EVAPORATION SYSTEM TO REDUCE THE VOLUME OF LEACHATE FROM A LANDFILL VALORIZING BIOGAS

Dellá Franco, Carlos; Llopis Doménech, Rodrigo; Colomer Mendoza, Francisco José; Esteban Altabella, Joan
Universidad Jaume I

The removal of leachate is important cost in solid waste sanitary landfills. On the other hand, generated biogas from anaerobic fermentation of wastes, used to be bunt in a torch, according to rules (Directiva 1999/31/CE and Real Decreto 1481/2001). So, the biogas is not exploited. In this work, a evaporation system is presented in order to reduce the volumen of leachates from a sanitary landfill. For that, different evaporations methods have been compared. Next, the optimum system has been chosen and a economic study has been analyzed. The chosen system (direct contact evaporator in an evaporation column) consisto on a boiler, direct contact evaporator and gas-liquid exchanger. Furthermore, it is posible to take profit of biogás or apply natural gas as a power source in the case that biogás was not enought.

Keywords: leachate; biogas; evaporator; evaporatiorn column; gas-liquid exchanger

SISTEMA DE EVAPORACIÓN PARA REDUCIR EL VOLUMEN DE LIXIVIADOS DE UN DEPÓSITO CONTROLADO, VALORIZANDO EL BIOGÁS

La eliminación de lixiviados supone un coste importante en los depósitos controlados de residuos sólidos. Por otro lado, el biogás generado como consecuencia de la fermentación anaerobia de los residuos biodegradables se suele quemar en antorcha según normativa (Real Decreto 1481/2001) por lo que no se aprovecha este biogás. En este trabajo se plantea una instalación basada en un sistema de evaporación para reducir el volumen de lixiviados de un depósito controlado, utilizando como combustible este biogás. Para ello, se han estudiado los distintos métodos de evaporación utilizados en la eliminación de aguas residuales. Una vez analizados estos se seleccionará el más apropiado y se realizará un estudio económico donde se evaluará el ahorro que supone la evaporación de parte o todo el lixiviado frente a la gestión externa del lixiviado. La configuración elegida (evaporador de contacto directo utilizando una columna de evaporación) constará de caldera, evaporador de contacto directo e intercambiador (gas – líquido). Debido a la presencia de biogás en el mismo vertedero, se estudiará la posibilidad de emplearlo como combustible y si no fuera suficiente, de añadir una fuente externa de gas natural que se almacenaría en depósitos en el mismo emplazamiento.

Palabras clave: lixiviado; biogás; evaporador; columna de evaporación; intercambiador gas-líquido

Correspondencia: Francisco J. Colomer Mendoza - fcolomer@uji.es

Agradecimientos: Los autores agradecen al consorcio BIONORD (Gestión de residuos de la Zona Norte de Castellón) por su colaboración y participación activa en este trabajo

1. Introducción

En la mayoría de sociedades actuales y a pesar de la creciente concienciación sobre la jerarquía de gestión, enterrar los residuos urbanos es todavía la práctica más utilizada para eliminarlos. Esto es debido fundamentalmente a la sencillez en el proceso y bajo coste del vertido.

Una vez que se han enterrado los residuos es fundamental minimizar los impactos centrados principalmente en la generación de lixiviados y biogás. Los lixiviados se forman por la humedad propia de los residuos y por el agua infiltrada de las precipitaciones que ha arrastrado por percolación las sustancias solubles. De este modo, se genera un líquido muy contaminante (Bou-Zeid & El-Fadel, 2004). Si los lixiviados no se recogen ni se tratan adecuadamente pueden contaminar aguas subterráneas, aguas superficiales y suelos (Cossu & Raga, 2008; Agostini et al., 2012). Para evitar que esto ocurra, los vertederos se impermeabilizan, se instala el drenaje y las conducciones apropiadas para evacuar el lixiviado y después del almacenamiento temporal en una balsa, se trata el líquido recogido.

Una vez los residuos son depositados en el vertedero, la materia orgánica presente es rápidamente biodegradada, generando amoniaco y ácidos grasos volátiles. Estos ácidos se diluyen fácilmente en el agua, disminuyendo su pH y favoreciendo la solubilización de los metales pesados. Así pues, se genera un lixiviado joven con una carga contaminante muy elevada (Fellner & Brunner, 2010). Con el tiempo el vertedero produce lixiviado viejo, que se caracteriza por una elevada demanda química de oxígeno (DQO), una menor demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y una menor cantidad de tóxicos disuelta. (Tabla 1).

Tabla 1. Analítica genérica del lixiviado (Colomer, 2006)

Parámetro	valor
pH	5 – 9,4
Solidos solubles (mg/L)	40 – 7.700
Cloruros (mg/L)	100 – 5.420
Sulfatos (mg/L)	5 – 1.560
COT (mg/L)	700 – 10.000
DBO_5 (mg/L)	97 – 45.070
DQO (mg/L)	641 – 77.500

Una vez que los lixiviados son almacenados en la balsa, deben recibir el tratamiento adecuado. Para ello, generalmente, se emplean tratamientos similares a los utilizados en la depuración de aguas residuales urbanas. Estas instalaciones requieren una gran inversión en instalación, operación y mantenimiento. Es por ello que la empresa encargada de la gestión del vertedero suele contratar la gestión externa que se encarga de recoger, transportar y tratar este lixiviado.

Por otra parte, otro de los efluentes del vertedero más perjudiciales para el medio ambiente es el biogás generado en el seno del vertedero y que, si no se lleva un control adecuado, es liberado a la atmósfera. El biogás de vertedero está formado principalmente por metano y dióxido de carbono, los dos principales gases que provocan el efecto invernadero y que por consiguiente, contribuyen al calentamiento global. Es por ello que su recogida, canalización y tratamiento es uno de los mayores retos a los que se enfrentan los explotadores de

vertederos. El biogás es forzado a salir por tuberías insertadas en la masa de residuos y canalizado hasta el punto de tratamiento. Si no se dispone de ningún sistema de aprovechamiento, el biogás debe ser quemado para evitar que se libere a la atmósfera (RD 1481/2001). La quema del metano supone una pérdida de energía que podría ser aprovechada por el propio vertedero para su funcionamiento diario. Sin embargo, los costes de inversión que suponen la instalación de un sistema capaz de convertir este gas en energía son elevados, por lo que este combustible es en la mayoría de casos desaprovechado.

2. Objetivos

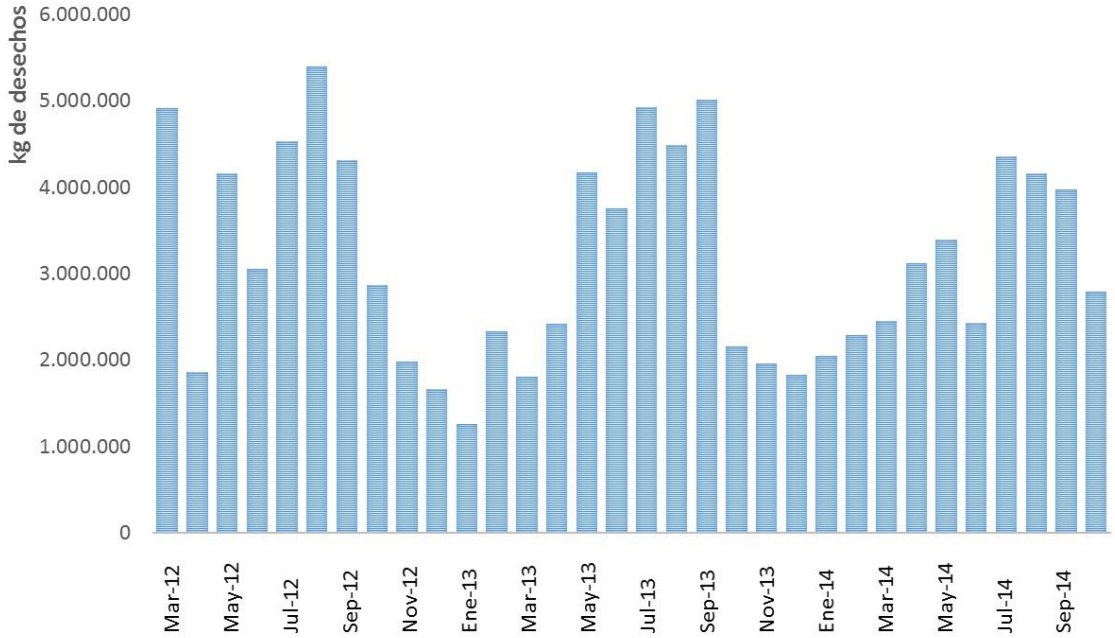
El objeto del presente trabajo es el estudio y diseño de un sistema que permita la reducción del volumen de lixiviados generados en los vertederos. El equipo se va a diseñar para el vertedero de Cervera del Maestre (Zona 1, Castellón). Para ello, se pretende aprovechar el biogás generado en el propio vertedero de manera que el calor generado en la combustión del mismo sirva para evaporar parte del lixiviado. También se estudiarán alternativas cuando la energía obtenida del biogás sea insuficiente.

3. Metodología de la explotación del vertedero

Actualmente, la planta y vertedero de Cervera presta servicio de valorización y eliminación de residuos municipales a 49 municipios de las comarcas del norte de la provincia de Castellón. La entrada de residuos a la planta tiene una fuerte dependencia estacional, ya que en verano se multiplica la población y los desechos de las poblaciones que forman la Zona I del Plan de residuos de Castellón. Durante estos meses, la planta abre la segunda línea de tratamiento de residuos, línea que durante el resto del año permanece parada salvo avería de la primera. Mediante el proceso de biosecado se ha eliminado gran parte de la materia orgánica fácilmente biodegradable y de la humedad, también se han recuperado gran parte de materiales reciclables. Además, los rechazos se prensan en balas de hasta alcanzar una densidad de 750 – 900 kg/m^3. En la Figura 1 se puede ver la evolución mensual de los residuos (rechazos) que pasan de la planta al vertedero. Estas son las razones por las que la cantidad de residuos depositados en el vertedero es mucho menor que la cantidad que entra a la planta, con lo cual se ahorra espacio, además de otorgar al vertedero mayor estabilidad al evitar la formación de huecos.

Una vez que el rechazo llega al vertedero, diariamente, después de la deposición de los residuos, se aplica una capa de tierra de cobertura. Esta tierra proviene de la excavación del vaso del vertedero y se encuentra acopiada alrededor del mismo. Periódicamente se extrae parte de ella y se deposita al lado del frente de trabajo para facilitar la labor de los operarios. Debido a la cobertura diaria, los residuos carecen de oxígeno durante su degradación, por lo que se produce una fermentación anaerobia que genera biogás. El biogás es extraído mediante tuberías verticales que fueron colocadas al principio de la explotación. Conforme avanza el relleno del vaso estas tuberías se conectan mediante una red de conducciones con la antorcha de quemado o con otro sistema de aprovechamiento del biogás. A pesar de los daños que provoca el vertido de metano a la atmósfera, las conducciones no son obligatorias por el momento, pues el contenido en metano del biogás no supera el 60% que es el límite establecido por la normativa. Así pues, se estima que la cantidad de biogás generado será de 1,33 m^3 de biogás/m^3 de RSU depositado al año, un valor mucho menor al habitual debido al proceso de secado y separación del residuo orgánico, al que son sometidos los residuos en la planta de tratamiento.

Figura 1: Entrada mensual de rechazos al vertedero



Por otra parte, el vertedero de Cervera dispone de una balsa para la recogida de lixiviados con una capacidad de 2.500 m^3, esta se encuentra anexa al vertedero y es abastecida de lixiviado mediante dos bombas. En estos momentos el tratamiento del lixiviado se delega a un gestor externo que se encarga de recogerlo y transportarlo hasta las instalaciones donde es depurado y vertido al medio. El coste por metro cúbico recogido es de alrededor 25 €.

Se realizan análisis de la composición de los lixiviados extraídos del vertedero 4 veces al año. Los resultados obtenidos en las analíticas se sitúan dentro de los intervalos especificados en la tabla 1. La empresa encargada de este tratamiento ha informado de que en caso de recibir un lixiviado más concentrado, el coste de depuración aumentaría, en concreto se triplicaría. Por tanto, esto se tendrá en cuenta a la hora de hacer los cálculos económicos sobre el coste de depuración del lixiviado tras ser evaporada gran parte de su contenido en agua.

La generación promedio de lixiviados del depósito controlado en los últimos 3 años es de alrededor de 6.000 m^3/año, con una concentración de sólidos promedio de 1,05%; lo que supone un coste anual 150.000 €.

4. Metodología de diseño del sistema de evaporación

Existen numerosas tecnologías de tratamiento que han ido evolucionando con los años. Todas las tecnologías empleadas para el tratamiento de aguas residuales han sido probadas en la eliminación de lixiviados. Estas han tenido resultados variables debidos a la presencia de prácticamente todos los grupos de contaminantes existentes. Si se comparan las distintas tecnologías como procesos anaerobios, procesos aerobios, sistemas naturales (humedales artificiales o lagunas), evaporación, recirculación o sistema de membranas puede concluirse con que tecnologías como la evaporación pueden lograr reducciones similares y/o superiores a los sistemas combinados, teniendo menos problemas operacionales, menores emisiones de lodos, y de acuerdo a comparaciones realizadas en países desarrollados, aparentemente mucho menores costos de tratamiento.

Selección del sistema evaporativo

El lixiviado posee una alta carga contaminante, con sólidos en suspensión y elementos corrosivos que dificultarán el funcionamiento y reducirán la duración del sistema.

Los evaporadores de película y ebullición son inadecuados debido al potencial depósito de contaminantes en la superficie de transferencia metálica, por tanto se descarta su uso en la evaporación de lixiviados.

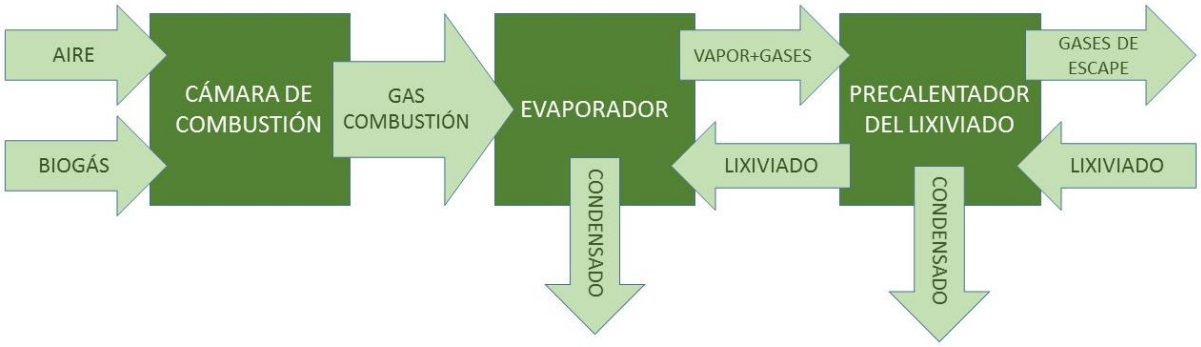
Los evaporadores flash y de contacto directo evitan la ebullición en la superficie de transferencia, con lo que conseguimos evitar la suciedad y corrosión.

Se selecciona para realizar la comparativa el evaporador de contacto directo utilizando una columna de evaporación por las siguientes razones:

- existe una gran transferencia de calor y masa por el contacto íntimo entre gas caliente y líquido y por la gran superficie de contacto de las partículas dispersadas,
- su construcción es simple y su coste bajo debido a la eliminación de tubos y paredes metálicas y
- mediante la columna de evaporación se consigue que los contaminantes orgánicos pasen del lixiviado al vapor.

La configuración del sistema evaporativo elegida se representa en la Figura 2.

Figura 2: diagrama de balance del sistema evaporativo



Los principales componentes en el modelo conceptual del proceso de evaporación incluyen una cámara de combustión que produce gases de combustión calientes, y una columna de evaporación en la que se produce el intercambio de calor y masa entre el lixiviado y los gases calientes. El lixiviado es bombeado hasta la parte superior de la columna y pulverizado dentro de ella. Los gases de combustión entran por la parte inferior de la columna, por tanto se produce un intercambio a contracorriente.

La transferencia de calor y masa se produce a través de la superficie de contacto líquido-gas, evaporando parte del líquido, que es el objetivo buscado. La masa gaseosa de salida, formada por los gases de combustión más el lixiviado evaporado en forma de vapor de agua, sale por la parte superior de la columna. El lixiviado que no ha podido ser evaporado saldrá por la parte inferior, este lixiviado tendrá una mayor concentración en sólidos en suspensión y elementos contaminantes, pues hay una gran cantidad de estos que no se ha incorporado a la corriente gaseosa de salida junto con el vapor de agua.

Balances de energía y masa

Se realizarán balances de masa y energía en la cámara de combustión y en la columna de evaporación. Mediante estos cálculos se pretende conocer la cantidad de lixiviado que se puede evaporar a partir de una cantidad de combustible fijada. Se estudiará en primer lugar,

la utilización como combustible del biogás generado en el propio vertedero, y en segundo lugar, se analizará la opción de añadir un depósito de gas natural que se utilice como combustible de apoyo.

En el primer balance se fija la frontera en los límites de la cámara de combustión. En este balance se pretende obtener la masa y temperatura de salida de los gases producto de la combustión. Los datos de entrada serán el caudal de biogás y la cantidad de aire introducidos en la cámara. Estos datos servirán para elegir una cámara de combustión adecuada según las condiciones de trabajo seleccionadas.

El segundo balance tiene como frontera los límites de la columna de evaporación. Se busca la cantidad de agua que es capaz de evaporar y la cantidad de lixiviado que hay que introducir para que se opere en las condiciones de entrada. Estas condiciones, fijadas por el explotador, serán la temperatura a la que funciona el evaporador y la temperatura y masa de los gases que provienen de la combustión. Con estos datos térmicos y de caudal se puede diseñar una columna cuyo funcionamiento se adapte los mismos. Por tanto en este sistema habrá tres parámetros a fijar; la cantidad de biogás introducida, el exceso de aire y la temperatura del evaporador. El objetivo final es conocer la cantidad de lixiviado evaporado con las condiciones escogidas.

Cámara de combustión

El poder calorífico del biogás dependerá de la cantidad de metano. Se asume que todo el metano introducido se consume en la reacción de combustión. Aproximamos la composición del aire con un 79% de nitrógeno y un 21% de oxígeno, todas las propiedades calculadas se harán a partir de esta aproximación. Se introducirá siempre un exceso de aire para asegurar la combustión completa y conseguir mayor masa de gases de escape para utilizar en el evaporador. Cuanto mayor sea el exceso de aire se obtendrá una mayor cantidad de gases a la salida, pero estos tendrán una menor temperatura. Esto puede ser positivo pues permite trabajar a menores temperaturas y conseguir una mayor transferencia de calor debido al aumento de la cantidad de masa de fluido caliente. La reacción de combustión que se produce en la cámara es la siguiente:

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O \qquad (1)$$

Con tal de estimar la temperatura de los gases de escape se realiza un balance de energía en la cámara de combustión. En él se tienen en cuenta todas las corrientes de entrada y salida, además del calor producido en la reacción de combustión (Figura 3). Las corrientes de entrada (biogás y aire) estarán inicialmente a temperatura ambiente, con sus respectivas masas (datos de entrada) y calores específicos, este último parámetro es dependiente de la temperatura. La corriente de salida será el caudal de gases producto de la combustión junto con el vapor de agua generado y el aire en exceso que no ha reaccionado. Estos gases saldrán a alta temperatura la cual se podrá variar, como ya se ha comentado, variando la cantidad de exceso de aire introducida. Para representar esta corriente de aire húmedo se dividirá en gases secos y vapor de agua, con sus respectivas masas y calores específicos, pero a la misma temperatura (T_2).

Aplicando las correspondientes fórmulas psicrométricas y calculando los correspondiente parámetros, se llega a la ecuación del balance de energía (2)

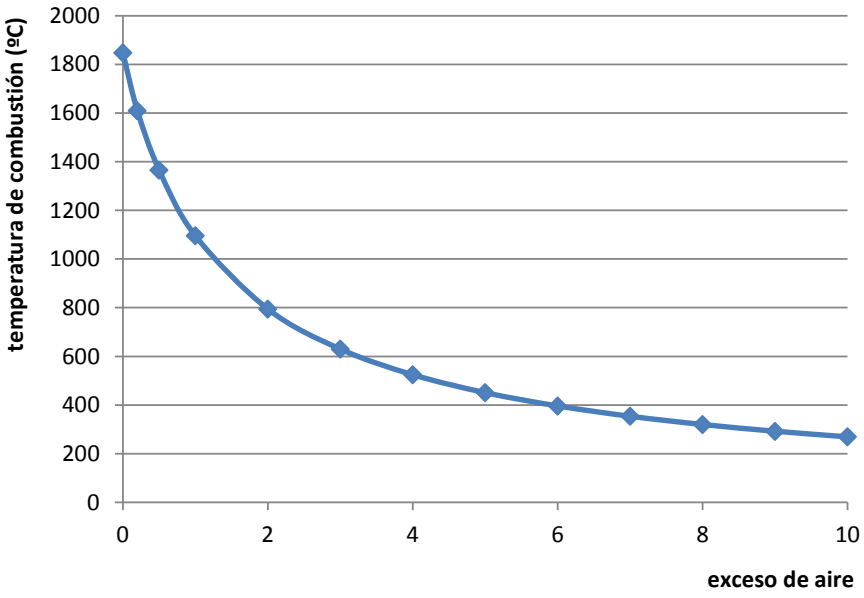
$$m_{aire} \cdot Cp_{aire} \cdot T_{aire} + m_{wv1} \cdot Cp_{wv1} \cdot T_{wv1} + m_{CH_4} \cdot Cp_{CH_4} \cdot T_{CH_4} + m_{CO_2} \cdot Cp_{CO_2} \cdot T_{CO_2} + \Delta H_{combustión} = m_{2g} \cdot Cp_{2g} \cdot T_2 + m_{wv2} \cdot Cp_{wv2} \cdot T_2 \qquad (2)$$

Figura 3: balance de energía en la cámara de combustión



A continuación se plantea, para una composición del biogás promedio del 60% de metano y el 40% de CO_2, con un caudal de biogás de 10 kg/s y según la ecuación 2, la temperatura de salida de gases. Ésta dependerá del caudal de aire que se introduzca en la cámara de combustión (Figura 4), de manera que al aumentar el caudal de aire, disminuirá la temperatura de salida de los gases.

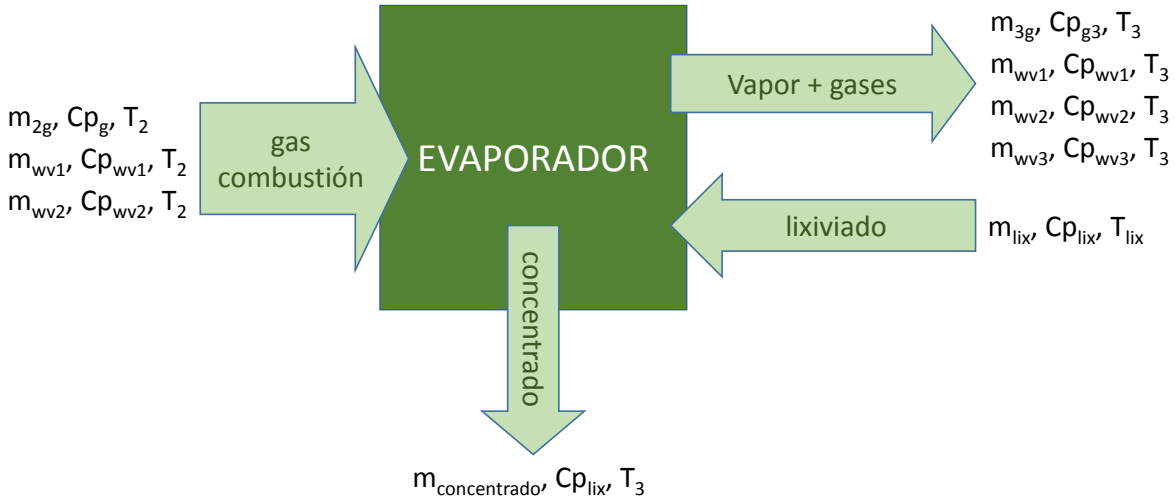
Figura 4: Temperatura de combustión (˚C) en función del exceso de aire (T_{amb}=15ºC)



Evaporador

En el evaporador se produce un intercambio de calor entre el lixiviado y los gases calientes de salida de la cámara de combustión, representados por una corriente de aire seco (g2) y otras dos de vapor de agua (wv1 y wv2). Estas cuatro corrientes serán las entradas del sistema (Figura 5).

Figura 5: balance de energía y agua en el evaporador



A partir de la Figura 5 se llega a la ecuación del balance de agua y energía del evaporador (3)

$$m_{lix} \cdot Cp_{lix} \cdot T_{lix} + m_{2g} \cdot Cp_g \cdot T_2 + m_{wv1} \cdot Cp_{wv1} \cdot T_2 + m_{wv2} \cdot Cp_{wv2} \cdot T_2 = m_{concentrado} \cdot Cp_{lix} \cdot T_3 + m_{3g} \cdot Cp_{3g} \cdot T_3 + m_{wv1} \cdot Cp_{wv1} \cdot T_3 + m_{wv2} \cdot Cp_{wv2} \cdot T_3 + m_{wv3} \cdot Cp_{wv3} \cdot T_3 + m_{wv3} \cdot h_{v1} \quad (3)$$

En la cual

$$m_{concetrado} = m_{lix} - m_{wv3} \quad (4)$$

No obstante, La dependencia de biogás por parte del sistema para su funcionamiento hace que éste no sea todo lo robusto que debería. Es por ello que se plantea la utilización de otro combustible en momentos en los que el biogás no sea suficiente para evaporar la cantidad de lixiviado deseada. Incluso puede sustituirse completamente el biogás por el nuevo combustible, ya que la utilización de un combustible comercial garantiza la uniformidad en sus características (PCI, densidad,…), la menor presencia de dióxido de carbono en el combustible y la seguridad en el suministro.

5. Programa de cálculo

Con tal de facilitar el dimensionamiento de este sistema de evaporación y para poderlo adaptar a cualquier vertedero, se ha elaborado un programa de fácil utilización que permite calcular la cantidad de lixiviado evaporada en función de unos parámetros de entrada. El programa está elaborado dentro de un entorno Excel® y consta de dos páginas, una para la cámara de combustión y otra para el evaporador.

Parámetros de control

En primer lugar se fijarán las condiciones ambientales y las condiciones básicas del sistema. En el recuadro “Datos de simulación”, debe introducirse la temperatura ambiente (temperatura a la que se encuentra el biogás y aire que entrará al sistema), la humedad relativa, la presión dentro del sistema, el rendimiento de la cámara de combustión, el exceso de aire y el caudal de biogás que introduciremos a la cámara de combustión.

Tabla 2: datos a introducir en el sistema

DATOS DE SIMULACIÓN					
T_{amb}	15	ºC	Rendimiento de la cámara de combustión	0,98	
HR	60	%	Caudal de biogás	10	kg/s
Presión	101325	Pa			
Exceso de aire	3				

En el apartado de combustible pueden encontrase los combustibles más habituales con su peso molar y su poder calorífico inferior. También los pesos moleculares de los gases mayoritarios en la atmósfera y los que se crean en las reacciones de combustión. Aquí se puede ajustar el porcentaje de cada gas que participará en la combustión.

Por otro lado están los parámetros de control de la columna de evaporación, que en este caso solamente es uno: la temperatura de equilibrio que se alcanzará en el evaporador, también llamada temperatura de evaporación. Esta temperatura será a la que salgan las distintas corrientes del evaporador.

Cálculos

Una vez introducidas las características del ambiente, de la cámara de combustión, del evaporador y del combustible, el programa calcula la cantidad de agua que contiene el aire a la entrada a la cámara a partir de las condiciones ambientales y pasa a cuantificar las proporciones de los elementos que intervienen tanto a la entrada como a la salida.

Conocidas ya las cantidades de los distintos gases que intervienen, se supone una temperatura de combustión y se itera junto con el calor específico hasta hallar el equilibrio y la temperatura real de combustión a la que saldrán los gases de escape. Este es el dato que se quiere conocer antes de pasar a la columna de evaporación.

En la parte del evaporador, se presentan las características de los gases a la entrada, obtenidas de la cámara de combustión, y las condiciones de los gases de salida suponiendo una humedad relativa del 90% (este parámetro también puede ser modificado). A partir de estas últimas características se obtiene el caudal de agua que es capaz de evaporar el sistema en las condiciones introducidas.

Se realiza un balance de energía y se obtiene la cantidad de lixiviado que debe entrar al sistema para que se cumplan estas condiciones. Una vez obtenido el caudal de lixiviado se calcula el porcentaje eliminado de lixiviado con respecto al total introducido.

Por tanto, los parámetros principales de control son el caudal de biogás, el exceso de aire y la temperatura en el evaporador. El resto de parámetros dependen de condiciones externas difícilmente controlables. Sin embargo, no todas las combinaciones de estos tres parámetros son posibles, por ejemplo, la temperatura en el evaporador no debe acercarse a los 90ºC pues puede empezar a producirse ebullición dentro de la columna de evaporación, efecto que debe evitarse. Tampoco se pueden introducir porcentajes muy elevados de exceso de aire, pues ello baja la temperatura de salida de los gases de combustión hasta niveles que dificultan la evaporación.

Efecto de los parámetros

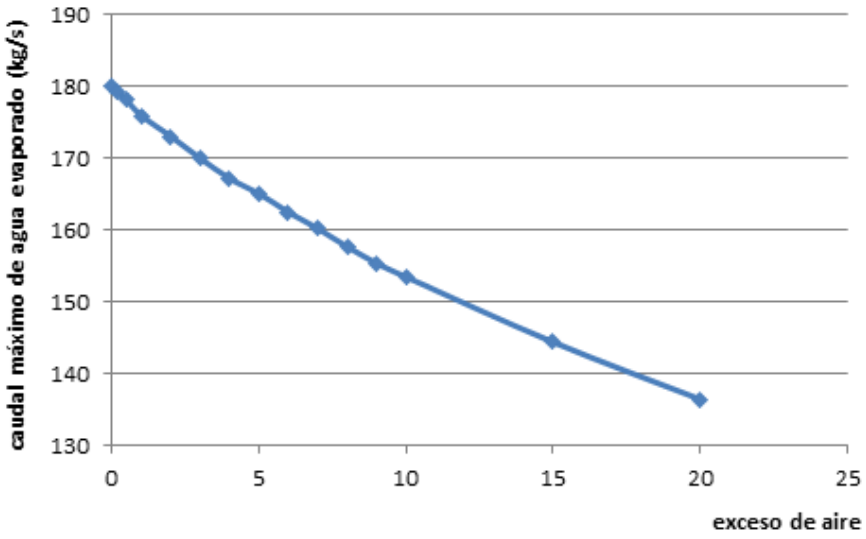
El efecto de los parámetros descritos en la tabla 2 y su rango de valores se describe a continuación.

- Efecto del exceso de aire: Este parámetro se debe regular para conseguir un caudal

importante de gas que facilite el intercambio con el lixiviado, pero a una temperatura moderada, pues si esta aumenta demasiado provoca problemas (Figura 4). En primer lugar, la cámara de combustión y las conducciones tendrían que ser capaces de resistir mayores temperaturas y por tanto serían más caras. En segundo lugar, la temperatura del evaporador debería bajar para que se cumplieran los balances y con ella disminuiría la cantidad de lixiviado evaporado.

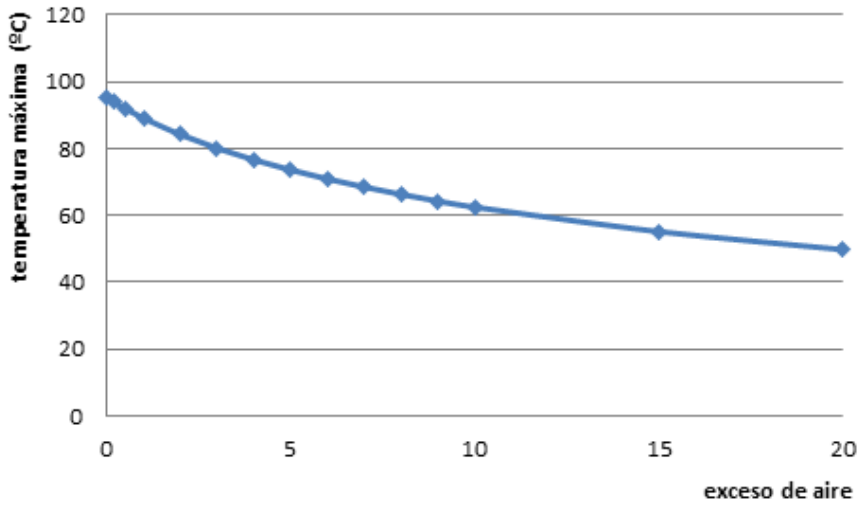
En la Figura 6 se relaciona el exceso de aire con el caudal máximo de agua evaporado. Puede verse que cuanto mayor es el exceso de aire, menor es el caudal evaporado.

Figura 6: Caudal máximo evaporado (kg/s) en función del exceso de aire



En la Figura 7 se puede ver la influencia del exceso de aire en la temperatura máxima que puede alcanzar el evaporador; a mayor exceso de aire, menores temperaturas en el evaporador.

Figura 7: Temperatura máxima en el evaporador (˚C) en función del exceso de aire

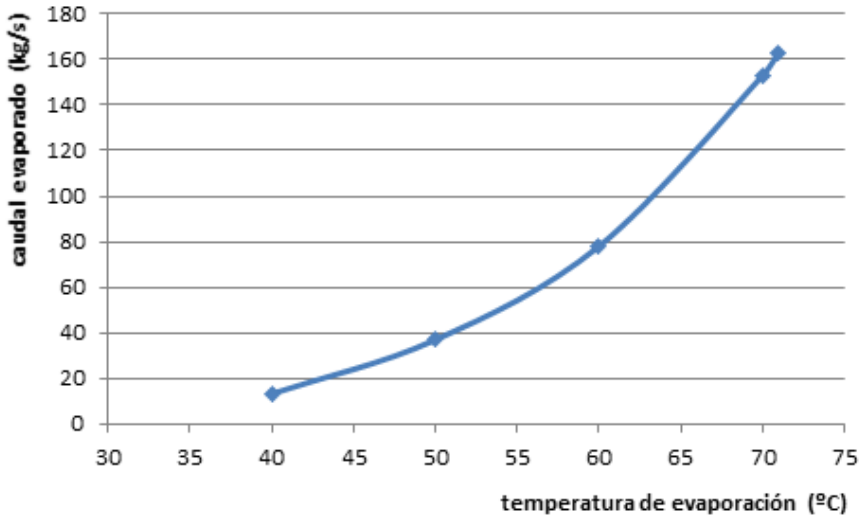


A la vista de los resultados presentados se puede fijar un límite inferior a la hora de seleccionar el porcentaje de aire en exceso, se pueden descartar ciertas cantidades por provocar una temperatura de combustión demasiado alta o por requerir una temperatura

en el evaporador cercana al punto de ebullición. Por tanto se descartan excesos de aire menores del 300%. En cuanto al límite superior podemos descartar los excesos de aire mayores del 600% por requerir temperaturas en el evaporador bastante menores de 70ºC y por provocar una masa excesiva de gases contaminados que deberán ser tratados posteriormente.

- Efecto del caudal de combustible: El único efecto que provoca el aumento de caudal de combustible es el aumento proporcional del caudal de lixiviado evaporado. No cambiará ni la temperatura de combustión ni la del evaporador pues se mantienen todas las relaciones estequiométricas.
- Efecto de la temperatura del evaporador: según la Figura 8 se puede concluir con que a medida que aumenta la temperatura de evaporación, aumenta el caudal evaporado y por tanto, la cantidad de lixiviado. Iterando distintas temperaturas con distintos excesos de aire, se colige que con un 500% de exceso de aire se conseguiría la temperatura óptima con el mínimo consumo. Se elige una temperatura de evaporación de 73,6ºC con la cual se obtiene la máxima evaporación sin tener que recurrir a mayores temperaturas.

Figura 8: Caudal evaporado (kg/s) en función de la T de evaporación (ºC) - Exceso de aire=500%



6. Estudio del consumo energético

El equipo empleado será el mismo sea cual sea el combustible gaseoso utilizado, tan solo habrá que tener en cuenta que para almacenar el gas natural cerca de la cámara de combustión, se necesitará un depósito.

En cuanto al precio, el biogás es uno de los efluentes del vertedero y es totalmente gratuito, no supone ningún coste para el vertedero. El gas natural por su parte, será suministrado por una empresa distribuidora del mismo.

El análisis se hará para un punto concreto de funcionamiento

- Condiciones ambientales de Cervera del Maestre (Castellón)
- Exceso de aire: 500%
- Temperatura de evaporador: 73,6˚C

En primer lugar, se comprueba si la generación de biogás prevista es suficiente para

evaporar el lixiviado producido a lo largo del año. El dato de mayor producción de lixiviado se corresponde con el año 2013, cuando se recogieron 6.043,08 m^3.

Con un caudal de biogás promedio de 350 kg/año (≈420 m^3/año) se pueden tratar 6004 kg/año de lixiviado y evaporar algo más del 96% de él, es decir unos 5.778 kg de lixiviado. La generación de biogás prevista es mucho menor, ya que según el programa LandGem (EPA, 2005) se tendrán 108 m^3/año. Por tanto, si se pretende evaporar todo el lixiviado recogido en el vertedero, es necesario emplear gas natural (GN) como complemento al biogás.

Los resultados vertidos por la herramienta, para tratar alrededor de 6.000 m^3 de lixiviado se observan en la Tabla 3.

Tabla 3: consumos de combustible y caudales condensado/evaporado esperados

	Caudal de combustible introducido (kg/año)	Caudal de lixiviado tratado (kg/año)	Caudal de lixiviado evaporado (kg/año)	Caudal de concentrado (kg/año)
Con biogás	108,00	1.852,69	1.782,94	69,75
Con GN	150,00	4.340,44	3.995,28	345,16
Total	258,00	6.193,13	5.778,22	414,91

Por tanto, en el caso más desfavorable en cuanto a generación de lixiviado serán necesario emplear gas natural junto a biogás, en concreto se emplearán 150 kg de gas natural adicional para poder evaporar todo el lixiviado previsto. Esto supondrá un sobrecoste derivado de la compra del combustible y la instalación de un depósito de gas natural junto con las conducciones que lleven este gas hasta la cámara de combustión. A continuación se cuantifica el sobrecoste que supone.

Debido al bajo consumo de gas natural que supone el vertedero (≤ 5.000 kWh/año), se aplicará una tarifa tipo TUR 1. La tarifa de gas natural consta de un término fijo (4,38 €/mes) y otro variable (0,05725877 €/kWh), se elige la tarifa de Gas Natural Fenosa. Esto supondrá un coste de 169,18 €/año de GN.

7. Estudio de viabilidad económica

Tabla 4: resumen del estudio de viabilidad económica

		Biogás + GN [1]	GN [2]
Inversión inicial (€)		158.187	187.071
Coste de operación y mantenimiento (€/año)	Gas natural	169	223
	Mantenimiento instalaciones	1.000	1.000
	Bomba	150	150
Ahorro promedio (€/año)		150.000	150.000
Balance promedio (€/año)		167.693	225.514

Valor Actual Neto (VAN) (€)	630.153	504.354
Tasa Interna de Rendimiento (TIR)(%)	19,38	21,30
Periodo de retorno (PR) (años)	1,7	2,2

En este punto se evaluará la viabilidad económica del sistema de evaporación propuesto para eliminar el lixiviado del vertedero controlado de Cervera del Maestre. Para ello se plantean dos escenarios: [1] utilización del propio biogás generado en el vertedero y gas natural como complemento, [2] utilización de gas natural (GN) como combustible. Para la instalación se ha elaborado la Tabla 4, que resume todos los datos necesarios para el cálculo de la rentabilidad del proyecto.

La inversión inicial de las dos alternativas incluye todas las instalaciones necesarias para el correcto funcionamiento del sistema: caseta de obra prefabricada (2.928,38 €), instalación y montaje de la cámara de combustión (15.777,62 €). Sin embargo, la instalación del depósito de gas natural y conexión a la caseta es diferente, ya que en el caso de biogás + GN supondría 139.480,95 € y en el de sólo GN supondría 168.364,86 €.

8. Conclusiones

Con este trabajo se permite reducir la cantidad de lixiviados generados en el vertedero de residuos de Cervera del Maestre (Castellón, España). Además, como objetivo secundario, se busca estudiar el aprovechamiento energético del biogás generado en el mismo vertedero para conseguir. Para ello se ha desarrollado un sistema de evaporación adaptado a las características del lixiviado, que emplea combustible gaseoso como fuente energética. Junto con el diseño del sistema, se ha elaborado una herramienta informática que permite dimensionarlo y valorar la posibilidad de emplear otros combustibles gaseosos complementando o sustituyendo el gas del vertedero.

Se puede concluir con que los análisis de viabilidad han proporcionado resultados positivos en cuanto a su posible implantación. En caso de querer implantar este sistema se recomienda hacer un análisis más exhaustivo de cada uno de los elementos del sistema y proceder a su diseño detallado, pues el alcance del presente proyecto no contemplaba tal posibilidad por la dificultad y extensión de la misma.

9. Referencias

Agostini, F., Sundberg, C. & Navia, R. (2012). Is biodegradable waste a porous environment?. A review. Waste Management & Research, 30(10) 1001–1015

Bou-Zeid, E. & El-Fadel, M. (2004). Parametric sensitivity analysis of leachate transport simulations at landfills. Waste Management 24(7), pp. 681-689

Colomer, F. J., (2006). Tesis: Análisis y sistematización de la seguridad medioambiental de los vertederos de residuos urbanos y asimilables. Aplicación a las balsas de lixiviados. Universidad Politécnica de Valencia, Spain.

Cossu R & Raga R (2008). Test methods for assessing the biological stability of biodegradable waste. Waste Management 28, pp. 381–388.

España, Real Decreto 1481/2001 de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.

EPA, Environmental Protection Agency (2005) Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide. U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development Washington, DC 20460 https://www3.epa.gov/.../**landgem**-v302-guide.pdf

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