

04-006

Simulation of the settlement and evolution of waste in a landfill at laboratory scale

Joan Esteban Altabella; Francisco J. Colomer Mendoza; Antonio Gallardo Izquierdo

Universitat Jaume I;

The physical, chemical and biological processes in the solid waste mass of the landfill have very complex prediction. Consequently, it is difficult to estimate the settlements, which can be classified in initial, primary or secondary. On the other hand, the initial and primary settlements depend firstly on the loads, so that a higher thickness of the waste mass involves generally a greater settlement. The secondary settlements depend firstly on the mechanisms that affect degradation. Therefore, a higher biodegradable fraction content always means a greater settlement. In this paper, the behavior of a landfill has been simulated by means of a lysimeter. By mean of an hydraulic piston density of waste has been increase up to reach 35.24 kN (equivalent pressure to a thickness of 30 m of waste), during 45 days. Settlements have resulted in around 28%. These results allow establishing a relationship between the height of the waste and density. In addition, in order to simulate rainfall a periodic irrigation has been applied. Furthermore, chemical and physical properties of leachate and waste have been analyzed during this time.

Keywords: Landfill; waste; lysimeter; settlements; leachate

Simulación a escala de laboratorio del asentamiento mecánico y de la evolución de los residuos de un depósito controlado

Los procesos físicos, químicos y biológicos que experimenta la masa de residuos de un depósito controlado hacen muy compleja la predicción de su comportamiento. En estas instalaciones se generan asentamientos que pueden ser clasificados en iniciales, primarios y secundarios. Por una parte, los iniciales y primarios dependen principalmente de las cargas, por lo que un mayor espesor de la masa de residuos conlleva generalmente un mayor asentamiento. Por otra parte, los asentamientos secundarios dependen principalmente de mecanismos que afectan a la degradación, por lo que un mayor contenido de la fracción biodegradable conlleva siempre un mayor asentamiento. En este trabajo se ha simulado el comportamiento de un depósito controlado con el uso de un lisímetro. Mediante un pistón hidráulico se ha ido incrementando la densidad inicial hasta alcanzar unas condiciones de carga máximas de 35,24 kN (equivalente a una columna de residuos de 35 m) en 45 días, lo que ha supuesto un asentamiento del 28%. Esto permite establecer una relación entre altura de residuo y densidad. Además, se han aplicado riegos periódicos para simular las precipitaciones y durante este periodo se ha ido analizando la evolución de las propiedades físico-químicas del lixiviado y de los residuos

Palabras clave: Depósito controlado; residuo; lisímetro; asentamiento; lixiviado

Correspondencia: Antonio Gallardo Izquierdo gallardo@uji.es

Agradecimientos: Los autores agradecen la colaboración los proyectos BIONORD ZONA 1 (Castellón) y REDIGAR (código 715RT0494 subvencionado por el programa CYTED)



Este obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

1. Introducción

Controlar la contaminación originada por los residuos sólidos urbanos eliminados en un depósito controlado es de suma importancia, ya que la manipulación incorrecta puede afectar negativamente al medio ambiente que lo rodea y a la salud humana. Este control implica la necesidad de efectuar amplios estudios técnicos y científicos que permitan conocer las propiedades de estos residuos, y en base a ello, predecir su comportamiento. Por su parte, los resultados obtenidos pueden contribuir también a desarrollar nuevos modelos de simulación o a calibrar los ya existentes.

En general, estos estudios de investigación se desarrollan a escala de laboratorio con el uso de lisímetros (Ham, 1982; Orta de Velásquez et al., 2003; Dollar, 2005; Aguilar, 2008; Stoltz, Gourc & Oxarango, 2010; Stoltz et al., 2012). Una de las ventajas que presenta esta tipología de estudios es que permite simular fácilmente las condiciones de la masa de residuos de un depósito controlado bajo diferentes condiciones de carga. Además, la fase experimental puede programarse para diferentes periodos de tiempo, durante los cuales, pueden determinarse las propiedades de los residuos y realizarse un seguimiento de la evolución del poder contaminante del lixiviado generado.

Para este tipo de trabajos la estanqueidad y la temperatura son los factores a controlar cuando se quieren reproducir las condiciones de degradación anaerobia, ya que un ligero cambio puede tener un gran efecto en la actividad bacteriana (Farquhar & Rovers, 1973).

Por otra parte, para determinar el riesgo de contaminación del lixiviado generado, es necesario conocer cómo, cuánto y cuando se produce. A este fin, el modelo de gestión implantado en el depósito controlado permite saber cómo se produce; las condiciones climatológicas determinan cuánto se genera; y el potencial de almacenamiento, o la capacidad de campo, permite establecer cuando se produce.

El depósito controlado simulado en este trabajo se ubica en la Provincia de Castellón y en él se vierten principalmente los residuos procedentes de los flujos de rechazo de una Planta de Tratamiento Biológico-Mecánico (TBM) ubicada en la misma zona.

2. Objetivos

Para el desarrollo de este trabajo se han planteado dos objetivos principales:

1. Simular el comportamiento de la masa de residuos de un depósito controlado a escala de laboratorio con el uso de un lisímetro.
2. Evaluar la evolución de las propiedades de la masa de residuos y del poder contaminante del lixiviado generado bajo distintas condiciones de carga.

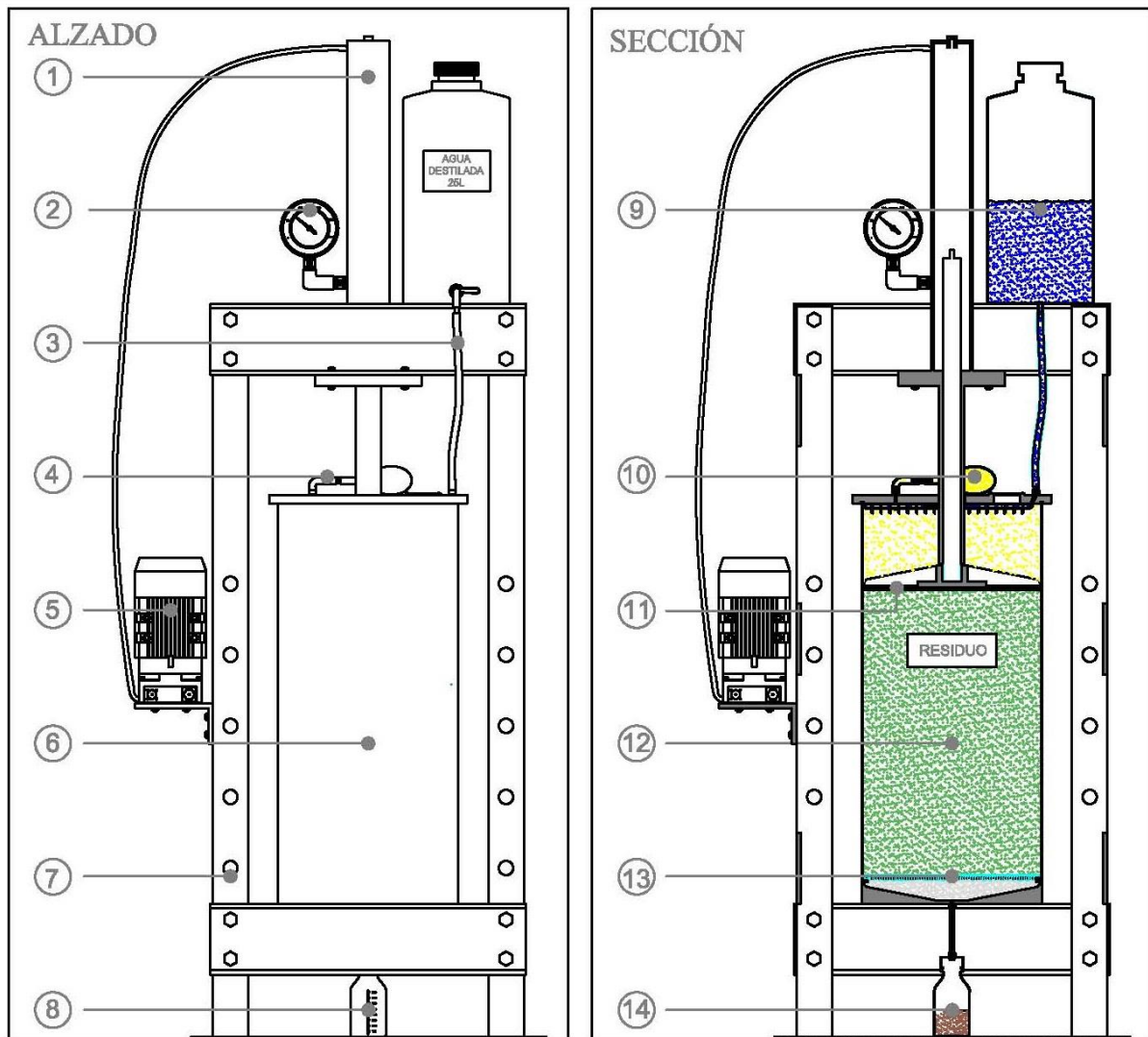
3. Metodología

3.1 Descripción del lisímetro utilizado para la fase experimental

El lisímetro utilizado para este trabajo está equipado con cuatro sistemas o componentes básicos: control térmico para simular las condiciones de degradabilidad, sistema de riego para simular las condiciones de pluviometría, sistema de recogida y almacenamiento del lixiviado percolado para determinar la evolución del poder contaminante y un sistema de captación de gases para calcular las emisiones que podrían generarse.

Este equipo, que consideró las directrices aportadas por otros autores en trabajos experimentales similares (Ham, 1982; Orta de Velásquez et al. 2003; Dollar, 2005; Aguilar, 2008; Stoltz, Gourc & Oxarango, 2010; Stoltz et al., 2012), fue el diseñado por Esteban-Altabella et al. (2016).

Figura 1: Diagrama lisímetro.



Escala 1:15

En la figura 1 se puede observar la estructura del lisímetro utilizado, compuesto por un pórtico de acero (7) sobre el que se colocó el lisímetro. Este, compuesto por un tambor de acero inoxidable (6), contuvo en su interior dos placas perforadas (11 y 13). Una de ellas (13), colocada en el fondo permitió crear un vacío entre los residuos (12) y la parte inferior del tambor que se rellenoó con grava para facilitar la percolación del lixiviado (8, 14). La otra, situada en la parte superior (11) comprimió la masa de residuos mediante la presión que ejerció un cilindro hidráulico (1). Con la ayuda de una bomba (5), la capacidad de carga máxima en este prototipo pudo superar los 7 MPa y para su medición se colocó un manómetro (2). Para los ensayos de infiltración-percolación se colocó un depósito con agua destilada (9) que alimentó un sistema de riego previamente instalado (3). Finalmente, para analizar el biogás generado, en el caso de que así fuera, se colocó un balón de recogida de gases (10) mediante un sistema de captación específico (4).

3.2 Corrientes de rechazo del depósito controlado

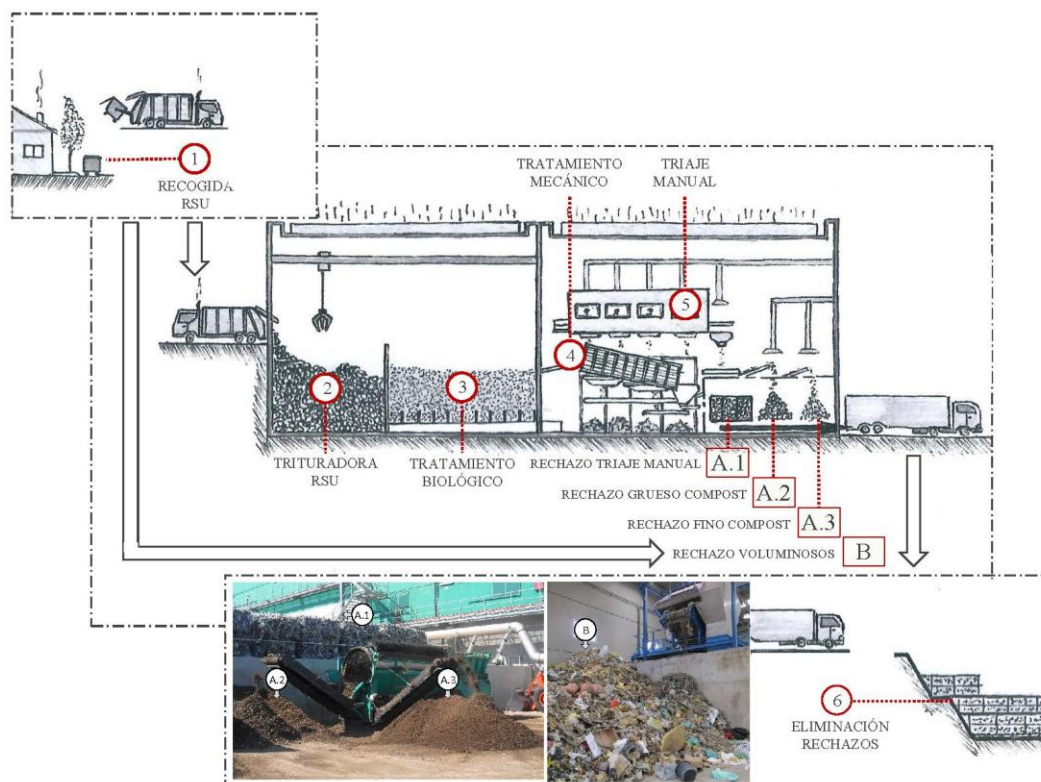
La cantidad de residuos eliminados en el depósito controlado investigado se sitúa en torno a 65.000 t/año (BIONORD 2014). Estos residuos proceden de cinco corrientes de rechazos principales (Tabla 1).

Tabla 1: Corrientes de rechazo y cantidades vertidas en el depósito investigado

ID	Corrientes de rechazo	t	%
A	Flujos de rechazo de la Planta TBM	60.527	92,20
B	Flujos de rechazo de voluminosos	435	0,66
C	Poda y residuos verdes	1.436	2,19
D	Mezcla residuos voluminosos y RCD	1.588	2,42
E	Algas	1.663	2,53

En la Tabla 1 se puede observar que el 92,20% de los residuos eliminados en el depósito controlado procede de la Planta de TBM. Este tipo de instalaciones generan habitualmente tres flujos de rechazos continuos que representan en torno al 73,27% del residuo sólido municipal que entra anualmente (Gallardo, Edo & Colomer, 2014). De este modo, la corriente A se clasifica en tres flujos de rechazos (Figura 2) que presentan normalmente la siguiente relación de porcentajes anuales: 44% rechazo del proceso de recuperación de materiales (A.1), 42% rechazo previo al afino del bioestabilizado (A.2) y 14% rechazo del afino del bioestabilizado (A.3). En lo que respecta al resto de corrientes (B, C, D y E) cabe indicar que, a excepción de los rechazos de voluminosos (B) que son continuos en el tiempo, el resto son puntuales.

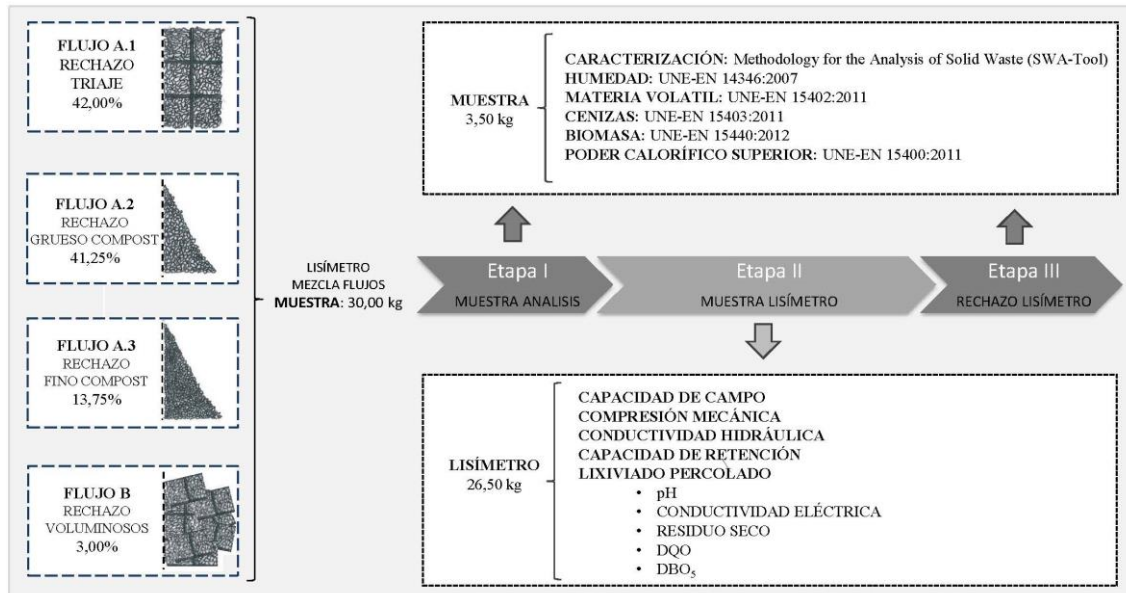
Figura 2: Esquema de los flujos de rechazos generados



3.3 Implementación de la metodología de control

La metodología de control implementada para este trabajo se programó en tres etapas de la siguiente forma (Figura 3):

Figura 3: Metodología de control programada para la fase experimental



3.3.1 Etapa I: Inicio de la fase experimental

En esta fase se realizaron cuatro tomas de muestras por cuarteo, tres procedentes de los distintos flujos de rechazos de la Planta de TBM, y una cuarta centrada en el rechazo de voluminosos, que a pesar de ser poco representativa es constante en el tiempo.

Para ello, en primer lugar, se realizó a nivel de campo el muestreo de los flujos de rechazos según el procedimiento descrito por Applus (2012). A continuación, siguiendo la metodología descrita por la SWA-Tool (Comisión Europea 2004) se realizaron cinco caracterizaciones; tres correspondientes a los flujos de la corriente de rechazos principal (A.1, A.2 y A.3); una cuarta correspondiente a la corriente de voluminosos (B); y una última (F) que representó la combinación de estos flujos en las siguientes proporciones (Figura 3): 42,00% rechazo del proceso de recuperación de materiales (A.1); 41,25% rechazo previo al afino del bioestabilizado (A.2); 13,75% rechazo del afino del bioestabilizado (A.3) y un 3% rechazo de voluminosos (B).

Seguidamente, para garantizar la mezcla homogénea de las distintas fracciones se trocearon hasta un tamaño máximo de 10 cm los rechazos obtenidos (Espinace et al. 1997). De la muestra de 30 kg obtenida se separaron 3,50 kg para determinar las propiedades físicas y químicas del rechazo según procedimientos normalizados (i) y los 26,50 kg restantes fueron introducidos en el lisímetro (ii).

(i) Análisis de laboratorio

Se determinó el contenido en humedad según norma UNE-EN 14346:2007 (AENOR 2007), de materia volátil según norma UNE-EN 15402:2011 (AENOR 2011b), cenizas y carbono fijo según norma UNE-EN 15403:2011 (AENOR 2011c), biomasa y no biomasa según norma UNE-EN 15440:2012 (AENOR 2012) y finalmente el poder calorífico inferior según norma UNE-EN 15400:2011 (AENOR 2011a). Estos ensayos se realizaron por triplicado siguiendo el procedimiento descrito por Colomer et al. (2008).

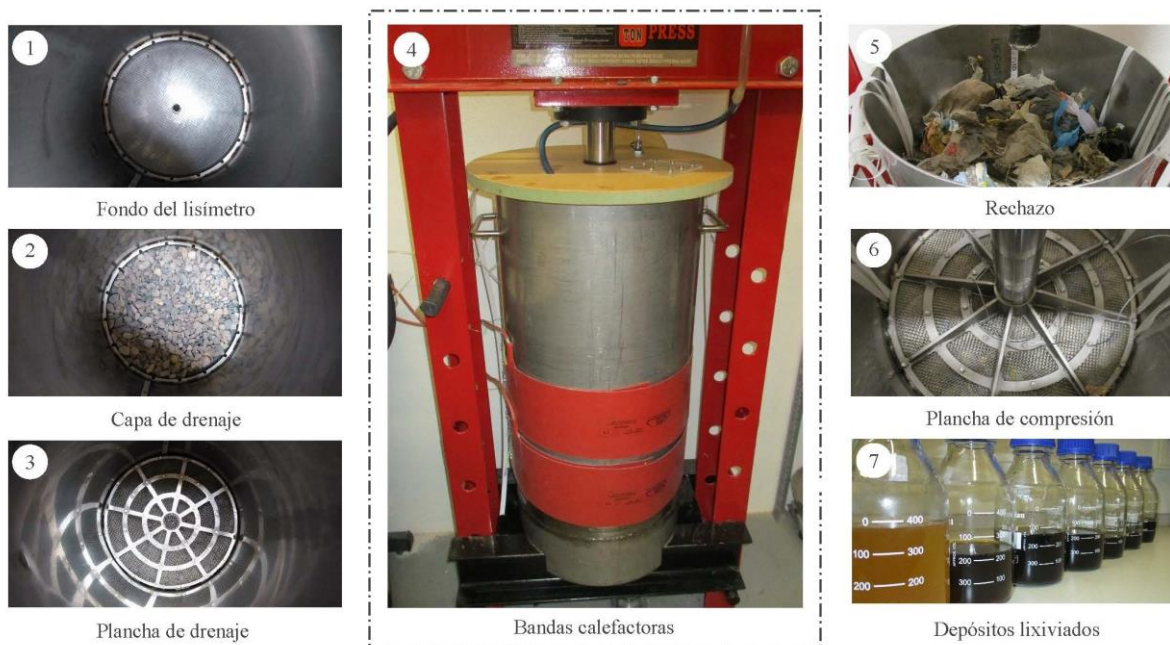
(ii) Fase de llenado

En primer lugar, se colocó en el lisímetro una capa de drenaje de 0,10 m de espesor con gravas de 2 cm de diámetro (Figura 4). A continuación, para separar la masa de residuos de la capa de drenaje se colocó una plancha perforada de acero inoxidable y sobre esta un geotextil que evitó la obstrucción del sistema de drenaje por la filtración de partículas.

En segundo lugar, para recoger y almacenar el lixiviado percolado se colocó un depósito hermético que evitó, por una parte, la evaporación del líquido, y por otra, la entrada de aire afectando al proceso de degradación anaerobio.

En tercer lugar, para simular las condiciones térmicas de la masa de residuos del depósito controlado se cubrió el tambor con una banda calefactora conectada a un controlador de temperatura.

Figura 4: Estructura del lisímetro



A continuación, se introdujeron en el lisímetro los 26,50 kg de rechazo restantes. Para obtener una densidad equivalente a 500 kg/m^3 se comprimió la masa de residuos hasta alcanzar un espesor de 0,42 m. Para controlar mejor la operación de llenado, como indicaron (Sánchez & López (1991), se realizó este proceso en tres fases diferenciadas, a razón de 8,83 kg cada una.

Finalmente, para simular las condiciones anaeróbicas se cubrió herméticamente la parte superior del lisímetro con una placa y se colocó un balón de recogida de gases. Por su parte, para implementar el calendario de riegos sin necesidad de realizar aperturas se instaló un sistema de riego en espiral sobre la superficie interna de la placa.

3.3.2 Etapa II: Durante la fase experimental

Alcanzado este punto se inició la fase de compresión-infiltración-percolación. Por una parte, de acuerdo con el procedimiento descrito por (Dollar, 2005), se mantuvo constante la temperatura de la masa de residuos en $30 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. Por otra parte, se determinaron semanalmente las propiedades del lixiviado recogido en el depósito.

Para calcular el volumen de agua necesario en el primer riego (25 L) se consideró que el porcentaje de humedad de los rechazos eliminados en el depósito controlado es inferior al 15% y que presentan un nivel máximo de absorción equivalente a un 50,25% (1,01 kg_{H2O}/kg_{SEC}), de acuerdo con lo indicado por Tchobanoglous, Theisen & Vigil (1994).

Transcurridas 24 h desde el primer riego se determinó el valor de la capacidad de campo aplicando la siguiente ecuación (1).

$$C_{C1} = \frac{H_{R0} * D_{R0} * V_{R0} + (V_{I1} - V_{F1})}{(1 - H_{R0}) * D_{R0} * V_{R0}} \quad (1)$$

Dónde: C_{C1} es la capacidad de campo de los residuos, expresada en kilogramos de agua por kilogramo de residuos en base seca (kg_{H2O}/ kg_{SEC}); H_{R0} es la humedad en tanto por uno de la masa de residuos; D_{R0} es la densidad inicial de la masa de residuos (kg/m³); V_{R0} es el volumen de los residuos del lisímetro (m³); V_{I1} es el volumen de agua añadido al lisímetro (L); V_{F1} es el volumen de lixiviado percolado las primeras 24h (L).

Alcanzada la capacidad de campo se inició la fase de riegos a intervalos semanales con idéntica relación volumétrica (4 L). Se estimó para cada caso la conductividad hidráulica, la capacidad de retención, el grado de humedad de los rechazos y la evolución del poder contaminante del lixiviado.

Finalmente, para determinar la capacidad de compresión mecánica durante esta fase, la masa de residuos fue sometida a distintas condiciones de carga. A partir de ello fue posible estimar el asentamiento mecánico que produce una columna de residuos eliminados sobre la celda ensayada.

3.3.3 Etapa III: Final de la fase experimental

Para finalizar la fase experimental se extrajo del lisímetro la columna de residuos compactados y se realizó un estudio exhaustivo de la variación de las propiedades físico-químicas según profundidades. Para ello se dividió esta columna en tres muestras de idéntico espesor y se determinó el contenido de humedad, materia volátil, cenizas, carbono fijo, biomasa y poder calorífico siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 3.3.1.

4. Resultados y discusión

4.1 Composición de los distintos flujos de rechazo

Tras una primera caracterización de las muestras de rechazos obtenida, la composición de los distintos flujos de rechazo fueron las indicadas en la Tabla 2.

Tabla 2: Composición de los flujos de rechazo en peso húmedo

Fracción	Ud	Flujos				
		A.1	A.2	A.3	B	F ^a
Orgánica	%	6,92	23,08	17,98	1,75	13,42
Madera	%	3,44	2,99	2,89	19,13	3,22
Papel y cartón	%	27,58	18,54	21,25	3,11	23,92
Plástico	%	28,95	24,44	33,69	18,28	28,31
Vidrio	%	0,27	12,89	2,64	1,77	4,41
Textiles	%	25,92	1,24	13,69	37,29	16,68

Metales	%	4,21	2,08	3,24	4,70	3,42
R. Peligrosos	%	0,00	0,05	0,00	0,01	0,01
R. Complejos	%	0,36	0,17	0,75	0,55	0,36
Inertes	%	0,95	10,60	3,40	7,65	4,21
Otras categorías	%	1,41	3,93	0,47	5,76	2,03

El valor del contenido de humedad obtenido para los distintos flujos fue el indicado en la Tabla 3.

Tabla 3: Humedad de las muestras de rechazos

Variable	Ud	Flujos de rechazos				
		A.1	A.2	A.3	B	F
Contenido de humedad	%	7,66	11,03	22,88	19,51	11,50

Los rechazos A.1, A.2 y A.3 han sido sometidos previamente a un proceso de biosecado en la Planta de TBM (Gallardo et al. 2012). Debido a ello, el contenido en humedad obtenido es muy bajo, aunque bien es cierto que, debido a la operación de afino y maduración del material orgánico el valor registrado es superior en los flujos A.2 y A.3. En cuanto al rechazo procedente de la corriente de voluminosos (B) cabe indicar que el contenido de humedad es el habitual, ya que esta corriente únicamente se somete a operaciones de recuperación y trituración. Finalmente, el valor obtenido para el flujo F, resultante de la combinación de los anteriores (A.1, A.2, A.3 y B) es inferior al 15%.

4.2 Propiedades físico-químicas del rechazo al inicio y fin de la fase experimental

Los resultados obtenidos de contenido de materia volátil, cenizas, carbono fijo, biomasa y poder calorífico al inicio y final de la fase experimental son los indicados en la tabla 4.

Tabla 4: Análisis físico-químico de los rechazos introducidos en el lisímetro (sms)

Variables	Ud	Inicio Experiencia		Fin experiencia	
		\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
Materia volátil	%	76,45	0,03	68,84	5,70
Cenizas	%	13,10	0,13	25,44	5,11
Carbono fijo	%	10,46	0,03	5,72	2,41
Contenido en biomasa	%	59,46	1,20	35,61	8,17
Contenido no biomasa	%	27,44	1,08	38,95	5,02
Poder calorífico inferior	Kcal/kg	4.419	17,15	5.045	364,79

Según la tabla 4 al finalizar la fase experimental los rechazos extraídos del lisímetro registraron un incremento del poder calorífico del 14%. Esta misma dinámica se registró en valores como el contenido en cenizas, que se duplicó, o en el caso del contenido no biomasa que registró incrementos del 41,94%. Esta tendencia se debe a la degradación de las fracciones de rápida biodegradación y a que generalmente el proceso de infiltración-percolación arrastra parte de la biomasa y sales minerales (Espinace, Díaz & Palma, 1991). Bajo esta premisa, el contenido en biomasa, que descendió un 40,11% al final de la experiencia, se debe considerar que fue recogida en el lixiviado, el cual contiene de promedio un 1,95% de sólidos totales.

Los resultados obtenidos durante la fase de compresión-infiltración-percolación fueron los mostrados en la tabla 5.

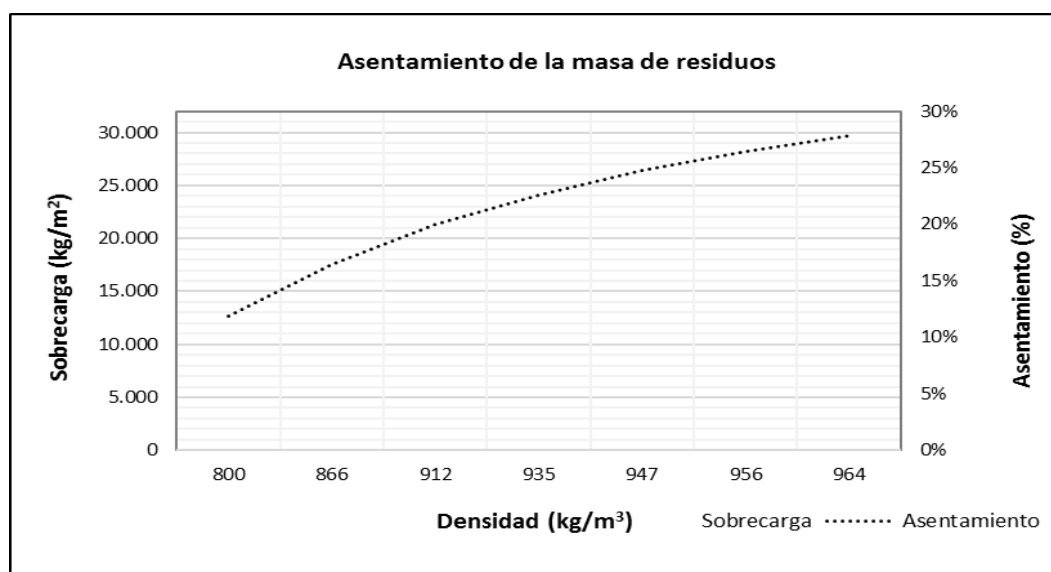
Tabla 5: Propiedades de los residuos. Resultados semanales.

Variables	Ud	Semanas						
		1	2	3	4	5	6	7
Carga aplicada	kN	7,5	10	15	20	25	30	35
Espesor residuos	cm	37,00	35,10	33,60	32,50	31,60	30,90	30,30
Densidad rechazos	kg/m ³	800	866	912	935	947	956	964
Volumen infiltrado	L	25,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Volumen percolado	L	14,07	2,93	3,60	4,20	4,48	4,37	4,41
Conductividad hidrá.	cm/s	0,46	0,05	0,29	0,36	0,40	0,36	0,35
Humedad rechazos	%	37,43	39,17	39,80	39,49	38,72	38,12	37,44
Capacidad retención	kg _{H2O} /kg _{HUM}	0,41	0,03	0,01	- 0,01	-0,01	-0,01	-0,01
Capacidad de campo	kg _{H2O} /kg _{SEC}	0,60	0,64	0,66	0,65	0,63	0,62	0,60

De acuerdo con lo indicado por (Reddy et al. 2010) los valores de la capacidad de campo disminuyeron a medida que aumentó la densidad de la masa de residuos. Además, como indicaron (Orta de Velásquez et al. 2003) para densidades superiores a 750 kg/m³ estos valores se situaron en torno a 0,60 kg_{H2O}/kg_{SEC}.

Por su parte, los resultados de la capacidad de retención registraron valores negativos durante las últimas cuatro semanas. Ello se debe al incremento de cargas que, simulando el peso del continuo vertido de residuos, conlleva una pérdida del contenido de humedad en forma de lixiviados.

Figura 5: Asentamiento de la masa de residuos



En cuanto a la conductividad hidráulica cabe indicar que los resultados obtenidos en general fueron elevados, en torno a 300 m/d (Tabla 5). (Fellner & Brunner 2010) indicaron que la formación de vías preferenciales conlleva valores elevados por efecto del arrastre de

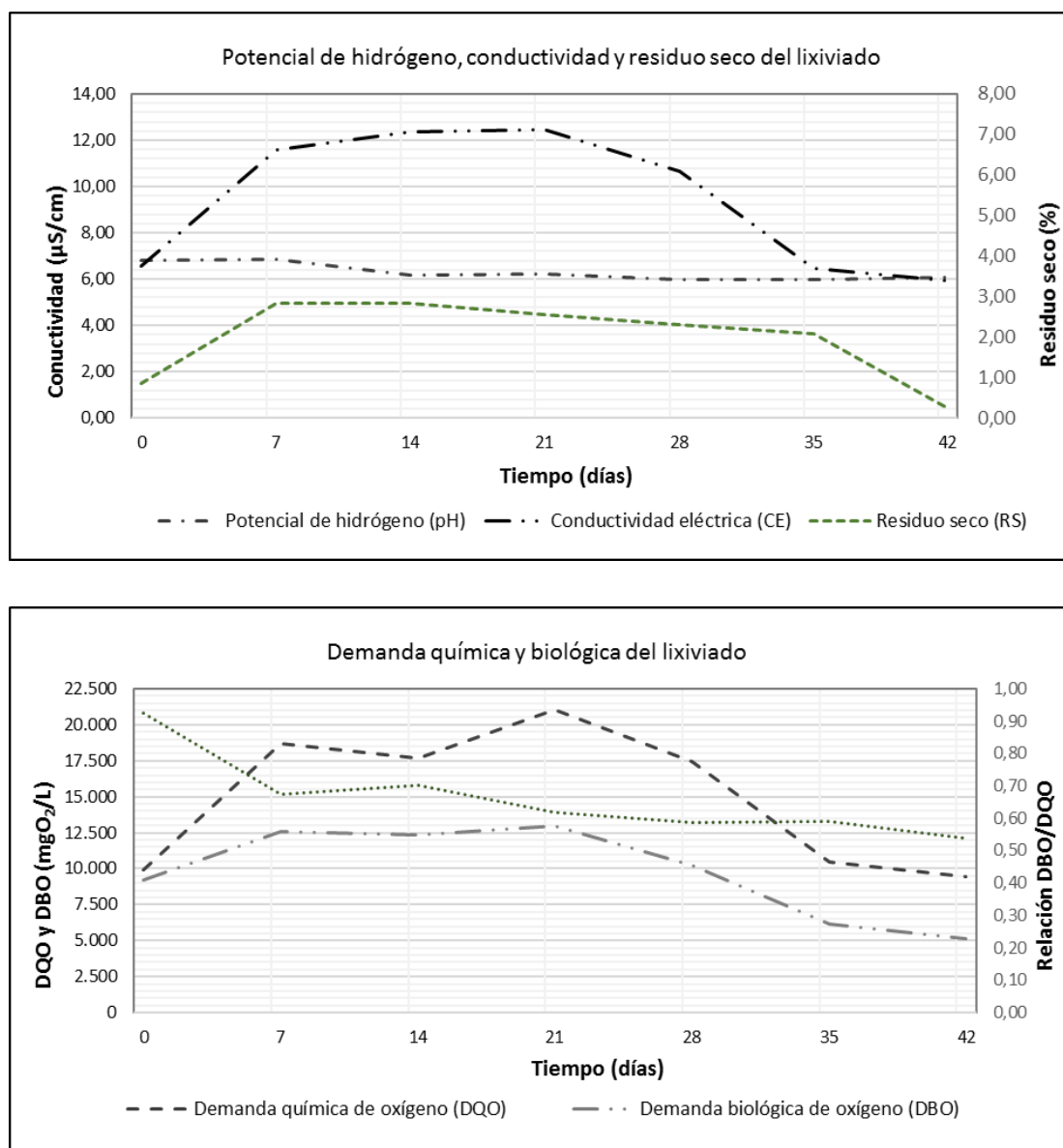
partículas finas en la masa de residuos. Por lo tanto, podría considerarse que en el lisímetro se forman estas vías preferenciales y que en general durante la fase experimental debería incrementarse el valor de la conductividad hidráulica a causa de la degradación. Sin embargo, como indicó (Jain et al. 2006), por efecto del incremento de cargas aplicado este valor disminuye ligeramente.

En cuanto a la reducción del espesor de la masa de residuos cuando estos son sometidos a diferentes condiciones de carga (Figura 5), de acuerdo con (Rafizul et al. 2012), el asiento inicial fue elevado, en torno al 11,90%, y este incremento se redujo progresivamente tras aumentar las cargas hasta registrar un asentamiento total del 27,86%.

4.3 Evolución de las propiedades del lixiviado durante la fase experimental

La evolución de las propiedades del lixiviado recogido en los depósitos durante la fase experimental fueron las mostradas en la fFigura 6.

Figura 6: Evolución de las propiedades del lixiviado



Como indicaron Vega & Herrero, (2012) los valores obtenidos para fases experimentales que no se extienden más de 60 días son los propios de la fase acidogénica. Por ello, el pH se situó en torno a 6,5 y las concentraciones de DQO y DBO₅ fueron relativamente elevadas ($\approx 15.000 \text{ mgO}_2/\text{L}$ y $\approx 10.000 \text{ mgO}_2/\text{L}$, respectivamente). En ambos casos se produjo un descenso constante, aunque fue ligeramente superior en el caso de la DBO₅ por efecto de la degradación de la materia rápidamente biodegradable. Debido a ello, durante la fase experimental el ratio de DBO₅/DQO pasó de los 0,93 iniciales a situarse en valores de en torno a 0,54 al final de la experiencia. Este fue un indicativo de estabilización de la masa de residuos.

5. Conclusiones

Durante la fase experimental el rechazo introducido en el lisímetro ha experimentado un proceso de lavado. Como consecuencia de ello el agua infiltrada ha arrastrado la materia soluble contenida en los residuos, generando lixiviado con un elevado poder contaminante.

Las propiedades químicas del residuo han registrado considerables modificaciones cuando se comparan los resultados iniciales con los obtenidos al final de la experiencia. Por una parte, se observa un incremento en el contenido de cenizas (sms) y una disminución de material volátil (sms), lo cual, aunque parece elevado, es lógico ya que el material inerte inicial que se pudo caracterizar (4,21%) no es arrastrado por el lixiviado. Por otra parte, se ha detectado una disminución del contenido en biomasa (40,1%) y un incremento en el contenido de no biomasa (41,94%), lo cual ha conllevado un aumento del poder calorífico inferior de en torno a un 14%. Esta tendencia se asocia al efecto que produce el arrastre de la fracción biodegradable por la infiltración del agua. Por su parte, el material no biodegradable, que se mantiene en el interior del lisímetro, por ser de mayor tamaño y no ser soluble, es fundamentalmente plástico y parte del textil (Tabla 2) los cuales tienen un elevado PCI (sms).

Por otra parte, los parámetros químicos del lixiviado siguen una evolución variable (Figura 6). No se observa una variación significativa en el pH, ya que el residuo ya ha sido fermentado en la planta TBM y por tanto no hay sustrato para la fase acidogénica. Sí que se observa una evolución en la conductividad eléctrica, la DQO y la DBO₅, encontrándose valores máximos en la cuarta semana ($\approx 21.000 \text{ mgO}_2/\text{L}$ y $\approx 13.000 \text{ mgO}_2/\text{L}$, respectivamente) que luego van descendiendo, ya que tanto las sales solubles como el material biodegradable va arrastrándose por el lixiviado. Algo similar ocurre con el residuo seco, que alcanza un valor máximo la tercera semana (2,82%) y luego va disminuyendo a medida que va acabándose el material soluble (0,24%).

Desde el punto de vista físico sí que se detecta una correlación entre la carga aplicada y la densidad del residuo. Esto podría simular la variación de la densidad del residuo en un depósito controlado en función de la capa de residuos que se va depositando. Con una columna de residuos de más de 35 metros se alcanzaría una densidad de $964 \text{ kg}/\text{m}^3$, lo cual deja evidencia de que a medida que aumenta el peso de residuos depositados encima, aumenta la densidad.

Por su parte, la capacidad de campo no muestra grandes variaciones en función de la densidad de los residuos. El máximo valor se registra durante la tercera semana (densidad $912 \text{ kg}/\text{m}^3$) y a continuación va descendiendo de 0,66 a 0,60 $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SEC}}$ a medida que se incrementa la presión y por tanto la densidad de la masa de residuos ($964 \text{ kg}/\text{m}^3$). Como consecuencia de este incremento de cargas se produce un asentamiento al final de la experiencia del 27,86%.

Finalmente, cabe indicar que durante el periodo de experimentación las cantidades de biogás que se almacenaron semanalmente en el globo de recogida de gases no fue significativa. Los resultados obtenidos fueron los esperados debido a que los residuos procedentes de la planta de TBM presentan un bajo contenido de materia orgánica biodegradable. Para que la producción de biogás sea representativa la programación de la fase experimental debería extenderse en el tiempo, durante el cual sería conveniente mantener la humedad para que haya una degradación anaerobia del residuo de lenta biodegradación (papel, cartón y parte del textil).

6. Referencias bibliográficas

- AENOR, (2007). UNE-EN 14346:2007. Caracterización de residuos. Cálculo de la materia seca por determinación del residuo seco o contenido en agua. *Asociación Española de Normalización y Certificación*, 26 de septiembre, pp.24.
- AENOR, (2011a). UNE-EN 15400:2011. Combustibles sólidos recuperados. Determinación del poder calorífico. *Asociación Española de Normalización y Certificación*, 28 de diciembre, pp.62.
- AENOR, (2011b). UNE-EN 15402:2011. Combustibles sólidos recuperados. Determinación del contenido de materia volátil. *Asociación Española de Normalización y Certificación*, 16 de noviembre, pp.18.
- AENOR, 2011c. UNE-EN 15403:2011. Combustibles sólidos recuperados. Determinación del contenido de ceniza. *Asociación Española de Normalización y Certificación*, 19 de octubre, pp.14.
- AENOR, (2012). UNE-EN 15440:2012. Combustibles sólidos recuperados. Métodos para la determinación del contenido en biomasa. *Asociación Española de Normalización y Certificación*, 28 de marzo, pp.58.
- Aguilar, R.A., (2008). *Determinación de los parámetros hidrológicos en rellenos sanitarios en México, caso de estudio: Tlalnepantla, Estado de México*.
- Applus, (2012). *Plan piloto caracterización residuos urbanos origen domiciliario. Informe resultados.*, Sada (A Coruña): Applus Norcontrol S.L.U.
- BIONORD, (2014). *Información ambiental BIONORD. Residuos depositados 2014*, Castellón, España. pp 5.
- Colomer, F.J., Gallardo, A., Romero, S., Bovea, M.D., Carlos, M., (2008). Los residuos sólidos en las titulaciones técnicas. In *I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*. Castellón, pp. 12.
- Comisión Europea, (2004). Methodology for the Analysis of Solid Waste (SWA-Tool), Vienna: *Comisión Europea*, 5th Framework Program.
- Dollar, L., (2005). Moisture retention of municipal solid waste mixed with sewage sludge and ash in a semi-arid climate. *Waste Management & Research*, 23(3), pp.209–219.
- Espinace, R., Diaz, I. & Palma, J., 1991. Comportamiento mecánico del relleno sanitario de Limache. In *IX Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones*. Viña del Mar, Chile, pp. 1091–1104.
- Esteban-Altabella, J., Colomer-Mendoza, J.F., Gallardo-Izquierdo, A., Fuentes-Ballesteros, J.F., (2016). Design and construction of a lisimeter to simulate of a sanitary landfill on pilot plant scale. *20th International Congress on Project Management and Engineering*.

Cartagena, España, pp. 1498–1510.

- Farquhar, G.J. & Rovers, F.A., (1973). Gas production during refuse decomposition. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2(4), pp.483–495.
- Fellner, J. & Brunner, P.H., (2010). Modeling of leachate generation from MSW landfills by a 2-dimensional 2-domain approach. *Waste Management*, 30(11), pp.2084–2095.
- Gallardo, A., Edo, N., Mengual, J., Pascual, P., (2012). Análisis del rendimiento de las plantas de clasificación de residuos de envases en España: valorización de sus rechazos. *RETEMA*, 163, pp.44–54.
- Gallardo, A., Edo, N. & Colomer, F.J., (2014). *Análisis de la evolución de las plantas de tratamiento mecánico-biológico de residuos en España*, *RETEMA*, 176, pp.12–24.
- Ham, R., (1982). Decomposition of solid-waste in test lysimeters. *Journal of the environmental engineering division ASCE*, 108 (6), p.1147.
- Jain, P., Powell, J., Townsend, T., Reinhart, D., (2006). Estimating the Hydraulic Conductivity of Landfilled Municipal Solid Waste Using the Borehole Permeameter Test. *Journal of Environmental Engineering*, 132(6), pp.645–652.
- Orta de Velásquez, M.T., Cruz-Rivera, R., Rojas-Valencia, N., Monje-Ramírez, I., (2003). Determination of field capacity of municipal solid waste with surcharge simulation. *Waste Management & Research*, 21(2), pp.137–144.
- Rafizul, I.M., Howlader, M.K. & Alamgir, M., (2012). Construction and evaluation of simulated pilot scale landfill lysimeter in Bangladesh. *Waste Management*, 32(11), pp.2068–2079.
- Reddy, K.R., Hettiarachchi, H., Parakalla, N., Gangathulasi, J., Bogner, J., Lagier, T., (2010). Hydraulic Conductivity of MSW in Landfills. , (August 2009), pp.677–683.
- Sánchez, G.J. & López, S.F., (1991). Resultados de las pruebas de capacidad de absorción y análisis de laboratorio de las celdas de control de Bordo Poniente III.
- Stoltz, G., Tinet, A., Staub, M., Oxarango, L., Gourc, J., (2012). Moisture Retention Properties of Municipal Solid Waste in Relation to Compression. , (April), pp.535–543.
- Stoltz, G., Gourc, J.P. & Oxarango, L., (2010). Characterisation of the physico-mechanical parameters of MSW. *Waste Management*, 30(8–9), pp.1439–1449.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H. & Vigil, S., (1994). *Gestión integral de residuos sólidos.*, McGraw-Hill.
- Vega, M.E.L. & Herrero, R.S., (2012). Estudio preliminar del comportamiento de rellenos sanitarios como biodigestores a escala de laboratorio. *Afinidad*, 69(558), pp.113–119.