

CAPTURA SUSTENTABLE DEL DIÓXIDO DE CARBONO EN LOS LIXIVIADOS DE UN RELLENO SANITARIO

M. en C.A. **Ranulfo Gómez- Bravo^a**; Dra. **Verónica Martínez-Miranda^a**,
Dra. **Violeta Lugo-Lugo^b**, Dra. **Ivonne Linares-Hernández^{a*}**,
Dr. **Abraham David^c Benavides**, Dr. **Pablo G. Romanazzi**

^aCentro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería,
Universidad Autónoma del Estado de México, Carretera Toluca-Ixtlahuaca,
Km. 14.5, C.P. 50200, Toluca, Estado de México, México.

ilinaresh@uaemex.mx

^bUniversidad Tecnológica del Valle de Toluca, Carretera del Departamento del
D.F. km 7.5, Santa María Atarasquillo, Lerma, México. ^c University of North
Texas, Chilton Hall 204F, 410 Avenue C, Denton, TX 76201, USA. ^d
Departamento de Hidráulica. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de
La Plata. Calle 47 Nro. 200, 1er. piso, Of. 6.

Resumen

Las actividades de tratamiento y manejo de los residuos sólidos urbanos (RSU) son fuente de emisión de gases de efecto invernadero tales como son el metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂), principales gases generados y emitidos por los rellenos de RSU. Según la EPA, los rellenos generan aproximadamente el 20,2% del total de las emisiones de metano antropogénico, y es el tercer más grande generador de éstos en los EE.UU. Otro producto de la descomposición de los RSU en un relleno son los lixiviados, efluente líquido formado por la infiltración del agua de lluvia e hidrólisis de los RSU, orgánicos e inorgánicos. En el sitio de estudio se utiliza un material arcilloso llamado tepetate y parcialmente también un compuesto de cal comercialmente denominado calhidra, ambos como medio de recubrimiento de los RSU previo a la compactación. En el presente trabajo se estudia la capacidad de los lixiviados para capturar, en los rellenos, el CO₂ producido por la descomposición de la materia orgánica de los RSU, y por la propiedad del agua de disolver este gas y de retenerlo en forma disuelta como bicarbonato cuando el pH del lixiviado tiende a un valor básico al aumentar la edad de operación, como es el caso del sitio en estudio en el que el pH es de 8.2 a 8.7; una expresión de la concentración del CO₂ capturado en el lixiviado es la alcalinidad como g/m³ de carbonato de calcio, que aquí llega a ser mayor a las 14.000 unidades de alcalinidad y que equivale a más de 12 kg de CO₂/m³ de lixiviado. Una condición que promueve la interacción de fases líquido-gas para la captura del CO₂ en el lixiviado es el encapsulado de los RSU en capas de recubrimiento de tepetate y calhidra.

Palabras clave: relleno sanitario * lixiviados * alcalinidad * captación de CO₂.

1. Introducción

Las actividades de tratamiento y manejo de los residuos sólidos son fuente de emisiones de gas de efecto invernadero. El metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) son los constituyentes primarios de generación y emisión de gas (biogás) en los rellenos sanitarios. Las guías del Panel Intergubernamental Sobre cambio climático de 2006 (IPCC por sus siglas en inglés), fijó una convención internacional para no reportar CO₂ biogénico por la descomposición de residuos sólidos en rellenos sanitarios en el sector WASTE (IPCC 2006).

Los lixiviados son el efluente líquido, que pasa a través de los residuos depositados en un rellenos sanitarios, debido a la infiltración de agua de lluvia e hidrólisis de desechos, provenientes de los residuos sólidos urbanos (RSU) y emanados por el relleno o vertedero (Sanjay 2013), que contienen grandes cantidades de materia orgánica; en su mayoría son: sustancias húmicas junto con especies nitrogenadas, metales pesados, compuestos orgánicos como organoclorados, fenólicos, incluso plaguicidas. Sus características fisicoquímicas están representadas típicamente por la Demanda Química de Oxígeno (DQO), Carbono Orgánico Total (COT), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), relación DBO₅/DQO, pH, Sólidos Suspendidos (SS), Nitrógeno Amoniacal (NH₃-N), Nitrógeno total Kjeldahl (TKN), materia microbiológica, turbidez y contenido de metales. En la Tabla I, se observa como la antigüedad del relleno influye en su composición (Ziyang, 2009).

Tabla I. Clasificación de lixiviados de relleno con respecto al tiempo (Ziyang, 2009).

| Parámetro | Joven < 5 años | Medio de 5-10 años | Viejo > 10 años |
|-------------------------------|----------------|--------------------|-----------------|
| pH | < 6,5 | 6,5 – 7,5 | > 7,5 |
| DQO (mg de O ₂ /L) | > 10.000 | 4.000 – 10.000 | < 4.000 |
| DBO ₅ /DQO | 0,5 – 1 | 0,1 – 0,5 | < 0,1 |
| N-NH ₃ (mg/L) | < 400 | - | > 400 |
| Metales pesados (mg/L) | Bajo – medio | Bajo | <bajo |
| Biodegradabilidad | Alta | Media | Baja |

En general, la composición de los lixiviados es compleja y su generación se ha elevado en los últimos años, debido al incremento de la población y al crecimiento consiguiente de RSU enviados a rellenos sanitarios; así como la cantidad existente de rellenos irregulares en operación. En conjunto, se genera un riesgo potencial por los lixiviados producidos en tales sitios ya que se

pueden infiltrar en el subsuelo y afectar a los mantos freáticos de donde se extrae agua para uso y consumo humano.

Poco ha sido el interés por cuantificar el contenido de CO₂ y de conocer su comportamiento en este tipo de lixiviados, que pueden capturar o emitir grandes cantidades de CO₂ en función del pH, composición iónica, temperatura y antigüedad. En este trabajo se presenta una alternativa de captura sustentable de CO₂ que mitiga las emisiones de este gas a la atmósfera en un relleno sanitario cubierto con un material de compactación con alto contenido de arcilla conocido como tepetate.

2. Metodología

Se estudiaron lixiviados de un relleno sanitario sin clasificación de residuos donde se ha acumulado los desechos de esta entidad de los últimos 8 años, que está por clausurarse y se ha recubierto con capas de tepetate, donde se generan lixiviados que son contenidos en una pequeña represa, sin que al momento sean tratados. Se tomó una muestra de lixiviados que se colocó en contenedores de plástico y se transportó al laboratorio donde se refrigeró a 4°C para analizarla posteriormente. Los parámetros se analizaron de acuerdo a los métodos estándar (APHA-AWWA-WPCF, 2005).

3. Resultados

3.1 Caracterización fisicoquímica de la muestra

Después de su depósito en el relleno sanitario en estudio, los RSU generados por la población, resultan en una mezcla de materia orgánica e inorgánica con una mínima separación realizada por personas que lo consideran como su actividad económica. Esta mezcla es inicialmente descompuesta por las bacterias aeróbicas. Después que el oxígeno es agotado, los residuos remanentes son consumidos por bacterias anaeróbicas, las cuales descomponen los desechos residuales, en sustancias orgánicas de cadena corta que son la fuente de sustrato para el crecimiento de bacterias metanogénicas. En esta etapa se genera biogás, que está constituido aproximadamente por 50% de CO₂ y 50% de CH₄ en volumen.

Basado en literatura reciente, el tipo específico de material de recubrimiento puede afectar la velocidad de oxidación del gas del relleno sanitario (RTI 2011). Los materiales de recubrimiento más comúnmente usados son tierra, barro y arena. Algunos estados también permiten el uso de residuos verdes, lonas, materiales derivados de residuos, lodo residual o biosólidos y tierra contaminada como recubrimiento diario. En el relleno sanitario en estudio las capas de recubrimiento que se aplican sobre los RSU en forma diaria están constituidos principalmente por tepetate y ocasionalmente por calhidra (nombre comercial que recibe la cal hidratada), sobre la materia orgánica animal. El tepetate que se utiliza como recubrimiento es un material abundante en la región. Esta región carece del desarrollo de alguna otra actividad económica como la agricultura, debido a que tiene poca fertilidad por la alta presencia de material arcilloso que absorbe grandes cantidades de agua y que tiende a endurecerse al perder la humedad.

Una muestra de lixiviado proveniente del relleno sanitario de residuos sólidos obtenida en Abril de 2015, de color café oscuro que mantiene en solución la mayor parte de sus contaminantes con una mínima presencia de sedimento. El lixiviado corresponde a un relleno en uso de al menos 8 años de antigüedad (Tabla II).

Tabla II. Parámetros analizados en la muestra de lixiviado.

| Parámetro | Unidad | Contenido |
|-------------------------------------|--|-----------|
| pH | | 8,2 |
| Conductividad electrolítica (CE) | mS/cm | 18,825 |
| Alcalinidad | g/m ³ CaCO ₃ | 6825,00 |
| Acidez | g/m ³ CaCO ₃ | 2028,89 |
| Carbono total | g/m ³ CT | 4454,00 |
| Carbono inorgánico | g/m ³ CI | 1471,60 |
| Carbono orgánico total | g/m ³ COT | 2982,60 |
| Demanda química de oxígeno (DQO) | g/m ³ O ₂ | 7440,00 |
| Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) | g/m ³ DBO ₅ | 331,18 |
| Relación DBO / DQO | | 0,044 |
| Cloruros | g/m ³ Cl ⁻ | 5438,03 |
| Sulfatos | g/m ³ SO ₄ ²⁻ | 2171,69 |
| N-amoniacal | g/m ³ N-NH ₃ | 810,67 |
| Nitratos | g/m ³ NO ₃ ⁻ | 71,15 |
| Nitritos | g/m ³ NO ₂ ⁻ | 0,008 |
| Fósforo total | g/m ³ P total | 12,31 |
| Sodio | g/m ³ Na | 1728,91 |
| Potasio | g/m ³ K | 843,89 |
| Calcio | g/m ³ Ca | 229,56 |
| Magnesio | g/m ³ Mg | 229,85 |
| Silicio | g/m ³ Si | 28,40 |
| Hierro | g/m ³ Fe | 20,29 |
| Cromo | g/m ³ Cr | 2,35 |
| Manganeso | g/m ³ Mn | 1,66 |
| Níquel | g/m ³ Ni | 0,51 |
| Zinc | g/m ³ Zn | 0,46 |
| Cadmio | g/m ³ Cd | 0,03 |
| Sólidos Disueltos Totales (SDT) | g/m ³ SDT | 14.121 |
| Sólidos Suspendidos Totales (SST) | g/m ³ SST | 975 |

La generación de lixiviados en un relleno depende de varios factores: su edad, la naturaleza de los RSU, el contenido de humedad, su grado de compactación, condiciones climáticas entre otros (Renou et al., 2008). Al comparar los parámetros valorados en la muestra de lixiviado con respecto a lo reportado por Renou *et al.*, 2008, éstos corresponden en lo general a un lixiviado entre edad mediana a vieja.

En esta etapa del relleno sanitario, el gas generado migra hacia la superficie a través de las capas de la materia en descomposición, sin que sea aprovechado. Asimismo, el cual interactúa a contraflujo con los lixiviados de los RSU que fluyen por gravedad y es capturando por éstos que incrementan el contenido CO₂ en forma de alcalinidad (Tabla II).

El pH de 8,2 obtenido en la muestra de lixiviado analizada sugiere también que es un relleno clasificado como de edad media tendiendo a edad vieja, según la guía propuesta por Ziyang et al., (2015).

La concentración de SDT de 14.121 g/m³ en el lixiviado del relleno sanitario en estudio son más elevados que los SDT (9.619 g/m³) reportados por Fan et al. (2006), con una mayor presencia de Na, K, Ca y Mg (Tabla II).

La muestra aporta un valor de alcalinidad 6.825,00 g/m³ como CaCO₃, que es equivalente a 8.196,29 g/m³ HCO₃⁻ y 64,04 g/m³ CO₃²⁻, los mismos que fueron calculados usando las ecuaciones 1 y 2 de Deutsch (1997). Con lo anterior se puede inferir que la mayor parte de CO₂ generado en el relleno sanitario está en forma disuelta como HCO₃⁻.

$$[HCO_3^-] \frac{mg}{L} = \frac{Alk \left(\frac{mg \text{ de } CaCO_3}{L} \right)}{1 + \frac{2 \times 10^{-10.3}}{10^{-pH}} \times 50} \times 61 \quad \text{reacción 1}$$

$$[CO_3^{2-}] \frac{mg}{L} = \frac{Alk \left(\frac{mg \text{ de } CaCO_3}{L} \right)}{2 + \frac{10^{-pH}}{10^{-10.3}} \times 50} \times 60 \quad \text{reacción 2}$$

Con el diagrama de especiación de los constituyentes mayoritarios del lixiviado de la Figura 1 se demuestra que al valor de pH 8,2 hay un predominio de bicarbonatos (HCO₃⁻) y una fracción pequeña (menos del 10%), de la especie carbonato (CO₃²⁻) presente en el lixiviado que se combina con calcio y magnesio en forma sólida.

La captura de CO₂ corresponde a la capacidad que tiene el agua de disolver este gas y formar H₂CO₃ (reacción 1). En el lixiviado que es alcalino se verifica una reacción instantánea ácido-base entre CO₂ y el medio alcalino. Donde el carbono del CO₂, queda atrapado en la solución acuosa como bicarbonato (HCO₃⁻), la reacción es reversible y dependiente del valor del pH (reacción 2). Una segunda reacción ácido-base a un pH más elevado puede formar CO₃²⁻ (reacción 3). Estas reacciones permitieron capturar el CO₂ gas en forma de HCO₃⁻ en el lixiviado, debido al aislamiento producido por la compactación con el tepetate, tal como se maneja para el enriquecimiento del biogas generado en digestores anaerobios (Danckwerts, 1970; Tippayawong y Thanompongshart, 2010).

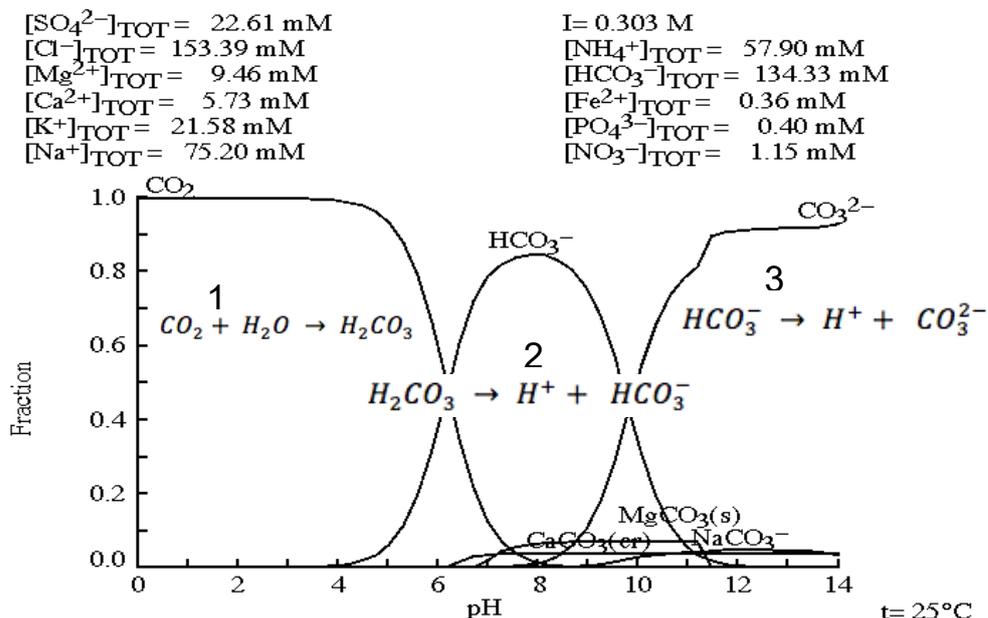


Figura 1. Diagrama de especiación de carbonatos y bicarbonatos.

Como se tiene capturado al CO_2 en forma de HCO_3^- se puede llegar a la formación casi total de la forma de CO_3^{2-} incrementando el valor de pH como se muestra en la Figura 1. Así, se puede aprovechar esta transformación para tener especies químicas sólidas de fácil manejo que pueden ser utilizadas en la industria de la construcción, en productos agroquímicos como recuperadores de suelos ácidos, debido a que se tienen lixiviados que contienen muy bajas concentraciones de metales pesados y con una proporción de materia orgánica (Tabla II).

Al mismo tiempo se considera que el biogás que se produzca en el relleno sanitario como producto de la descomposición de la materia orgánica tendrá menor concentración de CO_2 ; ésta es una alternativa de purificación ya establecida para este tipo de biogás (Tippayawong y Thanompongshart, 2010). Con el propósito de comprender más el comportamiento de captura de CO_2 en forma de alcalinidad como HCO_3^- , se determinó variación en los valores de la alcalinidad y de las especies que la conforman HCO_3^- y CO_3^{2-} (Figura 2). La concentración depende de la cantidad de humedad con respecto a la época del año. La muestra M3 fue obtenida en lluvias torrenciales circunstanciales donde la concentración de alcalinidad disminuyó.

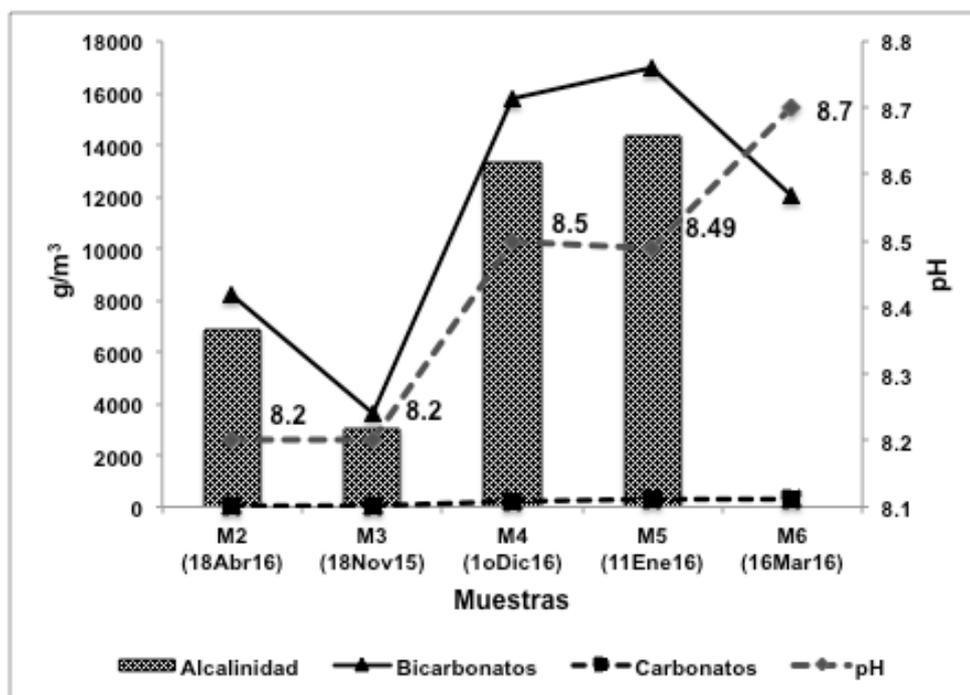


Figura 2. Valores pH; de contenido de alcalinidad, de bicarbonatos y carbonatos en varias muestras en g/m³.

4. Conclusiones

El proceso de compactación de los RSU con tepetate como se realiza en el relleno sanitario en estudio, permite la captación de dióxido de carbono generado por el proceso de descomposición anaerobia de la materia orgánica. El dióxido de carbono capturado se evidencia por la presencia de alcalinidad elevada en el lixiviado en forma de bicarbonatos y que varía en función de la humedad en los residuos. Parte de esa alcalinidad es modificada por la presencia parcial de “calhidra” usada cuando se vierten sobre materia orgánica animales. El lixiviado resultante se puede aprovechar si el dióxido de carbono retenido se precipita en forma sólida como carbonatos al incrementar su valor de pH y ser de beneficio éste sólido en la remediación de suelos ácidos.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen: a CONACYT por la beca de investigación. A “*The 100,000 Strong in the Americas Initiative*” por el apoyo económico otorgado para el proyecto tripartita entre UNT-UNLP-UAEMex “*Bridging the Americas: Promoting Global Solutions for Local Landfill Problems through Student Service and Learning*”; A la UAEMex por la beca de Estancia Corta a través de la Secretaría de Cooperación Internacional. H.H. Ayuntamiento de Atlacomulco, Estado de México por apoyo y facilidades a este proyecto. Al COMECYT por el apoyo económico otorgado para la asistencia a este congreso.

6. Referencias bibliográficas.

APHA–AWWA–WPCF. Standard methods for examination of water and wastewater. 17th edition. Washington D. C. U.S.A.: American Public Health Association and Water Pollution Control Federation, 2005.

DRAFT Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990 – 2014, EPA 430-R-16002.

<http://www.epa.gov/climatechange/emissions/usinventoryreport/.html>

Danckwerts PV. Gas – Liquid Reactions, McGrawhill, 1970.

Fan HJ, Shu HY, Yang HS, Chen WC. Characteristics of landfill leachates in central Taiwan. Science of the Total Environment 2006; 361: 25–37.

Renou S, Givaudan JG, Poulain S, Dirassouyan F, Moulin P. Landfill leachate treatment: review and opportunity. Journal of Hazardous Materials 2008; 150: 468-93.

Rodier J. Análisis de las Aguas. Ediciones Omega. Barcelona, España, 1998.

Sanjay M, Amit D, Mkhherjee SN. Real Life MSW Landfill leachate treatment by combined coagulation-flocculation and carbon adsorption for removal of phenol and organic load (COD). International Journal of Chemical and Environmental Engineering 2014; 5 (1).

Tippayawong N, Thanompongchart P. Biogas quality upgrades by simultaneous removal of CO₂ and H₂S in a packed column reactor. Energy 2010; 35: 4531– 35.

Ziyang L, Bing D, Xiaoli C, Yu S, Youcai Z, Nanwen Z. Characterization of refuse landfill leachates of three different stages in landfill stabilization process. Journal of Environmental Sciences 2009; 21: 1309–14.