

LABWASTE.12: CALCULATION TOOL FOR THE DESIGN OF SOLID WASTE LANDFILLS WITH INERT WASTE RECOVERY

Esteban Altabella, J.; Colomer Mendoza, F. J.; Gallardo Izquierdo, A.;
Carlos Alberola, M.

Universitat Jaume I

The Landfill models and softwares are limited to individual calculation of some of the variables. However, there are none that meet all of them. This paper shows the development of a computational tool called LABWASTE.12 to design all variables about landfills with debris waste recovery. This tool presents a model from Excel® program for landfills draft, establishing the possibility of developing recycled aggregates. For the development of the tool the following variables are taken into account: properties and composition of the waste, characterization and properties of natural/recycled debris; statistical correlation between population and area of the landfill; preliminary design of the vessel; slope stability and dams, evacuation perimeter channel drains, leachate generation, design of stormwater and leachate ponds and predimensioning; biogas generation and finally, sealing and closure according to official regulations.

This will allow to obtain an estimate of the amount of aggregate required, waterproofing, geotextile, fences, chimneys, dams, etc., And an analysis of the feasibility of use and overall budget and items.

Keywords: LABWASTE.12; Landfill; Model; Draft; Waste management

LABWASTE.12: HERRAMIENTA DE CÁLCULO PARA EL DISEÑO DE VERTEDEROS DE RESIDUOS SÓLIDOS CON VALORIZACIÓN DE RESIDUOS INERTES

Los modelos y softwares sobre vertederos se reducen al cálculo individual de algunas de las variables. Sin embargo, no existe ninguno que las reúna a todas. El presente documento muestra la elaboración de una herramienta de cálculo denominada LABWASTE.12 para diseñar todas las variables de los vertederos con valorización de residuos inertes. En esta herramienta se presenta un modelo a partir del programa excel® para realizar anteproyectos de vertederos, estableciendo la posibilidad de valorizar áridos reciclados. Para el desarrollo de la herramienta se han tenido en cuenta las siguientes variables: propiedades y composición de los residuos; caracterización y propiedades de los áridos reciclados/naturales; correlación estadística entre población y superficie de los vertederos; diseño preliminar del vaso; estabilidad de taludes y diques; canal perimetral de evacuación de pluviales; generación de lixiviados; diseño de de las balsas de pluviales y lixiviados y predimensionado; generación de biogás y por último, sellado y clausura según normativa vigente.

Todo ello, permitirá obtener un cálculo aproximado de la cantidad de áridos necesarios, impermeabilización, geotextil, cerramientos, chimeneas, diques, etc., así como un análisis de la viabilidad de uso y presupuesto general y por partidas.

Palabras clave: LABWASTE.12; Vertedero; Modelo; Anteproyecto; Gestión de residuos

Correspondencia: Dpto. Ingeniería Mecánica y Construcción. Avda. Vicent Sos Baynat, s/n. C.P.12071. Castellón, España.

1. Introducción

Los planes nacionales y autonómicos de residuos hacen una especial mención a los residuos de construcción y demolición (RCD). De hecho el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR, 2009) incluye un Plan Nacional de RCD (2008 – 2015) y a nivel estatal está vigente el Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los RCD. Toda esta normativa establece los requisitos mínimos de su producción y gestión, con objeto de promover su prevención, reutilización, reciclado y valorización. Por otro lado, el Plan Integral de Residuos de la Comunidad Valenciana (PIR, 2010) describe un déficit en las plantas de tratamiento de RCD, de manera que está previsto construir en el futuro plantas de este tipo que se sumarán a la 7 ya existentes.

Sin embargo, una gran parte de los áridos procedentes del reciclaje de los RCD no tienen salida comercial y son depositados en vertederos, sin ninguna utilidad alternativa. Además, durante estos últimos años, esta problemática se ha visto agravada por la situación económica que atraviesa España. El descenso de la construcción ha reducido más la salida de este producto al mercado. Una posible aplicación sería su utilización en la construcción de vertederos ya que la mayoría de los existentes a nivel nacional hacen uso de áridos en la mayor parte de su estructura que proceden de canteras, utilizando en muchos casos miles de toneladas que podrían ser sustituidas en cantidades equivalentes por áridos procedentes de RCD.

2. Justificación y objetivos

El objetivo de este estudio es determinar la viabilidad técnica y económica de la utilización de áridos reciclados procedentes de plantas de reciclaje de RCD en la construcción, explotación y clausura de vertederos. Para ello, se han analizado todas las acciones de las fases de construcción y explotación de un vertedero, y la relación y dependencia entre las variables. En lo que respecta a la viabilidad económica, es necesario indicar, que ésta depende de muchos factores, entre los que cabe destacar el coste de los áridos demandados y su transporte. Este estudio, plantea la creación de una herramienta informática que tenga en cuenta esta cantidad de factores.

Así pues, en la herramienta presentada, a la que se le ha denominado LABWASTE.12, se plantea la construcción, explotación y clausura de vertederos a nivel de anteproyecto, de manera que el usuario (empresa constructora, explotadora, administración pública, etc.) pueda conocer de manera aproximada las cantidades de materiales (áridos y otros) que serán necesarios para la explotación, así como poder hacer un estudio preliminar de los procesos y emisiones que se van a producir durante las fases del ciclo de vida de las instalaciones para el vertido de residuos. En un principio, la herramienta se ha limitado a España, pero con pequeñas modificaciones podría ampliarse para su aplicación en otras regiones.

3. Metodología y resultados obtenidos

El desarrollo de la herramienta de cálculo LABWASTE.12 ha sido realizado con el programa informático Excel®, y está estructurado en los 12 capítulos. Estos, a su vez, se subdividen en epígrafes que permiten definir la relación matemática existente entre distintas variables y unificar la información por temáticas. Mediante las relaciones matemáticas entre todos los datos, introducidas en las distintas hojas Excel® se van a obtener los resultados necesarios para presentar un prediseño de vertedero y presupuesto a nivel de anteproyecto. La herramienta proporciona datos por defecto o bien a elegir por el usuario. Así pues, se va a detallar la metodología seguida para estructurar cada uno de los capítulos.

3.1 Datos generales

En este capítulo se crea una base de datos generales que se utilizarán automáticamente según necesidades en los diferentes capítulos existentes. La finalidad principal del estudio es determinar si la utilización de áridos procedentes de RCD en vertederos es viable económicamente. Para ello, es muy importante conocer la ubicación del vertedero y de la planta de tratamiento de RCD, determinando así, mediante un análisis de los costes de transporte, si es viable económicamente la utilización de estos áridos con respecto al uso de aquellos que proceden de cantera. Por ello, habrá que proporcionar en este capítulo los siguientes datos generales (Tabla 1):

Tabla 1: Datos generales del vertedero que deben ser proporcionados en el capítulo 1

Dato solicitado	Opciones
Comunidad autónoma	Deberá elegirse la comunidad autónoma
Tipo de vertedero (por topografía del terreno)	Area, trinchera, vaguada
Tipo de vertedero (por tipo de residuo)	Inertes (RI), no peligrosos industriales (RNP), urbanos (RU), rechazos
Población que se abastece (habitantes)	Dato aportado por el usuario
Tasa de generación diaria	A partir de datos estadísticos se ofrece un dato por defecto para vertederos de RU, tanto a nivel nacional como autonómico, o bien puede el usuario elegir el valor.
Densidad de los residuos en vertedero	200 - 1.100 kg/m ³ . El usuario puede elegir otra densidad.
Perímetro del vertedero	Dato aportado por el usuario*
Área disponible para el vertedero	Dato aportado por el usuario*

*Para introducir estos datos la herramienta proporciona un vínculo con el identificador de parcelas agrícolas del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (<http://sigpac.mapa.es/fega/visor/>)

Adicionalmente, se solicitan también los siguientes datos:

- **Composición y humedad de los residuos:** a partir de datos estadísticos se ofrece un dato por defecto para vertederos de RU, tanto a nivel nacional como autonómico, o bien puede el usuario elegir el valor. Estos datos clasifican las fracciones (en %) de RU en biorresiduo, papel/cartón, plástico, vidrio, metales, varios, y proporciona también humedades promedio de todos ellos. Los datos de composición y de humedad promedio que se incluyen son los proporcionados por el PNIR (2009), por el PIR (2010) o los obtenidos a partir de los trabajos de Gallardo et al. (2010) y Gallardo et al. (2012). A partir de los datos anteriores, la herramienta proporciona los datos promedio de humedad en los residuos, los cuales servirán para calcular el volumen de lixiviados generado.
- **Datos climáticos:** el usuario debe introducir la información necesaria que la herramienta utiliza para dimensionar la balsa de recogida de aguas pluviales, el canal perimetral, la cuneta interna, la balsa de lixiviados, etc. (Tabla 2).

Tabla 2: Datos climáticos

Dato solicitado	Dato seleccionado	Unidades de medida
Periodo de recogida de datos	por el usuario	años

Media de las precipitaciones máximas anuales caídas en 24 h	por el usuario	L/m ²
Desviación típica de las precipitaciones máximas caídas en 24 h	por el usuario	--
Pluviometría media mensual (P)	por el usuario	L/m ²
Evapotranspiración real mensual (ETPr)	por el usuario	L/m ²
Temperatura media mensual	por el usuario	L/m ²
Variación de reserva = (P – ETPr)	LABWASTE.12	L/m ²

- Datos de la planta de clasificación de RCD: el usuario debe introducir la información necesaria de los tipos, características y costes de áridos que la planta de tratamiento de RCD seleccionada ofrece. Todo ello, permitirá estimar la viabilidad económica de la utilización de áridos procedentes de RCD con respecto a los de cantera. La herramienta solicita los siguientes datos (Tabla 3).

Tabla 3: Propiedades y caracterización de las plantas de clasificación de RCD

Dato solicitado	Opciones
Comunidad autónoma	Deberá elegirse la comunidad autónoma
Nombre de la Planta de valorización de RCD	por el usuario
Distancia aproximada de la planta de valorización de RCD al vertedero de residuos (km)	por el usuario
La planta de valorización de RCD dispone de la siguiente clase de áridos reciclados	Reciclado de hormigón, cerámico o mixto
Características de la arena procedente de RCD	granulometría (mm), densidad (t/m ³) y coste (€/t)
Características de la zahorra procedente de RCD	granulometría (mm), densidad (t/m ³) y coste (€/t)
Características de la grava procedente de RCD:	granulometría (mm), densidad (t/m ³) y coste (€/t)

- Datos de la planta de áridos de cantera: el usuario debe introducir información sobre los tipos, características y costes de áridos procedentes de cantera. Se analizan las mismas variables que en la Tabla 3.
- Datos generales de transporte: el usuario debe indicar el tipo de transporte utilizado para cubrir la distancia existente entre las plantas y el vertedero (Tabla 4).

Tabla 4: Características del transporte de áridos

Dato solicitado	Opciones a elegir
Tipo de vehículo utilizado para el transporte de áridos	por el usuario
Capacidad del vehículo seleccionado (m ³)	por el usuario
Coste estimado del transporte (€/km)	por el usuario

- Datos generales de los tipos de áridos utilizados: el usuario debe introducir información sobre los tipos de áridos y granulometrías a utilizar en todos los capítulos definidos (Tabla 5).

Tabla 5: Aplicación de áridos

Actividad	Tipo de árido requerido	Opciones
Construcción de la capa de drenaje del vaso	grava	
Construcción de la capa de drenaje del vaso	zahorras	
Construcción de las celdas/capa de cobertura	arena/zahorra	
Construcción del sistema de evacuación de pluviales	zahorra/grava	Procedencia del árido (planta de clasificación de RCD/cantera), granulometría (mm)
Construcción del sistema de evacuación de lixiviados	grava	
Construcción del drenaje de la balsa de lixiviados	grava	
Construcción del sistema de captación/evacuación de biogás	grava	
Capas de drenaje del sellado y clausura del vertedero	grava	

3.2 Vaso

Este capítulo alberga la información respectiva a las características del vaso de vertido y recoge algunos de los datos suministrados en el epígrafe anterior como el tipo vertedero en función de la topografía, perímetro estimado del vertedero, etc. y solicita otros datos con la finalidad de proporcionar datos para el diseño del vaso del vertedero.

- Datos generales del vaso: además de los datos aportados en el apartado anterior, el capítulo solicita otros datos (Tabla 6). La impermeabilización del vaso debería realizarse, y así está contemplado en la herramienta LABWASTE.12, siguiendo el esquema de la Figura 1.

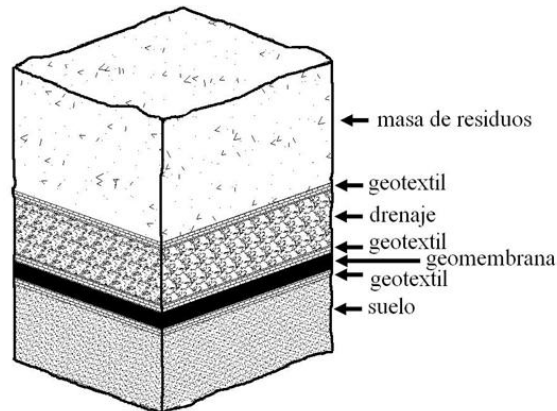
Tabla 6: Datos adicionales para poder hacer el prediseño del vaso del vertedero

Dato solicitado	Finalidad
Año previsto para el inicio del vertido de residuos en el vaso	Cálculo de la vida útil del vertedero y programación de actividades
Área estimada disponible para el vaso	Conocer de forma aproximada el área que deberá impermeabilizarse, así como la estructura de las celdas unitarias
Profundidad promedio estimada del vaso	Permite calcular la dimensión de los conductos de captación de biogás, así como la definición de la estructura de todas las celdas unitarias
Coeficiente de permeabilidad (k) de la barrera geológica natural	Necesidad o no de instalar capa impermeable artificial, geomembrana, geotextil y/o georred.
Profundidad equivalente de la barrera geológica natural	
Espesor de la capa de drenaje de recogida de lixiviados	Cálculo de la grava necesaria

A partir de la Tabla 6, la herramienta proporciona por una parte, el área estimada de impermeabilización, la capacidad estimada del vaso y la vida útil estimada del vaso. Por otra parte informa sobre la necesidad de instalar capa impermeable artificial, ya que en cualquier caso, debe cumplirse la normativa vigente (Real Decreto 1481/2001). La capa de drenaje (Figura 1), a diferencia de lo que ocurre con las correspondientes a geotextiles y geomembranas es obligatoria para todos los casos. La herramienta calcula de forma automática la cantidad de áridos necesaria para conformar esta capa, en volumen y peso,

según densidades. También relaciona precios y cantidades y aporta el coste económico de la construcción del vaso, utilizando un cuadro de precios o base de datos actualizada.

Figura 1: Orden recomendado por LABWASTE.12 de las distintas capas en el fondo del vaso.



3.3 Diques

Este capítulo alberga toda la información en referencia a las características de los diques de contención, tanto del vertedero como de las balsas de lixiviados y pluviales.

- **Datos generales del dique de fondo:** el usuario debe introducir la información necesaria que la herramienta utiliza para conocer las características generales del dique de fondo, es decir, el dique que soporta todo el volumen de residuos del vaso. Este grupo recoge datos introducidos en capítulos anteriores como tipo de vertedero, perímetro estimado del vaso, área estimada disponible para el vaso, etc. y solicita los siguientes (Tabla 7).

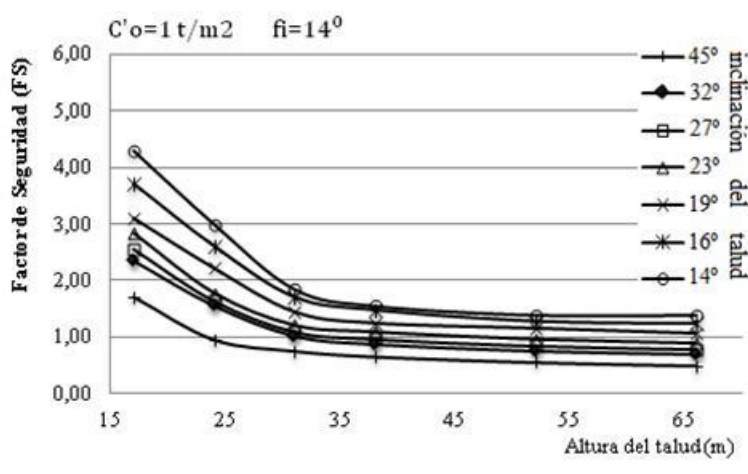
Tabla 7: Datos necesarios que LABWASTE.12 solicita para el diseño de los diques

Dato solicitado	Finalidad
Sección del dique	
Anchura de la coronación del dique	
Altura del dique	La herramienta aplica por defecto un trapecio escaleno. A partir de estos datos se calcula la geometría final del dique, la necesidad de áridos (zahorras compactadas) y el coste.
Inclinación del talud aguas arriba	
Inclinación del talud aguas abajo	
Longitud del frente de dique	

- **Datos generales del dique balsa de pluviales:** el usuario debe introducir la información necesaria para conocer las características generales del dique de la balsa de pluviales. Para este dique la herramienta solicita los mismos datos que en el anterior (Tabla 7) y además hay que indicar si es necesario o no este dique, en función de la topografía del terreno.
- **Datos generales del dique balsa de lixiviados:** el usuario debe introducir la información necesaria para conocer las características del dique de la balsa de lixiviados. Para ello, la herramienta solicita los mismos datos que en los anteriores (Tabla 7) y además hay que indicar si es necesario o no este dique, en función de la topografía del terreno.
- **Datos estabilidad de taludes:** el programa informático “Estabilidad de taludes” (creado por el profesor B. Rechea (1996) de la Universidad Politécnica de Valencia) permite calcular la estabilidad de los taludes por medio de su factor de seguridad (FS). No

obstante, para el diseño del nomograma representado en la Figura 2 se han aplicado las fórmulas y métodos de cálculo de la mecánica de suelos (Taylor, 1948; Janbu, 1967; Bishop & Morgenstern, 1960). La información resultante de fijar dos parámetros fundamentales para estar del lado de la seguridad permite que la herramienta de cálculo pueda obtener automáticamente el valor del FS, como puede observarse en los siguientes apartados. Estos datos han sido obtenidos de un resumen de las propiedades geotécnicas de los residuos recogido de Colomer et al (2009). En este caso se fija el valor de la cohesión efectiva del material (C'_{o}) que es de 1 t/m^2 y el ángulo de rozamiento efectivo (ϕ') en 14° , valores muy bajos pero favorables a la seguridad. Así pues, la herramienta solicita que el usuario indique la geometría de los taludes (altura e inclinación del talud). A partir de la introducción automática de estos datos en el nomograma de la Figura 2, la herramienta calcula el factor de seguridad (FS), el cual debe ser mayor de 1,4 para que el talud se considere seguro desde el punto de vista geotécnico (Bureau of Reclamation, 1980; Lambe et al., 1990; Terzagui et al., 1996).

Figura 2: Nomograma realizado a partir de las fórmulas de la mecánica de suelos y propiedades geotécnicas de los residuos.



A partir de los datos anteriores y los de capítulos previos, y si el usuario acepta el valor del FS proporcionado, la herramienta indica automáticamente las necesidades de áridos para cada uno de los diques y el coste de los mismos.

3.4 Celdas unitarias

Este capítulo alberga toda la información en referencia a las características de las celdas unitarias (EPA, 1993). Una celda incluye los propios residuos sólidos depositados y el material de cobertura (con 15 – 30 cm de espesor).

- Datos generales de las celdas unitarias: además de los datos aportados en capítulos anteriores, la herramienta solicita que el usuario indique los datos de la Tabla 8.

Tabla 8: Datos requeridos para el prediseño y presupuesto de las celdas unitarias

Dato solicitado	Datos suministrados por defecto
Altura media de las celdas	por el usuario
Espesor medio de la capa de cobertura	15 – 30 cm
Tipo de árido a utilizar y granulometría	zahorras/arena

Con los datos de la Tabla 8 y los indicados en anteriores capítulos, LABWASTE.12 suministra automáticamente los datos de área necesaria para depositar residuos,

necesidades en volumen/peso diarias, mensuales, anuales y totales de áridos necesarios para las coberturas y el coste de los mismos.

3.5 Pluviales

Este capítulo alberga todos los datos correspondientes a las estructuras de evacuación y captación de aguas pluviales en los vertederos (EPA, 1993; Vaquero, 2004).

- Datos generales canal perimetral recogida de pluviales: este canal recogería el agua de escorrentía aguas arriba del vertedero y su finalidad es impedir que esa corriente de agua penetre en el recinto del vertedero. El primer paso supone indicar si es necesario este canal, lo cual depende fundamentalmente del tipo de vertedero en función de su topografía. En caso de que sea necesario la herramienta recoge datos de los capítulos anteriores como las precipitaciones máximas y solicita al usuario los datos indicados en la Tabla 9.

Tabla 9: Datos necesarios para dimensionar el canal de evacuación de pluviales

Dato solicitado	Datos suministrados por defecto
Periodo de retorno estimado	50, 100, 500 años
Área de captación de la cuenca	por el usuario
Geometría del canal perimetral	trapezoidal
Inclinación de las paredes laterales con respecto a la vertical	30° ó por el usuario
Naturaleza del material de las paredes utilizado	hormigón
Coefficiente de rugosidad de Manning	0,013 – 0,017
Pendiente máxima de la línea de agua	0,5 – 2%
Longitud del canal	por el usuario (m)
Espesor de las paredes del canal	0,1 – 0,3 m ó por el usuario

Mediante la aplicación del método de Gumbel introducido en la herramienta, LABWASTE.12 suministra información sobre el caudal máximo que podría tener el canal en el periodo de retorno indicado. Con este dato y con los de la Tabla 9 y a partir de la ecuación de Manning se ofrecen las medidas del canal y la necesidad de hormigón necesaria. Sabiendo que la proporción máxima recomendada de áridos reciclados en hormigón estructural es del 25%, se propone también la cantidad de áridos reciclados que podrían aplicarse en la construcción del canal.

- Datos generales cuneta interna recogida de pluviales: canal construido para recoger el agua de escorrentía originada dentro del recinto del vertedero y reconducir este caudal hasta una balsa de recogida. Para el cálculo y diseño de esta cuneta se procede del mismo modo que para el canal anterior, pero en este caso, la superficie de captación de pluviales es la parcela donde está ubicado el vertedero, por lo que esta cuneta, como norma general, tendrá menores dimensiones que el canal.
- Datos generales balsa de pluviales: para dimensionar esta balsa es necesario conocer previamente qué volumen que debe ser almacenado. Como este valor ya ha sido obtenido, la herramienta lo introduce en este apartado, siempre teniendo en cuenta que el resultado final vendrá definido atendiendo el número de balsas seleccionado por el usuario. La herramienta solicita los datos de la Tabla 10.

Tabla 10: Datos necesarios para dimensionar la balsa de pluviales

Dato solicitado	Datos suministrados por defecto
Número de balsas de pluviales que se prevé construir	1, 2 ó por el usuario
Volumen de agua máximo estimado (m ³)	por el usuario
Geometría de la balsa	Cuadrada/rectangular/redonda
Profundidad de la balsa estimada	1 – 5 m ó por el usuario
Inclinación talud aguas arriba	45° ó por el usuario

A partir de los datos anteriores y mediante cálculos trigonométricos y matemáticos la herramienta proporciona la geometría de los taludes, la capacidad y la superficie de geomembrana, geotextil y georred necesaria para la impermeabilización de la balsa, así como el requerimiento de áridos para su construcción (zahorras para los diques) y el coste.

3.6 Lixiviados

Este capítulo alberga todos los datos correspondientes a las estructuras de evacuación y captación de lixiviados en los vertederos.

- Datos generales de recogida de lixiviados: recoge algunos datos proporcionados en capítulos anteriores (compactación de los residuos, evapotranspiración, humedad de los residuos, pluviometría, etc.) y solicita que el usuario indique si es necesaria o no una balsa de lixiviados, la geometría de la balsa y el periodo entre la descarga de los lixiviados de la balsa. A partir de esos datos, la herramienta aplica el método suizo (Jaramillo, 2009) y muestra información sobre el caudal de lixiviados generado en el vertedero (L/día).
- Datos sistema evacuación de lixiviados: la herramienta incluye este grupo para conocer las características de las tuberías y los áridos necesarios para la construcción del sistema de evacuación de lixiviados. La información necesaria se indica en la Tabla 11. Este cálculo se ha realizado a partir de los trabajos realizados por Carey et al. (2000) y Guyer (2009).

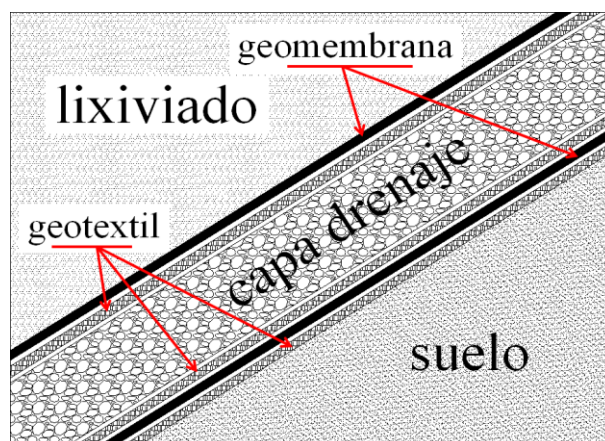
Tabla 11: Datos a aportar para el diseño y cálculo del sistema de evacuación de lixiviados

Dato solicitado	Datos suministrados por defecto
Distancia entre tuberías	10 – 100 m
Diámetro promedio de las tuberías de evacuación de lixiviados (mm)	200 ó por el usuario
Profundidad del canal de evacuación de lixiviados (m)	0,5 ó por el usuario
Anchura del canal de evacuación de lixiviados (m)	1 ó por el usuario

Con los datos anteriores LABWASTE.12 suministra la sección del canal, los metros de tubería, la cantidad de áridos necesaria y el coste.

- Datos generales balsa de lixiviados: se opera de modo similar a la balsa de pluviales, con la diferencia de que esta balsa debe tener instalado un sistema de drenaje para detección de fugas (Figura 3). La herramienta suministra las dimensiones y capacidad de la balsa, las necesidades de áridos y láminas y el coste.

Figura 3: Capas necesarias para el vaso de la balsa de lixiviados



3.7. Biogás

Este capítulo alberga todos los datos correspondientes a las estructuras de captación de biogás en los vertederos.

- Datos generales pozos de captación de biogás: se utilizan datos de los capítulos anteriores y se solicita la información que se detalla en la Tabla 12.

Tabla 12: Datos necesarios para diseñar el sistema de captación y evacuación de biogás

Dato solicitado	Datos suministrados por defecto
Diámetro conducto externo de captación (m)	0,80 ó por el usuario
Diámetro conducto interno de captación (m)	0,25 ó por el usuario
Radio de acción de los pozos (m)	20, 25, 30 ó por el usuario

Con estos datos la herramienta informa sobre el número de pozos y los requerimientos de tubería de extracción y áridos, así como el coste.

- Datos generales conductos de captación de biogás: conocido el valor correspondiente al área estimada disponible para el vaso, la herramienta muestra automáticamente el valor de la relación establecida de metros lineales de tubería por metro cuadrado de superficie de vaso. Esta información ha sido obtenida a partir de varios proyectos sobre vertederos reales y se ha establecido una correlación estadísticamente significativa entre las dimensiones del vertedero y la relación (longitud de tuberías/superficie de vertedero), lo cual permite a la herramienta calcular en el grupo correspondiente la cantidad de metros lineales de tuberías necesarios. Introduciendo el diámetro promedio de las tuberías LABWASTE.12 informa los metros totales necesarios y su coste.
- Datos estimación captación de biogás: con este grupo se proporciona una estimación de la generación y posible captación de biogás del vaso. Para determinar la producción de biogás del vertedero diseñado es preciso analizar una serie de aspectos previos que permitan concluir mediante un análisis preliminar la rentabilidad de su valorización. Por ello, se atiende lo establecido por “Hanbook Landfill Gas to Energy Project” de la EPA (LMOP, 2010), que fija unos valores mínimos a partir de los cuales se considera rentable la valorización del biogás en vertederos. Entre otros, en trabajos realizados por miembros del grupo INGRES se tomaron el Modelo de primer orden (Oonk et al., 1994; EPA, 2005; Faour et al., 2007), el Modelo Afvalzorg multi-fase, el Modelo EPER francés (Scharf y Jacobs, 2006), el Modelo SWANA Zero Order, SWANA Simple First Order Model (Van Zanten y Scheepers, 1995), el LandGEM US EPA, el Modelo Mexicano del

Biogás y el Scholl Canyon (Scharf y Jacobs, 2006). La estimación de la producción de biogás se realiza en base a lo establecido por el modelo de Swana Orden Cero (Solid Waste Association of North America) por corresponderse con aquél que se asemeja en mayor grado a las captaciones de biogás en vertederos conocidos. Esta elección se ha tomado por ser este modelo el que más se ajusta a un caso real conocido y por su fácil aplicación. La herramienta muestra automáticamente en este apartado el valor fijado según este modelo para determinar la potencia de generación de metano. El usuario debe indicar el año previsto para inicio de la estimación de producción biogás y a partir de la relación matemática con variables introducidas anteriormente se proporciona la gráfica de generación de biogás y la viabilidad de valorizar o no este biogás.

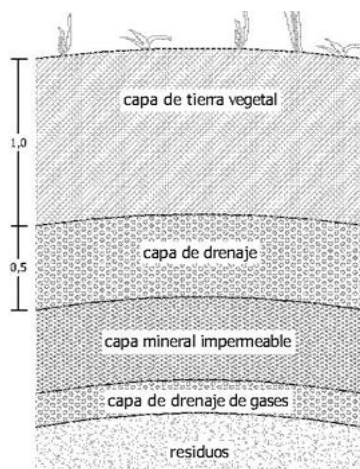
3.8 Cerramiento

Si se realiza un análisis de la legislación sobre vertederos en distintos países se puede observar que en todas ellas existe una obligatoriedad de instalar un vallado perimetral (Colomer et al., 2005). Este capítulo alberga todos los datos referentes a los cerramientos necesarios en el vertedero y las balsas. El usuario debe informar si el perímetro indicado para el vertedero es el que debe vallarse, de igual modo con los perímetros de las balsas. También deberá elegir el tipo de vallado, teniendo en cuenta que la legislación obliga a una altura mínima de 1,80 m. La herramienta proporciona los metros de vallado, el coste por unidad (vertedero, balsas de pluviales, balsas de lixiviados) y el coste total.

3.9 Clausura, sellado e integración

La finalidad principal de la clausura es construir una separación física entre los residuos y la atmósfera, de manera que los impactos ambientales de estos estén controlados. Esto incluye la cobertura final del vaso con o sin impermeabilización. La impermeabilización de la capa final evitará emisiones difusas de biogás (Tchobanoglous et al., 1994; Directiva 31/1999; Hontoria y Zamorano, 2000; Márquez et al., 2011). Adicionalmente a la clausura la normativa hace hincapié en la integración visual y medioambiental, es decir, integrar la zona del vaso con el paisaje que lo rodea, y con el entorno. Para ello, es necesario proyectar los usos post-clausura que se le van a dar al vertedero. Si la parcela estaba emplazada en una zona forestal se deberá considerar el tipo de vegetación autóctona, que depende de la ubicación geográfica. Para determinados tipos de vertederos la UE obliga a clausurar según lo mostrado en la Figura 4.

Figura 4: Representación gráfica de la clausura, sellado y reinserción de un vertedero de residuos no peligrosos según la normativa de la Unión Europea



La herramienta solicita al usuario los espesores de las distintas capas (Tabla 13)

Tabla 13: Datos solicitados por la herramienta para el diseño de la cobertura

Dato solicitado	Datos suministrados por defecto
Área estimada disponible para la cobertura(m ²)	por el usuario
Espesor de la capa de drenaje de gases (m)	0,30 ó por el usuario
Espesor de la capa de drenaje de pluviales (m)	0,30 ó por el usuario
Espesor de la capa de tierra vegetal	0,70 ó por el usuario
La tierra extraída del vaso es utilizada para la creación de la capa de tierra vegetal	si/no
Tipo de áridos utilizados (granulometría)	arena/zahorra/grava
Geomembrana/geotextil	si/no

A partir de los datos anteriores la herramienta proporciona información sobre las cantidades de materiales necesarias para la cobertura y su coste.

4. Conclusiones

A partir de todos los datos introducidos y mediante las relaciones matemáticas entre ellos, LABWASTE.12 suministra al usuario:

- Informe final con todos los datos introducidos y los calculados: en él se resumen los datos de todos los capítulos y las soluciones de cada uno de ellos
- Presupuesto por capítulos y total a partir de varios cuadros de precios. La herramienta da la opción de indicar cualquier otro precio.
- Análisis de viabilidad económica para que el usuario pueda decidir si resulta más rentable el uso de áridos reciclados o áridos de cantera, para cada uno de los capítulos y actividades.

5. Referencias

- Bishop, A.W. & Morgenstern, N., (1960). Stability Coefficients for Earth Slopes, *Geotechnique*, Institution of Civil Engineers, London, 10. 129-150.
- Bureau of Reclamation. (1980). *Manual de Tierras*. Ed. Bellisco. Madrid.
- Carey, P.; Carty, G.; Donlon, B.; Howley, D.; & Nealon, T. (2000). *Landfills Manual, Landfills site design*. Environmental Protection Agency. Wexford, Ireland.
- Colomer, F.J.; Ferrer, A. & Gallardo Izquierdo, A., (2005). "Legislación sobre vertederos en algunos países del mundo. Análisis comparativo". *II Congreso Ibérico sobre Vertederos*, Málaga.
- Colomer, F.J.; Ferrer, A.; Gallardo, A. & Bovea, M.D. (2009). Safety factor nomograms for homogeneous earth dams less than ten meters high. *Engineering Geology*, 105, 231-238.
- EPA, U.S. Environmental Protection Agency. (1993). *Solid Waste Disposal Facility Criteria. Technical Manual*. www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/landfill/techman/intro.pdf

- EPA. U.S. Environmental Protection Agency. (2005) *First-order kinetic gas generation model parameters for wet landfills*.
<http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P100ADRJ.PDF>
- Faour, A.A.; Reinhart, D.R. & You, H. (2007). First-order kinetic gas generation model parameters for wet landfills. *Waste Management*, 27, 946-953
- Gallardo, A., Bovea, MD., Prades, M., Colomer, FJ, & Carlos M. (2010) Comparison of different collection systems for sorted household waste in Spain. *Waste Management*, 30, 2430-2439.
- Gallardo, A., Bovea, MD., Prades, M. & Colomer, FJ (2012) Analysis of collection systems for sorted household waste in Spain. *Waste Management*, 32, 2383-2395.
- Guyer, J.P. (2009). *Introduction to Sanitary Landfills*. Ed. Continuing Education and development, Inc. 9 Greyridge Farm Court Stony Point, NY 10980.
- Hontoria, E. & Zamorano, M. 2000. *Fundamento del manejo de los residuos urbanos*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Granada.
- Janbu, N (1967). Discussion of paper Dimensionless Parameters for Homogeneous Earth Slopes by Bell, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 93, 367-374.
- Jaramillo, J. (2002). *Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales*. OPS/CEPIS/PUB/02.93. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. <http://www.cepis.ops-oms.org>
- Lambe, T.W. & Whitman, R.V. (1990). *Mecánica de suelos* (Nueva edición). Ed. Limusa. Mexico.
- LMOP, Landfill Methane Outreach Program (E.P.A.). (2010). *LFG Energy Project Development Handbook*.
- Márquez, L. Ed. et al. (2011). *Residuos sólidos: un enfoque multidisciplinario*. Ed. Libros en Red. México DF.
- Oonk, J.; Weenk, A.; Coops, O.; & Luning, L., (1994). *Validation of Landfill Gas Formation Models* Inst. of Environment and Energy Technology., Report No. 94-315.
- Rechea, M. (1996). Programa de Estabilidad de Taludes. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España. nº 1996DIC/ESP.
- Scharf, H. & Jacobs, J. (2006). Applying guidance for methane emission estimation for landfills. *Waste Management*, 26, 417-429.
- Taylor, D.W. 1948. *Fundamentals of soils mechanics*. Ed. Wiley, New York.
- Terzaghi, K., Peck, R.B. & Mestri, G. 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, INC. New York. vol. 3ª.
- Tchobanoglous, G., Theysen, H. & Vigil, S. (1994). *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. Ed. McGraw-Hill/Interamericana de España. Madrid.
- Van Zanten, B. & Scheepers, M.J.J. (1995) Modelling of landfill gas potentials. *Proceedings of SWANA 18th Annual Landfill Gas Symposium*, New Orleans, L.A.
- Vaquero, I. (2004). *Manual de Diseño y Construcción de Vertederos de Residuos Sólidos Urbanos*. U.D.Proyectos, E.T.S.I.Minas - UPM. Madrid. pp. 360.