

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA EN LIXIVIADOS MADUROS MEDIANTE UN SISTEMA ACOPLADO: COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN-OXIDACIÓN ANÓDICA

\*Eleonora del Carmen Ubaldo Vázquez<sup>1</sup>  
Hugo Alejandro Nájera Aguilar<sup>1</sup>  
Rubén Fernando Gutiérrez Hernández<sup>2</sup>

*EVALUATION OF THE REMOVAL OF MATURE LEACHATE  
ORGANIC CHARGE BY A COUPLED SYSTEM:  
COAGULATION-FLOCCULATION-ANODIC OXIDATION*

*Recibido el 2 de septiembre de 2013; Aceptado el 18 de junio de 2014*

### Abstract

In this work, we evaluated the removal of organic matter measured as COD contained in mature leachate from the landfill to Tuxtla Gutierrez, Chiapas, Mexico, based geographically in 16 ° 39 'north latitude and 0.819 ° 12'0 .85 93 west longitude, with an average elevation of 960msnm. With the application of a coupled system. As a first step we applied the coagulation-flocculation process to different pH values (7, 6 and 5) using as a coagulating solution FeCl<sub>3</sub> 2.2 g L<sup>-1</sup>, fast and slow mixing were performed at 250 rpm for 80 seconds and 30 rpm for 20 minutes, respectively. The best treatment obtained was subjected to the anodic oxidation step using boron-doped diamond (BDD) electrodes at different current intensities (CI) 100, 200 and 300 mA and at pH 3, 5 and 7. The oxidation time was three hours. The higher COD removal (48%) was achieved at pH 5. Anodic oxidation on the best treatment (pH = 3, CI = 300 mA) reached a COD removal of 83%, resulting in a 90% overall removal with the application of the coupled system and increased biodegradability by 69.5% (0.16 to 0.23).

**Key Words:** Anodic oxidation, Coagulation-Flocculation, mature leachate.

<sup>1</sup> Escuela de Ingeniería Ambiental, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, México.

<sup>2</sup> Ingeniería Química y Bioquímica. Instituto Tecnológico de Tapachula, México.

\*Autor correspondiente: Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Lib. Nte. Pte. s/n. Col. Lajas Maciel, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. 29000. México. Email: [leis\\_ubaldo@hotmail.com](mailto:leis_ubaldo@hotmail.com)

## Resumen

En el presente trabajo, se evaluó la remoción de materia orgánica, medida como la demanda química de oxígeno (DQO) contenida en los lixiviados maduros, con la aplicación de un sistema acoplado, provenientes del relleno sanitario de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, ubicado geográficamente en 16° 39' 0.819 de latitud Norte y 93° 12' 0.85 de longitud Oeste, con una altitud media de 960msnm. Como primera etapa se aplicó el proceso de Coagulación-Floculación a diferentes valores de pH (7, 6 y 5) aplicando como coagulante una solución de FeCl<sub>3</sub> 2.2 g/L, la mezcla rápida y lenta se realizó a 250 rpm durante 80 seg y 30 rpm durante 20 min, respectivamente. El mejor tratamiento obtenido fue sometido a la etapa de oxidación anódica, utilizando electrodos de diamante dopado con boro (DDB) a diferentes intensidades de corriente (I.C) de 100, 200 y 300 mA y a pH 3, 5 y 7. El tiempo de oxidación establecido fue de tres horas. La mayor remoción de DQO (48%) se logró a pH 5. La oxidación anódica en su mejor tratamiento (pH=3; I.C= 300 mA) alcanzó una remoción de DQO del 83%, obteniendo una remoción global del 90% con la aplicación del sistema acoplado y el incremento del índice de biodegradabilidad en un 69.5% (0.16 a 0.23).

**Palabras clave:** Coagulación-Floculación, Lixiviados maduros, Oxidación anódica.

## Introducción

Toda actividad antropogénica genera residuos sólidos, los cuales son dirigidos a sitios de disposición final, siendo en este lugar donde surge uno de los principales problemas, la generación de los lixiviados (Romero, 2010). Estos líquidos tienen la capacidad de infiltrarse a través del suelo, hasta los mantos freáticos contaminando las aguas subterráneas (Méndez *et al.* 2004) y, a través de los escurrimientos, las superficiales. Debido a su alta toxicidad, representan un grave problema a la salud de la población expuesta.

Teniendo en cuenta la capacidad de migración y su agresividad cuando no son controlados, y como consecuencia, la contaminación del suelo, agua subterránea y superficial, se hace evidente la necesidad de generar esquemas de tratamiento que favorezcan la depuración de los lixiviados. En el estado de Chiapas tan solo el 31% de los residuos se disponen en sitios controlados (SEMAHN, 2012), mientras que un 69% son dispuestos en tiraderos a cielo abierto (TCA).

En la actualidad, el nulo manejo de los lixiviados constituye la práctica común en el estado de Chiapas, a pesar de ser uno de los líquidos más complejos y contaminantes, sino el mayor, generado ininterrumpidamente en el territorio estatal. Por lo anterior, es necesario llevar a cabo estudios y propuestas de tratamiento capaces de remover la gama de contaminantes que caracterizan a los lixiviados.

Dentro de las opciones de tratamientos, los pretratamientos fisicoquímicos o biológicos acoplados a los procesos avanzados de oxidación (PAO), han demostrado ser eficientes, dentro de estos últimos, la oxidación anódica empleando electrodos de DDB reportan altas eficiencias

de remoción de carga orgánica en lixiviados maduros provenientes de rellenos sanitarios, tal como lo reportan Cabeza *et al.* (2007) y Anglada *et al.* (2009).

Así, en el presente estudio se buscó evaluar la remoción de la materia orgánica, medida como DQO, presente en lixiviados maduros provenientes del relleno sanitario de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, mediante un sistema acoplado Coagulación-Floculación-Oxidación anódica, utilizando electrodos de DDB.

### Metodología

El muestreo se realizó en el cárcamo uno de la zona clausurada del relleno sanitario de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, en temporada de estiaje en enero del 2013, la muestra simple fue transportada en una garrafa de polipropileno al laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas en donde se llevó a cabo la caracterización del lixiviado. Se determinaron los parámetros de pH, Conductividad eléctrica, Turbidez, Alcalinidad, Cloruros, Color, DBO<sub>5</sub> y DQO, esto se realizó conforme a lo establecido en las normas mexicanas y a los Métodos Normalizados para la determinación de aguas residuales, adaptadas a las condiciones de los lixiviados.

Debido a la naturaleza del lixiviado, se aplicó la coagulación-floculación empleando como coagulante una sal inorgánica (FeCl<sub>3</sub>) a una dosis de 2.2 g/L, dosis empleada por Nájera *et al.* (2011) para lixiviados provenientes del mismo sitio, trabajando a diferentes valores de pH (5, 6 y 7). Los ensayos de coagulación-floculación se llevaron a cabo en un equipo de prueba de jarras JARTESTER marca PHIPPS AND BIRD PB-700, adaptándose 3 vasos de precipitado de 250 mL cuyo contenido fue agitado con turbinas tipo Rushton (dimensiones de paletas de 18.5 mm x 43.5 mm).

Antes de iniciar las pruebas, las muestras fueron llevadas a temperatura ambiente, se agitaron y filtraron, con ayuda de una tela de polipropileno, para remover cualquier sólido grueso presente. El volumen de lixiviado en el vaso fue de 150 mL, el periodo de mezcla rápida (250 rpm) y lenta (30 rpm) fue de 80 segundos y 20 minutos respectivamente, al término del tratamiento las muestras se dejaron sedimentar durante una hora y se tomaron alícuotas dos centímetros por debajo del sobrenadante para la determinación de la DQO total.

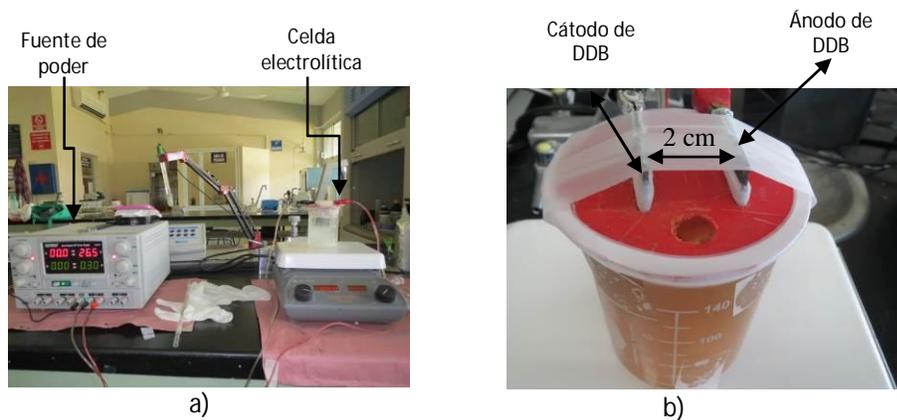
La oxidación anódica se realizó en una celda electrolítica por lote, a tres intensidades de corriente (100, 200 y 300 mA) y tres valores de pH (3, 5 y 7), estos últimos fueron ajustados con NaOH al 2M y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 10%. El número de variables controladas permiten tener un diseño experimental 3<sup>2</sup>, presentado en la Tabla 1, con un total de 9 tratamientos, realizándose 3 repeticiones para cada uno de ellos, con un tiempo de oxidación de tres horas establecido con la construcción de la curva de remoción de DQO.

**Tabla 1.** Diseño experimental  $3^2$  seguido en la segunda etapa del sistema

| Intensidad de Corriente (mA) | pH             |                |                |
|------------------------------|----------------|----------------|----------------|
|                              | 3              | 5              | 7              |
| 100                          | T <sub>1</sub> | T <sub>4</sub> | T <sub>7</sub> |
| 200                          | T <sub>2</sub> | T <sub>5</sub> | T <sub>8</sub> |
| 300                          | T <sub>3</sub> | T <sub>6</sub> | T <sub>9</sub> |

*mA = mili Ampers*

El montaje experimental de la oxidación anódica se observa en la figura 1(a) y 2(b), los electrodos fueron colocados a una distancia de 2 cm de separación, la intensidad de corriente fue suministrada por la fuente de poder marca EXTECH Instruments modelo 382270, en donde por medio de caimanes se condujo la corriente hacia los electrodos de la celda electrolítica, en donde la muestra permaneció a agitación constante (850 rpm).



**Figura 1.** Montaje experimental de la celda electrolítica, por lote, no dividida

La eficiencia de remoción en el parámetro DQO para ambas etapas se determinó usando la ecuación 1.

$$\%Remoción = [(C_i - C_f)/C_i] \times 100 \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

$C_i$  = Concentración inicial de carga orgánica en mg/L

$C_f$  = Concentración final de carga orgánica en mg/L

El índice de biodegradabilidad fue calculado a partir de la ecuación 2

$$IB = DBO_5 / DQO$$

Ecuación (2)

Donde:

IB= Índice de Biodegradabilidad

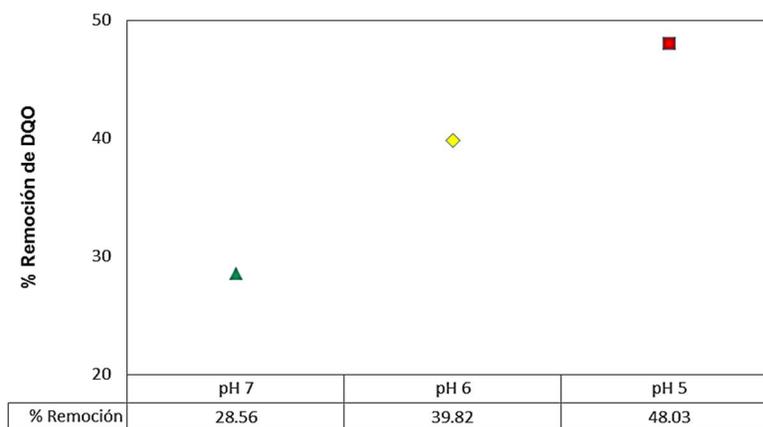
DBO<sub>5</sub>= Demanda Biológica de Oxígeno en mg/L

DQO= Demanda Química de Oxígeno en mg/L

### Resultados

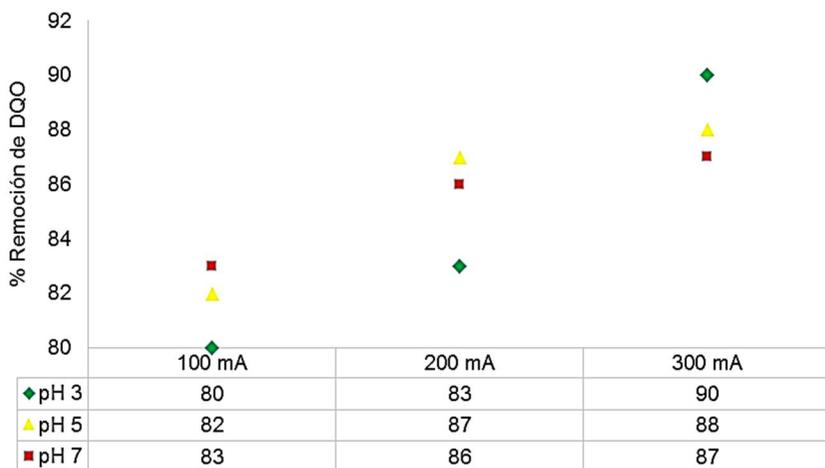
La caracterización del lixiviado arrojó los valores de pH (7.35), Conductividad eléctrica (15.7 mS/cm), Alcalinidad (666.6 mg/L de CaCO<sub>3</sub>), Cloruros (713 mg/L), Color (5940 mg/L), DBO<sub>5</sub> (520 mg/L), DQO (3159.3 mg/L) y IB (0.16), este último de gran importancia para definir el tipo de lixiviado, el cual tiene características propias de un lixiviado maduro, tal como lo reportan Méndez *et al.* (2004), Ntampou *et al.* (2006) Nájera *et al.* (2009) con valores de IB < 0.28.

De los tres tratamientos ensayados en la etapa de Coagulación-Floculación (Figura 2) se observa que la mayor remoción de DQO (48%) se obtuvo a pH 5, con una concentración inicial y final de 3159.3 y 1884.4 mg/L, respectivamente.

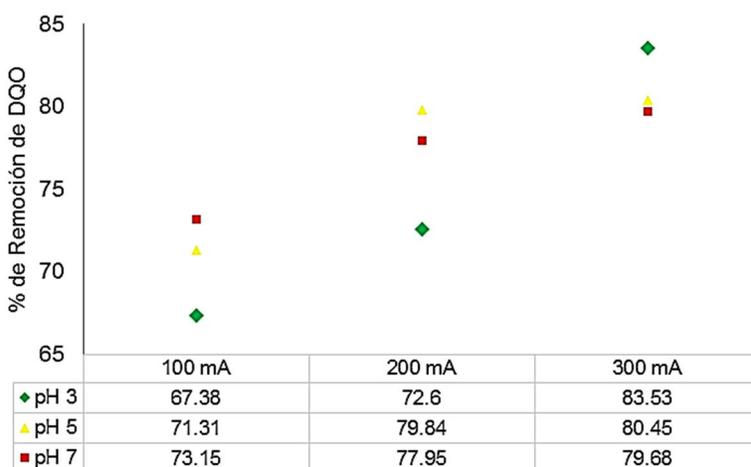


**Figura 2.** Eficiencias de remoción de DQO obtenidas en la etapa de Coagulación-Floculación

En la Figura 3 se observa la gráfica de la eficiencia de remoción de DQO global del sistema acoplado para los nueve tratamientos ensayados en la etapa de oxidación anódica, en donde se consideró el porcentaje de remoción obtenido en el mejor tratamiento de coagulación-floculación (48%) y el porcentaje obtenido con la aplicación de la oxidación anódica.



a)



b)

**Figura 3.** (a) Eficiencia de remoción de la DQO del sistema acoplado, Coagulación-Floculación–Oxidación anódica para los tres valores de pH. (b) Eficiencia de remoción de la DQO en la Oxidación Anódica

En la etapa de oxidación anódica (Figura 3b) se logró remover hasta el 83.5% de DQO al término del tratamiento durante tres horas a una concentración inicial de 1414 mg/L de  $\text{Cl}^-$ . Cabeza *et al.* (2007) reporta alrededor del 80% de remoción de DQO en lixiviados maduros después de tres horas del tratamiento electroquímico a una concentración de 1420 mg/L  $\text{Cl}^-$ , condición similar a la reportada en el presente trabajo para la concentración inicial de  $\text{Cl}^-$ , considerando que en ambos se trabajó con electrodos de DDB sin la adición del electrolito.

De la Figura 3 (a) podemos observar que a una Intensidad de Corriente (I.C.) de 100 mA, las eficiencias de remoción más altas fueron obtenidas a pH 7 (83%), seguidas del pH 5 (82%) y la menor eficiencia a pH 3 (80%), entonces al aplicar una I.C. de 100 mA, la eficiencia de remoción aumentó con el incremento del pH. Sin embargo, son valores de remoción muy cercanos.

Para la I.C. de 200 mA se puede observar un incremento de 3 a 4% para cada pH en la remoción de DQO con respecto a lo obtenido a 100 mA, sin embargo no continúa la tendencia observada en 100 mA, obteniendo la mayor remoción a pH 5 (86%) y la menor a pH 3 (83%). Con la aplicación de 300 mA, contrario a lo obtenido a 100 mA, la eficiencia de remoción aumenta con la disminución del pH, alcanzando una remoción global del 90% de DQO. Nájera *et al.* (2011) reportan eficiencias similares del 90% con la aplicación de coagulación-floculación-Fenton, sin embargo el proceso Fenton tiene como desventaja la generación de lodos, lo que no sucede con la oxidación anódica, debido a que cuando la oxidación anódica se realiza utilizando electrodos de DDB, se favorece la mineralización completa de los compuestos orgánicos (combustión o incineración electroquímica) (Cortés, 2008).

Se realizó el análisis estadístico de los tratamientos utilizando el Software Sigma Plot 12, en donde, de acuerdo con los resultados del análisis de varianza y a lo observado en el gráfico de superficie de respuesta (Figura 4), se tiene que de los dos factores estudiados (pH e I.C.), el segundo es el que presentó un mayor efecto sobre la variable respuesta, esto es, a mayor I.C. el porcentaje de remoción de la DQO fue mayor.

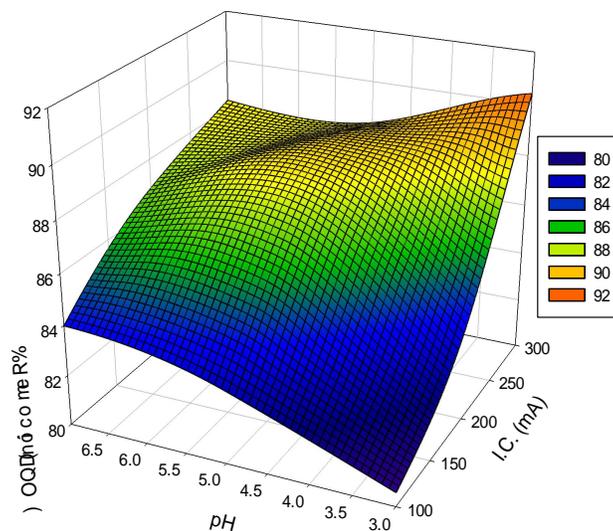
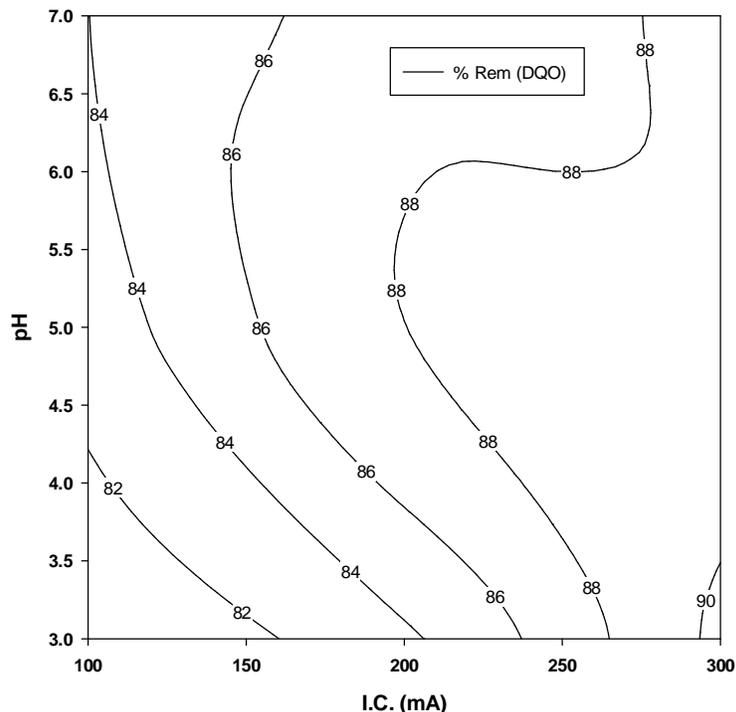


Figura 4. Gráfica de superficie de respuesta en la remoción de DQO con los dos factores ensayados

Para el caso del pH no se observan diferencias significativas en sus diferentes niveles ( $p=0.001$ ). Finalmente, para el caso de la I.C. (mA) y el pH, existe una interacción estadísticamente significativa ( $P < 0,001$ ).

Otra forma de representar la influencia que el factor I.C. tuvo en la remoción de la DQO, se muestra a través de la figura 5, donde se observa que la máxima remoción (90%) correspondió a una I.C. de 300 mA y pH de 3.



**Figura 5.** Gráfico de contorno con la influencia de los factores estudiados

### Conclusiones

Se logró evaluar la remoción en la concentración de la DQO en el tratamiento de los lixiviados maduros provenientes del cárcamo uno de la zona clausurada del relleno sanitario de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Con la aplicación de la etapa de Coagulación-Floculación y de oxidación anódica, se alcanzaron remociones del 48 y 83% de DQO, respectivamente.

La eficiencia global del sistema acoplado fue del 90% de remoción de la DQO, a condiciones de pH 5 a una concentración 2.2 g/L de  $FeCl_3$  para la etapa de Coagulación - Floculación y a pH 3

aplicando una I.C. de 300 mA en la etapa de Oxidación anódica, eficiencias equiparables a las encontradas en otros estudios pero con la gran ventaja de obtener una menor producción de lodos.

Se obtuvo un incremento en el IB de 0.16 a 0.23, sin embargo continua siendo bajo para un posterior tratamiento biológico.

### Agradecimientos

Al programa de mejoramiento al profesorado (PROMEP), perteneciente a la Secretaría de Educación Pública, México, por el financiamiento del presente proyecto en su primera etapa.

### Referencias

- Anglada, A., Urtiaga, A., Ortiz, I. (2009). Pilot Scale Performance of the Electro-Oxidation of Landfill Leachate at Boron-Doped Diamond Anodes, *Environmental Science and Technology*, **43**(6), 2035–2040.
- Cabeza, A., Urtiaga A., Ortiz I. (2007). Electrochemical Treatment of Landfill Leachates Using a Boron-Doped Diamond Anode, *Environmental Science and Technology*, **46**(5), 1439–1446.
- Cortés, Y. (2008). *Estudio de la degradación electroquímica de la desmentrina en medio acuoso*. Tesis inédita de Maestría. Universidad Politécnica de Catalunya. Catalunya, España.
- Méndez, R., Castillo E., Sauri M., Quintal C., Jiménez B. (2004). Tratamiento físico químico de los lixiviados de un relleno sanitario, *Ingeniería Revista Académica*, **8**(02), 155-163.
- Nájera, H., Castañón, J., Figueroa, J., Rojas-Valencia, M. (2009). Caracterización y tratamiento fisicoquímico de lixiviados maduros producidos en el sitio de disposición final de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. Red de Ingeniería en Saneamiento básico, *International Journal of Environmental Engineering*, **4**
- Nájera, H., Castañón, J., Figueroa, J., Rojas-Valencia, M. (2009). Caracterización y tratamiento fisicoquímico de lixiviados maduros producidos en el sitio de disposición final de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. Red de Ingeniería en Saneamiento básico, *International Journal of Environmental Engineering*, **3**/[2\(4\)](#), [372-382](#).
- Nájera, H., Vázquez, R., Gutiérrez, R., Bello, R., Rojas-Valencia, M. (2011). Physicochemical treatment of mature leachates, from Tuxtla Gutiérrez, Chiapas landfill. *Sustain. Environ. Res*, **21**(5), 313-319.
- Ntampou, X., Zouboulis, A., Samaras, P. (2006). Appropriate combination of physico-chemical methods (coagulation/flocculation and ozonation) for the efficient treatment of landfill leachates. *Chemosphere*, **62**, 722-730.
- Romero, C. (2010). *Aprovechamiento Integral de Lixiviados*. Tesis inédita de Doctorado, Universidad de Salamanca. Salamanca, España.
- SEMAHN, (2012). Secretaria de medio ambiente e historia natural, consultado desde: <http://www.semahn.chiapas.gob.mx/portal/residuos/diagno>