, la proporción estequiométrica entre el Fe^{+2} , RH y Fe^{+3} tiene que ser establecida para maximizar la eficacia del proceso de degradación.

Se considera que las características clave del sistema Fenton son las condiciones del reactivo, ejemplo: $[Fe^{+2}]$, $[Fe^{+3}]$, $[H_2O_2]$ y las características de la reacción (pH, temperatura y la cantidad de constituyentes orgánicos e inorgánicos), ya que estos parámetros determinan la eficiencia de la reacción, es importante comprender la relación entre estos parámetros considerando la producción y consumo de radicales hidroxilo [Neyens *et al.*, 2003].

Una característica importante en el Fenton es el costo del H₂O₂, este es el mayor gasto en el tratamiento, por lo que se necesita diseñar procesos que utilicen el mínimo de peróxido hasta que se alcance la reducción de contaminantes deseados, además la alta concentración de H₂O₂ inhibe a los microorganismos [Lipczynska-Kochany *et al.*, 2008].

Por otro lado también se debe tener cuidado con el agua a tratar dado que, si contiene cantidades significativas de aniones, incluye bicarbonato (238+/- 2mg/L), cloruro y fosfato (9.8+/-0.5mg/L), estos actuaran como agentes limpiadores de OH· e inhibirán la reacción Fenton. En aguas reales es necesario agregar excesos de H₂O₂, la dosis óptima se determina experimentalmente [Deng *et al.*, 2006; Lipczynska-Kochany *et al.*, 2008].

Existen diferentes configuraciones para el tratamiento de lixiviados utilizando el método Fenton, de acuerdo a Deng *et al.*, 2006, agrupa estas configuraciones en cuatro: la primera consiste en utilizar el Fenton únicamente, la segunda utiliza el Fenton antes de un tratamiento biológico, en el tercero se emplea el Fenton después de un tratamiento físico-químico, seguido ocasionalmente de uno biológico y la cuarta configuración utiliza un tratamiento biológico después el Fenton y ocasionalmente uno físico-químico o un tratamiento biológico.

Para lixiviados maduros los arreglos que se estilan son la primera y segunda configuración, la finalidad de ellas es reducir la DQO e incrementar la biodegradabilidad del lixiviado. La tercera y cuarta configuración, se utilizan para lixiviados jóvenes o intermedios pues ellos contienen compuestos orgánicos

fácilmente biodegradables, los cuales pueden removerse con procesos físico-químicos como la coagulación o tratamientos biológicos [Deng *et al.*, 2006].

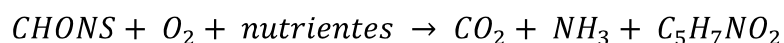
2.6 OXIDACIÓN BIOLÓGICA

Los procesos de tratamiento biológico consisten en controlar el ambiente requerido para un crecimiento óptimo de los microorganismos involucrados [Wiszniewski *et al.*, 2006].

En la oxidación biológica generalmente se utilizan lodos activados para complementar la reducción de DQO en los lixiviados [Deng *et al.*, 2006]. En principio los lodos activados se vierten en un reactor que contiene a los microorganismos a los cuales, se les suministra constantemente materia orgánica y oxígeno [Wiszniewski *et al.*, 2006]. Los microorganismos consumen la materia orgánica y la transforman en condiciones aerobias en biomasa nueva, CO₂, agua y minerales.

Las reacciones que ocurren en los procesos de lodos activados se resumen como sigue:

1. Sorción de orgánicos solubles, coloidales y suspendidos en los flóculos de los lodos.
2. Biodegradación (oxidación) de los orgánicos resultando en la obtención de productos finales (CO₂, H₂O y minerales) y la síntesis de nueva biomasa microbiana.



Donde:

CHONS = materia orgánica

$C_5H_7NO_2$ = nuevas bacterias

3. Ingestión de bacterias y la posibilidad de otra materia suspendida por protozoarios u otros depredadores.
4. Oxidación de amonio a nitritos y adicionalmente a nitratos por la nitrificación de bacterias.

En momentos de insuficiente suministro de energía (lixiviado), la oxidación de células de reserva (internas y también externas), resultan en la mineralización de lodos.

Ventajas de los lodos activados

- Se adaptan considerando cualquier tamaño de comunidad (excepto para muy pequeñas).
- Buena eliminación de los parámetros como sólidos suspendidos, DQO, DBO₅, N por nitrificación y desnitrificación.
- También se usan para una simultánea defosfatación.

Desventajas del uso de los lodos activados como método de oxidación biológica:

- Relativamente altos costos de capital.
- Alto consumo de energía.
- Requiere personal capacitado y monitoreo regular.
- Sensible a cargas hidráulicas.

- Dificultad para controlar la sedimentación de lodos.
- Alta producción de lodos residuales.

Winkler *et al.*, 1995, establece que los lodos activados están integrados por varios componentes que se pueden clasificar como microorganismos viables, organismos no viables o moribundos, organismos muertos, materia orgánica inerte y materia orgánica biodegradable. Los organismos viables son los que utilizan los nutrientes orgánicos para producir nuevos organismos o biomasa, organismos no viables son los que utilizan bioquímicamente los nutrientes pero no producen nuevos organismos y la materia orgánica inerte o no biodegradable puede incluir sustancias originalmente presentes en los residuos de alimentación y el residuo de los organismos descompuestos.

Los tratamientos biológicos son recomendados para disminuir los costos de tratamiento de oxidación avanzada [Wiszniewski *et al.*, 2006]. Estos métodos funcionan a partir de células vivas, las cuales generalmente son suministradas de manera externa.

3 JUSTIFICACIÓN

La materia orgánica recalcitrante contenida en los lixiviados maduros tiene compuestos que inhiben la biocenosis celular o que son tóxicos para los microorganismos además de que tienden a bioacumularse en el ambiente [Monje-Ramírez *et al.*, 2004]. Es por ello que los lixiviados tienden a causar impactos negativos en la biota acuática afectando el balance de nutrientes y causando efectos mutagénicos y genotóxicos [Noaksson *et al.*, 2005; Sang *et al.*, 2006]. Cuando estos lixiviados entran en contacto con la superficie terrestre tienden a causar devastación forestal contribuyendo también a la erosión de la misma [Perales, 2007].

Por lo antes mencionado, es necesario implementar uno o varios tratamientos que reduzcan la cantidad de compuestos orgánicos recalcitrantes y al mismo tiempo logren hacerlos más asimilables para el ecosistema, disminuyendo su impacto negativo.

El lixiviado que se trata en este proyecto es maduro (edad > 10 años), por lo que se recomienda utilizar un tratamiento oxidativo químico con hierro y peróxido de hidrógeno (Fenton) el cual es uno de los más viables por su economía y facilidad de operación comparados con otros tratamientos existentes [Zhang *et al.*, 2006]. El método Fenton es un proceso de oxidación avanzada y es efectivo para remover los compuestos orgánicos recalcitrantes sin embargo para obtener una purificación total

del lixiviado es necesario integrar varios métodos para su tratamiento [Wiszniewski et al., 2006]. López y col. (2004) afirman que los tratamientos biológicos se utilizan eficientemente después del Fenton dado que la oxidación química mejora la biodegradabilidad de éste. El tratamiento microbiológico con lodos activados es capaz de efectuar esta remoción después de aplicar la oxidación con hierro y peróxido de hidrógeno además reducirá los costos de operación del método Fenton [Wiszniewski et al., 2006].

El aplicar estos tratamientos a los lixiviados también permite cumplir con la legislación mexicana, reduciendo los niveles máximos permisibles de descarga de contaminantes a cuerpos receptores NOM-001-SEMARNAT-1996, al mismo tiempo se cumple con lo estipulado en el Art. 41, Capítulo I, Título 5, de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, que establece que los generadores de residuos peligrosos y los gestores de este tipo de residuos, deberán manejarlos de manera segura y ambientalmente adecuada conforme a los términos señalados en esta ley.

4 HIPÓTESIS

La oxidación química con el método Fenton removerá la mayor parte de los compuestos orgánicos recalcitrantes e incrementará la biodegradabilidad del lixiviado maduro, el proceso oxidativo biológico disminuirá la cantidad de compuestos orgánicos de bajo peso molecular remanentes en el efluente acuoso resultado de la oxidación química.

5 OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL

Reducir la cantidad de compuestos orgánicos recalcitrantes presentes en un lixiviado maduro por medio de tratamientos de oxidación química y biológica.

5.1.1 OBJETIVOS PARTICULARES

- Recolectar una muestra de un lixiviado maduro proveniente de residuos sólidos urbanos y determinar su contenido de materia orgánica (DQO y DBO₅), pH, conductividad eléctrica, nitrógeno y fósforo total.
- Determinar la presencia de compuestos orgánicos recalcitrantes en el lixiviado por espectrofotometría uv-vis, antes y después de los tratamientos de oxidación.
- Aplicar el método de oxidación química al lixiviado maduro con hierro y peróxido de hidrógeno (Fenton).
- Aplicar un método de oxidación biológica utilizando lodos activados provenientes de una planta de tratamiento de agua residual industrial, en condiciones aerobias.

- Cuantificar los compuestos orgánicos, nitrógeno y fósforo total, pH, conductividad eléctrica y materia orgánica (DBO₅ y DQO) antes y después de aplicar la oxidación química y cuantificar la DQO antes y después de aplicar la oxidación biológica (lodos activados).

6 MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 OBTENCIÓN DEL LIXIVIADO

El lixiviado se obtuvo del relleno sanitario del “Bordo Poniente”, ubicado en el antiguo lago de Texcoco. La muestra se obtuvo del cárcamo tres, correspondiente a la etapa 1. La estación del año donde se recolectó la muestra fue en primavera específicamente en el mes de mayo del 2008. De acuerdo al sistema meteorológico nacional las condiciones climáticas fueron: temperatura máxima de 26.9°C y una precipitación media de 57.3mm. La ubicación de la etapa I del Bordo Poniente se puede observar en la figura número 6.1 [CNA, 2010; Bárcenas *et al.*, 1998].

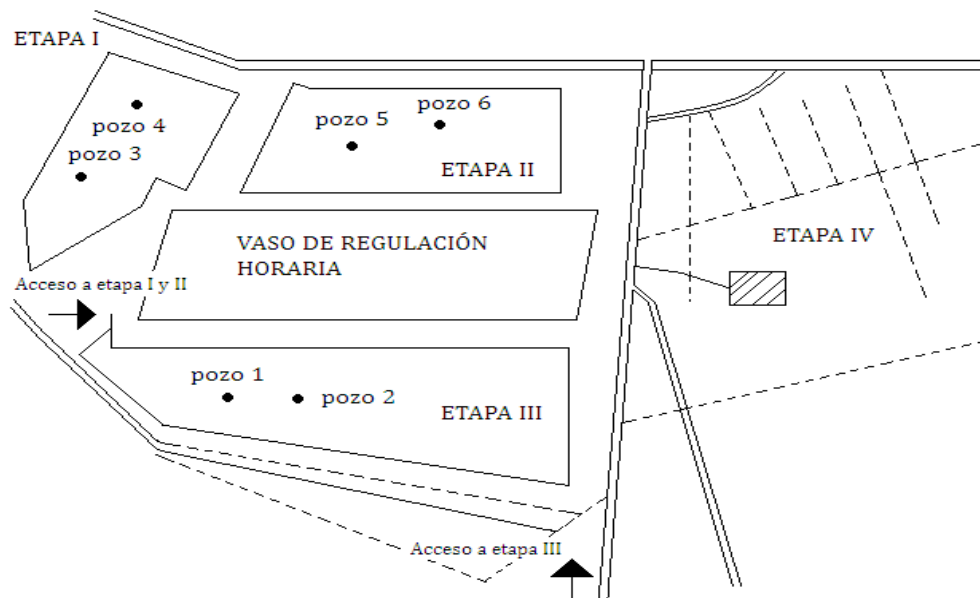


Figura 6.1. Ubicación de la etapa I del Bordo Poniente

En la figura 6.2 se muestra la metodología que se empleó en este proyecto.

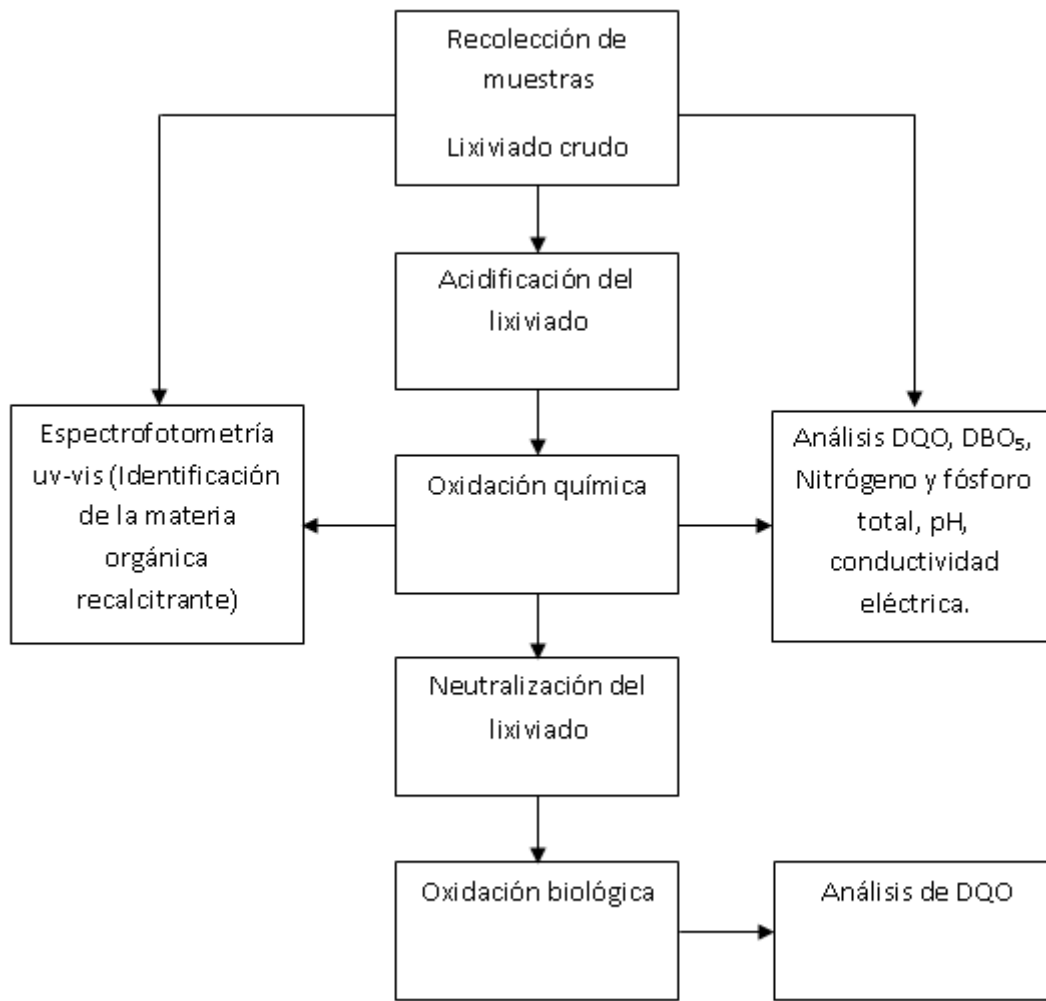


Figura 6.2. Esquema de la metodología experimental

Cabe mencionar que el lixiviado se recolectó en recipientes nuevos de polietileno, éstos se mantuvieron en refrigeración a 4°C y su contenido se acidificó a un pH 3, para su análisis posterior. La cantidad de lixiviado recolectado fue de 16 litros.

6.2 CARACTERIZACIÓN DEL LIXIVIADO

Se determinaron los parámetros de pH, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), nitrógeno total, fósforo total y conductividad eléctrica.

Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO): Este parámetro se determinó de acuerdo al método 8,000 de HACH por reflujo cerrado para DQO con rango de 0-1,500ppm, la cuantificación de este parámetro se determinó agregando 2ml de una dilución de lixiviado crudo (1mL de lixiviado + 9mL de agua) al tubo de ensaye HACH que contiene una digestión acida de mercurio (para el blanco se utilizó agua destilada), este tubo se cerró y se homogenizó cuidadosamente, después se sometió a un digestor a una temperatura de 150°C por un periodo de 2 horas, terminado este tiempo el tubo se enfrió a temperatura ambiente y a la solución resultante se le midió la DQO en mg/L con ayuda del espectrofotómetro 5,000 marca HACH, serie 12,342 y utilizando el programa 435 COD HR.

Determinación de fósforo total: Se realizó de acuerdo al método 10,127 de HACH, con rango de 1-100mg/L. Para la determinación del blanco se agregó 5mL de agua desionizada a un tubo de ensaye HACH, el cual contenía una solución alcalina, en otro tubo idéntico se agregó 5ml de una dilución de lixiviado (1ml de lixiviado crudo + 9mL de agua), adicionalmente a los dos tubos se agregó persulfato de potasio, se taparon los tubos y se agitaron hasta disolver los sólidos, para inmediatamente someterlos a digestión por 30 minutos a 150°C. Una vez terminada la digestión, los tubos se

enfriaron a temperatura ambiente y después se agregó 2mL de NaOH 1.54N, se taparon los tubos y se homogenizo la solución. Posteriormente se agregó 0.5mL de molibdovanadato de potasio, se taparon los tubos y se homogenizaron, para colocarlos nuevamente en el digestor por 7 minutos a 150°C. A la solución resultante se le midió el fosforo total en mg/L con un espectrofotómetro 5,000 marca HACH, serie 12,342, el cual utiliza el programa 542 P total HR TNT.

Determinación de nitrógeno total: Se realizó de acuerdo al método 10,072 de HACH, con rango de 10-150mg/L. Se prepararon 2 muestras, la primera, una muestra blanco, la cual se preparó con persulfato de potasio y 0.5mL de agua desionizada y la segunda, consistió de 0.5mL de una dilución de lixiviado (1mL de lixiviado crudo + 9mL de agua), se taparon los tubos, agitaron vigorosamente, colocándose en el digestor por 30 minutos a 105°C. Una vez terminado este tiempo, se enfriaron a temperatura ambiente para después adicionarles el reactivo A de HACH y agitar por 15 segundos. Los tubos se colocaron nuevamente en el digestor a 105°C por 3 minutos e inmediatamente después se les adicionó el reactivo B de HACH. Se agitaron nuevamente por 15 segundos y se colocaron nuevamente dentro del digestor por 2 minutos más a 105°C. Finalmente se tomaron 2mL de cada tubo de la digestión del paso anterior y se colocaron en otro tubo para digestión HACH denominado C, la solución se homogenizó y estos tubos se colocaron en el digestor por 5 minutos a 105°C, a la solución resultante se le midió el nitrógeno total en mg/L con ayuda del espectrofotómetro marca HACH, serie 12,342 y utilizando el programa 394 N total HR TNT.

Determinación del pH: Este se determinó con un potenciómetro marca Mettler Toledo, modelo 1229435663. El procedimiento que se siguió fue: primero la calibración del equipo y posteriormente la introducción de las celdas del potenciómetro para medir el potencial de hidrógeno de la muestra directamente. El lixiviado crudo se sometió a esta medición y también el líquido acuoso resultante de la oxidación química y biológica.

Determinación de conductividad eléctrica: se midió con el equipo OAKTON, modelo waterproof pc10, el equipo permite medir la conductividad eléctrica de manera directa, por lo que el lixiviado crudo y el líquido acuoso resultante de la oxidación química y biológica, se sometieron a esta medición sin tratamientos o análisis previos.

Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅): esta determinación se llevo acabo de acuerdo a la norma NMX-028-ECOL-1993. A una cantidad de agua destilada se le agregó nutrimentos y oxígeno, a está se le denomina agua de dilución. El agua de dilución es la principal fuente de energía para los microorganismos por lo que en ella se deposita una cantidad representativa del lixiviado (para la caracterización inicial se utilizó el 1% del lixiviado) y se sometió a un periodo de incubación de 5 días. El agua de dilución se sometió a pruebas de determinación de oxígeno disuelto al inicio y al término del periodo de incubación con y sin muestra de lixiviado. La ecuación para determinar la DBO₅ en mg/L es:

$$DBO_5 = \frac{(OD_I - OD_F) \text{ mg/L}}{\% \text{ dilución, expresado en decimales}}$$

Determinación de materia orgánica recalcitrante por espectroscopia uv-vis: el espectro uv-vis, se utiliza como indicador de la presencia de materia orgánica recalcitrante la cual tiene alto peso molecular. El lixiviado crudo se sometió a un barrido espectrofotométrico de 190 a 700nm, así como el lixiviado oxidado con el Fenton. El blanco que se utilizó fue agua destilada para ambos casos [Bautista, 2005]. El espectrofotómetro que se utilizó fue marca HACH, serie 12,342.

6.3 OXIDACIÓN QUÍMICA (FENTON)

Se utilizó el método descrito en López *et al.*, 2004. Se evaluaron diferentes proporciones de H_2O_2 y Fe^{+2} , la solución de peróxido que se empleó fue marca Baker con una concentración del 22.68%, esta concentración se corroboró por el método iodométrico. Las proporciones de Fe^{+2} que se utilizaron fueron de 0.0445mol/L, 0.0296mol/L, 0.0222mol/L, 0.0178mol/L, 0.0148mol/L, 0.0111mol/L y 0.0089mol/L, en forma de $FeSO_4$. Las pruebas para determinar la dosis óptima se realizaron en matraces Erlenmeyer de 100mL, en donde se colocaron 100mL de lixiviado crudo previamente acidificado con H_2SO_4 concentrado hasta llegar a un pH=3, al lixiviado se le agregó la dosis de Fe^{+2} y se agitó a 120rpm por 1 minuto. Posteriormente se redujeron las revoluciones a 30rpm, la oxidación se efectuó por un periodo de 3 horas. Las pruebas fueron realizadas por triplicado. El peróxido de hidrógeno fue adicionado lentamente en un lapso de 90 minutos. La temperatura inicial del lixiviado estuvo en un rango de 8-10°C.

Después de la oxidación química (método Fenton), se caracterizó el líquido acuoso resultante de la oxidación, los parámetros medidos fueron DQO, DBO₅, nitrógeno y fósforo total, pH y conductividad eléctrica. Las pruebas fueron realizadas por triplicado.

6.4 OXIDACIÓN BIOLÓGICA

Para ésta oxidación se utilizaron lodos activados provenientes de la planta de tratamiento “San Juan Ixhuatepec, S. U.” esta planta trata agua de origen industrial y doméstica. A este lodo se le cuantificaron los parámetros de DQO, DBO₅, nitrógeno y fósforo total, pH y conductividad eléctrica por triplicado.

La dosis óptima del lodo, para el tratamiento biológico, se determinó agregando 0.1, 1, 5, 10 y 20% de lodo activado a 100mL de lixiviado oxidado químicamente contenidos en matraces erlenmeyer. El tiempo de oxidación biológica fue de 16 días y se tomaron muestras del contenido de cada matraz cada 4 días para evaluar el contenido de DQO siguiendo el método descrito anteriormente. Una vez determinada la dosis de lodo óptima ésta se utilizó para continuar la destoxificación del lixiviado oxidado químicamente por el método Fenton, después de ajustar el pH hasta 7-8. Para esta etapa se utilizó un reactor de vidrio de volumen total de 1.7 litros, el cual posee una mampara fija que lo divide en dos secciones la primera es una cámara de aireación y la segunda de sedimentación (ver figura 6.3). La aireación es suministrada a través de burbujas producidas por una piedra porosa ubicada en el fondo del reactor. La agitación provocada por las burbujas de aire permite mantener el licor en estado de mezcla completa [Borzacconi *et al.*, 2009]. La cantidad de oxígeno suministrada fue de

200mL/min. Se realizaron muestreos del contenido del reactor para determinar la reducción de la DQO diariamente por 5 días, estos análisis se realizaron por triplicado.

Después de la oxidación biológica se determino la DQO, de acuerdo al procedimiento descrito anteriormente para este parámetro, las pruebas fueron realizadas por triplicado.

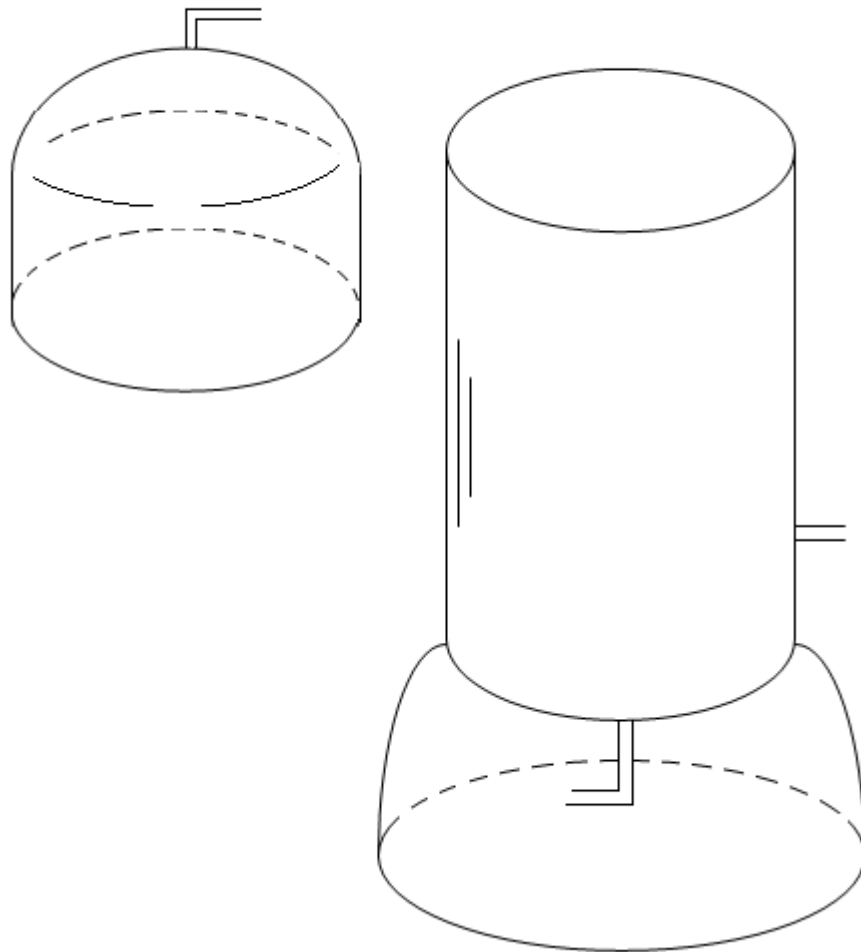


Figura 6.3. Reactor de vidrio para la oxidación química y biológica

7 RESULTADOS

7.1 CARACTERIZACIÓN DEL LIXIVIADO

Los resultados de la caracterización del lixiviado recolectado en Bordo Poniente I etapa se muestran en la tabla número 7.1.

Tabla 7.1. Caracterización inicial del lixiviado crudo

Parámetro	Concentración
pH	8.14
DQO (mg/L)	4,156.15
DBO ₅ (mg/L)	398.51
Conductividad (μS/cm)	466
Fósforo total (mg/L)	131
Nitrógeno total (mg/L)	1,533.46
Biodegradabilidad	0.1

Como puede observarse en la tabla 7.1, la biodegradabilidad del lixiviado es de 0.1, valor que nos permite corroborar su estabilidad y grado de madurez así como su posible composición. Esta biodegradabilidad es la característica más importante a evaluar y la que se aumentará en este trabajo.

7.2 OXIDACIÓN QUÍMICA DEL LIXIVIADO (PROCESO FENTON)

El lixiviado maduro de Bordo Poniente fue tratado con 22.63g de H_2O_2 , y 0.4940g de Fe^{+2} suministrado como $FeSO_4$, la remoción máxima obtenida fue de 92% en términos de DQO, con una biodegradabilidad de 0.8. Los resultados de la oxidación química con diferentes dosis H_2O_2/Fe^{+2} se muestran en la tabla 7.2.

Tabla 7.2. Oxidación química

H_2O_2 (g)	Fe^{+2} (g)	DQO (mg/L)	Fe^{+2}/H_2O_2	DBO ₅ (mg/L)	DBO ₅ /DQO	P (mg/L)	N (mg/L)	$H_2O_2^*$ (%)
22.63	1.2360	696	0.054	277	0.4	0	640	0.633
22.63	0.8217	556	0.036	317	0.6	0	710	0.433
22.63	0.6175	352	0.027	203	0.6	0	406	0.466
22.63	0.4940	322	0.021	243	0.8	0	499	0.366
22.63	0.4124	660	0.018	247	0.4	0	577	0.566
22.63	0.3093	640	0.013	230	0.4	0	589	0.266
22.63	0.2474	648	0.010	253	0.4	0	583	0.9

El $H_2O_2^*$ que se presenta en la tabla es el residual y se determinó por el método iodométrico.

Como la reacción Fenton es exotérmica, en este trabajo se decidió agregar el H_2O_2 de manera paulatina, la reacción comenzó con una temperatura que oscila entre los 8 y 10°C, a medida que continuó la adición de H_2O_2 la temperatura aumento hasta los 36°C, sin embargo, cuando terminó el periodo de oxidación (3 horas) ésta disminuyó

hasta los 22-33°C, y continuo disminuyendo a medida que continuaba la descomposición. La temperatura al inicio de la oxidación Fenton y al término de ésta se presenta en la tabla 7.3.

Tabla 7.3. Oxidación química-bis

H₂O₂ (g)	Fe⁺² (g)	Fe⁺²/H₂O₂	DQO* (%)	N* (%)	T°C inicial	T°C final	pH inicial	pH final
22.63	1.2360	0.054	84	58	10.5	22.4	2.951	2.476
22.63	0.8217	0.036	86	54	10.8	32.5	2.951	2.255
22.63	0.6175	0.027	92	74	10.4	23.9	2.973	2.439
22.63	0.4940	0.021	92	68	10.5	32.3	2.951	2.509
22.63	0.4124	0.018	86	62	10.2	32.8	2.951	2.393
22.63	0.3093	0.013	85	62	8.2	28.2	2.973	2.397
22.63	0.2474	0.010	85	62	8.3	28	2.973	2.442

DQO* y N*, representan las eficiencias de remoción en %.

Una característica importante en la oxidación química es el suministro del H₂O₂ y del Fe⁺², en este trabajo se adiciono el Fe⁺² en un solo paso, mientras que el H₂O₂, fue adicionado gota a gota en un periodo de 90 minutos.

7.3 OXIDACIÓN BIOLÓGICA DEL LIXIVIADO PRE-TRATADO

Primeramente se caracterizó el lodo activado para la oxidación biológica, éste proviene de una planta de tratamiento de aguas residuales denominada Planta de

tratamiento de aguas residuales San Juan Ixhuatepec, Sociedad de Usuarios. El agua de tratamiento de esta planta es una mezcla de aguas industriales y aguas de origen doméstico. Los resultados de la caracterización inicial se muestran en la tabla 7.4.

De éstos resultados podemos resaltar los correspondientes a la biodegradabilidad, en donde podemos observar su valor superior a 1 y los valores de conductividad eléctrica de 444 μ S/cm.

Tabla 7.4. Caracterización inicial del lodo activado

Parámetro	Concentración
pH	7.057
DQO (mg/L)	210
DBO ₅ (mg/L)	314
Conductividad (μ S/cm)	444
Fósforo total (mg/L)	486
Nitrógeno total (mg/L)	300.27
Biodegradabilidad	1.5

7.3.1 DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA EN EL REACTOR DE OXIDACIÓN

BIOLÓGICA

Para la oxidación biológica se utilizaron diferentes concentraciones de lodos activados (0.1, 1, 5, 10 y 20%), posteriormente se sometieron a incubación 16 días, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 7.5.

Tabla 7.5. Reducción de la DQO del lixiviado tratado por oxidación Fenton, al aplicar el tratamiento biológico

Concentración de lodo (%)	DQO mg/L				
	Día 0	Día 4	Día 8	Día 12	Día 16
0.1	410	317	358	314	222
1	590	532	514	425	372
5	570	507	416	418	334
10	860	661	457	641	236
20	1,220	867	701	233	513

De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla anterior, la concentración que se utilizó en el reactor para probar el tren de tratamiento fue de 10%, con esta concentración se obtuvo una remoción de 73%, para éste experimento, en términos de DQO.

Una vez determinada la dosis óptima de lodos activados (10%), se sometió el lixiviado crudo al tren de tratamiento oxidación química-oxidación biológica, la DQO del lixiviado crudo fue de 4,156mg/L, el lixiviado oxidado químicamente obtuvo una DQO de 1,400mg/L y el valor de la DQO cuando se agregó el lodo al lixiviado oxidado químicamente fue de 3,046.6mg/L, la oxidación biológica se mantuvo por un periodo de 5 días obteniendo una eficiencia de remoción de 50% en términos de DQO. Estos resultados se muestran en la figura 7.1.

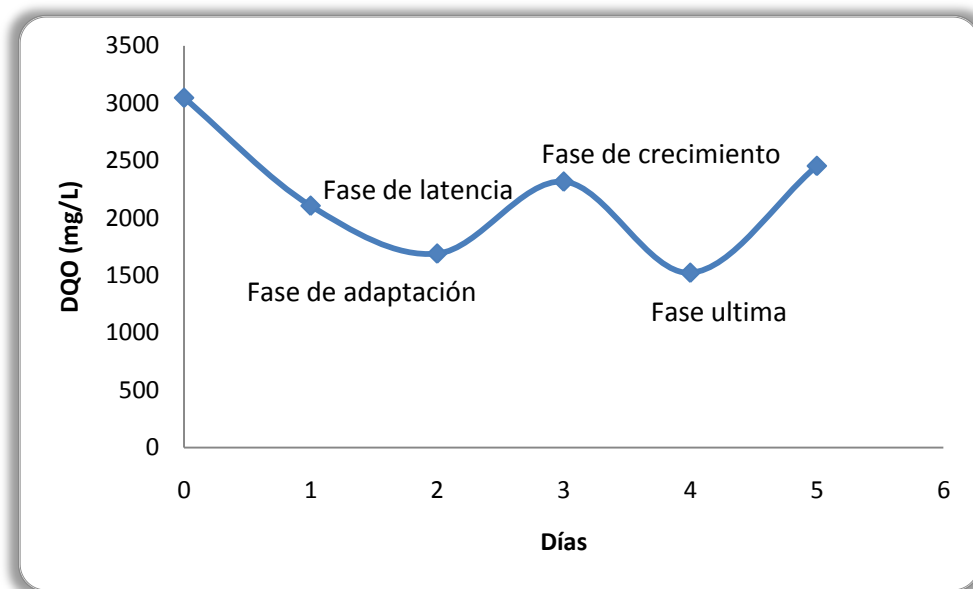


Figura 7.1. Curva de degradación biológica con lodos activados

7.4 IDENTIFICACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA POR EL ESPECTROFOTÓMETRO UV-VIS

El lixiviado crudo se sometió a un barrido por uv-vis con la finalidad de identificar la presencia de compuestos orgánicos de alto peso molecular presentes en él. Como se puede observar en la figura 7.2, el espectro del lixiviado crudo efectivamente pone en evidencia su contenido de compuestos orgánicos de alto peso molecular (principalmente ácidos húmicos) y lo podemos comparar con el espectro del agua destilada.

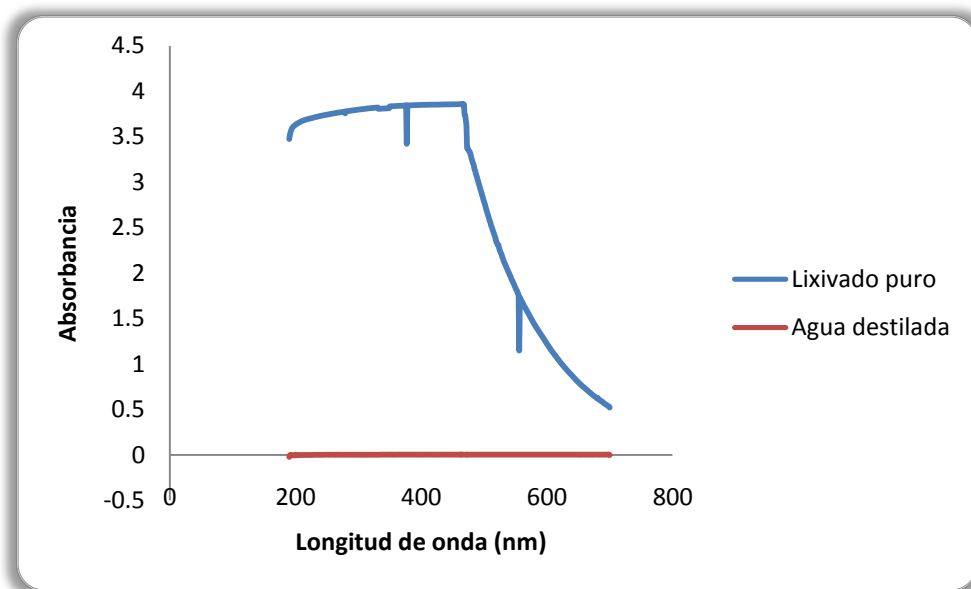


Figura 7.2. Lixiviado crudo, barrido

Los resultados de la oxidación química (Fenton), se presentan en las figuras 7.3 y 7.4.

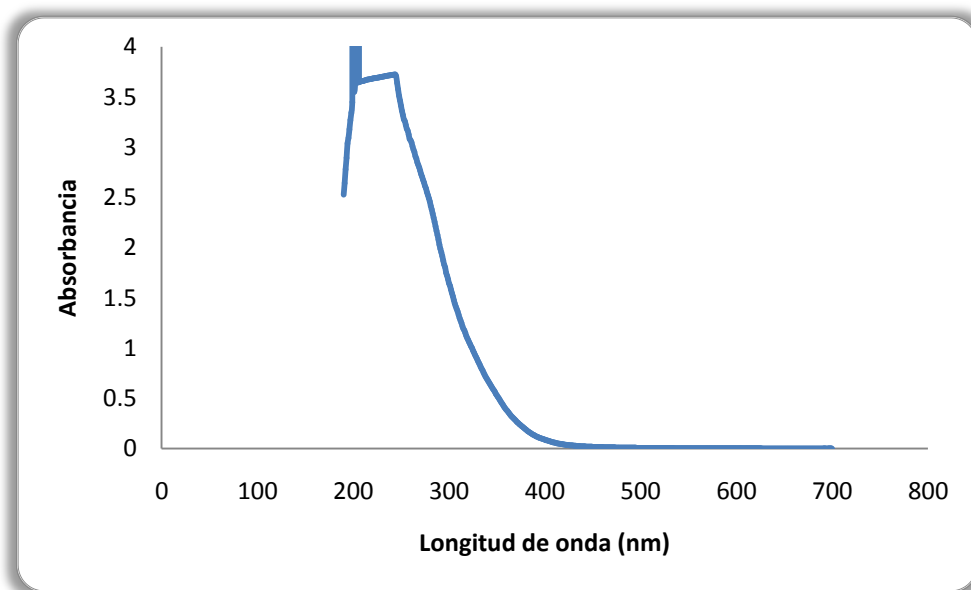


Figura 7.3. Oxidación química

Éstas muestran los resultados de la oxidación química como podemos ver existe una sustancial disminución de compuestos orgánicos recalcitrantes, después de aplicar la oxidación química (Fenton).

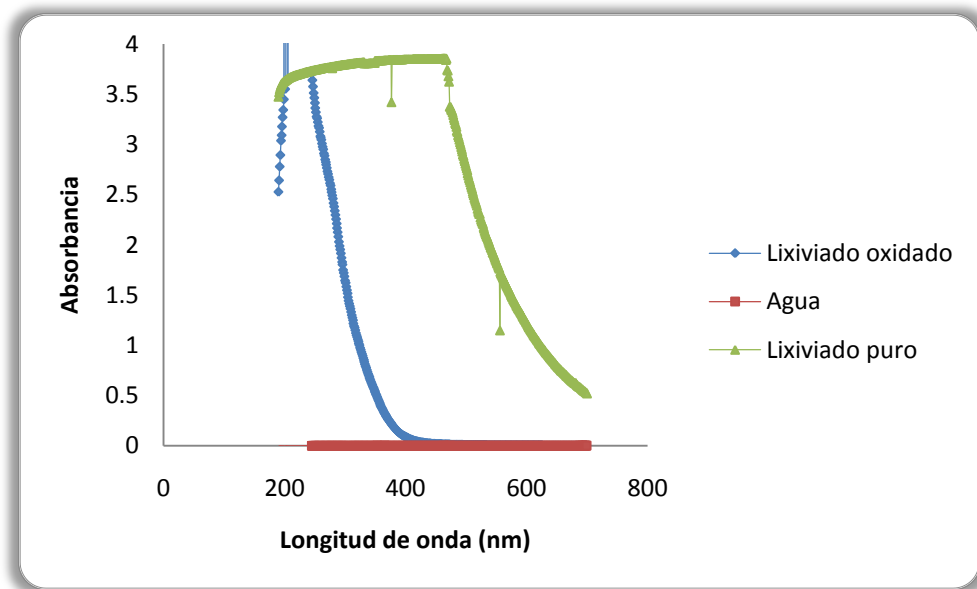


Figura 7.4. Comparación de la oxidación química y del lixiviado puro

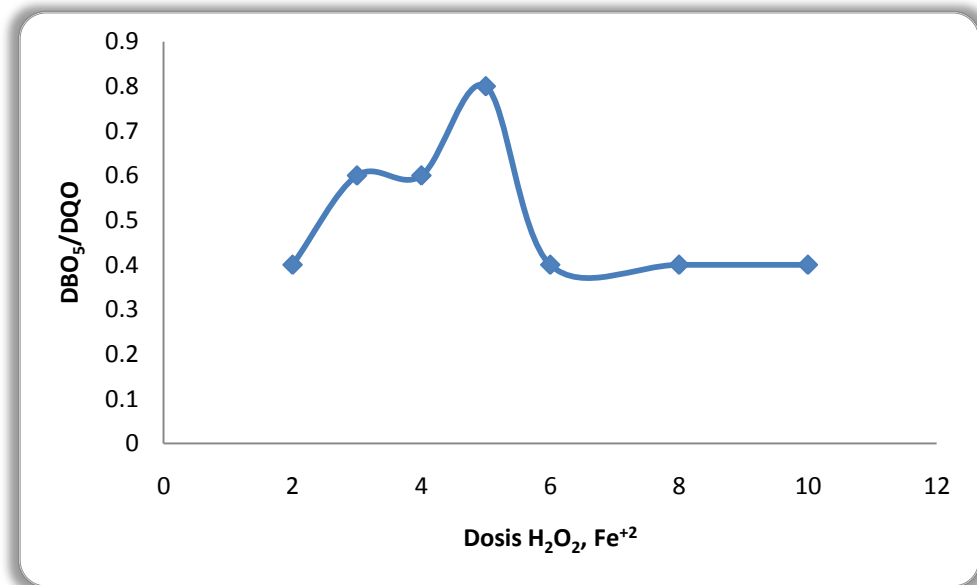


Figura 7.5. Biodegradabilidad vs dosis de H₂O₂/Fe²⁺

Oxidación biológica. La dosis que mejor resultado mostro fue la dosis 22.63g de H_2O_2 y 0.4940g de Fe^{+2} , con una biodegradabilidad de 0.8, después de esta dosis la curva permanece constante. (Ver figura 7.5).

Con lo que respecta al nitrógeno este es uno de los contaminantes más difíciles de eliminar del agua residual, en este trabajo el nitrógeno total inicial fue de 1,533.46mg/L, y las eficiencias de remoción con el Fenton (ver figura 7.6), varían drásticamente hasta que a partir de la dosis 22.63g de H_2O_2 y 0.4940g de Fe^{+2} esta permanece constante. La dosis que mayor remoción obtuvo (74%) fue de 22.63g de H_2O_2 y 0.6175g de Fe^{+2} .

En el caso de fosforo la remoción fue del 100%.

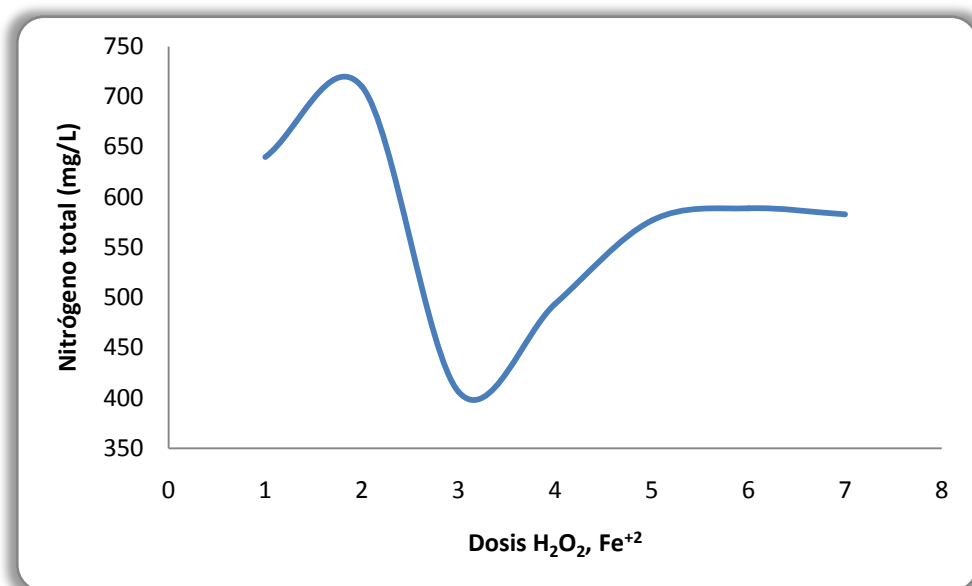


Figura 7.6. Nitrógeno total vs dosis de H_2O_2/Fe^{+2}

8 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1 CARACTERIZACIÓN DEL LIXIVIADO

Una característica importante en este lixiviado es la presencia de sales, como ya se ha mencionado la ubicación geográfica del relleno sanitario es el antiguo lago de Texcoco zona geográfica que de manera natural contiene sales y minerales, razón por la cual se le atribuye su alta salinidad ($466\mu\text{S}/\text{cm}$, el doble que el agua de mar). También es importante destacar que en un principio el bordo poniente funcionaba como un tiradero a cielo abierto por lo que no había un control de los materiales que se depositaban en él ni tampoco existían sistemas drenaje para lixiviados.

En la tabla 7.1 también se puede observar que la biodegradabilidad de este lixiviado es de 0.1, valor que nos permite corroborar su estabilidad y grado de madurez, así como su posible composición, siendo ésta mayoritariamente a materia orgánica recalcitrante (sustancias húmicas), lo cual coincide con lo previamente estudiado por Monje-Ramírez *et al.*, 2004.

Para comparar y corroborar la diferencia que tienen los lixiviados dependiendo de su lugar de origen, en un artículo publicado por Renou *et al.*, 2008, los lixiviados maduros

se caracterizan por tener los siguientes valores para los parámetros más característicos y se presentan en la tabla 8.1.

Tabla 8.1. Características de los lixiviados maduros en el mundo

Lixiviado	DQO	DBO	DBO/DQO	pH	SS	TKN	NH ₃ -N
Brasil	3,460	150	0.04	8.2	ND	ND	800
Estonia	2,170	800	0.37	11.5	ND	ND	ND
Finlandia	556	62	0.11	ND	ND	192	159
Finlandia	340-920	84	0.09-0.25	7.1-7.6	ND	ND	330-560
Francia	500	7.1	0.01	7.5	130	540	430
Francia	100	3	0.03	7.7	13-1,480	5-960	0.2
Francia	1,930	ND	ND	7	ND	ND	295
Malasia	1,533-2,580	48-105	0.03-0.04	7.5-9.4	159-233	ND	ND
Sur Corea	1,409	62	0.04	8.57	404	141	1,522
Turquía	10,000	ND	ND	8.6	1,600	1,680	1,590

Todos los valores excepto el pH, están en mg/L; ND, no disponible.

Fuente: Tabla 2 reportada en *Journal of Hazardous Materials*, 150(3), 468-493.

Como podemos ver en la tabla 8.1, los parámetros reportados difieren de un lugar a otro, esto es dependiendo de la producción de residuos sólidos característicos de cada comunidad, las condiciones hidrogeológicas donde se generan los lixiviados, edad y

condiciones climáticas del sitio donde están los residuos [Zhang *et al.*, 2005]. En el caso del relleno sanitario Bordo Poniente, la mayor parte de los residuos sólidos corresponde a materia orgánica. En un estudio realizado por Bárcenas y col. (1998), llegaron a la conclusión de que la composición de las celdas de la etapa I de este relleno corresponde a materiales ferrosos, plásticos, bajo contenido de vidrio, aluminio, suelo y lodo.

8.2 OXIDACIÓN QUÍMICA DEL LIXIVIADO (PROCESO FENTON)

En este trabajo, se utilizó el proceso Fenton como método de oxidación química. En este tratamiento el generador catalítico de radicales hidroxilo ($\text{OH}\cdot$) produce reacciones en cadena entre el ion ferroso y el H_2O_2 y la oxidación de compuestos orgánicos (RH) [Zhang *et al.*, 2006]. Sin embargo, es importante destacar que existen diferentes combinaciones del H_2O_2 y otros catalizadores, ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{+2}$ y $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{+2}/\text{UV}$), con los cuales es importante comparar.

Renou y col. (2008), recopiló la información de diferentes estudios en los que se aplicó el tratamiento $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ a diferentes lixiviados estabilizados, en éstos se puede apreciar que el tratamiento proporciona remociones de hasta 96% de DQO, sin embargo hay que tomar en cuenta que las lámparas de UV no son económicamente viables, lo que encarece a este tipo de tratamiento. Adicionalmente Zhang y col. (2006), manifiesta que los métodos que utilizan lámparas UV son menos practicables dado que la luz UV no puede penetrar al lixiviado en su totalidad, recordando que la eficacia de este método está directamente relacionada por la longitud de onda que

logra interactuar con el H_2O_2 y el lixiviado. Como se ha visto en los párrafos anteriores el método Fenton es la opción más viable por su costo de operación, lo que reafirma que es la mejor opción como tratamiento para lixiviados maduros en especial para el lixiviado de Bordo Poniente **estudiado en este trabajo**.

Renou y col. (2008), presenta los resultados de aplicar peróxido de hidrógeno e hierro (reactivo Fenton) a diferentes lixiviados estabilizados (maduros). En este método la dosis utilizada para la obtención de un 75% de remoción de DQO, fue de 0.685g de Fe^{+2} y 1.65g de H_2O_2 , con una relación Fe^{+2}/H_2O_2 de 0.41.

En el lixiviado maduro de Bordo Poniente, estudiado **en este trabajo**, la remoción del lixiviado se realizó con 22.63g de H_2O_2 , y de 0.4940g de hierro suministrado como $FeSO_4$, la remoción máxima obtenida fue de 92% en términos de DQO, con una biodegradabilidad de 0.8, lo que nos indica una transformación de los compuestos orgánicos biodegradables a CO_2 , H_2O y productos intermedios.

Por otro lado, Méndez y col. (2009), compararon la eficiencia de cuatro tratamientos: coagulación-floculación, flotación, adsorción y oxidación Fenton, encontrando que el tratamiento más eficiente corresponde a la oxidación Fenton con una remoción de DQO del 77%, siempre y cuando éste sea el único tratamiento para el lixiviado, un criterio utilizado para calificar los tratamientos analizados por los cuatros es que se obtienen mayores remociones en menores tiempos. Además los reactivos utilizados son más económicos si se comparan con aquellos que utilizan carbón activado y que tienen un costo adicional para su regeneración.

Al aplicar el Fenton **en este trabajo**, cuando el lixiviado fue acidificado con ácido sulfúrico concentrado se comprobó la formación de ácido carbónico y de CO_2 , lo cual se observa en la formación de espuma y se puede observar en la figura 8.1.

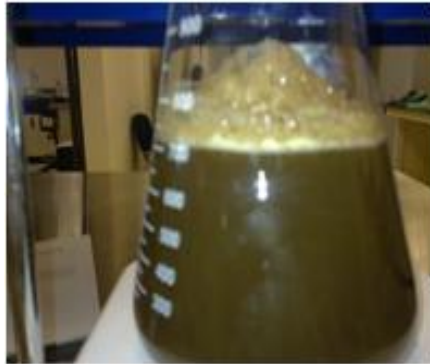


Figura 8.1. Formación de CO_2 y HCO_3

Esta espuma se origina por la alcalinidad de los lixiviados y se debe principalmente a la presencia de iones carbonatos y bicarbonato, los cuales están presentes en el suelo, el cual presenta altos niveles de sales minerales en esta zona [Bautista, 2005; Zhang *et al.*, 2005].

En este trabajo los resultados de la oxidación química con diferentes dosis de $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{+2}$ se muestra en la tabla 7.2, observándose eficiencias de remoción en términos de DQO que van del 70 al 90%.

Zhang y col. (2006) describen diferentes experimentos, en donde se manifiesta que un pH menor a 3.5 es para la oxidación de compuestos orgánicos mediante el Fenton, el pH afecta la actividad del oxidante, sustrato, la especiación del hierro y la descomposición del hidrógeno. A pH entre 2 y 4, los radicales hidroxilo reaccionan con los compuestos organometálicos, dando como resultado, la regeneración de H_2O_2 o incrementando su capacidad de reacción. Es por esta razón que en este trabajo se

acidifico el lixiviado con H_2SO_4 concentrado de 8.14 a un valor promedio de 2.96 y se muestran en la tabla 7.3. También es importante mencionar que de acuerdo a Zhang y col. (2006) el carbón inorgánico es fácilmente removible a pH ácido.

La temperatura es otro factor imprescindible en el tratamiento de lixiviados, Zhang y col. (2006), indican que a una temperatura inicial de $16^\circ C$ y con su incremento hasta $32^\circ C$ se obtienen eficiencias altas en la remoción de compuestos orgánicos. Monje-Ramírez y col. (2004) manifiesta que las reacciones $OH\cdot$ con los compuestos orgánicos se llevan a cabo con mayor eficiencia a medida que incrementa la temperatura siempre y cuando esta no rebase los $40^\circ C$, dado que la razón de reacción y producción de $OH\cdot$ se estabiliza o comienza a decrecer. Cuando la temperatura rebasa los $40^\circ C$, el H_2O_2 se descompone en H_2O y O_2 [Gogate et al., 2004].

Como la reacción Fenton es exotérmica, **en este trabajo** se decidió agregar el H_2O_2 de manera paulatina, esto permite regular la temperatura de reacción y que ésta no rebase los 40 grados, es por esto que también se comenzó la reacción con una temperatura que oscila entre los 8 y $10^\circ C$, a medida que continuó la adición de H_2O_2 la temperatura aumento hasta los $36^\circ C$, sin embargo, cuando terminó el periodo de oxidación (3 horas) ésta disminuyó hasta los $22-33^\circ C$, y continuo disminuyendo a medida que continuaba la descomposición. La temperatura al inicio de la oxidación Fenton y al término de ésta se presenta en la tabla 7.3.

La relación Fe^{+2}/H_2O_2 es también un parámetro importante a considerar, hay que recordar que el H_2O_2 proporciona los radicales hidroxilo mientras que el Fe^{+2} cataliza la producción de estos, existen diferentes autores como por ejemplo Neyens y col.

(2003), que describen que cuando se tiene una relación de $\frac{Fe^{+2}}{H_2O_2} < 1$, y si se tiene una ausencia de RH, ocurre una ligera descomposición de H_2O_2 a causa del ión férrico, el cual induce una reacción en cadena de radicales (el sistema férrico), inmediatamente después de iniciar el rápido agotamiento del H_2O_2 . Sin embargo, la presencia de RH frena la descomposición de H_2O_2 por el ión férrico (sistema férrico). El $HO_2\cdot$ adicional puede participar en la propagación de reacciones con radicales gracias a la reducción del ion férrico a ion ferroso y puede resultar en un gran consumo de H_2O_2 que ocurre en la ausencia de RH. López y col. (2004), indican que un exceso de H_2O_2 o de Fe^{+2} puede provocar que las reacciones que se forman por esta situación disminuyan la eficiencia de remoción, por lo que hace énfasis en encontrar la dosis óptima, lo cual se reflejará en la limpieza del efluente y la menor producción de lodos al final del tratamiento.

El color café negruzco que tienen los lixiviados **en este trabajo** se asocia con la oxidación al inicio de ésta y la formación del ion ferroso a férrico y la formación de coloides hidróxido férrico y su complejación con las sustancias húmicas/fulvicas, este hecho se presenta en la figura 8.2 y coincide con lo reportado por Bautista, 2005.

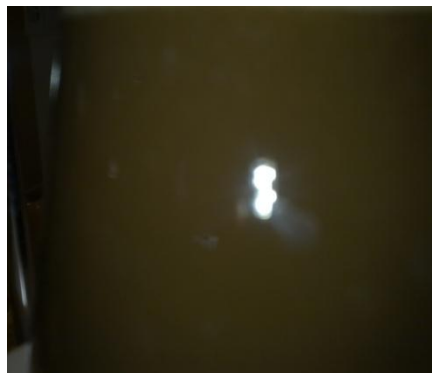


Figura 8.2. Color representativo de la oxidación química

Zhang y col. (2006), afirman que las relaciones H_2O_2/Fe^{+2} mayores de 3, no incrementan significativamente las eficiencias de remoción de compuestos orgánicos en términos de DQO, sin embargo en el caso del lixiviado analizado **en este trabajo** la dosis de H_2O_2 adicionado fue de 22.68g, y las dosis de Fe^{+2} variaron de 1.2360 a 0.2482g, con esta relación se obtuvieron eficiencias de remoción de DQO de hasta 92%. Es importante resaltar que la producción de lodos al final de la oxidación química fue de menos del 5% del volumen total analizado.

En lo referente al catalizador **en este trabajo** se empleó el $FeSO_4$, para que el Fe^{+2} interactúe con los radicales hidroxilo, sin embargo el Fe^{+3} ($FeCl_3$), también puede ser empleado en este tipo de oxidación como lo indica Rivas y col. (2003) en sus pruebas realizadas con el Fenton, observaron que el estado de oxidación del catalizador no influye en la eficacia del tratamiento, en términos de remoción de DQO.

8.2.1 DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA EN EL REACTOR DE OXIDACIÓN QUÍMICA

La degradación química **realizada en este trabajo** la podemos observar en las tablas 7.2 y 7.3, en esta podemos resaltar las remociones de hasta 92% considerando un exceso de H_2O_2 y una cantidad mínima de Fe, de acuerdo a Lipczynska-Kochany y col. (2008), en casos de efluentes reales es necesario agregar dosis de peróxido suficientes como para asegurar la degradación de compuestos orgánicos, adicionalmente los efluentes que contienen aniones como los fosfatos pueden contribuir al consumo de radicales hidroxilo formados con el H_2O_2 y el Fe, reduciendo la degradación de otros

orgánicos. Es por esta razón que la cantidad de fosfatos **en este trabajo** después de la oxidación química con el Fenton es 0mg/L, ya que muchos de los radicales hidroxilos interactuaron con este anión transformándolo a su forma más simple.

Un factor importante que debe destacarse es la producción de lodos, estos se forman al llevar el lixiviado oxidado a pH con valores de 7-8. Algunos autores como Wiszniowski y col. (2006), manifiestan que el proceso Fenton es costoso debido a este hecho sin embargo la dosis Fe^{+2}/H_2O_2 utilizada **en este trabajo** resulto en una producción de lodos de menos del 5%.

Zhang y col. (2005), manifiestan que cuando se emplean relaciones H_2O_2/Fe^{+2} superiores a 2, los mecanismos de reacción del Fenton llegan a ser independientes del H_2O_2 . Parece ser que un exceso de éste puede producir burbujas de oxígeno que dificultan la sedimentación de lodos, sin embargo, no es así **en este trabajo** por la presencia de aniones (PO_4) que consumen el peróxido de hidrógeno.

Yoon y col. (1998), evaluaron el proceso Fenton para la remoción de compuestos orgánicos dependiendo de su tamaño. Ellos encontraron que los grupos de alto peso molecular son más fácilmente removidas por la reacción Fenton que aquellos grupos de bajo peso molecular.

Una característica importante en la oxidación química es el suministro del H_2O_2 y del Fe^{+2} , **en este trabajo** se adiciono el Fe^{+2} en un solo paso, mientras que el H_2O_2 , fue adicionado gota a gota en un periodo de 90 minutos.

Zhang y col. (2005), indican que los mecanismos de reacción Fenton podrían variar con la relación RH a Fe^{+2} . Cuando una cantidad de Fe^{+2} es significativamente igual a la

cantidad de RH, estos (Fe^{+2} y RH) compiten para reaccionar con los radicales hidroxilos. Así que, el Fe^{+2} consume radicales hidroxilo.

Cuando el Fe^{+2} es adicionado en un solo paso y el H_2O_2 en dos pasos, lo que sucede es que el ion ferroso se sobre-dosifica. Los radicales hidroxilos que se forman por la reacción $Fe^{+2} + OH \cdot \rightarrow Fe^{+3} + OH^-$ podrían competir con la reacción $RH + OH \cdot \rightarrow H_2O + R \cdot$, cuando hay altas concentraciones de Fe, reduciendo la oxidación de materiales orgánicos. Cuando el Fe^{+2} y el H_2O_2 son aplicados simultáneamente en múltiples pasos se obtienen eficiencias de remoción de DQO satisfactorias.

Sin embargo, **en este trabajo** se obtuvieron remociones de hasta 92%, y es que al agregar el Fe^{+2} y el H_2O_2 en un solo paso en medio ácido crea demasiada espuma (CO_2) y dado que la reacción Fenton es exotérmica, eleva la temperatura, pudiendo ser este un factor que minimice la remoción de DQO.

8.3 OXIDACIÓN BIOLÓGICA DEL LIXIVIADO PRE-TRATADO

En este trabajo, primeramente se caracterizo el lodo activado para la oxidación biológica, este proviene de una planta de tratamiento de aguas residuales denominada Planta de tratamiento de aguas residuales de San Juan Ixhuatepec, Sociedad de Usuarios. El agua de tratamiento de esta planta es una mezcla de aguas industriales y aguas de origen domestico. Los resultados de la caracterización inicial se muestran en la tabla 7.4.

De estos resultados podemos resaltar los correspondientes a la biodegradabilidad, en donde podemos observar su valor superior a 1. Este valor es característico de los

lodos activados y refleja su composición altamente biodegradable, por lo que puede contribuir al aporte de nutrientes y facilitar la fase de adaptación de los microorganismos [Cisterna *et al.* 2009]. También es importante destacar los valores de conductividad eléctrica de $444\mu\text{S}/\text{cm}$, este valor es alto debido a la adición de sales (FeSO_4 , FeCl_3 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) en el proceso de tratamiento en la planta de agua residual.

8.3.1 DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA EN EL REACTOR DE OXIDACIÓN BIOLÓGICA

Utilizando diferentes concentraciones de lodos activados (0.1, 1, 5, 10 y 20%) los resultados que se obtuvieron **en este trabajo** al término de 16 días de oxidación biológica, se muestran en la tabla 7.5.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla anterior, la concentración que se utilizó en el reactor para probar el tren de tratamiento oxidación química-oxidación biológica, fue de 10%, con esta concentración se obtuvo una remoción de 73%, para este experimento (oxidación biológica), en términos de DQO, la decisión se tomo considerando que al agregar la dosis de lodo la DQO aumenta aproximadamente el doble de su valor y que al final del proceso de oxidación se generan nuevamente lodos, motivo por el cual el costo del tratamiento se eleva.

Una vez determinada la dosis óptima de lodos activados (10%), se sometió el lixiviado crudo al tren de tratamiento oxidación química-oxidación biológica, la DQO del lixiviado crudo fue de $4,156\text{mg}/\text{L}$, el lixiviado oxidado químicamente obtuvo una DQO de $1,400\text{mg}/\text{L}$ y el valor de la DQO cuando se agrego el lodo al lixiviado oxidado

químicamente fue de 3,046.6mg/L, la oxidación biológica se mantuvo por un periodo de 5 días obteniendo una eficiencia de remoción de 50% en términos de DQO. Estos resultados se muestran en la figura 7.1 y demuestra que la degradación de cinco días es insuficiente para estar dentro de norma por lo que será necesario mayor tiempo de degradación para la destoxificación del lixiviado.

El comportamiento de la tabla 7.5 y figura 7.1, se pueden explicar por el hecho de que los lodos activados contienen grandes cantidades de organismos, los cuales hacen posible la biodegradación de compuestos orgánicos, estos microorganismos a traviesan 4 fases la primera de ellas es la adaptación, en la cual los microorganismos reconocen su medio y se integran con las condiciones de este (pH, temperatura, relación C/N), la segunda de ellas se conoce como fase latente es decir los microorganismos aumentan en número hasta llegar a la tercer fase denominada de crecimiento en donde estos llegan a estabilizarse por un periodo determinado hasta llegar a un nivel en donde la población bacteriana comienza a decrecer (última fase) debido a la falta de nutrientes y cambios en sus condiciones de vida.

8.4 IDENTIFICACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA POR EL ESPECTROFOTÓMETRO UV-VIS

El lixiviado crudo oxidado **en este trabajo** se sometió a un barrido por uv-vis con la finalidad de identificar la presencia de compuestos orgánicos de alto peso molecular presente en él. Debido a que el espectro uv-vis produce saltos electrónicos que se solapan con los cambios rotatorios y vibracionales (necesarios para provocar la

excitación de electrones), la consecuencia de este hecho puede provocar un espectro continuo con picos anchos en forma de campana, lo que hace difícil la interpretación de este, sin embargo nos proporciona información acerca de la presencia o ausencia de determinados grupos funcionales en los compuestos orgánicos.

Como se puede observar en la figura 7.2, el espectro del lixiviado crudo efectivamente pone en evidencia su contenido de compuestos orgánicos de alto peso molecular (principalmente ácidos húmicos) y lo podemos comparar con el espectro del agua destilada.

Los resultados de la oxidación química de **este trabajo**, se presenta en las figuras 7.3 y 7.4. Esta muestra los resultados de la oxidación química como podemos ver existe una sustancial disminución de compuestos orgánicos recalcitrantes.

Cuando los materiales orgánicos son oxidados por el reactivo Fenton, se presentan tres tipos de degradación de materiales orgánicos: degradación primaria, un aparente cambio estructural en los compuestos donde la biodegradabilidad puede ser mejorada; degradación aceptable, degradación donde la toxicidad es reducida; última degradación, la degradación es completa hasta CO₂, agua y otros inorgánicos [Zhang *et al.*, 2005].

De acuerdo a estudios realizados por Zhang y col. (2005), observaron que la mayoría de la remoción de materiales orgánicos ocurrió en los primeros 20 minutos, después de este tiempo el cambio de DQO residual llega a ser insignificante.

Esto coincide con un estudio que realizó Méndez y col. (2010), en el que trataron un lixiviado estabilizado ubicado en la Península de Yucatán, en este encontraron que el

tiempo óptimo de reacción es de 20 minutos, con un pH de 4 y una concentración de H_2O_2 de 600mg/L y Fe^{+2} de 1,000mg/L con una remoción de DQO de 78%. (Ver figura 8.3).

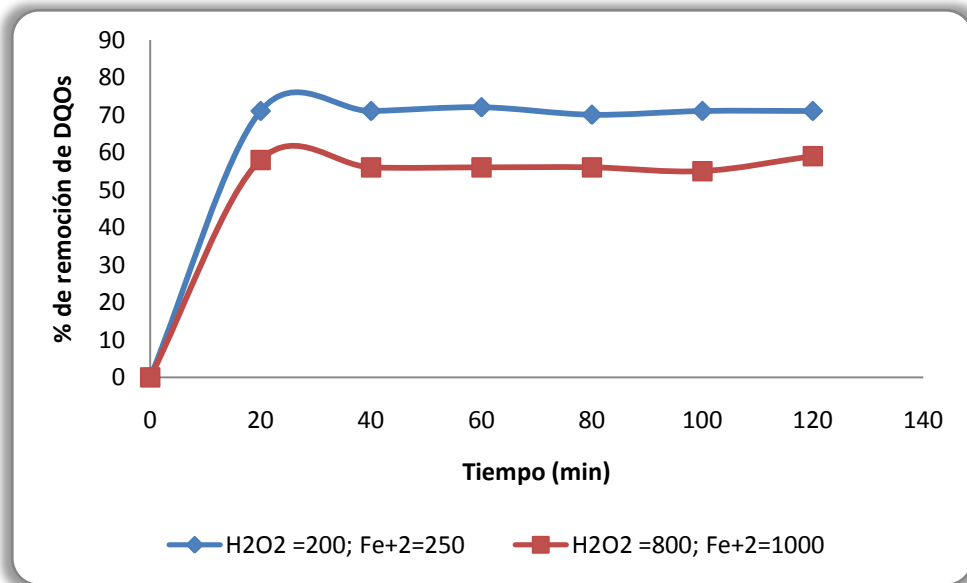
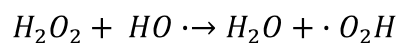
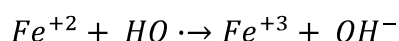


Figura 8.3. % de remoción de DQOs vs tiempo de reacción [Méndez *et al.*, 2010]

Oxidación biológica. **En este trabajo** la dosis que mejor resultado mostro fue la dosis 22.63g de H_2O_2 y 0.4940g de Fe^{+2} , con una biodegradabilidad de 0.8, es decir la mayoría de los compuestos orgánicos se transformaron a CO_2 y agua, después de esta dosis la curva permanece constante, esto es posiblemente a que no se llega a la última degradación es decir esta llega a ser primaria o bien aceptable, lo cual no necesariamente implica una eficiencia inaceptable, dado que con este tipo de degradaciones se obtienen subproductos de oxidación como loa ácidos orgánicos de cadena corta (ácidos carboxílicos principalmente) los cuales si pueden ser degradados biológicamente.

Adicionalmente como indica López y col. (2006), hay puntos dentro del proceso en donde hay excesos de peróxido o de hierro y se crean reacciones que no son favorables para la oxidación de compuestos orgánicos.



Dado que los radicales hidroxilos no se producen, la oxidación no se lleva a cabo.

Con lo que respecta al nitrógeno este es uno de los contaminantes más difíciles de eliminar del agua residual, **en este trabajo** el nitrógeno total inicial fue de 1,533.46mg/L, y las eficiencias de remoción con el Fenton (ver figura 7.6), varían drásticamente hasta que a partir de la dosis 22.63g de H₂O₂ y 0.4940g de Fe⁺² esta permanece constante. La dosis que mayor remoción obtuvo (74%) fue de 22.63g de H₂O₂ y 0.6175g de Fe⁺².

En el caso de fosforo la remoción fue del 100%, debido a que estos junto con los demás cationes contenidos en el lixiviado, interactúan rápidamente con los radicales hidroxilos formados, por lo que el consumo de H₂O₂ se acelera y justifica el exceso de este, en la oxidación química.

CONCLUSIONES

- La oxidación química con el método Fenton, removi6 la mayor parte de los compuestos orgánicos recalcitrantes e increment6 la biodegradabilidad del lixiviado maduro, el tratamiento biol6gico disminuy6 la cantidad de compuestos orgánicos de bajo peso molecular remanentes en el lixiviado.
- Se obtuvo una muestra real de un lixiviado maduro del bordo poniente I etapa, y se determin6 la DQO, DBO₅, pH, conductividad el6ctrica nitr6geno y fosforo totales.
- Para el lixiviado maduro del Bordo Poniente I etapa, la dosis 6ptima de remoci6n en t6rminos de DQO fue de 22.68g de H₂O₂ y de 0.4949g de Fe⁺² a pH de 3 y temperatura inicial de 10.5°C.
- Se cuantific6 la DQO, DBO₅, pH, conductividad el6ctrica nitr6geno y fosforo totales antes y despu6s de aplicar la oxidaci6n qu6mica, para la oxidaci6n biol6gica se midi6 6nicamente la DQO, antes y despu6s de este tratamiento.
- La combinaci6n de tratamientos biol6gicos y fisicoqu6micos result6 en eficiencias de remoci6n en t6rminos de DQO superiores al 70%. Sin embargo hay que considerar las emisiones que resultaron de estos procesos (CO₂ y lodos).

- El uso de peróxido de hidrógeno no fue excesivo considerando que la producción de lodos de este proceso fue mínima (>5%) y que se obtuvieron remociones de hasta 92% de DQO (únicamente con este tratamiento). La adición del H₂O₂ lentamente durante la oxidación química y su ligero exceso de este promovieron la eliminación de aniones como el fosfato, los cuales son difíciles de eliminar en cuerpos de agua.
- El uso de lodos activados provenientes de una planta de tratamiento de agua residual industrial en condiciones aerobias aportó eficiencias de remoción de hasta 70% de DQO, en el proceso de oxidación biológica únicamente.
- El nitrógeno total es uno de los más difíciles de eliminar sin embargo se pudo obtener eficiencias de hasta 74% de remoción de DQO únicamente considerando la oxidación química (Fenton).
- Después de aplicar la oxidación química (Fenton) y la oxidación biológica (lodos activados) se obtuvieron remociones de hasta el 50% en términos de DQO, considerando una concentración de lodos del 10%.
- La espectrofotometría uv-vis nos permitió cuantificar cualitativamente a los compuestos orgánicos de alto peso molecular denominada materia orgánica recalcitrante (ácidos húmicos fúlvicos y humatos).

RECOMENDACIONES PARA TRABAJO FUTURO

En México las plantas de tratamiento de lixiviados no son suficientes para solucionar el problema, por lo que se deben diseñar trenes de tratamiento específicos para los posibles lixiviados que se generan en nuestra comunidad.

Si bien es cierto que existen diferentes tratamientos para estos, debemos considerar los aspectos económico-ambientales de ellos. Para lo cual es necesario conocer el tipo de residuos que se están depositando en los rellenos sanitarios, así mismo es necesario predecir, mediante modelos matemáticos o simuladores la formación de estos lixiviados (Giraldo *et al.*, 2005) así como conocer su posible composición y permanencia en los sitios de disposición final. Actualmente en México el 43% de los residuos generados corresponden a desperdicios orgánicos (jardinería y alimentos), 18% papel y cartón, 8% de vidrio, 9% plástico, 7% pañales desechables y sanitarios, 5% aluminio, 2% ropa vieja, 2% de hierro, 1% latas y 5% de objetos diversos.

En la planta de bordo poniente se tienen 4 etapas, 3 de ellas ya no está en funcionamiento sin embargo la 4 etapa sigue recibiendo residuos por lo tanto esta también genera lixiviados muchos de los cuales son jóvenes, se ha demostrado que estos no pueden ser tratados eficientemente con el Fenton, sin embargo se podría

combinar los lixiviados jóvenes con los lixiviados estabilizados que se siguen produciendo en las diferentes etapas: 1. Para integrar y conservar un solo tren de tratamiento y 2. Para que los lixiviados estabilizados puedan proporcionar estabilidad a los lixiviados jóvenes, atrapando, quelando o complejando metales presentes en los lixiviados jóvenes por medio de los compuestos orgánicos de alto peso molecular contenidos en ellos (ácidos húmicos y fúlvicos). Por otro lado los lodos activados es un tratamiento que debe explorarse más a detalle, debido a que tiene algunos inconvenientes como la generación de nuevos lodos, otro factor importante que se debe considerar en la aplicación del Fenton es la emisión de algunos gases como CO₂, dichas emisiones deben cuantificarse y pronosticarse por medio de balances de materia o bien mediante procesos de simulación que nos permitan minimizar dichas emisiones.

Otra característica que se debe considerar en el tratamiento de lixiviados es el concepto de “green chemistry” (química verde), este concepto fue puesto en práctica en la década de los 90’ con la finalidad de contribuir al desarrollo sostenible y consiste en la reducción y eliminación del uso o la generación de sustancias peligrosas en el diseño, producción y aplicación de productos o procesos químicos, reduciendo de esta forma la contaminación. (EPA, 2009)

BIBLIOGRAFÍA

- Argemi, F., Cianni, N., Porta A. (2005). Disrupción endocrina: perspectivas ambientales y salud pública, *Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana*, 39(3):291-300.
- Bárcenas, H., Morales, J.J., González, L.M. (1998). Bordo Poniente, un relleno sanitario reutilizable? Ingeniería para el control de residuos municipales e industriales, S.A. de C.V. (INCREMI, S.A. de C.V.)
- Bautista Gorostieta, Luis Felipe, tesis de maestría, Descomposición de materia orgánica recalcitrante en lixiviados pre-tratados de rellenos sanitarios por ozono, Sección de Estudios de Posgrado de ESIQIE-IPN, junio del 2005.
- Borzacconi L., López I., Arcia E., Cardelino L., Castagna A., Viñas M. Comparación de tratamientos aerobios y anaerobios aplicados a lixiviados de relleno sanitario, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República de Uruguay, consulta 24-11-2009, 15:34
<http://www.cepis.org.pe/bvsaidis/aresidua/mexico/01147e20.pdf>,
- Cisterna, P., Peña, D. Determinación de la relación DQO/DBO₅ en aguas residuales de comunas con población menor a 25 000 habitantes en la VIII región, consulta: 24-10-2009, 16:23,
<http://www.cepis.org.pe/busaidis/chile13/trab-12.pdf>

- CNA, Comisión Nacional del Agua, 2010, consulta 04-02-2010, 13:23, <http://smn.cna.gob.mx/climaqtologia.html>
- Deng, Y., Englehardt, J.D. (2006). Treatment of landfill leachate by the fenton process, *Water research*, 40:3683-94.
- EPA, 2009, Green Chemistry, consulta: 25-2-2009, 12:13, www.epa.gov/greenchemistry
- Giraldo Atehortúa Sebastián, Rodríguez Henao Paula Andrea, tesis de licenciatura, modalidad participación en proyecto de investigación, Aplicación del método help para la predicción de la producción de lixiviados en el relleno sanitario “La esmeralda” ciudad de Manizales- fase III, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura departamento de Ingeniería Química, Manizales, 2005.
- Glosario greenfacts, fecha de consulta: 25-10-2010, 16:30pm, <http://www.greenfacts.org/es/glosario/ghi/genotoxico-genotoxicidad.htm>
- Glosario greenfacts, fecha de consulta: 25-10-2010, 16:40pm <http://www.greenfacts.org/es/glosario/mno/mutagen-mutagenico.htm>
- Gogate P.R., Pandit, B. (2004). A review of imperatives technologies for wastewater treatment I: oxidation technologies at ambient conditions, advances in *Environmental Research*, 8: 501-551.

- Gupta, S.K.; Sing, G. (2007). Assessment of the efficiency and economic viability of various methods of treatment of sanitary landfill leachate. *Environ. Monit. Assess.*, 118: 435-456
- HACH water analysis handbook procedures, 5th edition, 2008, consulta: 16:58, 15-10-2009, www.hach.com/fmminghach?/CODE%3ADOC316.53.0108515626%7C1
- INEGI, 2009. Fecha de consulta: 17-10-2009, 12:30pm, www.inegi.gob.mx
- Kurniawan, A.T., Lo W.H., Chan G.Y.S. (2006). Physico-chemical treatments for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate, *Journal of Hazardous materials*, B129:80-100.
- Lipczynska-Kochany E., Kochany J. (2008). Effect of humic substances on the Fenton treatment of wastewater at acidic and neutral pH, *Chemosphere*, 73: 745-750.
- López, A., Pagano, M., Volpe, A., Pinto, D. (2004). Fenton's pre-treatment of mature landfill leachate, *Chemosphere*, 54(7):1005-10.
- Méndez Novelo R.I., Castillo Borges E.R., Sauri Riancho M.R., Quintanal Franco C.A., Giácoman Vallejos G., Jiménez Cisneros B. (2009). Comparación de cuatro tratamientos fisicoquímicos de lixiviados, *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25(3):133-145.

- Méndez Novelo R.I., García Reyes R.B., Castillo Borges E.R., Sauri Riancho M.R. (2010). Tratamiento de lixiviados por oxidación Fenton, *Ingeniería e investigación*, 30(1):80-85.
- Método 10072, HACH para Nitrógeno total de 10-150mg/L HR, consulta: 17:40, 15-10-2009,
www.hach.com/fmminghach?/CODE%3ANITROGENTOT TNT HIGH7921%7C1
- Método 10127, HACH para fósforo total de 1-100mg/L HR, consulta: 17:00, 15-10-2009,
www.hach.com/fmminghach?/CODE%ADOC316.53.0112315664%7C1
- Método 8000, HACH para DQO de 0-150ppm HR, consulta: 16:58, 15-10-2009,
[www.hach.com/hc/browse.parameter.list/PAR027/NewLinkLabel=chemical+Oxyen+Demand+\(COD\)](http://www.hach.com/hc/browse.parameter.list/PAR027/NewLinkLabel=chemical+Oxyen+Demand+(COD))
- Monje-Ramírez I., Orta de Velásquez M.T. (2004). Removal and transformation of recalcitrant organic matter from stabilized saline landfill leachates by coagulation-ozonation coupling processes, *Water Research*, 38:2359-2367.
- Moreno Delgado L. (2007). On the role of solid waste leachate in lake pollution. Department of Ecology, chemical Ecology and Ecotoxicology, Lund University. pp. 29.
- Neyens E., Baeyens J. (2003). A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique, *Journal of Hazardous Materials*, B98:33-50.

- NMX-028-ECOL-1993, norma mexicana que establece el procedimiento para determinar la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO₅) y residuales tratadas - método de prueba.
- Noaksson, E., Linderoth, M., Tjärnlund, U., Balk, L. (2005). Toxicological effects and reproductive impairments in female perch (*perca fluviatilis*) exposed to leachate from Swedish refuse dumps, *Aquatic Toxicology*, 75:162-177.
- Perales, José. Periódico Cambio de Michoacán. 9-octubre-2007.
- Primo Martínez Oscar, tesis doctoral, Mejoras en el tratamiento de lixiviados de vertedero de RSU mediante procesos de oxidación avanzada, Universidad de Cantabria, 2008.
- Renou, S; Givaudan, J.G; Poulain, S; Dirassouyan, F; Moulin, P. (2008). Landfill leachate treatment: review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, 150(3), 468-493.
- Rivas, F.J., Beltrán, F., Gimeno, O., Carvalho, F. (2003). Fenton-like oxidation of landfill leachate, *Journal of Environmental Science Health*, A38:371-379.
- Robles Martínez, Fabián, Generación de biogás y lixiviados en los rellenos sanitarios. México: Instituto Politécnico Nacional, 2005.
- Sang, N., Li, G., Xin, X. (2006). Municipal landfill leachate induces cytogenetic damage in root tips of *Hordeum vulgare*, *Ecotoxicology and environmental safety*, 63:469-73.

- Términos de contaminación ambiental, fecha de consulta: 25-10-2010, 16:00pm, <http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/ContamAmbi.htm>
- Winkler Michael A. Tratamiento biológico de aguas de desecho, Ed. Limusa, México, 1995.
- Wiszniowski, J., Robert, D., Surmacz, J., Miksch, K., Weber, J.V. (2006). Landfill leachate treatment methods: a review, *Environ. Chem. Let.*, 4:51-61.
- Yoon, J., Cho, S., Cho, Y., Kim, S. (1998). The characteristics of coagulation of Fenton reaction in the removal of landfill leachate organics, *Water Sci. Technol.*, 38:209-214.
- Zhang, H., Jin, H., Huang, C.P. (2005). Optimization of Fenton process for the treatment of landfill leachate, *Journal of Hazardous materials*, 125(1-3): 166-174.
- Zhang, H., Jin, H., Huang, C.P. (2006). Treatment leachate by fenton's reagent in a continuous stirred tank reactor, *Journal of Hazardous materials*, B 136: 618-623.