

CAPÍTULO 5

TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE RELLENO SANITARIO.

El objetivo de este capítulo es aplicar los procesos avanzados de oxidación tipo $\text{FeOx-H}_2\text{O}_2$ y foto Fenton con hierro cero valente en la remediación de un efluente real. Se busca en este caso la reducción de la toxicidad de un lixiviado maduro (con una edad mayor a 10 años), generado en un tiradero de basura ubicado en Temixco, Morelos.

La razón de biodegradabilidad calculada en los laboratorios de la Universidad Iberoamericana, indican que se trata de un efluente altamente biorecalcitrante ($\text{BOD}_5/\text{COD} < 0.03$), lo que lo convierte en un efluente no tratable en un principio por procesos biológicos convencionales.

5. RELLENOS SANITARIOS

El relleno sanitario es entendido hoy en día como aquella instalación destinada a la disposición final de residuos sólidos no reciclables ni aprovechables, diseñada para minimizar los impactos ambientales y reducir los riesgos sanitarios potencialmente generables por dichos residuos, amén de controlar las reacciones y procesos propios de su descomposición dentro del mismo relleno, mediante procedimientos previstos y concebidos (MMA, 2002; Greenpeace, 2005).

La selección del método a utilizar para la operación del relleno sanitario debe realizarse con base en las condiciones topográficas, geotécnicas e hidrogeológicas del sitio seleccionado para la disposición final de los residuos. Debe establecerse el perfil estratigráfico del suelo y el nivel de acuíferos freáticos permanentes y transitorios. Los métodos más recomendables son: (MMA, 2002; Greenpeace, 2005).

- Método de zanja o trinchera.
- Método de área.
- Método de rampa.
- Método combinado.

5.1 CARACTERISTICAS BASICAS DE UN RELLENO SANITARIO

Todo relleno sanitario debe tener un sistema de impermeabilización en el fondo y debe contar con un sistema de recolección y evacuación de aguas de escorrentía y lixiviados. Para el dimensionamiento de las celdas, el ancho debe estar definido por el número de vehículos que llegan simultáneamente o con intervalos de 5 minutos y el largo debe estar definido por la cantidad de residuos sólidos que llega al relleno en un día. Para los niveles medio y bajo de complejidad la altura se debe limitar a 1.5 m. incluido el material de cobertura, si este es manual. Para los niveles alto y medio alto de complejidad la altura máxima de la celda diaria debe ser de 3 m incluidos el espesor de los residuos a disponer y el material de cubierta requerido, pero de todas maneras la altura depende de la estabilidad del sitio. La estabilidad de los taludes que conforman el relleno sanitario debe ser verificada teniendo en cuenta la caracterización de los residuos y el esfuerzo cortante a lo largo de las interfaces para lo cual debe ensayarse el material y evaluar el ángulo de fricción en la interfase. (MMA, 2002; Greenpeace, 2005).

5.2 REACCIONES DE DEGRADACIÓN

La mayor parte de los residuos sólidos generados en las viviendas (el 50% cuando menos) son de tipo orgánico, los cuales se degradan gradualmente a través de cinco fases dentro de un relleno sanitario (MMA, 2002; Greenpeace, 2005).

5.2.1 HIDRÓLISIS AEROBIA

En esta fase los componentes orgánicos biodegradables de los residuos sólidos urbanos sufren descomposición microbiana durante la disposición en un relleno sanitario, y poco después, se inicia la descomposición biológica bajo condiciones aerobias, ya que hay cierta cantidad de aire atrapado dentro del relleno sanitario. Durante esta etapa los microorganismos convierten algunos hidratos de carbono en azúcares simples (como la glucosa), dióxido del carbono y agua (MMA, 2002; Greenpeace, 2005).

5.2.2 HIDRÓLISIS Y FERMENTACIÓN

A medida que desciende el oxígeno comienzan a desarrollarse condiciones anaerobias y el relleno sanitario se convierte en anaerobio; el nitrato y el sulfato, que pueden servir como receptores de electrones en reacciones de conversión biológica, a menudo se reducen a nitrógeno y sulfuro de hidrógeno, como se ilustra en las ecuaciones siguientes: (MMA, 2002; Greenpeace, 2005).



El proceso implica la transformación mediada por enzimas (hidrólisis), de compuestos con alto peso molecular (por ejemplo lípidos, polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos en compuestos aptos para ser utilizados por los microorganismos como fuentes de energía y de carbono celular (MMA, 2002; Greenpeace, 2005).

5.2.3 ACETOGÉNESIS

Representa la conversión microbiana de los compuestos resultantes de la fase anterior en compuestos intermedios de bajo peso molecular, como son el ácido acético (CH_3COOH) y pequeñas concentraciones de ácido fúlvico y otros ácidos más complejos. El dióxido de carbono es el principal gas generado durante esta fase. También se producen cantidades pequeñas de hidrógeno (H_2). La demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) y la demanda química de oxígeno (DQO) se incrementan significativamente en esta fase, debido a la disolución de ácidos orgánicos en el lixiviado, con unos valores de biodegradabilidad entre 0.4 y 0.7, indicando que se trata de un efluente biodegradable (MMA, 2002; Greenpeace, 2005).

5.2.4 METANOGÉNESIS

En esta fase, las bacterias convierten el ácido acético en metano y CO_2 . El hecho anterior causa que el pH dentro del relleno sanitario suba a valores más neutros, es decir, en el rango de 6.8 a 8. A continuación, el pH del lixiviado, subirá, y se reducirán las concentraciones de DBO_5 , DQO y el valor de conductividad del lixiviado (MMA, 2002; Greenpeace, 2005).

5.2.5 MADURACIÓN Y ESTABILIZACIÓN

Esta fase se produce después de convertirse el material orgánico biodegradable en CH_4 y CO_2 . Durante esta fase, la velocidad de generación de metano en el relleno sanitario disminuye significativamente, porque la mayoría de los nutrientes se han separado con el lixiviado durante las fases anteriores, y los sustratos que quedan en el relleno sanitario son de degradación lenta. Los principales gases de relleno sanitario durante esta fase siguen siendo CH_4 y CO_2 . Según las medidas de sellado del relleno sanitario, también pueden encontrarse pequeñas cantidades de nitrógeno y oxígeno en el gas del relleno sanitario. Durante la fase de maduración, el lixiviado contendrá ácidos húmicos y fúlvicos (moléculas complejas de alto peso molecular), que son difíciles de degradar biológicamente. Finalmente, las condiciones pueden tornarse nuevamente aerobias (debido principalmente a fracturas dentro de las cárcavas) y es allí cuando el relleno se encuentra estabilizado (MMA, 2002; Greenpeace, 2005).

5.2.6 REACCIONES QUÍMICAS

Dos tipos generales de reacciones químicas tienen lugar dentro de la masa de residuos sólidos en descomposición en un relleno sanitario. La primera de ellas, involucra reacciones de oxidación a causa del oxígeno atrapado en los residuos dispuestos. El segundo tipo de reacción es de ácido-metal, debido a la presencia de ácidos orgánicos y CO_2 . Estos procesos movilizan los iones metálicos y sales que son los contaminantes potenciales. Sin embargo, una vez que la generación del metano se establece en el relleno (metanogénesis) se genera menos ácido y generalmente se retienen metales (MMA, 2002; Greenpeace, 2005).

5.2.7 REACCIONES FÍSICAS

Los efectos del agua cuando entra en contacto con los residuos dispuestos, hacen que se favorezca la disolución de materiales solubles, los cuales quedan disponibles para procesos de absorción y adsorción (MMA, 2002; Greenpeace, 2005).

Para finalizar, debemos entender que la metanogénesis es la etapa crítica en el proceso de degradación, por las características de las bacterias que la llevan a cabo, y por ser la más lenta de todo el proceso. Actualmente está ampliamente aceptado que la degradación de la materia orgánica sigue la serie de etapas discutida con anterioridad, la cual se puede resumir en el siguiente diagrama de flujo (Rodríguez et al., 2006):

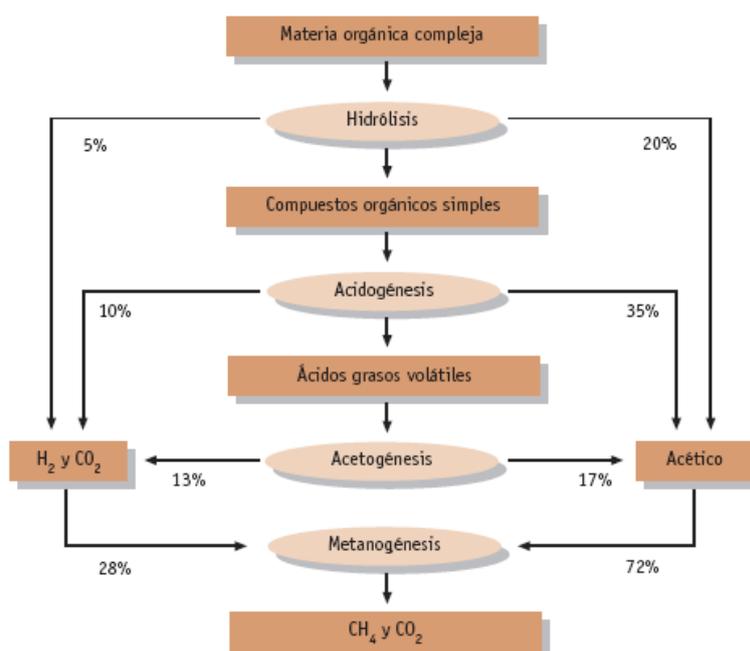


Figura 53. Esquema simplificado del proceso de degradación anaerobia. Fuente: Rodríguez et al., 2006

Tanto las variables físicas como las químicas influyen en el hábitat de los microorganismos. En los procesos anaerobios es importante tener en cuenta la influencia de factores medioambientales. Las bacterias formadoras de metano son las más sensibles a estos factores, por lo que un funcionamiento inadecuado de las mismas puede causar una acumulación de productos intermedios (ácidos) y desestabilizar por completo el sistema (MMA, 2002; Greenpeace, 2005; Rodríguez et al., 2006).

5.3 COMPOSICIÓN DEL LIXIVIADO DE UN RELLENO SANITARIO

Se entiende por lixiviado el líquido residual que es generado en la descomposición bioquímica de los residuos o como resultado de la percolación de agua a través de los residuos en proceso de degradación, este líquido tiende a salir, por gravedad, por la parte inferior del Relleno Sanitario, hasta que una capa impermeable lo impida.

El agua que se introduce en el seno de la masa de residuos, debido principalmente a fuentes externas (agua lluvia, drenaje superficial, aguas subterráneas, entre otras), se filtra a través de los residuos sólidos en descomposición lo que produce la lixiviación de materiales biológicos y compuestos químicos, tanto orgánicos como inorgánicos. Este proceso da lugar a la aparición de unas corrientes líquidas caracterizadas principalmente por un gran número de sustancias, con valores a menudo extremos de pH, alta carga orgánica y metales pesados, así como por su intenso mal olor (MMA,2002; Lopes de Morais, 2005).

En condiciones normales, el lixiviado se encuentra en el fondo de los rellenos sanitarios. Desde allí el movimiento es a través de los estratos subyacentes, aunque también ocurre algún movimiento lateral, dependiendo de las características del material circundante y de la forma del suelo que soporta el lleno (topografía, pendiente, tipo de suelo, forma de la cuenca, etc.). De acuerdo con los conocimientos actuales, las cantidades de lixiviados pueden determinarse según el grado de compactación del relleno: (MMA, 2002; Lopes de Morais, 2005).

- Rellenos compactados con compactadores: 25% de la tasa de precipitación anual (aproximadamente 5 m³/ha/d para el caso de 750 mm de precipitación anual)
- Rellenos compactados con orugas: 40% de la tasa de precipitación anual (aproximadamente 9 m³/ha/d para el caso de 750 mm de precipitación anual).

Las cantidades de lixiviados para rellenos se ubican aproximadamente entre estos valores. En la práctica pueden darse desviaciones de estos valores, condicionadas por particularidades locales. Al calcular las cantidades de lixiviados hay que tener en cuenta que, por lo general, su producción no está distribuida en forma equitativa a lo largo del año (MMA, 2002). En la tabla 32, se muestran los principales factores que afectan la composición del lixiviado de un relleno sanitario (MMA, 2002; Lopes de Morais, 2005; Greenpeace, 2005; Pacheco, 2004; Rodríguez et al., 2006).

Tabla 32. Factores que influyen en las características del lixiviado de relleno sanitario.

Características De Los Residuos Sólidos	Composición, granulometría, humedad, edad del residuo, pretratamiento.
Condiciones Ambientales	Régimen pluviométrico, temperatura, clima, características geológicas del terreno.
Características del Relleno	Aspectos constructivos de las celdas, balance hídrico, grado de compactación, propiedades del terreno, codisposición de residuos líquidos, irrigación, recirculación.
Procesos Internos	Hidrólisis, adsorción, biodegradación, especiación, disolución, reducción, fuerza iónica, tiempo de contacto, generación y transporte de gases.

Fuente: Lopes de Morais, 2005.

La variabilidad de la composición de los residuos dispuestos suele producir un percolado con contenidos elevados de metales pesados (según la edad del lixiviado), compuestos xenobióticos y microorganismos con efectos negativos sobre la salud humana (Silva, 2002; Lopes de Morais

2005; Pacheco 2004). Chirstensen y colaboradores (2001), a partir de una revisión bibliográfica proponen la clasificación de los contaminantes presentes en un lixiviado de relleno sanitario en cuatro grandes categorías:

1. Materia Orgánica Disuelta (MOD), expresada como DQO (Demanda Química de Oxígeno), o COT (Carbono Orgánico Total) e incluyendo metano, ácidos grasos volátiles (AGV) y compuestos biorecalcitrantes (compuestos húmicos y fúlvicos).
2. Macrocomponentes Inorgánicos: calcio, magnesio, sodio, potasio, amonio, hierro, manganeso, cloruros, sulfatos, sulfuros, carbonatos y metales potencialmente tóxicos como: cadmio, cromo, plomo, níquel, cobre, zinc.
3. Compuestos Orgánicos Xenobióticos: Los cuales pueden incluir una gran variedad de compuestos halogenados, compuestos fenolicos, alcoholes, aldehídos, cetonas, ácidos carboxílicos, además de otras sustancias de características tóxicas.
4. Compuestos Traza: Son sustancias encontradas en menores concentraciones como: boro, arsénico, selenio, bario, litio, mercurio y cobalto.

Varios compuestos orgánicos como: ftalatos, hidrocarburos aromáticos policíclicos, fenoles y compuestos aromáticos nitrogenados o clorados, también han sido detectados. Muchos de ellos tienen como fuente productos de uso diario, sin embargo, de acuerdo con Oman y Hinning (1993) es difícil asegurar que un compuesto encontrado en un lixiviado es proveniente de sustancias originalmente presentes en el relleno o es originado mediante procesos de degradación.

La toxicidad del lixiviado no puede ser atribuida únicamente a la presencia de grandes cantidades de compuestos recalcitrantes, metales pesados, elevada alcalinidad y la presencia del ion amonio. Se debe tener en cuenta el efecto sinérgico entre las diferentes sustancias presentes (Pacheco, 2004; Lopes de Morais, 2005).

Debido a la complejidad del lixiviado, su caracterización (composición global) se lleva a cabo a partir de análisis fisicoquímicos y de pruebas biológicas, entre las que se destacan (Silva, 2002; Lopes de Morais 2005; Pacheco 2004):

1. pH.
2. DQO.
3. COT.
4. DBO₅.
5. Nitrógeno Kjeldahl Total (NKT).
6. Nitrógeno Amoniacal (N-NH₃).
7. Alcalinidad.
8. Toxicidad (respirométrica por ejemplo).

Además de los parámetros anteriores existen una serie de relaciones entre ellos, de gran importancia que permiten clasificar el lixiviado generado: (Silva, 2002; Lopes de Morais 2005; Pacheco 2004).

- ✓ Razón de biodegradabilidad (DBO₅/DQO).
- ✓ Razón (Sulfatos/Cloruros).

La razón de biodegradabilidad, puede ser directamente relacionada con la fracción de materia orgánica biodegradable presente y es función de la fase de degradación en que se encuentra el relleno. La relación (sulfatos/cloruros) refleja el grado de anaerobiosis del lixiviado, ya que, a

medida que transcurre el tiempo las bacterias metanogénicas transforman el sulfato y sulfuro presente en el medio (Silva, 2002; Lopes de Morais 2005; Pacheco 2004).

Según Braig y colaboradores (1999) el lixiviado puede ser joven (reciente), intermediario y maduro (viejo). La clasificación se lleva a cabo a partir de las características presentadas con anterioridad y se explica a continuación.

Cuando se tienen valores elevados de la razón de biodegradabilidad (DBO_5/DQO) y de (DQO/COT) existe una presencia elevada de bacterias aerobias y facultativas, lo que se observa de rellenos recién construidos.

De acuerdo con Kjeldsen y colaboradores (2002) una baja relación (DBO_5/DQO) sugiere que el lixiviado contiene bajas concentraciones de ácidos grasos volátiles y concentraciones relativamente altas de ácidos húmicos y fúlvicos. A su vez, Kang y colaboradores (2002) determinan en sus estudios, que más del 60% del COD (Carbono Orgánico Disuelto) de un relleno en fase metanogénica esta en forma de sustancias húmicas. Estudios realizados por Rivas y colaboradores (2004) en los cuales se caracteriza un lixiviado de 12 años de edad proveniente de Badajoz (España) se encontraron los siguientes valores para la relación (CT/DQO)=0.34-0.53.

Harsem y colaboradores (1983) analizaron muestras de lixiviado en fase ácida y en fase metanogénica y encontraron que en las muestras jóvenes, más del 95% de la COD consistía en ácidos grasos volátiles con peso molecular inferior a 120 g/mol y apenas el 1.3% de la COD comprendían sustancias de peso molecular mayor a 1000 g/mol. En el lixiviado maduro, el 42% de la COD era constituido por sustancias de peso molecular mayor a 1000 g/mol.

Debido a que los microorganismos son los encargados de la degradación (tratamiento) de los efluentes más comunes, su incapacidad para degradar o transformar ciertas sustancias es un indicio de su persistencia en el medio ambiente o de su biorecalcitrancia. Esta incapacidad puede estar asociada a:

1. Estructura química compleja.
2. Acción tóxica de los compuestos presentes.
3. Interacción (sinergias) entre compuestos presentes.
4. Generación de compuestos tóxicos debido al metabolismo celular.

La biorecalcitrancia, puede estar relacionada con la presencia de compuestos de elevada masa molecular y de estructuras muy complejas (por ejemplo, sustancias húmicas), que son sustancias parcialmente aromáticas que no exhiben las características fisicoquímicas normalmente asociadas a compuestos de estructura orgánica bien definida (de Morais, 2005). La clasificación de las sustancias húmicas es meramente operacional y esta basada en las propiedades de solubilidad a diferentes valores de pH. El término ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF), y huminas (HU) hace referencia a las principales fracciones usadas hasta el día de hoy para describir los compuestos húmicos. La fracción de AH es aquella soluble a valores de pH alcalino, la fracción AF es aquella que después de la solubilización por álcalis, se mantiene soluble a cualquier valor de pH y la fracción HU es insoluble en todo el rango de pH (Lopes de Morais, 2005). La gran variabilidad en la composición de los lixiviados se refleja en la siguiente tabla tomada de Chirstensen y colaboradores, 2001.

Tabla 33. Composición media de un lixiviado de relleno sanitario.

PARÁMETRO	UNIDAD	RANGO
pH	-	4.5-9.0
Conductividad	[μS/cm]	2500-35000
Sólidos Totales (ST)	[mg/l]	2000-60000
Carbono Orgánico Total (COT)	[mg/l]	30-29000
DBO ₅	[mg/l]	20-57000
DQO	[mg/l]	140-152000
Nitrógeno Orgánico	[mg/l]	14-2500
P total	[mg/l]	0.1-23
Cloruros	[mg/l]	150-4500
Sulfatos	[mg/l]	8-7750
HCO ₃ ⁻	[mg/l]	610-7320
K	[mg/l]	50-3700
Nitrógeno Amoniacal	[mg/l]	50-2200
Calcio	[mg/l]	10-7200
Magnesio	[mg/l]	30-15000
Hierro	[mg/l]	3-5500
Manganeso	[mg/l]	0.03-1400
Arsénico	[μg/l]	0.01-1
Cadmio	[μg/l]	0.0001-0.4
Cromo	[μg/l]	0.02-1.5
Cobalto	[μg/l]	0.005-1.5
Cobre	[μg/l]	0.005-10
Plomo	[μg/l]	0.001-5
Mercurio	[μg/l]	0.00005-0.16
Níquel	[μg/l]	0.015-13
Zinc	[μg/l]	0.03-1000

Fuente: Chirstensen et al., 2001

Adicionalmente, según la edad del relleno se presentan los siguientes valores de composición para el lixiviado (Kjeldsen et al., 2002).

Tabla 34. Composición media de un lixiviado de relleno sanitario según la fase operativa.

PARÁMETRO	UNIDAD	FASE ANAEROBIA		FASE METANOGENICA	
		Rango	V. Medio	Rango	V. Medio
pH	-	4.5-7.5	6.1	7.5-9	8.0
DBO ₅	[mg/l]	4-40000	13000	20-550	180
DQO	[mg/l]	60-60000	22000	500-4500	3000
Biodegradabilidad		-	0.58	-	0.06
Sulfato	[mg/l]	70-1750	500	10-420	80
Calcio	[mg/l]	10-2500	1200	20-600	60
Magnesio	[mg/l]	50-1150	470	40-350	180
Hierro	[mg/l]	20-2100	780	3-250	15
Manganeso	[mg/l]	0.3-65	25	0.03-15	0.7
Zinc	[mg/l]	0.1-120	5.0	0.03-4	0.6

Fuente: Kjeldsen et al., 2002.

5.4 PROCESOS CONVENCIONALES PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS

Muchos de los procesos aplicados al tratamiento de aguas residuales vienen siendo aplicados al tratamiento de lixiviado de relleno sanitario, dentro de los cuales se puede mencionar:

1. Sistemas Aerobios.
2. Sistemas Anaerobios.
3. Sistemas Aerobios-Anaerobios.
4. Oxidación Química.
5. Precipitación-Coagulación.
6. Adsorción con carbón activado (CA).
7. Procesos basados en membranas.

Las principales dificultades observadas dentro del tratamiento del lixiviado están asociadas a las altas concentraciones de materia orgánica (expresada como DQO), alta concentración de nitrógeno en forma amoniacal, componentes tóxicos orgánicos y metales pesados. A continuación se presenta un pequeño resumen de los procesos mencionados en la literatura (Lopes de Morais, 2005).

5.4.1 PROCESOS FISICOQUÍMICOS, COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN-SEDIMENTACIÓN

Se trata de una serie de procesos de uso común en la clarificación del contenido de materiales coloidales y sólidos en suspensión. El principio del proceso consiste en la neutralización de cargas del material en suspensión mediante la adición de agentes floculantes (sulfato de aluminio), después de la adición del agente coagulante se deja la mezcla en reposo para facilitar el proceso de aglutinación. Los coagulantes usados son clasificados en dos grandes grupos: (Pacheco, 2004; Lopes de Morais, 2005).

1. Agentes Inorgánicos: Sulfato de aluminio, cloruro férrico, sulfato ferroso, etc.
2. Agentes Orgánicos: derivados de poliacrilamida, biopolímeros.

Los polímeros sintéticos antes mencionados puede a su vez causar problemas ambientales y de salud pública, debido a que muchos de ellos no son biodegradables y pueden liberar en algunos casos sus correspondientes monómeros, este es el caso de la poliacrilamida (liberación de acrilamida) que es considerado un agente neurotóxico y cancerígeno (Zouboulis et al., 2004). Se debe observar que la eficiencia de esta clase de procesos esta asociada a los siguientes factores:

1. Naturaleza y dosis del agente coagulante.
2. Edad del lixiviado.
3. Tipo de aplicación (pretratamiento-postratamiento).

En la literatura disponible, por lo general, los procesos de coagulación-floculación están limitados al estudio de efectos de las diferentes variables en la conversión final, que por lo general se expresa como un porcentaje de reducción en la DQO y COT. El efecto tóxico asociado a la adición de productos químicos no se menciona (Pacheco, 2004; Lopes de Morais, 2005).

Por otro lado, la electrocoagulación es otra forma de llevar a cabo el proceso, ampliamente utilizada en el caso de tratamiento de aguas industriales. Consiste en la formación de los reactivos in situ mediante la utilización de una celda electrolítica. El ánodo suele ser de aluminio, formándose cationes de Al^{3+} , mientras en el cátodo se genera H_2 .

No hay reglas generales en cuanto a qué coagulante es más eficaz en cada caso. Normalmente, para un agua residual concreta, se hace un denominado “ensayo de jarras” donde se analiza la eficacia de los distintos productos (o mezclas de los mismos) así como el pH y dosificación óptima. Los equipos en los que se lleva a cabo este proceso, suelen constar de dos partes bien diferenciadas: Una primera donde se adicionan los reactivos, y se somete el agua a una fuerte agitación y durante un corto periodo de tiempo, con el objetivo de conseguir una buena y rápida mezcla de reactivos y coloide para llevar a cabo la coagulación. A continuación se pasa a una zona donde la agitación es mucho menos intensa y donde el agua permanece más tiempo. En este caso el objetivo es que se produzca la floculación (Pacheco, 2004; Lopes de Morais, 2005). De esta forma la materia en suspensión tiene unas características mucho más adecuadas para su eliminación mecánica (sedimentación por gravedad).

5.4.2 PROCESOS POR MEMBRANAS

Los procesos de separación por membranas son en general una variación de los procesos de filtración clásica. En el cual los medios filtrantes presentan tamaño de poro muy inferior en comparación con los procesos convencionales. Los procesos son conocidos como: (Pacheco, 2004; Lopes de Morais, 2005).

1. Microfiltración.
2. Ultrafiltración.
3. Nanofiltración.
4. Osmosis Inversa.

Los procesos por membranas han sido muy estudiados durante los últimos años. Según Trebout y colaboradores (2001) la tecnología de membranas, en especial la Osmosis Inversa ha sido ampliamente empleada en Europa. El empleo de la nanofiltración también ha ganado popularidad debido a la capacidad para la remoción de DQO. Amokrane y colaboradores (1997) reportan en sus estudios remociones de hasta un 95% en la DQO y los sólidos totales disueltos mediante Osmosis Inversa, para un lixiviado pretratado mediante: microfiltración y ultrafiltración.

Uno de los principales problemas de la tecnología de membranas esta asociado al alto consumo de energía (por la aplicación de elevadas presiones), al taponamiento de los poros del medio filtrante (que ocurre muy frecuentemente durante el tratamiento de lixiviado) y finalmente a la disposición de un lodo concentrado puede generar un nuevo foco de contaminación (Amokrane et al., 1997).

Finalmente, los procesos fisicoquímicos son empleados por lo general como pretratamiento, con el objetivo de facilitar un tratamiento subsecuente, que en general es de naturaleza biológica. Como se puede notar, la principal desventaja de estos sistemas es el transporte (y concentración) de la matriz contaminante. Adicionalmente, los pretratamientos de este tipo, contribuyen poco al aumento de la biodegradabilidad del lixiviado (eliminación de la fracción toxica), generando problemas de compatibilidad con el tratamiento biológico final (Pacheco, 2004; Lopes de Morais, 2005).

5.4.3 PROCESOS DE TRATAMIENTO MEDIANTE SISTEMAS BIOLÓGICOS

Estudios realizados por Diamadopoulos (1994); Amokrane y colaboradores (1997); Tatsi y colaboradores (2003), demuestran que para un lixiviado joven se tiene una composición caracterizada por bajos pesos moleculares ($PM \leq 120$ g/mol) incluyendo un valor elevado de ácidos grasos volátiles; en estas condiciones la matriz puede ser tratada por procesos biológicos convencionales, específicamente por sistemas aerobios-anaerobios. Las variaciones estacionales que se presentan en la composición del lixiviado pueden afectar de manera severa el desempeño del sistema, por lo cual el proceso biológico debe estar en capacidad para absorber tales fluctuaciones. Debido a que el lixiviado maduro (viejo) presenta una biodegradabilidad inferior a 0.1, además de elevadas concentraciones de nitrógeno amoniacal ($NH_4^+ - N$), se inviabiliza en un principio los tratamientos biológicos, (Amokrane et al., 1997).

Zouboulis y colaboradores (2004), caracterizaron muestras de lixiviado sometidas a tratamiento biológico y encontraron que gran parte de la DQO residual estaba compuesta de sustancias orgánicas no biodegradables. En otro trabajo, Frascari y colaboradores (2004), analizaron muestras de lixiviado tratadas por sistemas de lagunas (TRH superior a 32 días) y muestran que a pesar que se ha dado una reducción apreciable de algunas sustancias inorgánicas (principalmente hierro), no se presentan una reducción significativa del color, lo cual indica una presencia de sustancias húmicas.

Una dificultad inherente al proceso biológico esta asociada a la formación de flóculos, que tienen una gran capacidad de adsorción, en este caso, el sistema biológico termina actuando como un sistema fisicoquímico concentrando los contaminantes biorecalcitrantes, por lo que finalmente, se requerirá de operaciones unitarias adicionales para completar el tratamiento (Pacheco, 2004; Lopes de Morais, 2005).

5.5. NORMATIVIDAD APLICABLE Y DESCRIPCIÓN DEL RELLENO SANITARIO DE TEMIXCO, MORELOS

La NOM-083-ECOL-1996 define que cualquier sitio de disposición final deberá tener una distancia mínima de 1,500 m con respecto a la traza urbana de la población por servir y en el caso de poblaciones rurales la distancia será de hasta 2,500 m. En caso de no cumplirse con esta restricción, se deberá demostrar que no existirá afectación alguna a los centros de población, ya que el riesgo es que después del inicio de las obras para el relleno sanitario, se construyan casas habitación alrededor, en un límite menor al establecido. Básicamente, el relleno sanitario deberá contar con obras de infraestructura, que comprenden básicamente:

- ✓ Impermeabilización del terreno
- ✓ captación de lixiviados y de biogás.

Antes de la construcción de celdas y ampliaciones de las mismas, el concesionario tiene que informar por escrito al concesionante, con copia a la Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de México, Dirección General de Planeación Ambiental. La información deberá contener:

1. Número de ampliación
2. Dimensiones y área de la celda a construir
3. Localización de la celda dentro del relleno sanitario (en un plano de conjunto).
4. Capacidad prevista (en metros cúbicos y toneladas)
5. Vida útil prevista

6. Fecha de construcción
7. Fecha de inicio de operaciones
8. Responsable de la obra.
9. Empresa subcontratada para realizar la obra.
10. Breve descripción de la obra.
11. Modificaciones a lo preestablecido en la Manifestación del Impacto Ambiental.

La información deberá ser entregada por lo menos 3 semanas antes de la fecha prevista al inicio de obra. La autoridad municipal se obliga a entregar la respuesta, haciendo las observaciones necesarias, al plazo correspondiente, en caso de no ser así, se tomara como autorización.

En el caso de que el relleno sanitario cuente con tratamiento de lixiviados, se recomienda la construcción de una laguna que contará con protección sintética (geomembrana de 1.5 mm de espesor) y un sistema de difusores de aire para permitir un tratamiento primario. El cambio del sistema requiere una autorización previa.

Para el control del biogás están previstos los pozos de venteo, se recomienda un mínimo de dos pozos por hectárea de relleno sanitario.

El relleno sanitario deberá estar delimitado por una cerca perimetral de malla ciclónica, para evitar el paso de animales y de personas ajenas al mismo.

Dada la importancia del impacto visual, ambiental y de salud pública, las zonas aledañas al relleno sanitario, la empresa o ente operador del relleno sanitario tiene que planear, ejecutar y controlar los métodos de operación dentro del sitio, incluyendo los caminos de acceso, que deberán estar libres de basura. En lo referente a sitios fuera de operación, los planes de clausura deberán reducir los impactos ambientales a través de los años, por lo que se contemplarán las acciones para:

1. Prevenir la infiltración de agua pluvial hacia el interior del relleno
2. Promover el drenaje de agua superficial fuera del sitio de disposición.
3. Prevenir la erosión de la cubierta final.
4. Prevenir la fuga incontrolada de biogás.

En la siguiente figura, se presenta un resumen de los impactos básicos causado por la operación de un relleno sanitario.

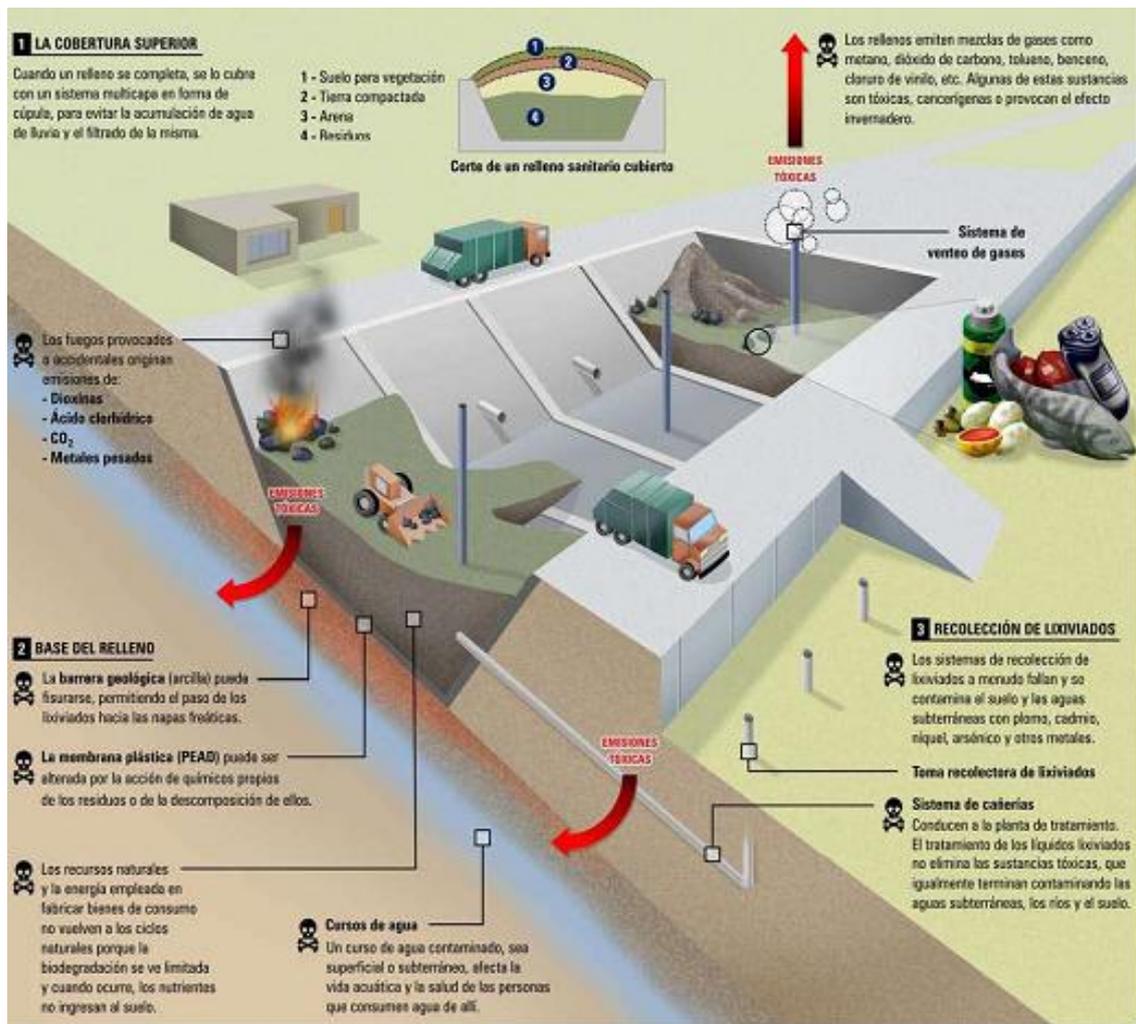


Figura 54. Impactos asociados a la operación de un relleno sanitario. Fuente: Resumen de los Impactos Ambientales y sobre la Salud de los rellenos Sanitarios. Greenpeace Argentina www.greenpeace.org.ar

Las figuras que se presentan a continuación corresponden al sitio de disposición de basuras en Temixco, Morelos, donde se tomaron las muestras de lixiviado para los estudios realizados en este trabajo. En las imágenes se destacan algunos de los aspectos que tienen alto impacto sobre el medio ambiente y la salud de los seres humanos.



Figura 55. Vista lateral del sitio de disposición de basuras, Temixco Morelos.



Figura 56. Zonas aledañas al sitio de disposición de basuras, Temixco Morelos.



Figura 57. Drenajes naturales de lixiviado, Temixco Morelos.



Figura 58. Punto de salida o aflore del lixiviado, Temixco Morelos.



Figura 59. Punto de mezcla con el río, foto 1. Temixco Morelos.



Figura 60. Punto de mezcla con el río, foto 2. Temixco Morelos.



Figura 61. Zona de cultivo aledaña. (Tiradero de basuras, Temixco Morelos).

A partir de las imágenes presentadas se puede concluir de manera preliminar que:

1. Se trata básicamente de un tiradero de basura a cielo abierto.
2. No se cumple con las normas básicas de infraestructura en lo referente al manejo de lixiviado y biogás.
3. Se puede observar en algunas zonas cercanas al río material hospitalario de desecho.
4. No cuenta con sistema de delimitación (evidente presencia de semovientes).
5. El control visual, ambiental y de salud pública perimetral es inexistente.
6. El plan de control post-clausura igualmente es inexistente, según los apartados mencionados con anterioridad.

5.6 CARACTERIZACIÓN DEL LIXIVIADO DEL SITIO DE DISPOSICIÓN DE BASURAS EN TEMIXCO, MORELOS.

Se presenta en la siguiente tabla los resultados obtenidos durante la caracterización del lixiviado obtenido del tiradero de basura ubicado en Temixco, Morelos. La caracterización fue realizada por Margarita Hernández, MSc y Samuel Macías, MSc, en los laboratorios de la Universidad Iberoamericana.

Tabla 35. Composición media del lixiviado obtenido en Temixco, Morelos.

PARÁMETRO	UNIDAD	RANGO
pH	-	7.8-8.4
Sólidos Totales (ST)	[mg/l]	11470
DBO ₅	[mg/l]	250-300
DQO	[mg/l]	7500-8300
O-fosfatos	[mg/l]	74.99
Cloruros	[mg/l]	2569.5
Sulfatos	[mg/l]	No detectable
Nitratos	[mg/l]	1.98
Nitrógeno Amoniacal	[mg/l]	27.36
Alcalinidad (CaCO ₃)	[mg/l]	2500
Turbidez (NTU)	-	32.2
Sólidos sedimentables	-	No observables
Sólidos disueltos	[mg/l]	10714
Sólidos suspendidos	[mg/l]	755.71
Manganeso	[mg/l]	2.472
Hierro	[mg/l]	18.2
Arsénico	[mg/l]	0.8
Cadmio	[mg/l]	0.006
Cromo	[mg/l]	0.44
Cobre	[mg/l]	0.527
Plomo	[mg/l]	0.52
Mercurio	[mg/l]	1
Níquel	[mg/l]	0.137
Zinc	[mg/l]	0.401
Absorbancia (500 nm)	-	8.75
Color observado	-	Café oscuro
BIODEGRADABILIDAD	-	0.0348

Con relación al trabajo de caracterización podemos decir lo siguiente:

1. Se trata de un lixiviado altamente biorecalcitrante (teniendo en cuenta su baja biodegradabilidad), proveniente de un relleno en fase metanogénica. El valor observado de este parámetro se encuentra por debajo de la media reportada en literatura (Pacheco, 2004; de Morais, 2005).
2. La baja relación de (sulfatos/cloruros) nos indica que el relleno se encuentra en una etapa de anaerobiosis, confirmando junto con el dato de biodegradabilidad y de pH que se trata de un relleno sanitario maduro (tiempo de clausura mayor a 10 años).
3. La formación de espumas y la presencia de un color café-pardo indican de manera cualitativa de sustancias altamente biorecalcitrantes como sustancias húmicas.
4. La ausencia de olores molestos en los puntos de muestreo suponen la ausencia de lixiviado joven en la corriente para la cárcava correspondiente. Se debe observar que el tiradero a pesar de la clausura sigue recibiendo basuras, por lo tanto, no se descarta la existencia de una corriente de lixiviado joven e intermedio.
5. La alta absorbancia a menos de 300nm confirma en un principio la presencia de compuestos aromáticos (fenoles).

En el análisis de DBO_5 se debe tener en cuenta que este parámetro no siempre representa adecuadamente la porción de material biodegradable (por lo general el valor es subestimado), debido a la elevada toxicidad de la matriz bajo estudio. Según Hufschmid y colaboradores (2003), existen dos características (casos) que pueden alterar la evaluación de la DBO_5 en tales efluentes:

1. La elevada toxicidad inicial afecta en forma definitiva el desempeño de los microorganismos.
2. Generación de sustancias tóxicas debido al metabolismo microbiano.

5.6.1 COLECTA DE LAS MUESTRAS

El punto de colecta de muestra de lixiviado del presente trabajo, está ubicado en la base del relleno y dadas las características del sitio proviene de celdas antiguas. El lixiviado extraído no ha sido sometido a procesos de pretratamiento y las muestras (40 L aproximadamente) fueron caracterizadas y almacenadas hasta su tratamiento a 4 °C.

Se evaluaron los siguientes parámetros del lixiviado:

- ✓ pH.
- ✓ DBO_5 .
- ✓ DQO.
- ✓ Absorbancia (500nm).

5.6.2 ESTUDIO PRELIMINAR DE BIODEGRADABILIDAD DEL LIXIVIADO

Entre las variables más importantes que se presentan en el estudio de los procesos fotocatalíticos se encuentran:

- ✓ pH.
- ✓ Dosis de reactivos.
- ✓ Procesos de estabilización de la matriz de trabajo.
- ✓ Tiempo de reacción.

Las reacciones que involucran radicales HO^\bullet , son fuertemente dependientes del pH del medio. Es conocido que valores de pH próximos a tres son ideales para procesos de tratamiento de tipo fenton (Fenton clásico, foto Fenton, etc.). La operación a pH superior disminuye la eficiencia debido a la formación de $Fe(OH)_3$ de baja actividad, dicho hidróxido prácticamente no reacciona con el peróxido de hidrógeno (Neyens et al., 2003).

A su vez, un ajuste pronunciado de pH puede afectar de manera significativa la matriz de trabajo debido a la precipitación de sustancias húmicas y ligninas (precipitado de color café) y generando un problema adicional de disposición de lodos. Durante la etapa de caracterización, se determinó la reducción en la DQO y la absorbancia de la muestra a 500nm a partir del cambio de pH. En la figura 62, se muestra el efecto del cambio de pH sobre una muestra de lixiviado sin estabilizar.



Figura 62. Efecto del cambio de pH en la muestra de lixiviado. a) Etapa de ajuste de pH. b) Etapa de sedimentación a pH 2.6 a diferentes tiempos.

En las figuras 63 y 64 se muestran los efectos del cambio de pH en otros parámetros de la muestra.

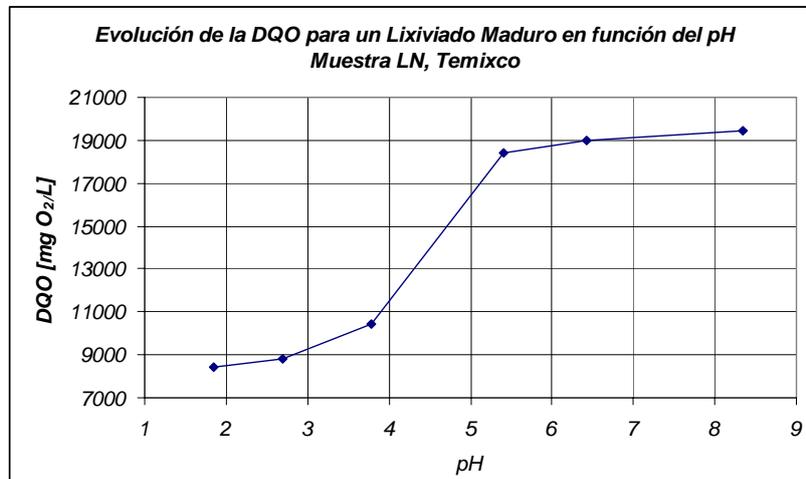


Figura 63. Efecto del cambio de pH de la muestra de lixiviado en la DQO [mg O₂/l]. Muestra LN, Temixco

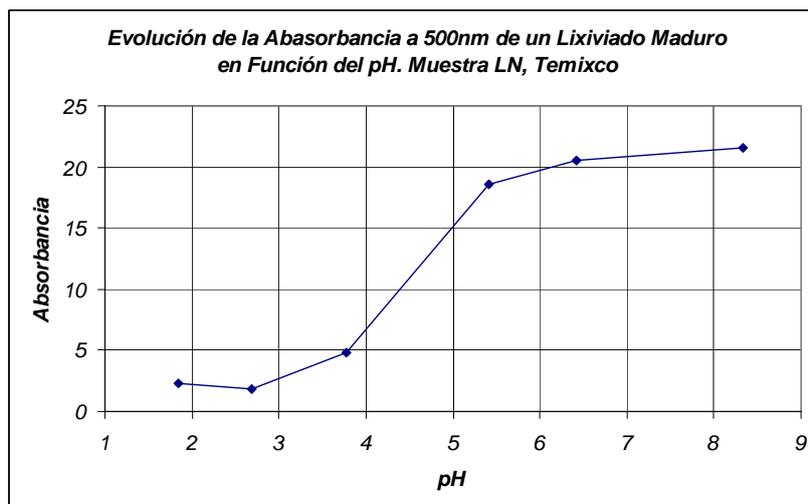


Figura 64. Efecto del cambio de pH de la muestra de lixiviado en la Absorbancia a 500nm. Muestra LN, Temixco

Teniendo en cuenta lo observado en las figuras 62-64, se justifica el uso de condiciones de operación cercanas a la neutralidad, para reducir el efecto del cambio de pH y evitar el traslado de los contaminantes a otra fase. El sistema FeOx-H₂O₂ se caracteriza por obtener buenos desempeños en condiciones próximas a la neutralidad (Yoon et al., 2004; Yoon et al., 2005), garantizando la mineralización o la transformación de los contaminantes iniciales en sustancias menos peligrosas y aprovechando un rango del espectro de radiación mayor a 500 nm (Safazadeh-Amiri et al., 1997).

En las tablas 36 y 37, se presenta un resumen de los resultados de la caracterización de la muestra que incluyen la toxicidad evaluada por el método respirométrico y biodegradabilidad. Se puede observar para el caso de la evaluación de la toxicidad un efecto negativo de la presencia del lixiviado (muestras LV y LN) en la velocidad de consumo de oxígeno, lo que sugiere la presencia de sustancias recalcitrantes.

Tabla 36. Evaluación de la toxicidad por el método respirométrico (consumo de oxígeno) del lixiviado obtenido en Temixco, Morelos (Muestras LV y LN)

Tiempo [min.]	Respiración Endógena I	Respiración Endógena II	Consumo Lixiviado LN1	Consumo Lixiviado LN2	Consumo Lixiviado LV1	Consumo Lixiviado LV2
0	9.61	9.07	5.75	5.94	6.85	7.1
2	9.17	8.66	5.25	5.66	6.65	6.9
4	8.49	7.72	4.92	5.36	6.46	6.71
6	7.82	6.87	4.62	5.07	6.28	6.52
8	7.2	6.03	4.3	4.77	6.09	6.34
10	6.65	5.28	3.98	4.48	5.91	6.16
12	6.17	4.63	3.73	4.21	5.75	5.99
14	5.76	4.04	3.44	3.95	5.59	5.83
16	5.03	3.47	3.19	3.71	5.39	5.62
18	4.46	2.93	2.95	3.48	5.2	5.44
Consumo [mg O₂]	5.15	6.14	2.8	2.46	1.65	1.66
Consumo [mg O₂/min]	0.286	0.341	0.156	0.137	0.092	0.092

Las condiciones operativas de las pruebas mostradas en la tabla 36 y el significado de la notación empleada se presenta a continuación:

- ✓ Temperatura: 22°C aproximadamente.
- ✓ Volumen lodo inoculado: 10 cm³.
- ✓ Volumen lixiviado agregado: 10 cm³.
- ✓ Volumen recipiente pruebas: 60 cm³.

El volumen restante del recipiente completó con agua de dilución saturada de oxígeno.

LV: corresponden a las muestras de lixiviados extraídas en Temixco, Morelos en el año 2006 durante el periodo invierno.

LN: corresponden a las muestras de lixiviados extraídas en Temixco, Morelos en el año 2007 durante el periodo verano.

- LN1: lixiviado nuevo muestra 1.
- LN2: lixiviado nuevo muestra 2.
- LV1: lixiviado viejo muestra 1
- LV2: lixiviado viejo muestra 2.

Tabla 37. Caracterización del lixiviado obtenido en Temixco, Morelos. (Muestra LN)

Muestra	Dilución	DQO	DBO ₅	Biodegradabilidad.
No Tratada	3:1	6485	254.5	0.0392
No Tratada	5:1	3891	183.5	0.0471
No Tratada	7.5:1	2594	139.0	0.0535
No Tratada	15:1	1297	192.0	0.1480

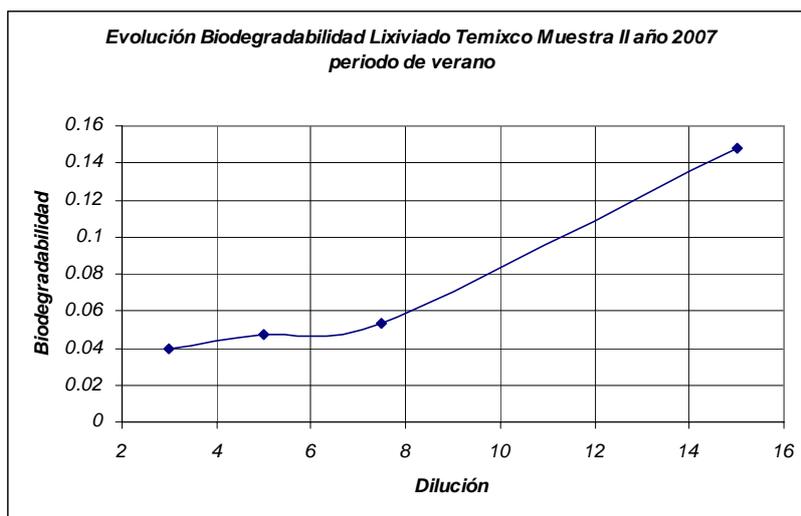


Figura 65. Evolución de la biodegradabilidad en función del número de diluciones para la muestra de lixiviado LN de Temixco, Morelos.

De los resultados mostrados en las tablas 36 y 37 podemos concluir acerca del lixiviado que:

- ✓ Se trata de un lixiviado con una elevada DQO, lo que dificulta en un principio su biodegradación por un solo proceso de tratamiento. Los valores medios estimados para la DQO en el caso del lixiviado viejo y el nuevo fueron: 7500-8300 mg O₂/L y 19000-20000 mg O₂/L respectivamente.
- ✓ A partir de los datos de: pH (8-8.4), biodegradabilidad (<0.04 para las dos clases de muestras) y de reducción en la tasa de consumo de oxígeno, confirmamos la presencia de sustancias recalcitrantes y podemos a su vez catalogar las muestra de lixiviados como maduras.
- ✓ Resulta bastante interesante para las dos muestras analizadas (muestra vieja en periodo de invierno y muestra nueva en periodo de verano) el valor elevado de DQO, lo que supone la presencia de sustancias elevadamente tóxicas. Se debe reconocer que los valores medios reportados en literatura para la DQO de un lixiviado maduro por lo general no exceden los 6000 mg O₂/L (Kjeldsen et al., 2002; Pacheco, 2004; Lopes de Morais, 2005).
- ✓ La no linealidad de la curva de biodegradabilidad resulta razonable si se tiene en cuenta que la DBO₅ es una medida que no es proporcional a la dilución de la muestra (como es el caso de la DQO), atendiendo al fuerte efecto inhibitorio de los contaminantes presentes en el lixiviado a elevadas concentraciones.

5.7 RESULTADOS DEL TRATAMIENTO DE LA MUESTRA I (LV1) MEDIANTE FEOX-H₂O₂ A PH NATURAL.

Dadas la características del lixiviado a tratar se prepararon una serie de pruebas con lixiviado diluido cinco veces para probar la eficiencia del sistema y comparar con la tecnologías disponibles a un mismo nivel de DQO. Las condiciones básicas de operación y los perfiles del estudio se resumen a continuación:

✓ Tipo Reactor:	Reactor B.
✓ Longitud tubo:	50 cm.
✓ Longitud efectiva tubo:	40 cm.
✓ Volumen/tubo	39.26 cm ³ .
✓ Volumen efectivo tubo:	31.41 cm ³ .
✓ Nro. Tubos:	16.
✓ Volumen total (V _T):	1200 cm ³ .
✓ Volumen reacción (V _R):	502 cm ³ .
✓ Relación (V _R /V _T):	0.4188.
✓ Relación (A _C /V _T):	3.2 (cm ² /cm ³).
✓ Relación (A _C /V _R):	7.65 (cm ² /cm ³).
✓ Tiempo de tratamiento:	3h.
✓ Flujo volumétrico:	1500 cm ³ /min.
✓ Hora de trabajo:	11:00 AM-2:00 PM.
✓ Lugar:	Azotea edificio "F" UIA.
✓ pH:	6.86
✓ H ₂ O ₂ :	517 ppm.
✓ Fe ⁽³⁺⁾ :	15 ppm.
✓ K ₂ C ₂ O ₄ :	495 ppm.
✓ DQO:	1364 mg O ₂ /L
✓ Tiempo:	3h.

Nota: En el experimento descrito, se añadió una segunda carga de H₂O₂ de 900 ppm después de 60 minutos de tratamiento para evaluar el efecto en la velocidad de degradación de la muestra. En todos los casos la velocidad de degradación se asocia directamente a la reducción de la DQO o a la tasa de mineralización del lixiviado.

Tabla 38. Fototratamiento del lixiviado obtenido en Temixco, Morelos. (Muestra LV)

Tiempo [min]	Temperatura [°C]	C[H ₂ O ₂] ppm	Color [Abs] 500nm	Remoción Color [%]
0.0	30.0	517.52	1.750	0.0
20.0	31.0	445.85	1.495	14.6
40.0	32.0	338.60	0.849	51.5
60.0	38.0	306.95	0.774	55.8
80.0	30.0	1216.35	0.630	64.0
100.0	35.0	1080.25	0.567	67.6
120.0	37.0	892.45	0.486	72.2
140.0	30.0	800.80	0.465	73.4
160.0	28.0	729.20	0.429	75.5
180.0	29.0	640.00	0.408	76.7

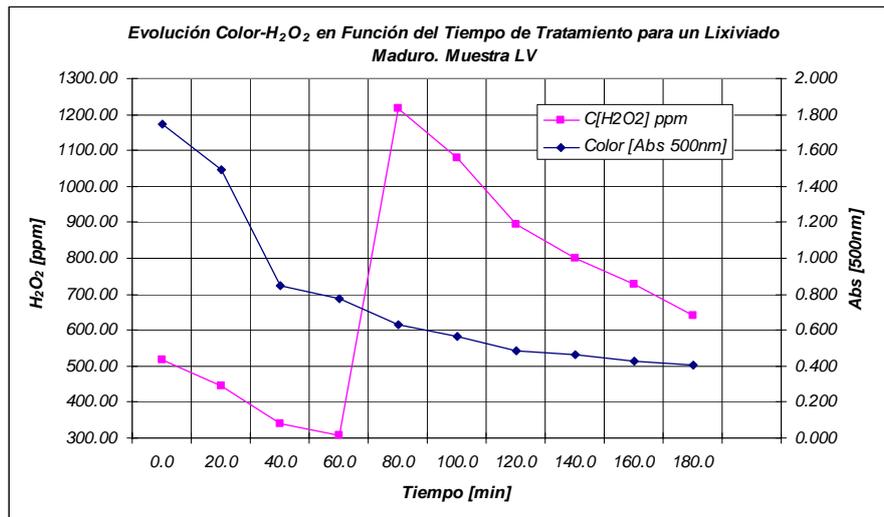


Figura 66. Evolución del proceso de fototratamiento mediado con FeOx-H₂O₂ de lixiviados maduros. Muestra (LV)

Tabla 39. Resultados de las pruebas el fototratamiento de lixiviados mediante procesos fotoasistidos mediados con FeOx-H₂O₂. (Muestra LV)

Muestra	DQO [mgO ₂ /l]	Mineralización [%]	DBO ₅ [mg O ₂ /l]	Biodegradabilidad
Inicial (no tratada)	1364.47	0.0	247.5	0.181
Fina (Tratada)	970.76	28.85	228	0.235

A partir de los resultados obtenidos en la prueba de fototratamiento de lixiviados maduros mediante FeOx-H₂O₂ en el reactor B (tabla 38-39 y figura 66), podemos hacer las siguientes observaciones.

- ✓ El 55.0% de la remoción del color se presenta durante los primeros 60 minutos de prueba y logra una remoción final cercana al 76.7% después de 180 minutos de tratamiento.
- ✓ Existe un remanente de peróxido, como se aprecia en la figura 66 que puede ser aprovechado con una segunda carga de ferrioxalato al reactor para mejorar de esta forma la mineralización del lixiviado. Se debe recordar que el FeOx es el generador de la especie Fe²⁺, que participa en la reacción Fenton.
- ✓ La remoción de la DQO alcanzó un valor cercano al 28.85% sin la observación de precipitados que generen transferencia de contaminantes entre fases. Es decir, se trató de una remoción real del contaminante problema.
- ✓ Si bien los resultados alcanzados mediante FeOx-H₂O₂ en el reactor B, son inferiores a los obtenidos en procesos fotoasistidos (tipo foto Fenton, TiO₂-H₂O₂) a pH ácido, (promedio de 33 % y 44% respectivamente para un proceso fotocatalítico heterogéneo con lámparas UV de lixiviado estabilizado, Lopes de Morais, 2005), se debe tener en cuenta que al acidificar la muestra tratada con ferrioxalato al final del proceso obtenemos remociones superiores al 40% en la DQO sin la generación de grandes cantidades de lodos.

Los datos reportados por Lopes de Morais (2005) y Pacheco (2004) para el fototratamiento de lixiviados mediante procesos Fenton y TiO₂-H₂O₂ asistidos con lámparas UV, indican que la

remoción alcanzada incluye el valor por remoción por cambio de pH y por adsorción de contaminantes sobre el catalizador (TiO_2). Igualmente, los datos de remoción de color (Absorbancia 500nm) presentados en estos trabajos son semejantes a los alcanzados por el proceso con $\text{FeOx-H}_2\text{O}_2$ a pH neutro en el reactor B (reactor solar CPC de 1200 cm^3 operando en flujo cerrado). Igualmente se debe mencionar que en el trabajo desarrollado por Lopes de Morais, (2005) los procesos de tratamiento se realizaron mediante lámparas UV (vapor de mercurio de 125W sin bulbo protector) con volúmenes de reacción cercanos a 120 ml.

Con respecto a los resultados obtenidos en el proceso $\text{FeOx-H}_2\text{O}_2$ (tabla 39), para la biodegradabilidad del efluente, no se alcanzó el valor mínimo de 0.30 para continuar con un tratamiento biológico. Lo anterior se puede explicar debido a las bajas concentraciones usadas de reactivos ($\text{FeOx-H}_2\text{O}_2$). A su vez, el remanente de peróxido causa un DQO adicional según lo expuesto por Kang y colaboradores (1999).

Se puede decir a este respecto, que el peróxido residual además de conducir a una DQO adicional genera un ambiente más agresivo para el desarrollo de los microorganismos. Por lo tanto, es difícil esperar mejores resultados hasta no garantizar una total eliminación del peróxido remanente. Las figuras 67 y 68, muestran el fotorreactor B en operación y el cambio de coloración obtenido mediante el tratamiento con $\text{FeOx-H}_2\text{O}_2$ de la muestra vieja de lixiviado (muestra LV).

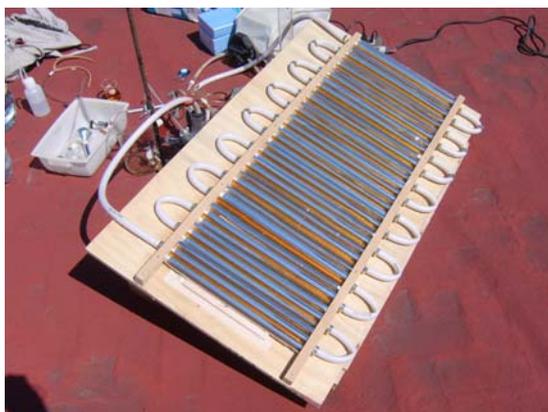


Figura 67. Reactor B en operación durante las pruebas de fototratamiento $\text{FeOx-H}_2\text{O}_2$ de la muestra LV de lixiviado.

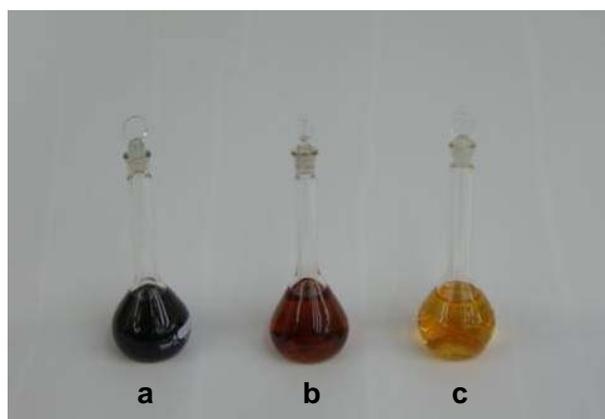


Figura 68. Resultados de la prueba de fototratamiento con $\text{FeOx-H}_2\text{O}_2$ de la muestra LV de lixiviado. a) Muestra no tratada b) Muestra fototratada 180 min. c) Muestra fototratada y acidificada a $\text{pH}=3$.

5.8 TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS MADUROS MEDIANTE PROCESOS FOTO FENTON CON HIERRO CERO VALENTE A pH ÁCIDO EN UN REACTOR BATCH DE FLUJO CERRADO (TIPO C)

La descripción de las condiciones operativas para el tratamiento del lixiviado maduro nuevo mediante procesos foto Fenton con hierro cero se presentan a continuación:

Nombre reactor:	Reactor C.
Diámetro tubo:	1.0 cm.
Longitud tubo:	50 cm.
Longitud efectiva tubo:	40 cm.
Volumen tubo	39.26 cm ³ .
Volumen efectivo:	31.41 cm ³ .
Nro. Tubos:	3.
Volumen total (V _T):	300 cm ³ .
Volumen reacción (V _R):	117.78 cm ³ .
Relación (V _R /V _T):	0.393.
Área captación (A _C):	720 cm ² .
Relación (A _C /V _T):	2.4 (cm ² /cm ³).
Relación (A _C /V _R):	6.11 (cm ² /cm ³).

En los experimentos realizados se exploraron dos niveles de concentración para el hierro y se mantuvo constante la concentración del peróxido de hidrógeno (relación 1:3 a la DQO del lixiviado a tratar):

Nivel 1:	0.10g Fe ⁰ .
Nivel 2:	0.05 g Fe ⁰ .
Muestra lixiviado:	LN
DQO inicial lixiviado:	7646 mg O ₂ /L (muestra LN acidificada)
DQO inicial lixiviado:	19200 mg O ₂ /L (muestra LN no tratada)
Concentración H ₂ O ₂ :	2500 mg/L.

Los resultados de las pruebas se muestran en la tabla 40.

Tabla 40. Resultados para el fototratamiento de lixiviados mediante foto Fenton con hierro cero valente. (Muestra II)

Muestra	Fe ⁰ [g]	Mineralización de la muestra [%] con respecto al lixiviado acidificado	Mineralización de la muestra [%] con respecto al lixiviado no tratado	Reducción Absorbancia fototratamiento [%]	Tiempo de tratamiento [min]
1	0.05	30.2	72.11	51.29	90
2	0.1	37.7	75.20	ND	120

Nota: La concentración de peróxido residual en el efluente tratado en las pruebas mostradas en la tabla 40 fue inferior en todos los casos 5 ppm. ND: No determinada.

A partir de las condiciones experimentales y de la tabla 40 podemos concluir que:

1. Los procesos foto Fenton garantizan una buena remoción global de la DQO en la muestra de lixiviado debido principalmente a la precipitación del material húmico presente en solución.
2. El proceso de fototratamiento presenta un buen rendimiento expresado como un porcentaje de mineralización, pero requiere al menos de una segunda etapa de tratamiento y acondicionamiento debido a la elevada carga orgánica remanente. Se debe reconocer que se

trata de un lixiviado con características bastante complejas dada la elevada DQO y la baja biodegradabilidad, por lo que resulta prácticamente inevitable el uso de un sistema biológico convencional.

3. Los procesos en medio ácido no resultan una alternativa ambientalmente limpia para el tratamiento de lixiviados maduros, si se tiene en cuenta que trasladan el contaminante de una fase a otra concentrándolo y por lo tanto magnificando la potencial tóxico del lixiviado.