

MODELACIÓN DE UNA CELDA VERTEDERO EXPERIMENTAL CON MODUELO 4.0

Ana LÓPEZ MARTÍNEZ^{1*}, Ricardo J. GONZALORENA VALLEJOS¹,
Miguel CUARTAS HERNÁNDEZ² y Amaya LOBO GARCÍA DE CORTÁZAR¹

¹ Grupo de Ingeniería Ambiental, Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria, Bulevar Ronda Rufino Peón 254, 39316 Tanos-Torrelavega, Cantabria, España

² Grupo de Tecnologías de la Información, Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación, Universidad de Cantabria, Avda. de los Castros s/n, 39005 Santander, Cantabria, España

*Autora responsable; lopezan@unican.es

(Recibido agosto 2011, aceptado diciembre 2011)

Palabras clave: asentamientos, biogás, lixiviado, simulación

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de simulación de una celda-vertedero aislada, gestionada de manera controlada durante 3 años y medio por el Grupo de Gestión de Residuos de la Universidad de Southampton, Inglaterra. Para ello se ha utilizado la herramienta de simulación de vertederos de residuos sólidos urbanos Moduelo 4.0, desarrollada por el Grupo de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cantabria, España. En este artículo se resume la metodología utilizada para la modelación y los supuestos y simplificaciones realizadas al modelo original para adaptarse al caso simulado. Finalmente se presenta un análisis de los resultados obtenidos, una descripción de los problemas encontrados en el proceso de modelación y propuestas de mejora del programa utilizado.

Key words: settlement, biogas, leachate, simulation

ABSTRACT

The simulation results of an isolated landfill cell are presented in this paper. It was controlled for three years and a half by the Waste Management Research Group of the University of Southampton (England). In order to simulate the cell, the municipal solid waste landfill simulation tool, Moduelo 4.0, developed by the Grupo de Ingeniería Ambiental (Environmental Engineering Group) of the University of Cantabria (Spain), was used. In this article the methodology used for the modelization and the suppositions and simplifications made to the original model to adapt to the simulated case are summarized. Finally, an analysis of the results obtained, a description of the problems found in the modelization process and proposals for the improvement of the program used are presented.

INTRODUCCIÓN

Este artículo resume la metodología, los resultados y conclusiones obtenidas por el Grupo de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cantabria (España), en respuesta al Segundo Reto de Modelización de Vertederos, “Landfill Modelling Challenge 2” (LMC2), lanzado por el Grupo de Gestión de Residuos de la Universidad de Southampton (Beaven 2009).

El objetivo de estos retos es comprobar y contrastar el potencial de los distintos modelos de simulación de vertederos en que se trabaja hoy en día. El organizador de este reto envió a los diversos desarrolladores de modelos de vertederos un mínimo número de datos sobre una celda de experimentación que se mantuvo en secreto, pidiéndoles que hicieran una predicción del comportamiento del mismo durante los siguientes años (generación de gases, asentamientos, contaminación del lixiviado y la variación de su volumen). Realizadas las predicciones de cada desarrollador, se convoca una sesión donde se presentan los datos reales de seguimiento de la celda y se contrastan con los distintos resultados de simulación. Uno de los modelos convocados a este reto es el desarrollado por el Grupo de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cantabria, denominado Moduelo.

Moduelo es un programa de simulación de vertederos de residuos sólidos urbanos (RSU) compuesto por tres modelos principales: hidrológico, biodegradación y asentamientos. Este programa se viene desarrollando desde 1998 por el Grupo de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cantabria y fue creado como una herramienta para el diseño y el control de instalaciones reales. Hasta la fecha se han desarrollado cuatro versiones del programa. Las primeras fueron descritas en detalle por Lobo *et al.* (2002a, b) y Lobo y Tejero (2007). En esta ocasión se ha utilizado la última versión, Moduelo 4.0, desarrollada en la plataforma Net (Net Framework 3.5) con el Visual Studio 2008 Integrated Development Environment y con lenguaje de programación C#.

Esta versión incluye modelos simplificados, desarrollados a partir de otros encontrados en la literatura o desarrollados específicamente para el programa. Una de las principales características de esta herramienta es que representa el vertedero en tres dimensiones y puede simular su manejo y estrategias de operación a lo largo del tiempo. Además, se pueden estimar datos diarios de humedad en diferentes áreas del vertedero, la cantidad y la calidad del lixiviado, los flujos que se dan a través del contorno del

vertedero, los asentamientos y la cantidad y calidad del biogás generado.

La celda experimental, situada en el vertedero de Landgraaf, Holanda está aislada hidráulicamente y tiene dimensiones de 55 m de ancho por 80 m de largo y una altura máxima de llenado de aproximadamente 8.5 m. Esta celda se rellenó en un periodo de 110 días con unas 25 000 T de una mezcla de residuos que se detalla más adelante.

En cuanto a sistemas de control y operación del vertedero, la celda dispone de un sistema de drenaje inferior por el que se evacua el lixiviado, dos sistemas para la inyección/recirculación de lixiviados y ocho pozos verticales para el seguimiento del nivel del lixiviado en las dos capas de residuos de la celda y para la toma de muestras (**Fig. 1**).

Beaven (2009) presenta con detalle las características de la celda-vertedero estudiada y muestra la información que se aportó a los modeladores para afrontar el reto de modelación.

MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación se describe el proceso de generación y calibración de los distintos parámetros que utiliza Moduelo para simular el comportamiento de la celda.

El primer paso a la hora de la definición del terreno en Moduelo es representar físicamente la celda. Para eso ésta se subdividió en 144 subceldas de 5×5 m distribuidas en 4 capas, una del tipo terreno situada como soporte de las demás (requisito del programa) y tres formadas por los distintos residuos vertidos en la celda (capas 1, 2 y 3 de la **figura 1**). Las principales características hidrológicas definidas para las distintas subceldas se detallan en Gonzalorenza *et al.* (2011).

La configuración física del sistema de recogida de lixiviados, formado por nueve tuberías horizontales de polietileno de alta densidad (HDPE) distribuidas en forma paralela a lo largo de la celda, se definió colocando los nueve tubos separados a una distancia de 5 m cada uno. En los datos proporcionados por Beaven (2009) no se detallan las características específicas de este sistema, por lo que se definieron en Moduelo de acuerdo con valores típicos de los sistemas de recolección de lixiviados en vertederos.

El sistema de recirculación de lixiviados está compuesto por dieciocho tuberías horizontales separadas en dos niveles (nueve tuberías en cada nivel). El primer nivel se sitúa 3.5 m por encima de la base de la celda (primera capa de residuos) y el otro nivel

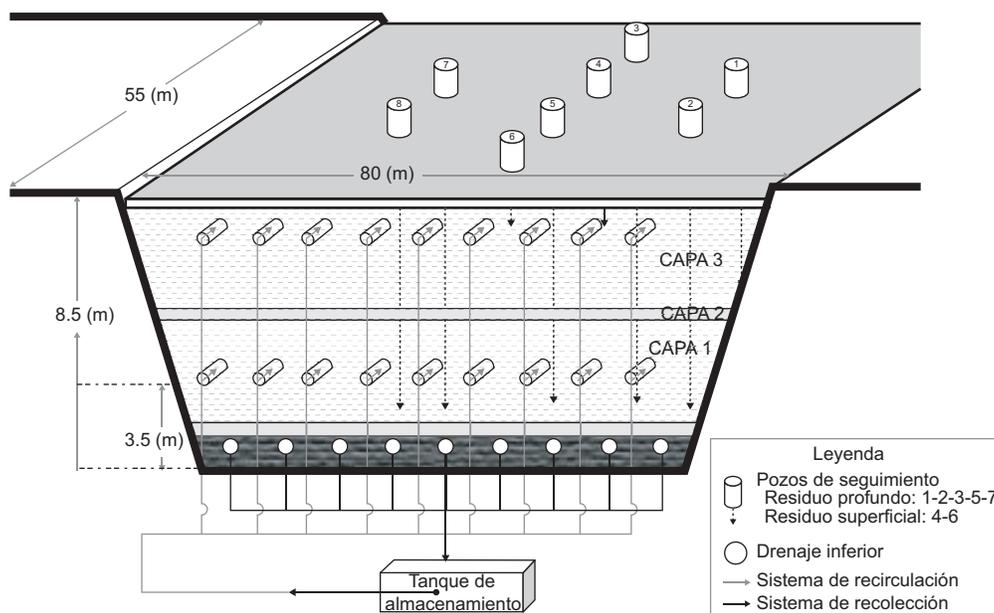


Fig. 1. Esquema de la celda-vertedero estudiada

en la parte superior de la misma (última capa de residuos), concretamente bajo la capa final de cobertura.

A la hora de simular la recirculación el programa Moduelo limita la capacidad de recirculación de acuerdo a las características que se le asignen al sistema. Para evitar esta limitación se definió una capacidad máxima de recirculación diaria de 100 m³, valor más elevado que los valores reales de operación.

Por otro lado, la versión actual del programa simula la recirculación desde un único tanque de almacenamiento. Este tanque debería almacenar tanto el lixiviado recogido por el sistema de drenaje como el agua limpia recirculada durante la experimentación, es decir, almacenar el total del líquido disponible para la recirculación. Para no limitar la recirculación y simularla correctamente se asignó al depósito de almacenamiento una capacidad de retención y regulación de 1000 000 m³.

Otra dificultad que se encontró en la definición del sistema de recirculación fue que Moduelo sólo permitía la adición de agua limpia al tanque de almacenamiento en forma de escorrentía superficial. Por eso, para añadir el agua limpia recirculada experimentalmente al sistema fue necesario definir el tipo de gestión de la escorrentía superficial como escorrentía conectada en las subceldas superficiales, de manera que la lluvia que cayera sobre ellas se incorporara inmediatamente al sistema en forma de agua limpia.

Por otro lado, Moduelo también requiere datos diarios de recirculación. Como la que se realizó sobre

la celda en estudio fue una recirculación discontinua, en la simulación se llevaron a cabo interpolaciones lineales para distribuir el volumen recirculado entre los días que hay entre los días de inyección de lixiviado reales.

El siguiente paso después de haber definido el modelo físico del vertedero es la definición del modelo de residuos. A la hora de realizar la caracterización fisicoquímica de los distintos tipos de residuos, Moduelo se centra sólo en los procesos que afectan a los residuos orgánicos.

En el programa la materia orgánica se representa con dos fracciones: una biodegradable y una no biodegradable. En la fracción biodegradable una parte es rápidamente hidrolizable (MS_{rhb}) y otra lentamente hidrolizable (MS_{lhb}). Ambas se caracterizan en el programa por su fórmula química (C_cH_hO_oN_nS_s) y su fracción biodegradable (f_{bio}).

Como información de partida para la creación del modelo de residuos se tenían 25 180 toneladas vertidas clasificadas en distintos tipos de residuos: domésticos, comerciales, suelo contaminado, fango biológico y arenas de fundición (en las capas 1 y 3) y residuo triturado (en la capa 2) compuesto por residuos procedentes de la industria de la automoción y residuos de electrodomésticos y de los residuos procedentes de las plantas de tratamiento de residuos de construcción y demolición.

Para realizar la caracterización de los residuos de tipo doméstico y comercial se partió de la composición detallada que aparece en Beaven (2009), por

lo que ésta se realizó con base en la clasificación definida por Moduelo en Lobo (2003), de acuerdo con los distintos componentes que forman estos residuos. Para los residuos denominados fango biológico, suelo contaminado, escombros y residuo triturado, la caracterización se realizó con base en trabajos desarrollados anteriormente por el grupo de investigación. Finalmente, en el caso del residuo arenas de fundición, la caracterización se obtuvo de Siddique *et al.* (2010). La caracterización final de todos los distintos tipos de residuos se muestra con más detalle en Gonzalorena *et al.* (2011).

Una vez definidos los modelos que forman parte de la simulación empieza el proceso de calibración.

En primer lugar se realizó la calibración hidrológica en la que las variables de ajuste fueron: contenido de humedad inicial, humedad de saturación, conductividad hidráulica (se asumió que la horizontal y la vertical eran iguales) y la fracción de canales preferenciales. Estos valores se fueron variando dentro del rango dado por valores de referencia expuestos en la literatura. La finalidad de la calibración es ajustar la forma de la curva de lixiviado extraído simulado con la curva de lixiviado medido en operación.

La **figura 2** muestra el ajuste obtenido después de esta calibración. En ella se aprecia que la extracción de lixiviados real se realizó de forma discontinua, y sin embargo, la curva de lixiviado simulado presenta una forma continua. Esto se debe a que el programa no permite simular extracciones discontinuas en los sistemas de drenaje por gravedad. Los parámetros utilizados en esta calibración se muestran en el **cuadro I**.

Una vez establecidos los parámetros del modelo hidrológico, se ajustaron los valores del modelo de biodegradación, para lo cual sólo se contaba con datos reales de cuatro muestras tomadas en diferentes días. Para ajustar las variables medidas en la muestra _demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO) y carbono orgánico total (COT)_ con las simuladas se utilizaron valores de los parámetros de hidrólisis, acetogénesis y metanogénesis acetoclástica que estaban dentro del rango de referencia. Los valores adoptados en la calibración se pueden consultar en el **cuadro II**.

Para finalizar la fase de calibración de la celda-vertedero se ajustaron los valores de los parámetros del modelo de asentamientos. Al no disponer de valores cuantitativos que permitan ajustar los parámetros del modelo de asentamientos, se adoptaron valores utilizados anteriormente en otros proyectos. Éstos son 0.2 para el coeficiente de compresión y 0.3 para la tasa de pérdida de masa-asentamiento.

RESULTADOS

La **figura 3** muestra la evolución de los contaminantes en el lixiviado obtenida con el modelo calibrado, en contraste con los datos aportados. En ella se aprecia que existe un tiempo de activación que dura aproximadamente 800 días. En este período, las concentraciones alcanzan valores mucho mayores que los valores registrados en la fase de estabilización que se da después. En la etapa de estabilización las concentraciones del lixiviado disminuyen considerablemente

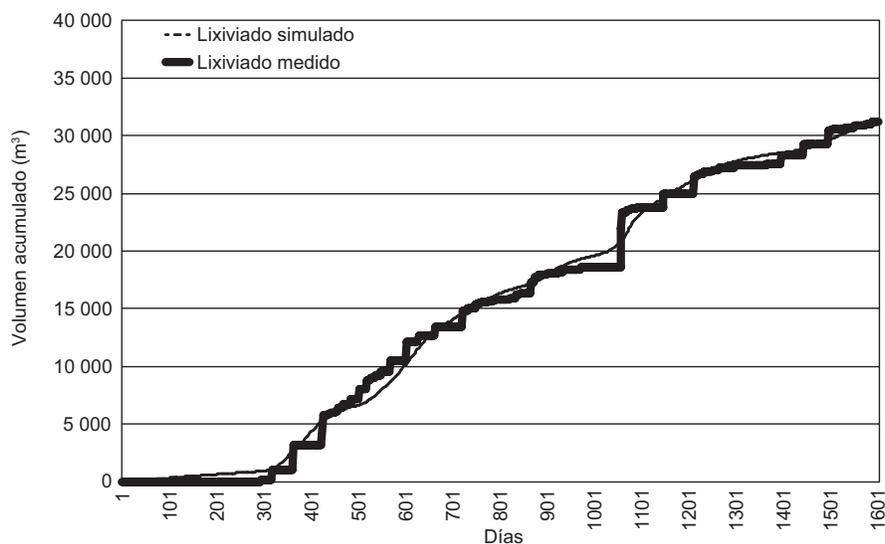


Fig. 2. Resultados de la calibración hidrológica

CUADRO I. PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO

CARACTERÍSTICAS DE LAS CELDAS	CELIDAS RESIDUO			REFERENCIAS
Características del residuo	Capa 1	Capa 2	Capa 3	
Humedad residual inicial (% peso húmedo)	15	7	15	Schroeder <i>et al.</i> (1994) y Tchobanoglous <i>et al.</i> (1993)
Capacidad de campo inicial (% peso húmedo)	33	23	33	Schroeder <i>et al.</i> (1994) y Tchobanoglous <i>et al.</i> (1993)
Humedad de saturación inicial (% peso húmedo)	75	60	75	Schroeder <i>et al.</i> (1994) y Tchobanoglous <i>et al.</i> (1993)
Conductividad hidráulica vertical (m/s)	1×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁶	1×10 ⁻⁵	Koda y Zakowicz (1998), Oweis (1990) y Schroeder <i>et al.</i> (1994)
Conductividad hidráulica horizontal (m/s)	1×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁶	1×10 ⁻⁵	Koda y Zakowicz (1998), Oweis (1990) y Schroeder <i>et al.</i> (1994)
Características de la cobertura	Capa 1	Capa 2	Capa 3	
Espesor de la cobertura (m)	-	-	0.5	Definida por el usuario
Contenido de humedad inicial (% peso húmedo)	-	-	15	Schroeder <i>et al.</i> (1994) y Tchobanoglous <i>et al.</i> (1993)
Densidad inicial (kg/m ³ peso húmedo)	-	-	0.67	Dato de operación
Humedad residual inicial (% peso húmedo)	-	-	7	Schroeder <i>et al.</i> (1994) y Tchobanoglous <i>et al.</i> (1993)
Capacidad de campo inicial (% peso húmedo)	-	-	23	Schroeder <i>et al.</i> (1994) y Tchobanoglous <i>et al.</i> (1993)
Humedad de saturación inicial (% peso húmedo)	-	-	60	Schroeder <i>et al.</i> (1994) y Tchobanoglous <i>et al.</i> (1993)
Conductividad hidráulica vertical (m/s)	-	-	1×10 ⁻⁵	Schroeder <i>et al.</i> (1994)
Modelo de infiltración superficial	Capa 1	Capa 2	Capa 3	
Tasa de infiltración mínima (mm/h)	3.81	0.64	3.81	Huber y Dickinson (1988)
Tasa de infiltración máxima (mm/h)	76.2	25.4	76.2	Huber y Dickinson (1988)
Parámetro de Horton (1/h)	4.14	4.14	4.14	Huber y Dickinson (1988)
Modelo de evapotranspiración	Capa 1	Capa 2	Capa 3	
Profundidad de evaporación (m)	0	0	0	Schroeder <i>et al.</i> (1994)
Punto de marchitez (%)	100	100	100	Schroeder <i>et al.</i> (1994)
Modelo de escorrentía superficial				
Máxima acumulación superficial (m)	1	1	1	Huber y Dickinson (1988)
Modelo de flujo preferencial	Capa 1	Capa 2	Capa 3	
Fración del volumen afectado por canales preferenciales (%)	20	20	20	Rosqvist y Destouni (2000)
Tasa conductividad hidráulica por flujo preferencial/ flujo homogéneo	100	100	100	Rosqvist y Destouni (2000)
Modelo de humedad residual	Capa 1	Capa 2	Capa 3	
Humedad mínima residual del residuo (% peso seco)	5	5	5	Huitric <i>et al.</i> (1980)
Influencia de la presión en la humedad residual (kg/m ²)	4536	4536	4536	Huitric <i>et al.</i> (1980)

hasta alcanzar valores del orden de 2200, 800 y 20 mg/L de DQO, COT y DBO, respectivamente, al final del estudio.

La **figura 4** presenta, por un lado la predicción de la producción de biogás a lo largo del tiempo y por otro la estimación de los asentamientos que se producen en el mismo periodo.

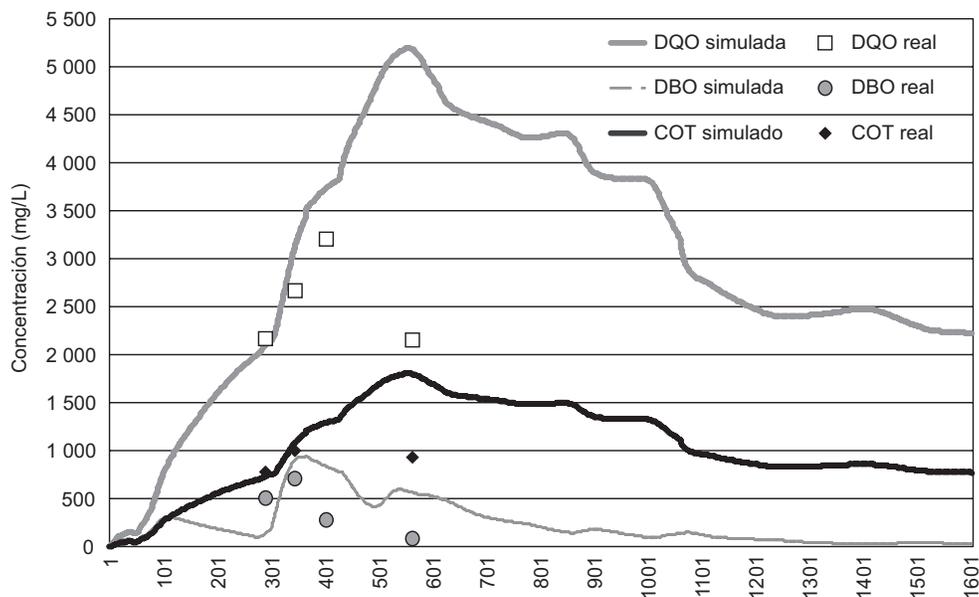
Con relación a la producción de biogás, hay que señalar que este resultado es producto de una calibración incompleta ya que no se disponía de datos sobre la generación de gas y, por lo tanto, la tasa de metanización no pudo ser calibrada. Por este moti-

vo se utilizó el valor más típico usado en trabajos anteriores. Ver valores en Gonzalorenna *et al.* (2011).

Teniendo en cuenta estas consideraciones, al final de la simulación se obtuvieron un total de 59 toneladas de carbono emitido en forma de biogás durante los tres años y medio de operación de la celda. Se aprecia que las proporciones globales obtenidas de metano y dióxido de carbono son de 40 y 60 %, respectivamente (**Fig. 4**). Sin embargo, cuando empieza la etapa de estabilización del vertedero, se observa una proporción de 80 y 20 de CH₄ y CO₂ respectivamente, propia de condiciones metanogénicas.

CUADRO II. PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN DEL MODELO DE DEGRADACIÓN

Parámetro		Valor adoptado	Rango de referencia
Tiempo de activación de la hidrólisis rápida (d)		0	
Tiempo de activación de la hidrólisis lenta (d)		0	
Tiempo de activación de la metanogénesis (d)		0	
Tasa de hidrólisis rápida (d^{-1})	$k_{h_{rea}}$	0.05	0.00023 – 0.05
Tasa de hidrólisis lenta (d^{-1})	$k_{h_{slo}}$	0.0025	0.00003 – 0.0025
Tasa de acetogénesis (d^{-1})	k_A	0.1	0.005 – 0.1
Tasa de metanogénesis acetoclástica (d^{-1})	k_{AC}	0.7	0.005 – 0.7
Tasa de metanogénesis hidrogenofílica (d^{-1})	k_{H_2}	50	50 – 500
Factor de arrastre	f_{dr}	0.2	0.01 – 0.5

**Fig. 3.** DQO, DBO y COT en el lixiviado

En cuanto a la predicción de asentamientos con Moduelo los resultados se obtuvieron también sin calibración previa. Por simulación se estimó que el asentamiento total en la celda sería de 3.1 % de la altura inicial debido principalmente a la compactación de residuos ya que la pérdida de fracción de masa representa sólo 5% del asentamiento total al final del período.

CONCLUSIONES

Durante la modelación de la celda-vertedero se encontraron varias dificultades debido a la rigidez de Moduelo. Como se ha indicado, Moduelo es una herramienta diseñada originalmente para la predicción del comportamiento de vertederos reales, por eso los modelos y parámetros que utiliza son típicos para este tipo de instalaciones.

Las dificultades surgen cuando las estrategias de operación a simular no han sido consideradas en el programa debido a que no se utilizan normalmente en vertederos reales, sino en otros casos como en vertederos experimentales.

Ante las dificultades encontradas en la creación del modelo de este trabajo, descritas en párrafos anteriores, se detectaron varias mejoras a realizar en el programa como permitir la introducción de volúmenes discontinuos de agua limpia al sistema de recirculación de lixiviados y añadir dentro de las opciones de extracción de lixiviado del sistema de drenaje la extracción discontinua mediante válvulas de regulación. En este caso el problema se evitó asumiendo un drenaje libre de lixiviados, pero esto no permite simular algunos procesos de degradación que pueden suceder en una celda con acumulación prolongada de lixiviado.

Por otro lado, dada la escasa cantidad de datos

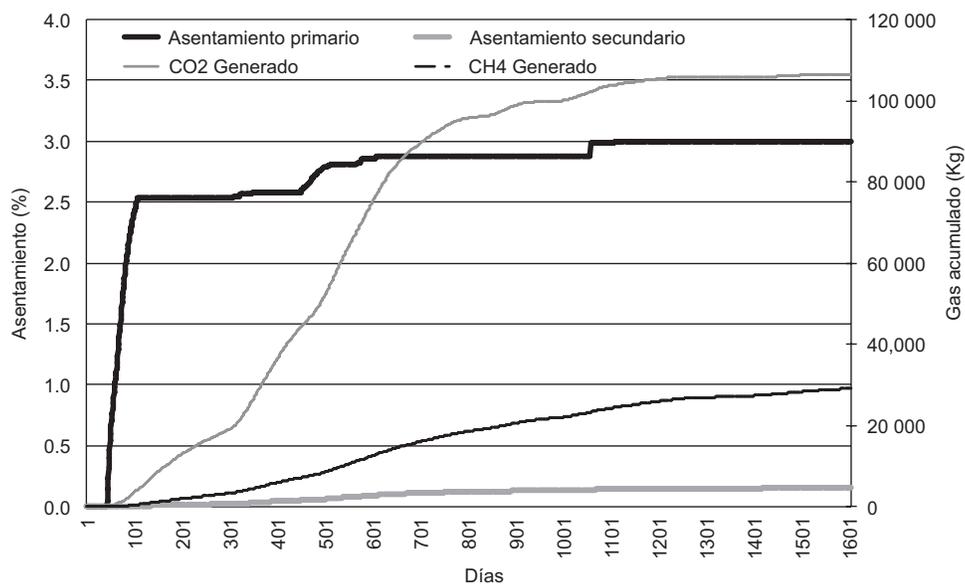


Fig. 4. Generación de gas y asentamientos en la celda-vertedero

aportados por los organizadores del reto de modelación, se han detectado varias lagunas de información que hicieron necesario asumir ciertos parámetros de forma arbitraria, lo que conduce a resultados que pueden no adecuarse a la realidad, como por ejemplo la falta de información acerca de las estrategias de llenado de la celda que pudieran servir para definir las capas, el orden de disposición de los distintos tipos de residuos.

Tampoco se facilitaron datos de generación de gas ni de asentamiento y para la calibración de la degradación sólo se disponía de las mediciones realizadas en cuatro muestras de lixiviado tomadas entre los días 290 y 560 (el experimento dura 1600 días aproximadamente), por lo que no muestran una tendencia clara sobre el comportamiento de la celda.

Finalmente, una estructura más compleja de Moduelo permitiría un análisis del comportamiento de la celda más detallado, analizando situaciones que permitirían una mejor gestión del vertedero. Se podría, por ejemplo, realizar un análisis de las distintas subceldas definidas en el modelo que permitiría evaluar y definir –con base en una operación más adecuada– la ubicación y la configuración del sistema de recirculación de lixiviados.

La principal conclusión de este trabajo es que la participación en este reto fue útil para hacer una evaluación de Moduelo en cuanto a su capacidad para simular situaciones para las cuales no fue diseñado originalmente.

REFERENCIAS

- Beaven R. (2009). A challenge to modellers to predict the performance of a landfill cell. Memorias. XII International Waste Management and Landfill Symposium. Cerdeña, Italia, 5 al 9 de octubre.
- Gonzaloren R., López A. y Lobo A. (2011). Simulation of the Southampton isolated landfill cell using Moduelo 4.0. Memorias. IV International Workshop Hydro-Physico-Mechanics of Landfills. Santander, España, 26 al 28 de abril. <http://www.hpm4.unican.es/template/papers/10.%20R.%20Gonzaloren.pdf>
- Huber W.C. y Dickinson R.E. (1988). Storm water management model; version 4. Environmental Protection Agency, United States.
- Koda E. y Zakowicz S. (1999). Physical and hydraulic properties of the MSW for water balance of the landfill. Environmental Geotechnics, Sêco e Pinto, Balkema, Rotterdam, Holanda.
- Lobo A., Herrero J., Montero O., Fantelli M. y Tejero I. (2002a) Modelling for environmental assessment of municipal solid waste landfills (Part 1: Hydrology). Waste Manage. Res. 20, 198-210.
- Lobo A., Herrero J., Montero O., Fantelli M. y Tejero I. (2002b) Modelling for environmental assessment of municipal solid waste landfills (Part 2: Biodegradation). Waste Manage. Res. 20, 514-528.
- Lobo A. (2003). Desarrollo de Moduelo 2: herramienta para la evaluación de la contaminación producida en vertederos de residuos sólidos urbanos. Tesis Doctoral,

- Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria. Santander, España, 346 p.
- Lobo A. y Tejero I. (2007). Modulo2: A new version of an integrated simulation model for municipal solid waste landfills. *Environ. Model. Software* 22, 59-72.
- Oweis I.S., Smith D.A., Ellwood R.B. y Greene D.S. (1990). Hydraulic characteristics of municipal refuse. *J. Geotech. Engrg.* 116, 539-553.
- Rosqvist H. y Destouni G. (2000). Solute transport through preferential pathways in municipal solid waste. *J. Contam. Hydrol.* 46, 39-60.
- Schroeder P.R., Dozier T.S., Zappi P.A., McEnroe B.M., Sjoström J.W. y Peyton R.L. (1994). The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model. Engineering documentation for version 3. Environmental Protection Agency, United States.
- Siddique R., Kaur G., Rajor A. (2010). Waste foundry sand and its leachate characteristics. *Resour. Conserv. Recy.* 54, 1027-1036.
- Tchobanoglous G., Theisen H. y Vigil S. (1993). Integrated solid waste management. Engineering principles and management issues, McGraw Hill, EUA.