



**La Producción de Biogás en Vertedero. Modelización  
y Determinación Analítica de los Parámetros  
Operativos de Funcionamiento mediante diferentes  
tipologías de Algoritmos**

**Autor:** Juan José Graña Magariños

**Institución:** Universidad Alfonso X El Sabio

## Resumen

El biogás producido en un vertedero controlado puede ser estimado a través de un modelo matemático a partir de los datos de composición de los RSUs, de las cantidades vertidas anualmente en él y de otras variables de entrada. Los resultados obtenidos se deben contrastar con los valores reales para determinar el grado de exactitud del modelo creado.

En el modelo planteado en este artículo se determina en primer lugar el Volumen Teórico de Biogás que produce la degradación anaerobia, a partir de una composición conocida de RSUs. A continuación se propone un modelo de cálculo para el Caudal Recuperado Anualmente de Biogás en un vertedero, desde su inauguración hasta su clausura. Para ello es necesario conocer la composición de los Residuos Sólidos Urbanos vertidos anualmente, así como su cantidad.

Los datos arrojados por el modelo planteado se compararán con los aportados por las empresas gestoras, con el fin de comprobar el grado de exactitud que tiene esta modelización. A partir del modelo matemático generado se ha construido un programa informático, GENBIVER, que permite realizar los cálculos de producción de manera simple e intuitiva.

Por último, se han construido dos tipologías de algoritmos, uno de tipo Exhaustivo y otro Heurístico. Estos algoritmos parten de la Producción Anual de Biogás del vertedero y de la determinación de los posibles rangos de funcionamiento de los parámetros operativos de la instalación por parte del usuario. A partir de dichos rangos en las variables de entrada, estos algoritmos determinan la mejor solución operativa de la instalación. Mediante su empleo se consigue una gran flexibilidad, debido a que a partir de unas variables de entrada es posible determinar de manera analítica los parámetros operativos de funcionamiento a emplear en el modelo de producción. Esto evita la necesidad de invertir tiempo y dinero en realizar análisis experimentales para determinar los valores operativos de estos parámetros.

Una vez construido tanto el modelo de producción como los algoritmos se implementan en un software informático, GENBIVER, probándose en varias instalaciones españolas y determinándose la fiabilidad del modelo a través del correspondiente estudio de residuos.

**Palabras clave:** vertedero, modelo, producción, biogás, RSU, residuo, degradación anaerobia, GENBIVER.

## 1.- Introducción

En este artículo se va a explicar brevemente el proceso seguido para la construcción de un modelo propio de producción de biogás para vertederos de RSUs. Para ello es necesario estimar las variables principales de las que depende la producción de biogás. Esto se explica de manera simplificada en el punto siguiente.

Para realizar esto se establecen las bases de partida para la construcción del modelo matemático, implementado estas variables principales en un programa informático que determine la cantidad de biogás que produce la degradación anaerobia, a partir de una determinada composición de residuos conocida, en un Vertedero de RSUs.

Una vez definidas las variables principales de las que depende la producción de biogás, para generar el modelo matemático se determina en primer lugar el Volumen Teórico de Biogás que produce la degradación anaerobia. A continuación se propone un proceso de cálculo para el Caudal Recuperado Anualmente de Biogás en un vertedero, desde su inauguración hasta su clausura.

Posteriormente se aplica dicho modelo obtenido a un vertedero real para obtener el Caudal Recuperado Anualmente de Biogás, desde su inauguración hasta su clausura, suponiendo conocidos tanto la composición de los Residuos Sólidos Urbanos depositados anualmente en él así como su cantidad.

El programa creado recibe el nombre de GENBIVER y pertenece a un software llamado TOTAL\_BIOGAS, que además dimensiona y evalúa las rentabilidades de este gas en Aplicaciones No Convencionales (Pilas de Combustible MCFC y SOFC, como Combustible para Vehículos o en Inyección a Red). La pantalla de inicio del programa se puede ver a continuación:



Figura I: Pantalla de Inicio del programa informático TOTAL\_BIOGAS (incluye GENBIVER).  
Fuente: elaboración propia.

En este artículo únicamente se va a tratar el primer módulo, es decir, GENBIVER. Éste modeliza la generación de biogás en un vertedero controlado de RSUs, calculando el

volumen de biogás generado a partir de diferentes variables que se comentan en apartados posteriores. Este software está dividido en tres pantallas de introducción de datos, y una cuarta en la cual se muestran los resultados obtenidos como consecuencia de la aplicación del modelo matemático. Las pantallas de introducción de datos al programa se describen con mayor detalle en los apartados siguientes.

## **2.- Factores que influyen en la generación de biogás en Vertederos de RSUs**

Los principales factores que influyen en la generación de biogás en un vertedero son: la cantidad y composición de los RSUs vertidos en la instalación, las variables ambientales de la instalación (fundamentalmente su temperatura media y nivel medio de precipitaciones donde ésta se ubica), la tipología y características de la instalación, los tratamientos a los que se somete a los RSUs en la instalación, los sistemas de captación empleados y otros factores.

### *2.1.- Cantidad de residuos vertidos y tipología*

Una de las variables más importantes en la formación de biogás es la cantidad de residuos vertidos en la instalación. Esto es debido a que el volumen de biogás producido depende directamente de la cantidad de materia orgánica presente en vertedero. Cuanta mayor cantidad de residuos vertidos en vertedero mayor cantidad de materia orgánica presente en él. Debido a esto, para realizar una correcta modelización de una instalación resulta indispensable conocer las cantidades (en toneladas, por ejemplo) de los residuos vertidos en vertedero desde su apertura hasta su cierre y separados por tipologías.

Se han considerado cuatro tipologías de residuos, éstas son: Urbanos y Asimilables a Urbanos, Rechazo de Compostaje, Lodos de E.D.A.R.s y Otros [No Inertes]. Todas estas categorías se cuantifican en toneladas. Dentro de los residuos Urbanos y Asimilables a Urbanos es necesario conocer la composición media de los residuos para así poder separar la Fracción de Rápida Degradabilidad de la Fracción de Lenta Degradabilidad. Para ello, es necesario conocer el porcentaje de los diferentes constituyentes de los residuos, es decir, materia orgánica, papel y cartón, plástico, textil, metal, vidrio y otros.

Si no se conociesen las cantidades vertidas es necesario realizar una hipótesis de vertido. Para ello se analizará la demografía de la zona de la cual depende el vertedero, teniendo en cuenta la variación estacional de la población. En el caso de tener que realizar hipótesis de vertido se tendrá en cuenta que la cantidad de residuos generados por habitante en la Unión Europea oscila entre 0,7 kg a 1,8 kg [Gendebien et al., 1992]. En países subdesarrollados que tienen una baja renta per cápita lo normal es emplear valores inferiores a 0,7 kg, siendo común tomar valores comprendidos entre 0,5 kg y 0,6 kg como valor medio de producción de residuos por habitante y día.

La tipología de los residuos vertidos en vertedero tiene una influencia capital debido a que la producción de biogás depende directamente de la materia orgánica contenida en los residuos. Para modelizar adecuadamente el comportamiento del vertedero como reactor anaeróbico es necesario realizar una simplificación en la tipología de los residuos. Así, toda materia orgánica se englobará en la Fracción de Rápida Degradabilidad o bien en la Fracción de Lenta Degradabilidad. A modo de ejemplo, los restos de comida, los residuos generados en las podas de jardines, los lodos de E.D.A.R.s y en general todos aquellos residuos orgánicos con un alto contenido en humedad se englobarán en la Fracción de Rápida Degradabilidad. Por el contrario, aquellos residuos orgánicos con un

contenido de humedad bajo se englobarán en la Fracción de Lenta Degradabilidad. En esta fracción tenemos por ejemplo los restos de papel, cartón, madera y aquellos otros residuos orgánicos con un contenido de humedad bajo. Los residuos englobados en esta categoría tienen un ritmo de producción de metano mucho más lento que los residuos de rápida degradabilidad.

Los restos no orgánicos, como pueden ser los residuos textiles, vidrios, plásticos, metales, etc. carecen de interés de cara a este estudio con lo que no serán tenidos en cuenta en el modelo planteado posteriormente. Para eliminar estas tipologías de residuos de los demás vertidos en vertedero será necesario conocer la composición de los RSUs que entran en la instalación. Si no se conoce con exactitud esta composición es necesario recurrir a la información publicada acerca de la composición típica de los residuos en la UE que entra a vertedero y seguir con esa estimación o realizar otra más precisa a partir de ésta.

En la Tabla siguiente se puede ver la composición media de los RSUs en Europa y Estados Unidos:

**Tabla I: Composición Media de los Residuos Sólidos Urbanos (RSUs) en la UE y EEUU.**

*Fuente: elaborada a partir de la referencia [Gendebien et. al., 1992].*

	Alimentación	Agrícola	Papel y Cartón	Madera	Textil	Plástico	Cristal	Metal	Otro
UE (%)	20-50	12-18	20-24	1-8	1-6	3-8	4-12	3-13	1-20
EEUU (%)	8-9	18-20	36-41	8-9	8-9	6-7	8-10	9-10	1-2

## 2.2.- Variables ambientales: temperatura y precipitación medias de la instalación

Las variables ambientales, fundamentalmente la temperatura media y el índice medio de precipitaciones de la zona donde se ubica el vertedero tienen también importancia capital en la producción de biogás en un vertedero, debido a que influye en la degradación anaerobia de los residuos.

Como se puede constatar en la numerosa bibliografía que hay sobre esta temática, el mayor contenido de humedad en los residuos afecta positivamente en la generación de biogás. Además, los vertederos ubicados en zonas húmedas producen un mayor volumen de biogás durante su periodo operativo que los ubicados en zonas secas. Pero hay que tener en cuenta que los vertederos ubicados en zonas húmedas dejan de producir biogás antes que los vertederos situados en zonas secas, donde la producción de este gas se sostiene más en el tiempo.

Como es sabido, la degradación anaerobia de la materia orgánica se ve favorecida por la presencia de agua [Attal et al., 1992; Sufilita et al., 1992]. Un elevado contenido de agua en los residuos depositados en vertedero favorece la producción de biogás debido a la aceleración que provoca en la velocidad de degradación de los residuos [Marticorena et al., 1993; Pohland y Al-Yousfi, 1995]. Para que la producción de metano se pueda realizar en condiciones adecuadas es necesario un contenido de agua en los residuos que oscila entre 40% a 60% [Pacey y DeGier, 1986; Rao y Sufilita, 1993; Brown y Maunder, 1994].

La cantidad de agua presente en los residuos depositados en vertedero es variable, dependiendo fundamentalmente de la tipología de los residuos de que se trate, de la época del año en que se realice la recogida y del sistema de gestión empleado. Los RSUs depositados en vertedero con un mayor contenido en humedad son los lodos de

E.D.A.R.s, los restos de comida y los restos de podas, por este orden [Pacey y DeGier, 1986]. Según la bibliografía consultada, el contenido de agua presente en los residuos oscila entre un 25% y un 60% del peso del residuo [Gendebien et al., 1992]. Así pues, un contenido de humedad situado en un 38% puede considerarse adecuado para el modelo.

Para mantener la eficiencia del vertedero en la producción de biogás y garantizar un adecuado nivel de humedad en los residuos se recomienda recircular los lixiviados producidos en el vertedero. Esto es importante fundamentalmente en vertederos ubicados en zonas secas, así como en periodos de verano donde la disminución de la humedad puede ser importante. La recirculación de estos lixiviados es muy beneficiosa para la producción de biogás debido a que los microorganismos responsables de la producción de este gas necesitan de un nivel adecuado de humedad para su desarrollo.

Además, la recirculación de lixiviados constituye el principal medio de transporte de los microorganismos responsables de la generación de biogás hacia nuevas zonas del vertedero. Esta recirculación debe ser realizada teniendo en cuenta el grado de humectación de las distintas zonas del vertedero con el fin de evitar inundaciones puntuales que provoquen disminuciones locales en la producción de biogás. Hay que tener en cuenta además, que estos lixiviados exigen la presencia de plantas de tratamiento en el propio vertedero dado que no es suficiente únicamente con la recirculación de los mismos.

La temperatura media de la zona donde se ubica el vertedero también es una variable importante en la generación de biogás. Su importancia radica en que ésta tiene que estar dentro de los rangos aptos para las bacterias mesófilas y termófilas que actúan en el proceso. Hay que tener en cuenta que la temperatura de los residuos en el vertedero se debe encontrar entre los 10°C y los 60°C, por fuera de este rango las bacterias que influyen en el proceso de generación de metano en el vertedero se encuentran fuera de su óptimo y su producción decae rápidamente. En concreto, para un adecuado desarrollo de las bacterias mesófilas la temperatura debe estar comprendida entre 20°C y 45°C mientras que para las bacterias termófilas la temperatura debe estar comprendida entre 45°C y 75°C [Pacey y DeGier, 1986]. Las temperaturas habituales en el interior de un vertedero están comprendidas normalmente entre 20°C a 50°C [Stegmann y Spendlin, 1986; Sufliita et al., 1992; Rao y Sufliita, 1993].

### *2.3.- Tipología y características de la instalación*

En cuanto a la generación de biogás, la relación entre la superficie ocupada por el vertedero y su volumen es una variable importante. Sí esta relación es baja se favorece la generación de biogás debido a que se mejora el aislamiento térmico de los residuos del ambiente exterior, y además se facilitan las labores de captación del biogás. Se tienen relaciones bajas entre superficie y volumen en instalaciones que se construyen en valles o depresiones naturales del terreno.

En el caso opuesto se tienen aquellos vertederos donde la relación entre la superficie ocupada y su volumen es alta. En este caso, los residuos depositados en vertedero ya no están tan bien aislados del ambiente exterior estando estos más expuestos a las condiciones climáticas. La captación de biogás también se complica exigiendo un mayor coste para el sistema de extracción. Este caso se da en vertederos construidos en zonas llanas del terreno donde los residuos depositados se encuentran a cotas superiores de la cota del terreno natural.



Hay que tener en cuenta cuando se planifica un vertedero que las condiciones climáticas afectan hasta una profundidad de residuo que ronda los 10 metros, siendo esta zona afectada por la temperatura ambiente. Cuando ésta es lo suficientemente baja puede hacer que la temperatura del residuo descienda por debajo del rango mesófilo [Pacey y DeGier, 1986].

Normalmente en los vertederos de la primera tipología, los residuos depositados en los primeros 10 metros se encuentran en el rango mesófilo, mientras que a partir de esa profundidad se encuentra en rango termófilo [Attal et al., 1992].

#### *2.4.- Tratamientos de los RSUs en la instalación*

Dentro de esta categoría se incluyen aquellas técnicas que se aplican a los residuos en la instalación. En primer lugar, al llegar los residuos al vertedero lo primero que afecta a la producción de biogás es la disposición de los RSUs en el vertedero. Actualmente, dependiendo de la orografía de la instalación, en los vertederos controlados se pueden encontrar fundamentalmente tres técnicas de vertido: la trinchera, el relleno por área y el relleno por celda.

En la primera de ellas, los residuos se vierten en zanjas abiertas previamente y el material extraído se empleará como relleno. Esta técnica se suele emplear en vertederos asentados en terrenos llanos. En el relleno por área, los RSUs se disponen en capas sobre el terreno natural. Esta técnica se suele emplear en vertederos con relaciones bajas entre superficie y volumen, es decir, en instalaciones que se construyen en valles o depresiones naturales del terreno. Por último, el caso de relleno por celda es similar al anterior pero los RSUs se encuentran delimitados lateralmente por diques de tierra. Esta técnica es válida para ambas tipologías de vertederos explicadas anteriormente.

Hay que tener en cuenta que la altura recomendable de los RSUs depositados en vertedero no debe superar los 3 metros, con el fin de evitar los asentamientos diferenciales que se podrían producir posteriormente en la instalación. Además estos asentamientos diferenciales podrían dañar los sistemas de extracción de Biogás [Gendebien et al., 1992].

La compactación de los residuos es otra variable que afecta a la producción de biogás en vertedero. A mayor compactación mayor producción de biogás. Esta relación se mantiene hasta que se llega a un valor de compactación, en el que la reducción de humedad en el residuo que provoca ésta, causa una reducción en la producción de biogás. Los RSUs tienen una densidad media sin compactar que ronda los 130-190 kg/m<sup>3</sup>. En la recogida, los camiones compactadores aumentan esta densidad hasta los 220-380 kg/m<sup>3</sup> y en el vertedero, los residuos sin apenas compactación alcanzan densidades comprendidas entre los 320-460 kg/m<sup>3</sup>. Los valores adecuados de compactación en un vertedero deberían estar comprendidos entre los 320-650 kg/m<sup>3</sup>. Para ello es necesario emplear diferentes tipos de maquinaria de compactación que a través de su peso y de diferentes pasadas logran aumentar la densidad del residuo. Por último, para lograr una adecuada compactación es necesario además tener en cuenta que los residuos deben ser vertidos en capas de menos de 50 cm de grosor, garantizando de este modo que con repetidas pasadas de la maquinaria (entre 2 y 5) se alcancen los valores de densidad buscados.

La trituración de los residuos también es otra variable importante en la producción de biogás. Ésta se consigue mediante el empleo de maquinaria equipada con cadenas o ruedas con elementos metálicos. Se recomienda que la maquinaria actúe en pendiente

para facilitar el desgarro y troceo de los residuos con los elementos metálicos de que dispone para tal fin. Una mayor trituración de los residuos aumenta la producción de biogás en vertedero debido a que se incrementa la superficie de los mismos sometida a la actividad bacteriana [Pacey y DeGier, 1986; Rao y Suflita, 1993]. Esta trituración debe garantizar la rotura de las bolsas de plástico donde se recogen la mayoría de los residuos domiciliarios, garantizando de este modo una producción de biogás adecuada.

### *2.5.- Sistemas de captación de biogás*

Los sistemas de captación de biogás son muy importantes en la producción de este gas. Para explicar su influencia hay que distinguir entre la cantidad de biogás generado real en la instalación y el caudal realmente recuperado por el sistema de extracción. Esta Tasa de Recuperación depende fundamentalmente de la eficiencia del sistema de extracción de biogás instalado en el vertedero y del nivel de impermeabilización que tiene el material de cobertura y sellado de la instalación.

El sistema de extracción de biogás debe garantizar la no entrada de aire por las sondas de captación. El aire actúa negativamente en la producción de biogás ya que altera las condiciones anaerobias de la zona. Esto repercute no sólo en una menor producción de biogás sino también en una reducción de la concentración de metano que éste contiene.

En cuanto a la cobertura hay que distinguir dos tipos: el recubrimiento diario y el sellado definitivo. Respecto al primero, su función principal es evitar el contacto de los residuos con el aire, impedir el vuelo de los residuos y permitir el movimiento de los vehículos por su superficie. Además, reduce el riesgo de incendios y la entrada del agua de lluvia al cuerpo de vertido. Para la obtención de biogás es necesario el recubrimiento diario de los residuos y éste deberá tener el grosor necesario para evitar que los residuos se vean influenciados por el ambiente exterior. También debe evitar la penetración del aire hacia el interior de la masa de residuos permitiendo así que estos estén en condiciones anaerobias.

La cobertura definitiva tiene gran importancia en la producción de biogás en el vertedero debido a que ésta tiene que garantizar un adecuado nivel de impermeabilización, tanto para evitar que el biogás pueda escapar al exterior como para evitar la filtración excesiva de agua hacia el interior del vertedero.

### *2.6.- Otros factores que influyen en la producción de biogás*

Además de los factores comentados anteriormente, existen sustancias que favorecen la actividad metanogénica y otros elementos que dificultan dicha actividad. La actividad metanogénica de las bacterias que producen biogás en el vertedero exige de una serie de nutrientes. Alguno de los más importantes son el potasio, magnesio, calcio, azufre, hierro, nitrógeno, fósforo, etc. De todos estos nutrientes, el que tiene más peligro de escasear es el fósforo por lo que tendrá que ser estudiado para comprobar periódicamente que no existen zonas del vertedero en valores límite o inferiores.

Además de los nutrientes, existen otras sustancias que si se encuentran en el vertedero dificultan la actividad metanogénica de las bacterias. Estas sustancias se conocen con el nombre de inhibidores. Los más importantes son los metales pesados, sulfuros, algunas sales, etc. [Pacey y DeGier, 1986; Rao y Suflita, 1993].



Cuando la concentración de estos elementos es alta, la producción de biogás cae rápidamente. Incluso concentraciones bajas de metales pesados pueden ser tóxicos para la actividad metanogénica como puede ser el cadmio (II), níquel (II), cinc (II), etc.

Por último, es necesario tener en cuenta que las bacterias metanogénicas tienen su intervalo óptimo de crecimiento entre un pH comprendido entre 6 y 8. Por esta razón, cuando se pretendan añadir lodos de E.D.A.R.s para humectar los residuos habrá que conocer el pH de éste y ver su grado de compatibilidad con las bacterias metanogénicas.

### 3.- Descripción del Modelo de Producción planteado

En este apartado se van a establecer las bases de partida de un modelo matemático, implementándolas en un programa informático, que determine la cantidad de biogás que produce la degradación anaerobia de la materia orgánica en un Vertedero de RSUs.

Una vez definidas las variables principales de las que depende la producción del biogás, es necesario estimar el Volumen Teórico de Biogás que produce la degradación anaerobia. A continuación se propone un proceso de cálculo para el Caudal Recuperado Anualmente de Biogás en un vertedero, desde su inauguración hasta su clausura.

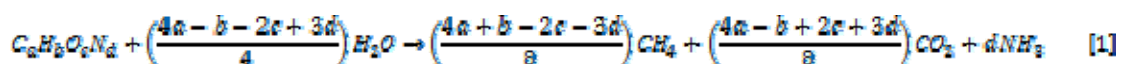
Posteriormente se aplica dicho modelo obtenido a un vertedero real para obtener el Caudal Recuperado de Biogás Anualmente, desde su inauguración hasta su clausura suponiendo conocidos tanto la composición de los Residuos Sólidos Urbanos depositados anualmente como su cantidad.

El programa informático GENBIVER es un modelo matemático que modeliza la generación de biogás en un Vertedero de RSUs controlado. Este software calcula el volumen de biogás generado a partir de diferentes variables, algunas de las más importantes son las cantidades de residuos vertidas anualmente y la composición de los RSUs. Este software está dividido en tres pantallas de introducción de datos y una cuarta en la cual se muestran los resultados obtenidos como consecuencia de la aplicación del modelo matemático. Dichas pantallas de introducción de datos al programa se describen con mayor detalle a continuación.

#### 3.1.- Datos de Identificación de la Instalación y Bases de Cálculo

Para calcular la cantidad total de biogás generado a partir de una tonelada de residuo en un Vertedero de RSUs se hace necesario conocer la composición de los residuos presentes en el mismo. Para realizar esto, se calculará la Producción Teórica de Metano según la Demanda Química de Oxígeno.

La materia orgánica se transforma mediante la degradación anaeróbica en metano (CH<sub>4</sub>) y otros gases como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), nitrógeno (N), etc. Esta transformación se realiza según la siguiente reacción:



La fórmula anterior representa la Ecuación Característica de la Materia Orgánica, donde los Coeficientes "a", "b", "c" y "d" deben ajustarse en función de la composición de los residuos.

La DQO o Demanda Química de Oxígeno se define como la cantidad de oxígeno que es necesario para oxidar químicamente un determinado sustrato. La DQO está relacionada con la producción de biogás, ya que su producción está íntimamente relacionada con el grado de biodegradabilidad de un sustrato, a pesar de que no todo sustrato que se puede degradar químicamente puede ser degradado biológicamente. De este modo, al realizar el modelo a partir de la DQO se comete un error por exceso que será tenido en cuenta.

El oxígeno necesario para una degradación completa de un gramo de materia orgánica será igual al oxígeno necesario para oxidar el volumen de metano generado a partir de ese sustrato. En el proceso de combustión de un mol de metano se consumen dos moles de oxígeno, es decir, para degradar completamente un mol de metano (16 gramos de metano) son necesarios dos de oxígeno (64 gramos de oxígeno).

Con lo cual, se obtiene que la DQO del metano es 4 gramos de oxígeno/gramos de metano. De esta forma, suponemos que la DQO de la materia orgánica es igual a "x" gramos de oxígeno por gramo de materia orgánica, su degradación anaerobia completa generará "x/4" gramos de metano. Es decir, se producen 0,25 gramos de metano por cada gramo de DQO de materia orgánica. Esto equivale a  $0,35 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$  de metano en condiciones normales. Por condiciones normales entendemos condiciones estándar de presión y temperatura, es decir, 0°C a 1 bar, y el volumen medido se denomina  $\text{m}^3\text{N}$ .

Según los cálculos realizados anteriormente, se obtiene que la producción de metano por kg de DQO de materia orgánica es  $0,35 \text{ m}^3\text{N}$ . Ésta es la producción máxima suponiendo una oxidación total de los residuos, algo que no ocurre en los vertederos debido al ineficiente funcionamiento del mismo como digestor anaerobio o debido a que parte de los residuos vertidos no son degradables biológicamente. La primera pantalla de introducción de datos del software GENBIVER se muestra en la siguiente Figura:

The screenshot shows the GENBIVER 1.0 software interface. The top navigation bar includes 'Total Biogás', 'Modelo de Degradación Anaerobia en Vertedero [GENBIVER 1.0]', and 'Herramientas Generales de Total\_Biogás'. The main window is divided into two columns: 'Datos de Identificación de la Instalación' and 'Bases de Cálculo'.

**Datos de Identificación de la Instalación:**

- Identificación de la Instalación:** Fields for 'Nombre de la Instalación', 'Titular de la Instalación', and 'CIF del Titular de la Instalación'.
- Localización de la Instalación:** Fields for 'Dirección de la Instalación', 'Municipio', 'Código Postal', and 'Provincia'.
- Coordenadas Geográficas del Punto de Referencia de la Instalación:** Fields for 'UTM - Huso', 'Coordenadas X (en metros)', 'Coordenadas Y (en metros)', and 'Altud de la Base Sobre el Nivel del Mar (en metros)'.
- Características Generales de la Instalación:** Fields for 'Capacidad del Vertedero (Toneladas)', 'Cantidad Media Diaria de Residuos Recibida (Toneladas/Día)', and 'Clase de Vertedero Según el Artículo 4 del Real Decreto 1481/2001' (radio buttons for 'Para Residuos Inertes', 'Para Residuos No Peligrosos', and 'Para Residuos Peligrosos').
- Datos de Contacto de la Instalación:** Fields for 'Fecha de Cumplimentación del Cuestionario', 'Persona que ha Cumplimentación el Cuestionario', 'Persona de Contacto', 'Correo Electrónico', and 'Teléfono'.

**Bases de Cálculo:**

- Volumen generado de Biogás por la Degradación Anaerobia de los RSU:** Text explaining that organic matter is transformed into methane (CH<sub>4</sub>) and other gases like carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and nitrogen (N<sub>2</sub>). A chemical equation is provided:  $C_xH_yO_zN_d + \left(\frac{4x-b-2c+3d}{4}\right)H_2O - \left(\frac{4x+b-2c-3d}{8}\right)CH_4 + \left(\frac{4x-b+2c+3d}{8}\right)CO_2 + dN_2$ . It notes that coefficients a, b, c, and d depend on the exact composition of the residues.
- Asumos de Cálculo para el Volumen generado de Biogás:** A list of five assumptions:
  - The oxygen required for complete degradation of one gram of organic matter is equal to the oxygen required to oxidize the volume of methane generated from that substrate.
  - In the combustion process of one mole of methane, two moles of oxygen are consumed (16 grams of methane require 64 grams of oxygen).
  - The DQO of methane is 4 grams of oxygen/grams of methane.
  - Supposing that the DQO of the organic matter is equal to "X" grams of oxygen per gram of organic matter, its anaerobic degradation will generate "X/4" grams of methane. That is, it produces 0.25 grams of methane per gram of DQO of organic matter. This is equivalent to  $0,35 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$  of methane in normal conditions (standard pressure and temperature, that is, 0°C a 1 bar).
  - The maximum methane production per kg of DQO of organic matter is  $0,35 \text{ m}^3\text{N}$ . This is the maximum production assuming total oxidation of the residues, which does not occur in landfills due to the inefficient functioning of the same as an anaerobic digester or due to the fact that part of the residues deposited are not biodegradable. Therefore, RSUs only contain a certain percentage of biodegradable organic matter.

Figura II: Paso 1º - Identificación de la Instalación y Bases de Cálculo del Software GENBIVER.  
Fuente: elaboración propia.

En ella se nos pide que introduzcamos los datos más destacados de la instalación a modelizar. Estos están divididos por apartados y son los siguientes:

1. Identificación de la Instalación: en este apartado se nos pide el nombre de la instalación, el titular de la instalación y el CIF del titular de la misma.
2. Localización de la Instalación: el software nos solicita la dirección de la instalación, el municipio en el que está situada, así como su código postal y provincia.
3. Coordenadas Geográficas del Punto de Referencia de la Instalación: en este subapartado se nos solicita el huso UTM, las coordenadas X e Y en metros así como la altitud sobre el nivel del mar a la que está situada la instalación.
4. Características Generales de la Instalación: en este subapartado se nos piden una serie de características del vertedero como la capacidad del mismo en toneladas y la cantidad media diaria de residuos recibida en toneladas/día. Además, se pide catalogar el vertedero según la categoría a la que pertenece según el Artículo 4 del Real Decreto 1481/2001, es decir, si el vertedero es de residuos inertes, de residuos no peligrosos o de residuos peligrosos.
5. Datos de Contacto de la Instalación: en este subapartado se nos solicita la fecha de cumplimentación del cuestionario, es decir, la fecha en la que se va a realizar la modelización. Además, se solicitan los datos de la persona que ha cumplimentado el cuestionario (la persona que ha manejado el software) y los datos de la persona de contacto que ha proporcionado los datos necesarios para realizar la modelización, ésta normalmente pertenecerá a la instalación. Por último, el software pide rellenar el correo electrónico y teléfono de dicha persona.

Los datos introducidos anteriormente no tienen otra utilidad que la de archivar los datos introducidos en el modelo, junto con los resultados obtenidos, en un informe global de la instalación. En la segunda parte de esta pantalla se muestran las bases de cálculo que toma este software para realizar la modelización así como las asunciones tomadas en el cálculo del volumen de biogás generado.

### *3.2.- Caudal de Biogás Recuperable*

Para realizar el cálculo del biogás recuperable según el software propuesto hay que distinguir en primer lugar la composición de los RSUs en dos grupos fundamentales: los residuos no biodegradables anaeróbicamente (materia inerte) de los residuos degradables anaeróbicamente (materia orgánica). En el software GENBIVER únicamente se van a considerar estos últimos.

A su vez esta fracción, el programa la divide en dos facciones con el objetivo de lograr una mayor sencillez. En primer lugar tenemos la Fracción de Rápida Biodegradabilidad, esta está compuesta por restos de alimentación, podas de jardín, etc. Por otra parte, la Fracción de Degradabilidad Lenta está compuesta por papel, cartón, madera, etc. Esta división se hace debido a la desigual velocidad de degradación que poseen las diferentes tipologías de residuos. Para ello, en este programa los RSUs se aglutinan en dos grandes grupos con velocidades de degradación similares. La menor velocidad de degradación de esta última fracción se debe al elevado contenido en celulosa, hemicelulosa y lignina, con lo que la hidrólisis en esta fracción se realiza muy lentamente. Hay que tener en cuenta además que la composición del sustrato no sólo afecta a la velocidad de degradación sino también a la DQO.

Para realizar el cálculo del biogás recuperable es necesario introducir una serie de variables en la pantalla siguiente del software GENBIVER. Estas se pueden ver en la siguiente captura de pantalla del programa:

GENBIVER 1.0

Total Biogás | Modelo de Degradación Anaerobia en Vertedero [GENBIVER 1.0] | Herramientas Generales de Total\_Biogás

1º - Identificación Instalación y Bases de Cálculo | 2º - Caudal Recuperable de Biogás en Vertedero | 3º - Velocidad de Generación de Biogás en un Vertedero | 4º - RESULTADOS OBTENIDOS

< Anterior | Siguiente >

---

**Caudal de Biogás Recuperable**

**Cálculo del Biogás Recuperable por Tonelada de Residuo de RD**

El proceso de cálculo realizado se resume en la siguiente fórmula:

$$V_{RD} = Q \cdot (1 - H) \cdot \left(\frac{1}{M}\right) \cdot C \cdot \alpha \cdot \beta \cdot R$$

**Variable Obtenida del Proceso de Cálculo**

VRD --> Volumen de Biogás Recuperable por Ton. de RSU de RD [Nm<sup>3</sup>/TRD] **110.5140855**

**Variables Dependientes de la Generación de Biogás**

Q -> Producción Teórica de Metano por Ton. de DQO [Nm <sup>3</sup> /TDQO]	350
H -> Humedad de los Residuos Deposados en Vertedero [%/100]	0.38
M -> Contenido de Metano del Biogás [%/100]	0.50
C -> Rendimiento de la Captación [%/100]	0.65
α -> Relación de Biodegradabilidad frente a DQO [%/100]	0.65
β -> Rendimiento de Mineralización [%/100]	0.41
R -> Tonelada de DQO/Tonelada de Materia Orgánica de Rápida Degradabilidad	1.47

RE-CALCULAR FRACCIÓN DE RÁPIDA DEGRADABILIDAD

**Calculo del Biogás Recuperable por Tonelada de Residuo de LD**

El proceso de cálculo realizado se resume en la siguiente fórmula:

$$V_{LD} = Q \cdot (1 - H) \cdot \left(\frac{1}{M}\right) \cdot C \cdot \alpha \cdot \beta \cdot L$$

**Variable Obtenida del Proceso de Cálculo**

VLD --> Volumen de Biogás Recuperable por Ton. de RSU de LD [Nm<sup>3</sup>/TLD] **69.165278**

**Variables Dependientes de la Generación de Biogás**

Q -> Producción Teórica de Metano por Ton. de DQO [Nm <sup>3</sup> /TDQO]	350
H -> Humedad de los Residuos Deposados en Vertedero [%/100]	0.38
M -> Contenido de Metano del Biogás [%/100]	0.50
C -> Rendimiento de la Captación [%/100]	0.65
α -> Relación de Biodegradabilidad frente a DQO [%/100]	0.65
β -> Rendimiento de Mineralización [%/100]	0.41
L -> Tonelada de DQO/Tonelada de Materia Orgánica de Lenta Degradabilidad	0.92

RE-CALCULAR FRACCIÓN DE LENTA DEGRADABILIDAD

**Figura III: Paso 2º - Caudal Recuperable de Biogás en Vertedero del Software GENBIVER.**  
 Fuente: elaboración propia.

Una vez realizada la justificación de la división de los RSUs en las dos categorías anteriores que hace el software, se enumeran las variables dependientes que toma GENBIVER que influyen en la generación de biogás en vertedero. Éstas se enumeran a continuación:

1. Producción Teórica de Metano por Tonelada de DQO: el programa parte por defecto de una producción de metano de 0,35 m<sup>3</sup>N por kg de DQO. Con ella se calcula el Caudal de Biogás Recuperable en el vertedero tanto para la Fracción de Rápida Degradabilidad como para la Fracción de Lenta Degradabilidad. Este valor se puede sustituir por otro que crea más conveniente el usuario.
2. Tonelada de DQO/Tonelada de Materia Orgánica de Rápida Degradabilidad: en el modelo planteado se supone una DQO media, por gramo de sustrato seco, para la materia orgánica de rápida degradabilidad (restos de alimentación, podas de jardín, etc.) de 1,47 gramos. Se adopta este valor debido al mayor contenido en proteínas y lípidos que contiene esta fracción.
3. Tonelada de DQO/Tonelada de Materia Orgánica de Lenta Degradabilidad: en el modelo planteado se supone una DQO media, por gramo de sustrato seco, para la materia orgánica de lenta degradabilidad (papel, cartón, madera, etc.) de 0,92 gramos. Esto se debe fundamentalmente al mayor contenido en celulosa que posee esta fracción.
4. Relación de Biodegradabilidad frente a DQO: teniendo en cuenta únicamente los parámetros anteriores, el modelo de cálculo planteado arroja un error por exceso debido a que no toda la materia orgánica químicamente lo es biológicamente. Por lo tanto es necesario estimar la cantidad de DQO que es degradable biológicamente. El software GENBIVER adopta como valor por defecto un 65%. Por supuesto, este valor es totalmente modificable por el usuario del software, de manera que se pueda ajustar el modelo a sus necesidades.

5. Rendimiento de Mineralización: el vertedero no es un reactor anaerobio totalmente eficiente. La mineralización incompleta se debe a factores tales como el grado de trituración de las basuras, su mayor o menor compactación, la falta de agua en el vertedero, etc. En este modelo se adoptará un rendimiento de mineralización del 41%, aunque este valor es totalmente ajustable por el usuario.
6. Contenido de Metano del Biogás: el contenido de metano del biogás que se genera en el vertedero varía en función del compuesto que se degrade. El metano que efectivamente se genera en un vertedero supone entre un 40% y un 50% del biogás teórico generado [Sufliya et al., 1992; Marticorena et al., 1993; Coops et al., 1995]. En el modelo planteado se supone una concentración de metano en el biogás recuperado del 50% en volumen de gas seco, valor habitual en los vertederos según la bibliografía.
7. Humedad de los Residuos Depositados en el Vertedero: los residuos depositados en los vertederos contienen una cantidad de humedad variable. Dicha cantidad depende fundamentalmente de la tipología de los residuos de que se trate, de la época del año en que se realice la recogida y del sistema de gestión empleado. Los RSUs depositados en vertedero con un mayor contenido en humedad son los lodos de E.D.A.R.s, los restos de comida y los restos de podas, por este orden [Pacey y DeGier, 1986]. Según la bibliografía consultada, el contenido de agua presente en los residuos oscila entre un 25% y un 60% del peso del residuo [Gendebien et al., 1992]. En este modelo se parte por defecto de un valor estimado de 38 gramos de agua por cada 100 gramos de materia orgánica vertida. En los cálculos del modelo se distingue entre la cantidad de materia orgánica húmeda vertida y la cantidad de materia orgánica seca vertida que se transforma en metano.
8. Rendimiento de la Captación: ningún sistema de captación actual es eficiente al 100%. Con lo cual se hace necesario suponer una determinada disminución de rendimiento. En este modelo, dicha disminución se cuantifica en un 35%, considerando así una Tasa de Recuperación del 65% (valor habitual en la bibliografía).

El proceso de cálculo planteado se resume en la siguiente fórmula:

$$V = Q \cdot (1 - H) \cdot \left(\frac{1}{M}\right) \cdot C \cdot \alpha \cdot \beta \cdot (R \cdot X + L \cdot Y) \quad [2]$$

donde:

- $V$  → Volumen de Biogás Teórico Recuperable por Tonelada de RSU [ $\text{Nm}^3/\text{T}$ ].
- $Q$  → Producción Teórica de Metano por Tonelada de DQO [ $\text{Nm}^3/\text{T}_{\text{DQO}}$ ].
- $H$  → Humedad de los Residuos [%/100].
- $M$  → Contenido de Metano del Biogás [%/100].
- $R$  → Rendimiento de la Captación [%/100].
- $\alpha$  → Relación de Biodegradabilidad frente a DQO [%/100].
- $\beta$  → Rendimiento de Mineralización [%/100].
- $R$  → Tonelada de DQO/Tonelada de Materia Orgánica de Rápida Degradabilidad.
- $X$  → Tanto por Uno de Materia Orgánica de Rápida Degradabilidad [%/100].
- $L$  → Tonelada de DQO/Tonelada de Materia Orgánica de Lenta Degradabilidad.
- $Y$  → Tanto por Uno de Materia Orgánica de Lenta Degradabilidad [%/100].



### 3.3.- Fundamentos teóricos para el cálculo de la Velocidad de Generación de Biogás

La velocidad de generación de biogás en un vertedero es proporcional a la velocidad a la que se produce la degradación de la materia orgánica en el mismo. Esta velocidad de degradación se puede suponer proporcional a la materia orgánica que aún no ha sido degradada en la instalación, ésta en los cálculos siguientes la denominaremos  $C(t)$ . Esta materia también se puede expresar como una potencia de ella  $C^n(t)$ , dependiendo del modelo cinético adoptado. En la bibliografía especializada se pueden encontrar distintos modelos, diferenciándose entre sí fundamentalmente en el valor que le otorgan a la constante “ $n$ ”. Es importante destacar que diversos autores [Marticorena et al., 1993; Coops et al., 1995] afirman que la modelización de la producción de biogás en vertedero a través de un modelo de primer orden obtiene mejores resultados que una modelización a través de la ecuación de segundo orden. Con lo cual, para la construcción del modelo matemático propio se tomará la ecuación correspondiente a “ $n = 1$ ”, es decir:

$$-\frac{dC}{dt} = k \cdot C(t) \quad [3]$$

La constante “ $k$ ” que aparece en la expresión anterior va a determinar la velocidad de degradación de la materia orgánica.

Como resultado de realizar la integración de la ecuación anterior se va a obtener la cantidad de materia orgánica que aún no ha sido degradada en un instante de tiempo “ $t$ ”, obteniendo:

$$C(t) = C_0 \cdot e^{-kt} \quad [4]$$

La constante “ $C_0$ ” que aparece en la expresión anterior es la cantidad de materia orgánica presente en el instante inicial en el vertedero.

Como cabe esperar y se ha explicado anteriormente, la producción de biogás es proporcional a la cantidad de materia orgánica que ha sido degradada. De este modo, la producción de biogás acumulada en un vertedero, para un instante de tiempo “ $t$ ” determinado desde el inicio de la degradación, será proporcional a la cantidad de materia orgánica degradada desde el instante cero. Esto se puede ver en la siguiente expresión:

$$D(t) = \alpha \cdot C_0 \cdot (1 - e^{-kt}) \quad [5]$$

En esta expresión aparece la constante de proporcionalidad “ $\alpha$ ”. A través de ella se le va a indicar al modelo la eficiencia en la que se realiza la conversión de materia orgánica en biogás.

Teniendo en cuenta lo explicado anteriormente, para calcular el caudal de biogás producido en un año “ $t$ ”, es decir, entre “ $t - 1$ ” y “ $t$ ”, se va a emplear la siguiente expresión:

$$Q(t) = D(t) - D(t - 1) = \alpha \cdot C_0 \cdot (e^k - 1) \cdot e^{-kt} \quad [6]$$

En esta expresión se supone que para “ $t = 0$ ” la producción de biogás es nula. Además, con el fin de expresar esta constante “ $k$ ” en unidades de tiempo se va a sustituir ésta por su inversa. Esta nueva constante se va a denominar Tiempo de Degradación “ $d$ ”.

Esta velocidad de degradación depende de la tipología de residuos presente en el vertedero. Así, por ejemplo los restos de papel, cartón y madera se degradan más lentamente que los restos de alimentación y podas de jardín, tal y como se ha comentado anteriormente (debido a la presencia de determinados componentes en su estructura).



En la bibliografía especializada podemos encontrar multitud de valores diferentes para el Tiempo Degradación de la materia orgánica en un vertedero. Así, podemos encontrar valores que van desde 12 años [Marticorena et al. (1993), Mutasem et al. (1997)] hasta valores de 20 años [Bogner et al. (1989)]. Existen otros autores [Attal et al. (1992)] que citan tiempos superiores de 25 o más años.

Los valores empleados en el modelo planteado para la constante “d” (expresada en años) se pueden ver en la Tabla siguiente:

**Tabla II: Valores tomados en el Modelo planteado para el Tiempo de Degradación “d” (años).**  
 Fuente: elaboración propia.

	Vertederos Húmedos (h)	Vertederos Secos (s)
Fracción de Rápida Degradabilidad (dx)	1	6
Fracción de Lenta Degradabilidad (dy)	15	25

En la construcción del modelo, la cantidad total de biogás producida por tonelada de residuo vertido en vertedero se representa por el producto de “ $\alpha \cdot C_0$ ”. Si a su vez esta producción se diferencia por cada fracción de residuos depositada en vertedero, tenemos:

- i. Producción de Biogás por Ton. de Residuos de Rápida Degradabilidad: Z m<sup>3</sup>N/t.
- ii. Producción de Biogás por Ton. de Residuos de Lenta Degradabilidad: W m<sup>3</sup>N/t.

A continuación se transforma la expresión [6] para adaptarla a las dos fracciones de residuos que se han tenido en cuenta en el modelo, obteniendo la siguiente expresión:

$$Q(t) = Z \cdot X \cdot (e^{t/dx} - 1) \cdot e^{-t/dx} + W \cdot Y \cdot (e^{t/dy} - 1) \cdot e^{-t/dy} \quad [7]$$

donde:

- $Q(t)$  → Caudal de Biogás Obtenido expresado en m<sup>3</sup>N/t.
- $t$  → Año sobre el que se pretende calcular la Producción de Biogás.
- $dx$  → Tiempo de Degradación para la F. de Rápida Degradabilidad (años).
- $dy$  → Tiempo en Degradación para la F. de Lenta Degradabilidad (años).
- $X$  → Tanto por Uno de la Fracción de Rápida Degradabilidad.
- $Y$  → Tanto por Uno de la Fracción de Lenta Degradabilidad.

Por último, con el fin de obtener la Producción Total de Biogás en un vertedero, es necesario modelizar éste como un conjunto de capas de residuos de distinta antigüedad vertidas unas sobre otras de manera superpuesta. Para obtener la Producción Total Acumulada de un vertedero es necesario calcular la producción de cada una de las capas supuestas de las que está compuesto el vertedero. Se supondrá que cada capa vertida en vertedero corresponde al vertido realizado en el mismo durante todo un año, con lo cual, se obtendrá la producción de biogás que genera cada una de estas capas año por año. Como resultado del sumatorio del biogás generado en un determinado año por todas las capas de residuos vertidas en el vertedero, se obtendrá la Producción Total de Biogás para un determinado año, que es el resultado final buscado.

Como se ha dicho anteriormente, para calcular la Producción de Biogás de un determinado vertedero en un año “t”, es necesario calcular la producción de biogás en cada una de las capas presentes en el vertedero, teniendo en cuenta las distintas características que éstas presentan (antigüedad, cantidad de residuos vertidos, etc.), ya

que el gas que se genera en una de las capas se mezcla con el generado en otras capas. El biogás proveniente de cada una de las capas se sumará y posteriormente éste puede ser captado por alguno de los métodos existentes o ser vertido directamente a la atmósfera. Lo comentado anteriormente se puede ver en la siguiente fórmula:

$$Q_{Total}(t) = \sum T_i \cdot Q_i \cdot (t - t_i) \text{ para } t = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 \dots, n - 1, n \text{ (Capas RSUs)} \quad [8]$$

donde:

- $T_i$  → Número de Toneladas vertidas de RSUs en la Capa i-ésima
- $Q_i$  → Caudal de Biogás Producido en la Capa i-ésima
- $t$  → Año en el cual fueron vertidos los residuos de la 1º Capa
- $t_i$  → Año en el cual fueron vertidos los residuos de la Capa i-ésima

### 3.4.- Unificación del Modelo de Producción de Biogás en Vertedero

Una vez modelizada la velocidad de degradación de la materia orgánica en función de si ésta se encuentra en un vertedero de tipología húmeda o seca, se va a generar un modelo unificado de cálculo de aplicación a cualquier tipo de vertedero.

Así, será necesario evaluar el comportamiento del vertedero en la producción de biogás para determinar si este se comporta según el modelo planteado de Vertedero Húmedo Perfecto, Vertedero Seco Perfecto, o bien tiene un comportamiento intermedio a estas dos modelizaciones de degradación de materia orgánica.

Para ello, una de las variables a tener en cuenta es la precipitación media donde se ubica el vertedero. En función de dicha precipitación media de la zona se dará más peso al modelo de vertedero húmedo que al seco y viceversa. También se tendrán en cuenta en este modelo generado otros factores como pueden ser la ubicación de la instalación, la temperatura media de la zona, etc.

Desarrollando un poco más la primera variable para unificar el modelo, hay que decir que se entiende por pluviometría el estudio de los datos de precipitación que se obtienen a través de los pluviómetros ubicados en un determinado territorio. Mediante estos, obtenemos la cantidad precipitada, y a partir de la media de las precipitaciones anuales de los años en los que está operativo el vertedero, partimos en la generación del modelo matemático unificado.

En el mapa siguiente se pueden ver las precipitaciones medias anuales de España. Con lo cual, a la vista de los datos mostrados en el mapa, se puede ver que hay una gran disparidad en las precipitaciones medias anuales dependiendo de la ubicación geográfica donde se encuentre la instalación. Así, en la zona norte del país nos encontramos con una precipitación media anual superior a los 1000 mm., mientras que en otras zonas del sur como por ejemplo Almería no se llega ni a 200 mm.

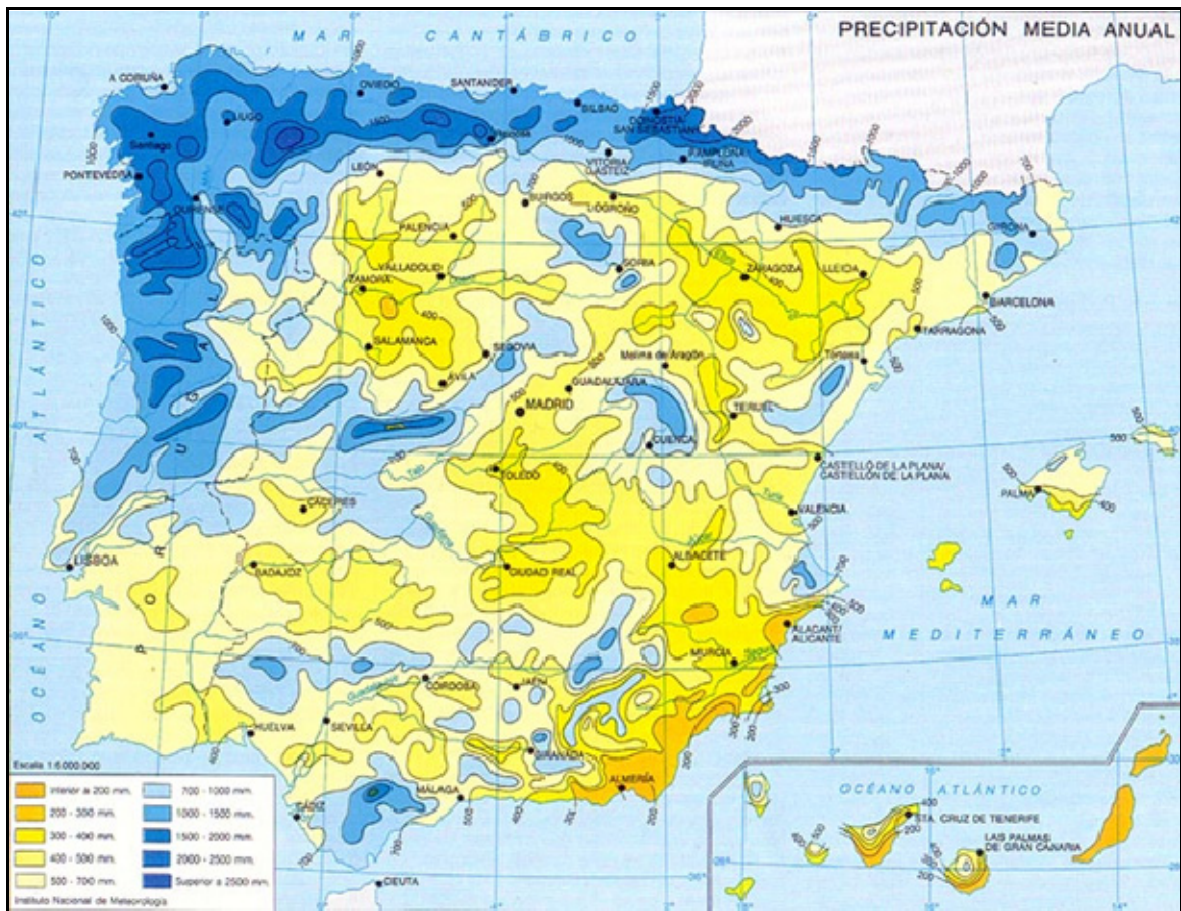


Figura IV: Precipitación Media Anual en España. Fuente: Universitat Pompeu Fabra.

Por último, es importante remarcar que este modelo también tiene en cuenta la ubicación de la instalación. Es necesario tener en cuenta esta variable debido a que se ha corroborado al aplicar el modelo a diferentes instalaciones, que existen vertederos que a pesar de estar situados en una zona sensiblemente húmeda o seca se comporta más como un vertedero de una tipología diferente. Es decir, existen vertederos ubicados en zonas húmedas que se comportan más como vertederos secos y por el contrario, existen vertederos ubicados en zonas secas que se comportan más como vertederos húmedos. En estos casos me refiero únicamente al comportamiento primario de la instalación, dado que estas instalaciones no se comportarán de ningún modo según los modelos de vertedero perfecto de las dos tipologías expuestas anteriormente.

Para unificar los modelos matemáticos anteriores de vertedero húmedo y seco es necesario determinar la pluviometría límite en la que una determinada instalación se comporta como el Modelo de Vertedero Húmedo Perfecto y cuando se comporta como el Modelo de Vertedero Seco Perfecto. Conociendo estas dos pluviometrías límite y la pluviometría de la zona ya se puede determinar el comportamiento del vertedero y realizar su modelización. Estas pluviometrías límite son específicas para cada vertedero y se pueden calcular con el software GENBIVER.

Conociendo el peso relativo de cada tipología de vertedero para la instalación a modelizar se define el método de cálculo que realiza GENBIVER. Éste parte de las dos fracciones de residuos que se han tenido en cuenta en el modelo, además de los dos modelos de

Vertedero Seco y Húmedo Perfecto planteados anteriormente. La expresión obtenida se puede ver a continuación:

$$Q(t) = \left[ Z \cdot X \cdot \left( e^{1/d_{xs}} - 1 \right) \cdot e^{-t/d_{xs}} + W \cdot Y \cdot \left( e^{1/d_{ys}} - 1 \right) \cdot e^{-t/d_{ys}} \right] \cdot PVS \\ + \left[ Z \cdot X \cdot \left( e^{1/d_{xh}} - 1 \right) \cdot e^{-t/d_{xh}} + W \cdot Y \cdot \left( e^{1/d_{yh}} - 1 \right) \cdot e^{-t/d_{yh}} \right] \cdot PVH \quad [9]$$

donde:

$Q(t)$  → Caudal de Biogás obtenido expresado en m<sup>3</sup>N/t.

$t$  → Año sobre el que se pretende calcular la Producción de Biogás

$d_{xs}$  → Tiempo de Degradación Seco para la Fracción de Rápida Degradabilidad (años).

$d_{ys}$  → Tiempo de Degradación Seco para la Fracción de Lenta Degradabilidad (años).

$d_{xh}$  → Tiempo de Degradación Húmedo para la F. de Rápida Degradabilidad (años).

$d_{yh}$  → Tiempo de Degradación Húmedo para la F. de Lenta Degradabilidad (años).

$X$  → Tanto por Uno de la Fracción de Rápida Degradabilidad.

$Y$  → Tanto por Uno de la Fracción de Lenta Degradabilidad.

$PVS$  → Tanto por Uno de la Producción de Biogás debida al Modelo en Seco.

$PVH$  → Tanto por Uno de la Producción de Biogás debida al Modelo en Húmedo.

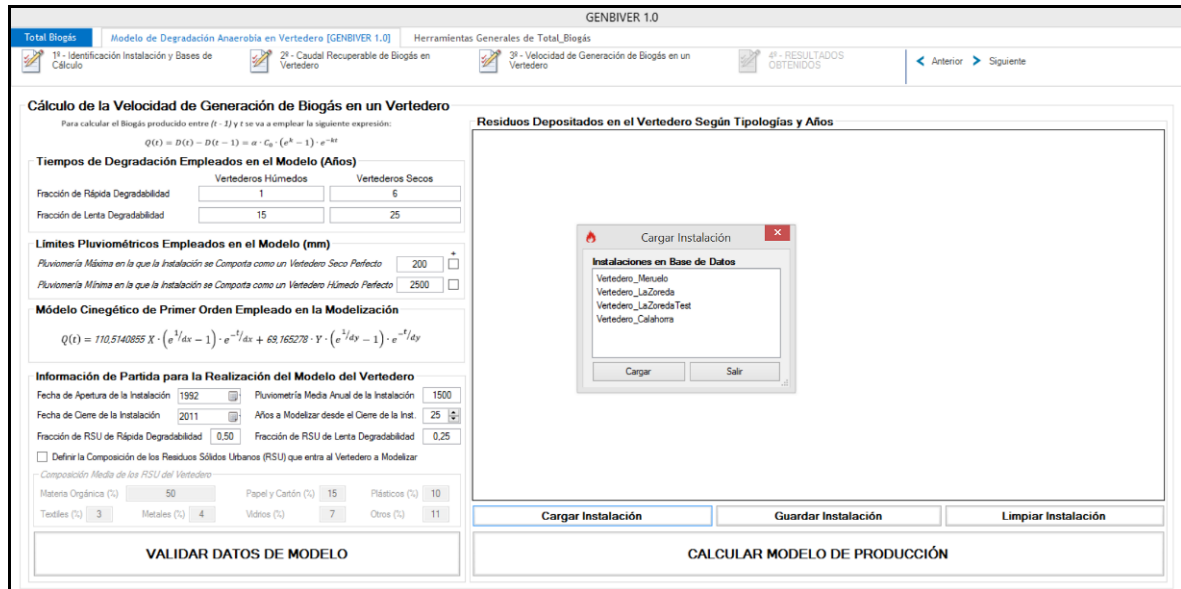
### 3.5.- Cálculo de la Velocidad de Generación de Biogás

Para calcular la velocidad de generación de biogás en un Vertedero, el modelo planteado, en la pantalla siguiente, muestra el modelo cinético de primer orden empleado en los cálculos. El modelo empleado depende de los cálculos comentados en los pasos anteriores. Además, para realizar la modelización de una instalación se necesitan aportar los siguientes datos adicionales:

1. Fecha de Apertura de la Instalación: es necesario conocer el año en el cual se comienzan a verter residuos en la instalación.
2. Fecha de Cierre de la Instalación: se necesita conocer el año en el que cesan los vertidos de RSUs en el vertedero.
3. Años a Modelizar desde el Cierre de la Instalación: por defecto se consideran 25 años, dado que es un tiempo más que suficiente para tener en cuenta la mayor cantidad de biogás que se genera en ésta una vez que se ha cerrado. Hay que tener en cuenta que el vertedero seguirá generando biogás muchos más años (incluso más de 100 años después del cierre de la instalación), pero éste será en cantidad demasiado reducida para que pueda ser tenida en cuenta de cara a un posible aprovechamiento comercial.
4. Fracción de RSUs de Rápida Degradabilidad: que tanto por uno de los RSUs depositados en vertedero pertenecen a la Fracción de Rápida Degradabilidad. En este modelo, por defecto, se supone que dicha fracción es el 50% del total de los RSUs depositados en vertedero (restos de alimentación, jardín, etc.).
5. Fracción de RSU de Lenta Degradabilidad: que tanto por uno de los RSUs depositados en vertedero pertenecen a la Fracción de Lenta Degradabilidad. En este modelo, por defecto, se supone que dicha fracción es el 25% del total de los RSUs depositados en vertedero (papel, cartón, etc.).



Por último, es necesario introducir en el modelo la cantidad de residuos depositados en el vertedero separados por año y tipología. En la pantalla siguiente se puede ver la pantalla de introducción de estos datos de la instalación en el programa GENBIVER.



**Figura V: Paso 3º - Velocidad de Generación de Biogás en un Vertedero del Software GENBIVER.**  
*Fuente: elaboración propia.*

#### 4.- Parametrización y Modelización del Vertedero de Meruelo (Cantabria)

A continuación se va aplicar el modelo anteriormente comentado al caso de un vertedero real situado en la Comunidad de Cantabria. El Vertedero Controlado de Meruelo se ubica en los montes de la cuenta del Río Campiazo, en las siguientes coordenadas:

**Tabla III: Coordenadas Geográficas del Punto de Referencia de la Instalación (UTM).**  
*Fuente: elaboración propia.*

Vertedero de Meruelo (UTM)	
Huso	30
Coord. X (metros)	450250
Coord. Y (metros)	4808834
Altitud (metros sobre nivel mar)	200

En el Vertedero de Meruelo se tratan las basuras domésticas de Cantabria. Dicho Vertedero es gestionado por una sociedad pública MARE (Medio Ambiente, Agua, Residuos y Energía) dependiente de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Dicha empresa se hace cargo de la recogida de los Residuos Sólidos Urbanos de los 102 municipios que tiene Cantabria, lo que equivale a una población superior a los 500000 habitantes.

En la actualidad (2014), el Vertedero de Meruelo es el único vertedero controlado que existe en Cantabria, ubicándose éste en el Ayuntamiento del mismo nombre.

La creación de vertederos controlados se debe a que parte de los residuos no pueden recuperarse, por lo que su eliminación se hace en primer lugar compactando y cubriendo

los residuos, para a continuación aprovechar el biogás producido en él para generar energía, y por último recogiendo y tratando las aguas contaminadas.

El Vertedero Controlado de Meruelo cuenta con una planta de reciclaje, una planta de tratamiento de lixiviados, una estación depuradora de aguas residuales, una planta de generación de energía eléctrica mediante biogás y un sistema de medición de análisis en continuo de los hornos incineradores.

Para aplicar el modelo de cálculo de Producción de Biogás propuesto en el apartado anterior, es necesario conocer la composición de los residuos depositados en dicho Vertedero, además de la cantidad de residuos vertidos en él. Para ello, la empresa MARE (Medio Ambiente, Agua, Residuos y Energía) ha proporcionado la información necesaria.

El Vertedero Controlado de Meruelo se trata de un vertedero de residuos no peligrosos de acuerdo a la clasificación que aparece en el Artículo 4 del Real Decreto 1481/2001. La cantidad media diaria de residuos recibida es de 330 toneladas/día y cuenta con una capacidad de vertido de 5696504 toneladas. La técnica empleada de disposición de vertido en el Vertedero de Meruelo es de relleno por área, no usándose así las técnicas de trincheras o zanjas y la de celdas.

A continuación se detallan algunas de las características estructurales y de funcionamiento más destacadas del Vertedero de Meruelo:

**Tabla IV: Dimensionamiento Físico del Vertedero de Meruelo (Cantabria).**

*Fuente: elaborada a partir de la información proporcionada por MARE (Medio Ambiente, Agua, Residuos y Energía).*

Volumen del Conjunto del Vaso o Vasos (m <sup>3</sup> )	Superficie del Conjunto de Vaso o Vasos (m <sup>2</sup> )	Espesor de los Residuos en el Depósito (m)		
		Mínimo	Medio	Máximo
5.696.504	174.220	3	3,5	4

**Tabla V: Periodo y Condiciones de la Actividad del Vaso 1 del Vertedero de Meruelo (Cantabria).**

*Fuente: elaborada a partir de la información proporcionada por MARE (Medio Ambiente, Agua, Residuos y Energía).*

VASO 1							
Año Inicio Explotación	Año Clausura Explotación	Sellado (S/N)	Fecha Inicio Sellado (día/mes/año)	Fecha Final Sellado (día/mes/año)	Desgasificación (S/N)	Fecha Inicio Desgasificación (día/mes/año)	Fecha Final Desgasificación (día/mes/año)
1989	1991	S	1991	1992	N	-	-

**Tabla VI: Periodo y Condiciones de la Actividad del Vaso 2 del Vertedero de Meruelo (Cantabria).**

*Fuente: elaborada a partir de la información proporcionada por MARE (Medio Ambiente, Agua, Residuos y Energía).*

VASO 2							
Año Inicio Explotación	Año Clausura Explotación	Sellado (S/N)	Fecha Inicio Sellado (día/mes/año)	Fecha Final Sellado (día/mes/año)	Desgasificación (S/N)	Fecha Inicio Desgasificación (día/mes/año)	Fecha Final Desgasificación (día/mes/año)
1992	2026	N	-	-	S	1996	-

Como se ha explicado anteriormente, en el modelo planteado se supone una DQO media, por gramo de sustrato seco, para la materia orgánica de rápida degradabilidad (restos de alimentación, podas de jardín, etc.) de 1,47 gramos y para el caso de la materia orgánica de lenta degradabilidad (papel, cartón, madera, etc.) de 0,92 gramos.



Además resulta necesario estimar la cantidad de DQO es degradable biológicamente. En este modelo se ha estimado un valor del 65% para esta variable.

El Vertedero de Meruelo (Cantabria) no es un reactor anaerobio totalmente eficiente. La mineralización incompleta se debe, como se ha comentado anteriormente, a factores tales como el grado de trituración de las basuras, su mayor o menor compactación, la falta de agua en el vertedero, etc. Debido a la mineralización incompleta de los residuos, el metano que efectivamente se genera en este Vertedero ha sido estimado en un 41% del teórico.

Además, los residuos depositados en los vertederos contienen un grado de humedad variable, dependiendo dicha cantidad de los residuos de que se trate, de la época del año en que se realice la recogida y del sistema de gestión empleado. Sobre el Vertedero de Meruelo no es posible realizar ensayos para determinar el contenido de humedad de los Residuos Sólidos Urbanos. Para el modelo del Vertedero de Meruelo (Cantabria) se ha estimado un valor de 38 gramos de agua por cada 100 gramos de materia orgánica vertida.

El contenido de metano del biogás varía según el compuesto que se degrade. Para cuantificar el volumen de este gas generado en un vertedero es necesario suponer el porcentaje de metano que contiene el biogás generado. En el Vertedero de Meruelo (Cantabria) se va a adoptar una composición de biogás recuperado del 50% en volumen de gas seco de metano, valor habitual en los vertederos según la bibliografía y nuestros análisis.

Otra variable que produce una disminución teórica de la Producción de Biogás en un vertedero es la eficiencia del sistema de captación, debido a que ningún sistema de captación actual es eficiente al 100%. Para cuantificar este hecho es necesario suponer una determinada disminución de rendimiento. En nuestro caso, esta disminución para el Vertedero de Meruelo se ha cuantificado en un 35%, considerando así una Tasa de Recuperación del 65%.

Finalmente es necesario suponer la composición de los residuos. Para este Vertedero se parte de una composición de residuos vertido en la instalación de un 45% de restos de alimentación, podas de jardín, etc. y un 23% de papel, cartón, madera, etc. Estos valores han sido obtenidos por los Algoritmos de cálculo planteados en el apartado siguiente de este artículo. Además, a partir de dicha composición, se determina el porcentaje de materia orgánica contenida en los Lodos de E.D.A.R., en el Rechazo de Compostaje y en la categoría Otros, teniendo en cuenta lo comentado en apartados anteriores.

Según se ha explicado anteriormente, para emplear el modelo de cálculo de Producción de Biogás propuesto en el apartado anterior, es necesario conocer la cantidad de entrada de residuos al Vertedero, esta información la podemos ver en la captura de pantalla de la página siguiente. En dicha Figura podemos ver la cantidad de entrada de residuos en el Vertedero de Meruelo cuantificada en toneladas, proporcionada por la empresa MARE. Dichas cantidades se encuentran clasificadas por categorías (Urbanos o Asimilables a Urbanos, Rechazo de Compostaje, Lodos de E.D.A.R. y Otros) desde la apertura del 2º Vaso del Vertedero en el año 1992 hasta el año 2011.

También es necesario conocer su ubicación, para determinar la precipitación anual media, y poder estimar el peso relativo del modelo de Vertedero Húmedo o Seco en dicha Instalación. Meruelo, la localidad donde se ubica el Vertedero, se encuentra en la conocida como España húmeda, con unas precipitaciones anuales superiores a 1200

mm. Se parte de la media de las precipitaciones anuales de los años a modelizar (entre 1992 y 2011), y una vez consultado el mapa anterior, podemos determinar que la precipitación media anual en Meruelo es de alrededor de 1500 mm. anuales. Dicho dato se ha obtenido consultando el estudio “Termopluviometría de Cantabria durante el Periodo 1981-2010” de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

A pesar de esto, este Vertedero no se comporta como un Vertedero Húmedo Perfecto, sino que según los datos proporcionados por MARE y corroborados por los Algoritmos de cálculo planteados en el apartado siguiente de este artículo, esta Instalación tiene un comportamiento mixto. El Modelo de Vertedero Húmedo tiene un peso de 0,06, mientras que el Modelo de Vertedero Seco tiene un peso de 0,94, siempre según los datos aportados por la empresa MARE.

A continuación se va a modelizar la velocidad de degradación de la materia orgánica en el Vertedero de Meruelo. MARE me ha aportado datos de producción y captación de biogás en el Vaso 2 del Vertedero de Meruelo entre los años 1992 y 2011, con lo cual, esos serán los años que voy a estudiar para la realización del modelo matemático de producción.

GENBIVER 1.0

Total Biogás | Modelo de Degradación Anaerobia en Vertedero [GENBIVER 1.0] | Herramientas Generales de Total\_Biogás

1º - Identificación Instalación y Bases de Cálculo | 2º - Caudal Recuperable de Biogás en Vertedero | 3º - Velocidad de Generación de Biogás en un Vertedero | 4º - RESULTADOS OBTENIDOS

Anterior | Siguiente

---

**Cálculo de la Velocidad de Generación de Biogás en un Vertedero**

Para calcular el Biogás producido entre  $t - 1$  y  $t$  se va a emplear la siguiente expresión:

$$Q(t) = D(t) - D(t-1) = a \cdot C_0 \cdot (e^{\lambda t} - 1) \cdot e^{-\lambda t}$$

**Tiempos de Degradación Empleados en el Modelo (Años)**

Vertederos Húmedos: Fracción de Rápida Degradabilidad: 1, Fracción de Lenta Degradabilidad: 15

Vertederos Secos: Fracción de Rápida Degradabilidad: 6, Fracción de Lenta Degradabilidad: 25

**Límites Pluviométricos Empleados en el Modelo (mm)**

Pluviometría Máxima en la que la Instalación se Comporta como un Vertedero Seco Perfecto: 1410

Pluviometría Mínima en la que la Instalación se Comporta como un Vertedero Húmedo Perfecto: 2910

**Módulo Cinético de Primer Orden Empleado en la Modelización**

$$Q(t) = 110.5140885 X \cdot (e^{\lambda_1 dx} - 1) \cdot e^{-\lambda_1 dx} + 69.165278 \cdot Y \cdot (e^{\lambda_2 dy} - 1) \cdot e^{-\lambda_2 dy}$$

**Información de Partida para la Realización del Modelo del Vertedero**

Fecha de Apertura de la Instalación: 1992 | Pluviometría Media Anual de la Instalación: 1500

Fecha de Cierre de la Instalación: 2011 | Años a Modelizar desde el Cierre de la Inst.: 25

Fracción de RSU de Rápida Degradabilidad: 0.45 | Fracción de RSU de Lenta Degradabilidad: 0.23

Definir la Composición de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) que entra al Vertedero a Modelizar

Composición Media de los RSU del Vertedero

Materia Orgánica (%): 50 | Papel y Cartón (%): 15 | Plásticos (%): 10

Textiles (%): 3 | Metales (%): 4 | Vidrios (%): 7 | Otros (%): 11

**VALIDAR DATOS DE MODELO**

---

**Residuos Depositados en el Vertedero Según Tipologías y Años**

Año	Urbanos Asimilables a Urbanos (Ton.)	Rechazo de Compostaje (Ton.)	Lodos E.D.A.R (Ton.)	Otros [No Inertes] (Ton.)
1992	137628	0	6892	80
1993	137818	0	6901	80
1994	138580	0	6939	81
1995	143529	0	7187	84
1996	156854	0	7854	91
1997	161708	0	8098	94
1998	173225	0	8674	101
1999	211582	0	10595	123
2000	257542	0	12896	150
2001	254158	0	12727	148
2002	148649	81144	19780	209
2003	42838	190053	20568	247
2004	48297	199665	26712	119
2005	52481	194465	30692	204
2006	65420	143738	33476	273
2007	68079	110977	38045	3655
2008	58428	88832	32380	1411
2009	51421	81159	17240	1803
2010	46242	77356	6694	7371
2011	42613	66658	5566	5670

**Cargar Instalación** | **Guardar Instalación** | **Limpiar Instalación**

**CALCULAR MODELO DE PRODUCCIÓN**

Figura VI: Paso 3º - Velocidad de Generación de Biogás en un Vertedero del Software GENBIVER (V. de Meruelo). Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta lo anteriormente comentado, podemos ver a continuación los resultados obtenidos en la modelización:

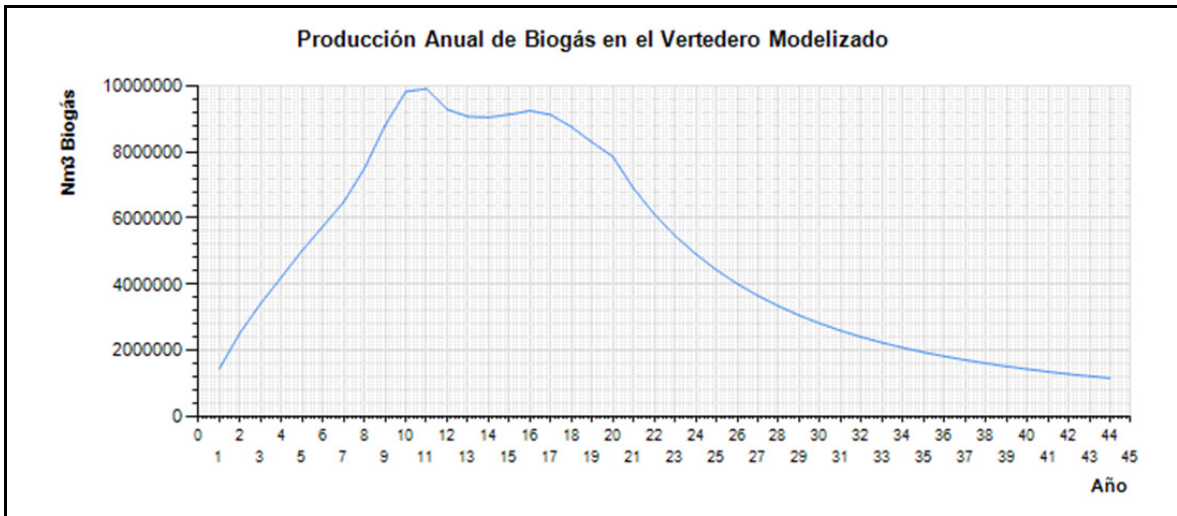


Figura VII: Producción Anual de Biogás en el Vertedero de Meruelo (año 0 = 1992). Fuente: elaboración propia.

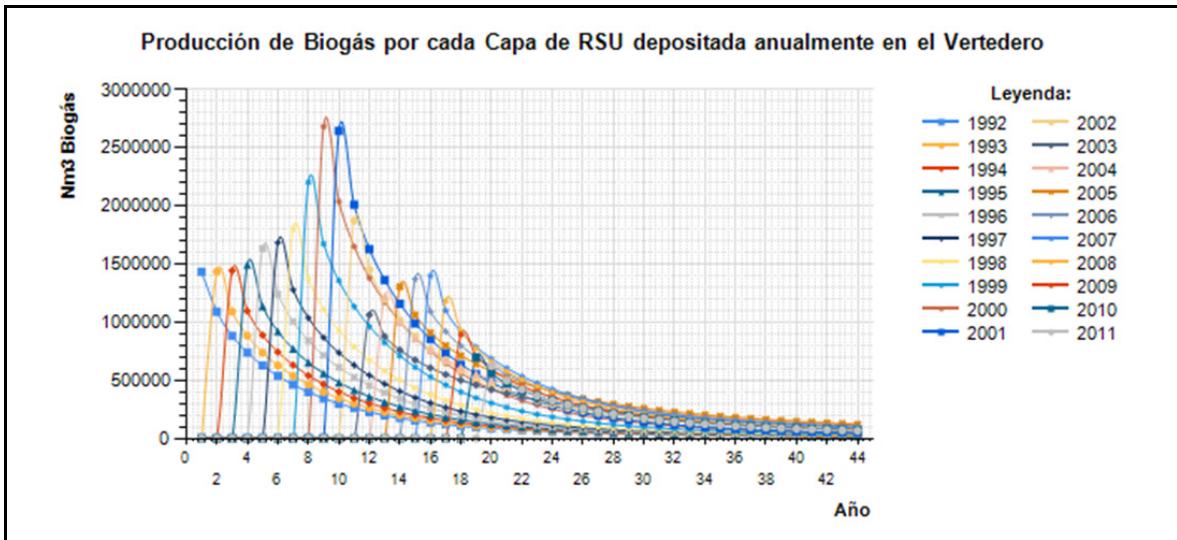


Figura VIII: Producción Anual de Biogás por C. de RSU vertida en Meruelo (año 0 = 1992). Fuente: elaboración propia.

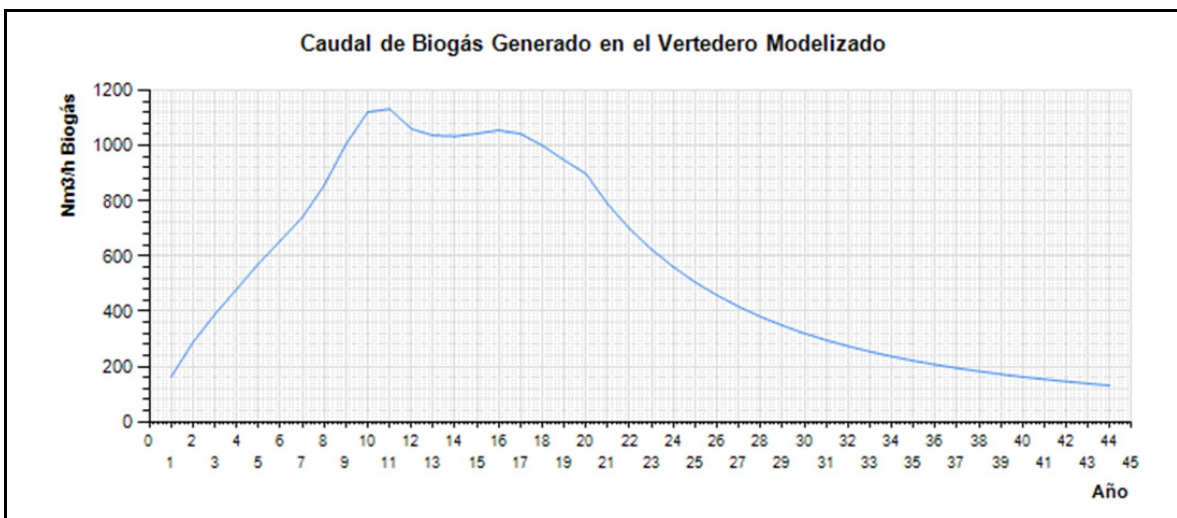


Figura IX: Caudal de Biogás Generado Anualmente en el V. de Meruelo (año 0 = 1992). Fuente: elaboración propia.

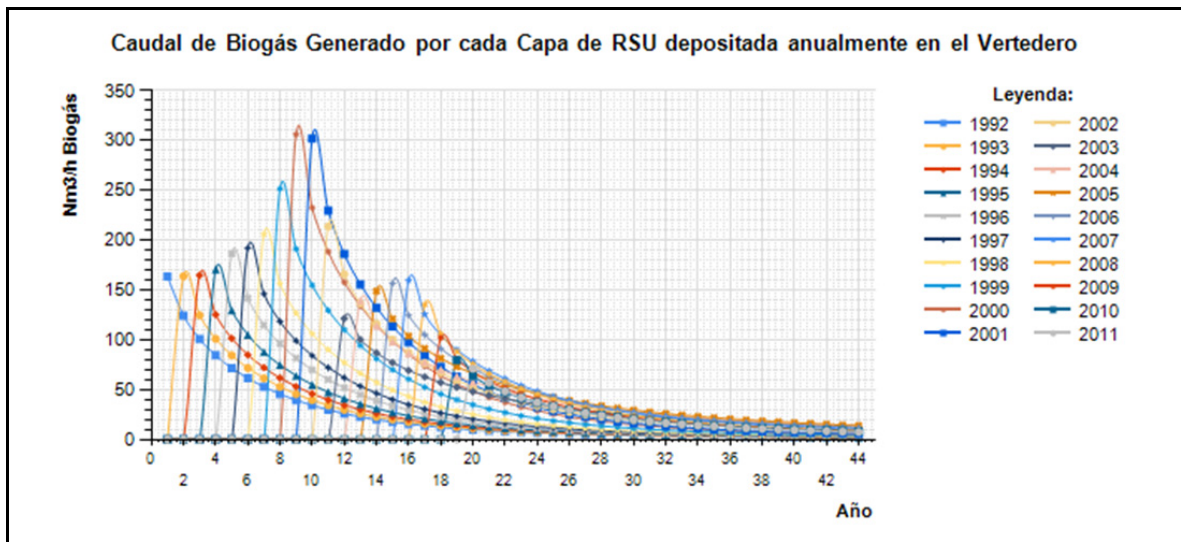


Figura X: Caudal de Biogás Generado por C. de RSU vertida en Meruelo (año 0 = 1992). Fuente: elaboración propia.

## 5.- Determinación Analítica de los Parámetros de Funcionamiento de un Vertedero

En este apartado se estudiará la forma más adecuada de obtener, de manera analítica, los parámetros operativos de un vertedero de RSUs planteados anteriormente. Para ello, se han construido dos tipologías de algoritmos, uno basado en una Búsqueda Exhaustiva denominado Voraz y otro de tipo Heurístico. Estos algoritmos parten de la Producción Anual de Biogás del vertedero y de la determinación de los posibles rangos de funcionamiento de los parámetros operativos de la instalación por parte del usuario. A partir de dichos rangos en las variables de entrada, estos algoritmos determinan la mejor solución operativa de la instalación. Mediante su empleo se consigue una gran flexibilidad, debido a que a partir de unas variables de entrada es posible determinar de manera analítica los parámetros operativos de funcionamiento a emplear en el modelo de producción. Esto evita la necesidad de invertir tiempo y dinero en realizar análisis experimentales para determinar los valores operativos de una instalación.

### 5.1.- Fundamento teórico del Algoritmo de Búsqueda Exhaustiva

Esta técnica está basada en una búsqueda combinatoria que consiste en enumerar sistemáticamente todas las posibles soluciones de un problema, y comprobar cada una de estas soluciones con el objetivo de encontrar la mejor de ellas.

Este tipo de búsqueda es sencilla de implementar y, siempre que exista, encuentra una solución. Sin embargo, su coste de ejecución es proporcional al número de soluciones candidatas, el cual es exponencialmente proporcional al tamaño del problema. Debido a eso, este tipo de búsqueda se emplea habitualmente cuando el número de soluciones candidatas no es elevada, o bien cuando el problema puede reducirse previamente usando algún otro método heurístico.

### 5.2.- Fundamento teórico del Algoritmo Heurístico

El algoritmo propuesto anteriormente ha demostrado ser invaluable en una amplia variedad de problemas prácticos. Algunos de estos problemas complejos no pueden ser



resueltos con el fin de encontrar una solución óptima. En estas situaciones se debe plantear encontrar una solución factible que se encuentre razonablemente cerca de la solución óptima. Con el fin de encontrar dicha solución se emplean métodos heurísticos.

Estos métodos permiten encontrar una solución muy buena pero ésta no tiene porqué ser la solución óptima al problema, sino que ésta se encuentra razonablemente cerca de ella. El empleo de estos procedimientos no garantiza la calidad de la solución encontrada pero puede proporcionar una solución de una calidad más que aceptable.

Mediante este enfoque se permite la posibilidad de manejar problemas grandes mediante el empleo de un algoritmo iterativo donde cada nueva iteración permite encontrar una nueva solución que puede ser de mayor calidad que la anterior. Una vez que termina el algoritmo la solución encontrada es la mejor que se pudo encontrar en cualquier iteración.

Este tipo de algoritmos tiene que ser específico para el problema a resolver, es decir, son soluciones “ad hoc”. Por Heurística entendemos la ciencia que estudia los procesos de decisión en una determinada área de conocimiento. Proviene de la palabra griega “heuriskein” que significa descubrir. Mediante esta técnica se pueden encontrar soluciones a problemas difíciles.

Actualmente se han desarrollado métodos de solución general que proporcionan tanto la estructura general, como los criterios estratégicos para desarrollar un método heurístico específico, que se ajuste a un problema en particular. Estas técnicas reciben el nombre de Metaheurística.

A partir de la Heurística, en este apartado se ha desarrollado un algoritmo que es capaz de encontrar buenas soluciones en un tiempo corto. Éste, en un tiempo razonablemente breve es capaz de identificar una solución de alta calidad para el problema. Esta técnica permite resolver los cálculos de manera rápida, a diferencia del anterior algoritmo planteado que hace demasiado complejo y grande este problema.

#### 5.2.1.- Principios y Estrategias del Método Heurístico

Para generar este algoritmo de resolución del problema se ha partido de los principios de la Heurística como ciencia. Para crear el algoritmo de solución al problema se ha partido de los siguientes principios/reglas:

- i. Analogía: es el principio básico de este tipo de algoritmos. Significa comparación o relación entre varios conceptos a través de la razón.
- ii. Reducción: a través de él se transforma un tipo de problema en otro. Así, un problema A es reducible a B, si las soluciones de B existen y dan una solución de A. Además, resolver A no debe ser más difícil que resolver B.
- iii. Separar los datos que se tienen de los que se buscan.
- iv. Representar las magnitudes dadas y buscadas con variables.
- v. Determinar las fórmulas que gobiernan el proceso.
- vi. Utilización de estructuras simples como números, en lugar de otro tipo de datos.

Partiendo de esta serie de principios se reformula el problema planteado originalmente mediante estrategias heurísticas. Éstas se emplean para organizar el proceso de resolución del problema abordado. Tenemos dos tipos de estrategias diferenciadas:

- i. Trabajo hacia delante: se parte de lo dado hacia la solución del problema.
- ii. Trabajo hacia atrás: se parte de lo que se busca hasta llegar a los datos.

El algoritmo planteado en la solución de este problema se basa en una estrategia de trabajo hacia atrás. A través de ella se examina lo que se busca y apoyándose en las distintas ecuaciones que gobiernan el proceso, obteniendo abundantes resultados intermedios, se intenta deducir lo buscado. El algoritmo intenta llegar a los datos buscados mediante iteraciones y haciendo cuadrar el sistema con la mayor precisión posible.

### 5.3.- Lógica de los Algoritmos

Este programa, perteneciente a GENBIVER, que determina analíticamente los parámetros operativos de funcionamiento de un vertedero está dividido en tres capas:

1. Capa de Presentación: en ésta se encuentran todos aquellos formularios con los cuales el usuario puede interactuar. Incluye la interfaz de usuario.
2. Capa de Lógica: incluye todos los métodos, en este caso los algoritmos que necesita el programa para obtener la solución.
3. Capa de Acceso a Datos: incluye todos los métodos de acceso a datos, etc., es decir, todo lo relacionado con la Base de Datos.

En la Capa de Presentación es el usuario quien decide el algoritmo a utilizar. Según dicha selección el programa va por una subrutina o por otra. Para ello, el programa hace una validación de datos antes de lanzar uno de los algoritmos. Una vez validados estos datos, el programa crea un proceso para realizar estos cálculos. Esto se puede ver en la captura de pantalla siguiente. En ella también se pueden ver los parámetros operativos de la instalación que calcula el programa, así como los rangos que tiene que definir el usuario para encontrar la mejor solución.

Figura XI: GENBIVER – C. de Presentación para Determinación Analítica de P. de Funcionamiento de Vertederos. Fuente: elaboración propia.

La Capa de Lógica interactúa con los diferentes proyectos establecidos en la aplicación, y se encarga de obtención de los datos necesarios para los cálculos de los parámetros de



funcionamiento de un vertedero. Estos se pueden ver en la pantalla anterior. A continuación, se explican los métodos utilizados para la obtención de dichos parámetros.

### 5.3.1.- Método de cálculo basado en Búsqueda Exhaustiva

Este proceso está dividido en una serie de bucles anidados. Cada uno de ellos representa uno de los parámetros para obtener la solución. Los 9 parámetros que evalúa el modelo son los que aparecen en la captura de pantalla siguiente.

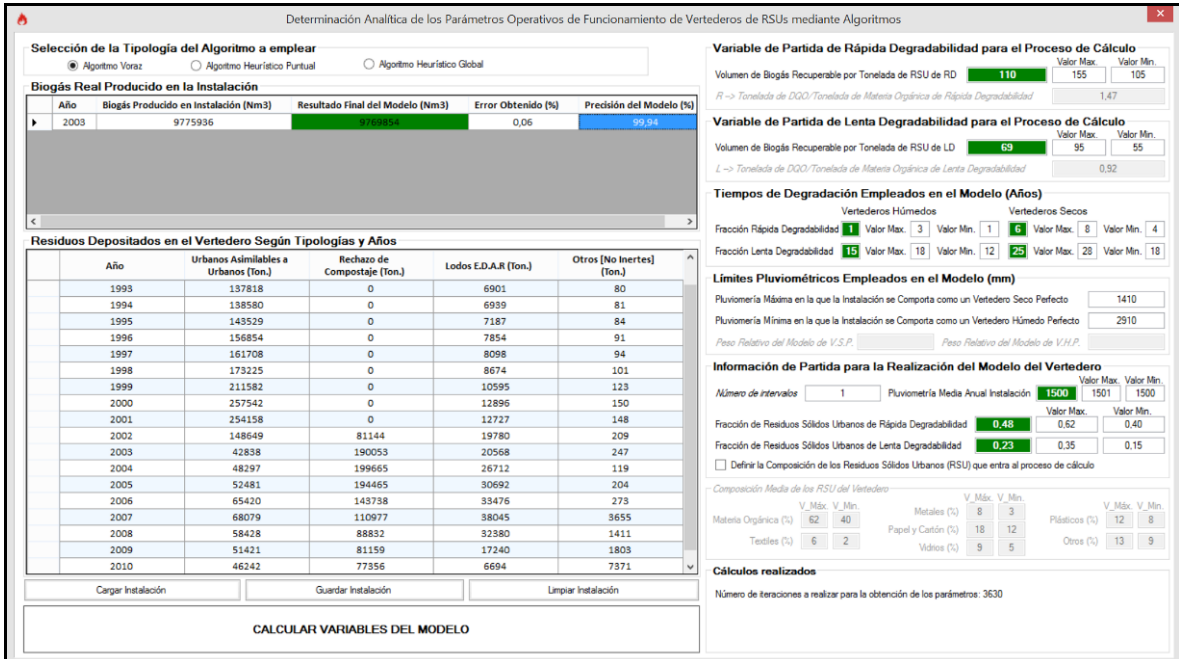
Para cada iteración se utilizan los métodos definidos previamente en la Capa de Lógica, es decir, se evalúa la Producción de Biogás por tonelada de residuos para la Fracción de Rápida Degradabilidad ( $Z \text{ m}^3\text{N/t}$ ) y para la Fracción de Lenta Degradabilidad ( $W \text{ m}^3\text{N/t}$ ). La expresión que va a evaluar el programa es la [9] y ya ha sido explicada anteriormente.

Por lo tanto, para obtener una solución tiene que operar todas posibles soluciones, comparando cada una de ellas una a una con el resultado de origen. El algoritmo se queda con la mejor solución obtenida.

Este cálculo encuentra la mejor solución posible pero tiene un elevado coste de rendimiento, puesto que, por cada bucle anidado la complejidad crece exponencialmente. La complejidad de una serie de bucles anidados es de  $O(n)$ , por lo que si el cálculo se realiza para los nueve bucles anidados su complejidad es igual a  $O(n^9)$ .

Así, este método de cálculo no es viable para calcular una instalación con todos los parámetros abiertos, lo que significa que es el usuario el que tiene que guiar al programa, estableciendo valores y fijando otros para que no entren en funcionamiento todos los bucles.

En la pantalla siguiente se puede ver una captura de pantalla del Algoritmo Voraz encontrando la mejor solución para el Vertedero de Meruelo para el año 2003. Los resultados obtenidos se pueden ver destacados en verde.



**Selección de la Tipología del Algoritmo a emplear**  
 Algoritmo Voraz  Algoritmo Heurístico Puntual  Algoritmo Heurístico Global

**Biogás Real Producido en la Instalación**

Año	Biogás Producido en Instalación (Nm <sup>3</sup> )	Resultado Final del Modelo (Nm <sup>3</sup> )	Error Obtenido (%)	Precisión del Modelo (%)
2003	9775936	9775936	0,05	99,94

**Residuos Depositados en el Vertedero Según Tipologías y Años**

Año	Urbanos Asimilables a Urbanos (Ton.)	Rechazo de Compostaje (Ton.)	Lodos E.D.A.R (Ton.)	Otros (No Inertes) (Ton.)
1993	137818	0	6901	80
1994	138580	0	6939	81
1995	143529	0	7187	84
1996	156854	0	7854	91
1997	161708	0	8098	94
1998	173225	0	8674	101
1999	211582	0	10595	123
2000	257542	0	12896	150
2001	254158	0	12727	148
2002	148649	81144	19780	209
2003	42838	190053	20568	247
2004	48297	199665	26712	119
2005	52481	194465	30692	204
2006	65420	143738	33476	273
2007	68079	110977	38045	3655
2008	58428	88832	32380	1411
2009	51421	81159	17240	1803
2010	46242	77356	6694	7371

**Variable de Partida de Rápida Degradabilidad para el Proceso de Cálculo**  
 Volumen de Biogás Recuperable por Tonelada de RSU de RD: **110** (Valor Max: 155, Valor Min: 105)  
 $R \rightarrow \text{Tonelada de DGO/Tonelada de Materia Orgánica de Rápida Degradabilidad}$ : 1,47

**Variable de Partida de Lenta Degradabilidad para el Proceso de Cálculo**  
 Volumen de Biogás Recuperable por Tonelada de RSU de LD: **69** (Valor Max: 95, Valor Min: 55)  
 $L \rightarrow \text{Tonelada de DGO/Tonelada de Materia Orgánica de Lenta Degradabilidad}$ : 0,52

**Tiempos de Degradación Empleados en el Modelo (Años)**  
 Vertederos Húmedos: Fracción Rápida Degradabilidad: **1** (Valor Max: 3, Valor Min: 1), Fracción Lenta Degradabilidad: **15** (Valor Max: 18, Valor Min: 12)  
 Vertederos Secos: Fracción Rápida Degradabilidad: **6** (Valor Max: 8, Valor Min: 4), Fracción Lenta Degradabilidad: **25** (Valor Max: 28, Valor Min: 18)

**Límites Pluviométricos Empleados en el Modelo (mm)**  
 Pluviometría Máxima en la que la Instalación se Comporta como un Vertedero Seco Perfecto: 1410  
 Pluviometría Mínima en la que la Instalación se Comporta como un Vertedero Húmedo Perfecto: 2910  
 Peso Relativo del Modelo de V.S.P.:  Peso Relativo del Modelo de V.H.P.:

**Información de Partida para la Realización del Modelo del Vertedero**  
 Número de intervalos: 1 Pluviometría Media Anual Instalación: **1500** (Valor Max: 1501, Valor Min: 1500)  
 Fracción de Residuos Sólidos Urbanos de Rápida Degradabilidad: **0,48** (Valor Max: 0,52, Valor Min: 0,40)  
 Fracción de Residuos Sólidos Urbanos de Lenta Degradabilidad: **0,23** (Valor Max: 0,35, Valor Min: 0,15)  
 Definir la Composición de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) que entra al proceso de cálculo

**Composición Media de los RSU del Vertedero**

	V. Máx.	V. Mín.	V. Máx.	V. Mín.	V. Máx.	V. Mín.		
Materia Orgánica (%)	62	40	Metales (%)	8	3	Plásticos (%)	12	8
Teleros (%)	6	2	Papel y Cartón (%)	18	12	Vidrios (%)	9	5
Otros (%)	13	9						

**Cálculos realizados**  
 Número de iteraciones a realizar para la obtención de los parámetros: 3630

Botones: Cargar Instalación, Guardar Instalación, Limpiar Instalación

**CALCULAR VARIABLES DEL MODELO**

Figura XII: GENBIVER – Determinación de P. de Funcionamiento (V. Meruelo) mediante Búsqueda Exhaustiva. Fuente: elaboración propia.

### 5.3.2.- Método de cálculo basado en la Heurística

La realización del cálculo Heurístico parte de la base del cálculo por Búsqueda Exhaustiva. Se van estableciendo valores a los diferentes parámetros para hallar una posible solución y fijando otros. Para ello, el método establecido en la Capa de Presentación realiza las llamadas, pasándole al Método Heurístico propiamente dicho los parámetros para calcular la solución y fijando los otros, por lo que los bucles anidados utilizados en el método de cálculo quedan limitados a uno sólo para cada iteración.

La complejidad de las operaciones del algoritmo disminuye de una manera drástica para cada iteración, siendo esta  $O(n)$ , lo que significa que para cada iteración le influye un solo bucle. Para la realización de este cálculo, el programa hace una validación de datos antes de lanzar el algoritmo. Una vez validados estos datos, el programa crea un proceso para realizar estos cálculos. En este proceso de cálculo se tienen en cuenta los mismos 9 parámetros y las mismas expresiones que para el caso anterior.

Este proceso está dividido en una serie de bucles anidados. Cada uno de ellos representa uno de los parámetros para obtener la solución. En cada iteración fija la media de los parámetros introducidos por el usuario y sólo permanece libre un parámetro, obteniendo la mejor solución para ese bucle.

Por lo tanto, se obtiene la mejor solución para el primer parámetro. En la siguiente iteración, este parámetro pasa a estar fijo en la mejor solución obtenida anteriormente, siendo el siguiente parámetro el que ahora va a estar libre. Los demás parámetros siguen fijados en su valor medio. Esto se repite “ $n$ ” veces hasta obtener la mejor solución posible para todos los parámetros. Este procedimiento se realiza para todos y cada uno de los años introducidos de manera simultánea, evaluando los datos introducidos a la vez para cada variación de parámetro.

El Algoritmo Heurístico no difiere del anterior en las expresiones matemáticas que emplea para la realización de los cálculos. Pero a diferencia del anterior, éste previamente realiza un primer cálculo para obtener los años en los que se va a realizar las operaciones. A continuación, el algoritmo busca la mejor solución para los distintos años que el usuario ha introducido, quedándose siempre con la mejor solución posible, por lo que, cada posible solución obtenida en este algoritmo siempre va a ser una solución global.

Para obtener la mejor solución global posible, el algoritmo guarda cada posible solución independientemente. Para cada una de ellas se realiza el cálculo de su error y su precisión. Aquella posible solución que tenga la precisión más elevada será la considerada solución. Para evaluar la Precisión del Modelo se emplea la siguiente expresión:

$$\text{Precisión Modelo (\%)} = 100 - \left[ \frac{\left( \sum_{\text{año}=0}^{\text{año}=i} \text{Biogás Real Producido (Nm}^3) \right) - \left( \sum_{\text{año}=0}^{\text{año}=i} \text{Biogás Modelo Producido (Nm}^3) \right)}{\left( \sum_{\text{año}=0}^{\text{año}=i} \text{Biogás Real Producido (Nm}^3) \right)} \times 100 \right] \quad [10]$$

El modo de operar del algoritmo es el siguiente, éste realiza la primera iteración, guarda la solución obtenida y calcula su precisión. Puesto que su precisión va a ser mayor que la que había en un primer momento guarda ésta. A continuación realiza una segunda iteración, calcula su precisión y la compara con la que estaba guardada anteriormente, si esta es mayor la guarda tomándola como precisión de comparación, mientras que si ésta es menor la descarta. Este procedimiento lo realiza “ $n$ ” veces para las siguientes

iteraciones, comparando siempre la precisión obtenida en la última iteración con la mejor precisión obtenida hasta ese momento. El resultado final del algoritmo será la mayor precisión obtenida en todas las iteraciones realizadas por él y los parámetros operativos de funcionamiento del vertedero con los que se ha obtenido.

Los valores obtenidos son los que se le muestran al usuario sombreados en verde. En la pantalla siguiente se puede ver un ejemplo de aplicación de este algoritmo. En él, se han obtenido los parámetros operativos de funcionamiento del Vertedero de Meruelo mediante este Algoritmo Heurístico.

Determinación Analítica de los Parámetros Operativos de Funcionamiento de Vertederos de RSUs mediante Algoritmos

**Selección de la Tipología del Algoritmo a emplear**

Algoritmo Voraz   
  Algoritmo Heurístico Puntual   
  Algoritmo Heurístico Global   
 Precisión Modelo: **96,9098**   
  Definir R / L

**Biogás Real Producido en la Instalación**

Año	Biogás Producido en Instalación (Nm3)	Resultado Final del Modelo (Nm3)	Error Obtenido (%)	Precisión del Model
2002	9823950	9.873.908	0,48	99,52
2003	9480936	9.292.823	2,41	97,59
2004	9031299	9.240.260	0,10	99,90
2005	9110858	9.116.417	1,04	98,96
2006	9477046	9.191.517	3,96	95,04
2007	9202820	9.223.286	0,10	99,90

**Resultados Obtenidos por el Algoritmo**

Año	Biogás Recuperable RD	Biogás Recuperable LD	Fracción RSUs RD	Fracción RSUs LD	T. D. RD - V. Húmedos
2001	110	69	0,45	0,23	1
2002	110	69	0,45	0,23	1
2003	110	69	0,45	0,23	1
2004	110	69	0,45	0,23	1

**Residuos Depositados en el Vertedero Según Tipologías y Años**

Año	Urbanos Asimilables a Urbanos (Ton.)	Rechazo de Compostaje (Ton.)	Lodos E.D.A.R (Ton.)	Otros (No Inertes) (Ton.)
1993	137818	0	6901	80
1994	138580	0	6939	81
1995	143529	0	7187	84
1996	156854	0	7854	91
1997	161708	0	8098	94
1998	173225	0	8674	101
1999	211582	0	10595	123
2000	257542	0	12896	150
2001	254158	0	12727	148
2002	148649	81144	19780	209

**Variable de Partida de Rápida Degradabilidad para el Proceso de Cálculo**

Volumen de Biogás Recuperable por Tonelada de RSU de RD: **110** (Valor Max: 165, Valor Min: 100)

R → Tonelada de DQO / Tonelada de Materia Orgánica de Rápida Degradabilidad: **1,47**

**Variable de Partida de Lenta Degradabilidad para el Proceso de Cálculo**

Volumen de Biogás Recuperable por Tonelada de RSU de LD: **69** (Valor Max: 95, Valor Min: 55)

L → Tonelada de DQO / Tonelada de Materia Orgánica de Lenta Degradabilidad: **0,92**

**Tiempos de Degradación Empleados en el Modelo (Años)**

Vertederos Húmedos: Fracción Rápida Degradabilidad: **1** (Valor Max: 3, Valor Min: 1); Fracción Lenta Degradabilidad: **15** (Valor Max: 18, Valor Min: 12)

Vertederos Secos: Fracción Rápida Degradabilidad: **6** (Valor Max: 8, Valor Min: 4); Fracción Lenta Degradabilidad: **25** (Valor Max: 28, Valor Min: 20)

**Límites Pluviométricos Empleados en el Modelo (mm)**

Pluviometría Máxima en la que la Instalación se Comporta como un Vertedero Seco Perfecto: **1410**

Pluviometría Mínima en la que la Instalación se Comporta como un Vertedero Húmedo Perfecto: **2910**

Peso Relativo del Modelo de V.S.P.: **0,94**    Peso Relativo del Modelo de V.H.P.: **0,06**

**Información de Partida para la Realización del Modelo del Vertedero**

Número de intervalos: **1**    Pluviometría Media Anual Instalación: **1500** (Valor Max: 1501, Valor Min: 1500)

Fracción de Residuos Sólidos Urbanos de Rápida Degradabilidad: **0,45** (Valor Max: 0,62, Valor Min: 0,40)

Fracción de Residuos Sólidos Urbanos de Lenta Degradabilidad: **0,23** (Valor Max: 0,32, Valor Min: 0,15)

Definir la Composición de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) que entra al proceso de cálculo

Composición Media de los RSU del Vertedero:

	V. Máx.	V. Mín.		V. Máx.	V. Mín.		V. Máx.	V. Mín.
Materia Orgánica (%)	62	40	Metales (%)	8	3	Pásticos (%)	12	8
Textiles (%)	6	2	Papel y Cartón (%)	18	12	Otros (%)	13	9
Vidrios (%)	9	5						

**CALCULAR VARIABLES DEL MODELO**

**GENBIVER 1.0**

Figura XIII: GENBIVER 1.0 – Determinación de P. de Funcionamiento (V. Meruelo) mediante Algoritmo Heurístico. Fuente: elaboración propia.

## 6.- Conclusiones

El modelo construido ha mostrado una elevada precisión en las instalaciones estudiadas. En concreto, en la aplicación al Vertedero de Meruelo (Cantabria) la precisión obtenida ronda el 97%, valor obtenido sólo con estimaciones, sin necesidad de realizar ningún tipo ensayo. Es de suponer que si se contasen con más datos, como la humedad real de los residuos depositados en el Vertedero, la eficiencia de la mineralización, rendimiento del sistema de captación, etc., dichos valores se ajustarían todavía más a los resultados reales. Sin embargo, para un modelo de este tipo la precisión obtenida se considera muy buena.

Los valores de Producción Real de Biogás proporcionados por MARE que se encuentran más alejados de los predichos por el modelo se corresponden a los años 2008 y 2009. Estos años se coinciden con valores de fugas en la Instalación anormalmente altos, según los datos de fugas medias producidas en años anteriores proporcionados por MARE.

## 7.- Bibliografía

Attal, A.; Akunna, J.; Camacho, P.; Salmon, P.; Paris, J. "Anaerobic Digestion of Municipal Wastes in Landfill". *Wat. Sci. Tech.*, 25, 243-253, 1992.

Bogner J. "Understanding natural and induced gas migration through landfill cover materials. The basis for improved landfill gas recovery". 21st Conf. "Intersociety Energy Conversion Engineering", San Diego, California, EEUU., 1, 199-204, 1986. (Publicado por: American Chemical Society, 1155, 16th Street, NW, Washington DC 20023 EEUU).

Brown, K.; Maunder, D. "Exploitation of Landfill Gas: a UK Perspective". *Wat. Sci. Tech.*, 30, 143-151, 1994.

Coops, O.; Luning, L.; Oonk, H.; Weenk, A. "Validation of Landfill Gas Formation Models". *Sardinia 95, Fifth International Symposium by CISA*, 1, 635-646, 1995.

Gendebien, A.; Pauwels, M.; Constant, M.; Ledrut-Damanet, M.; Nyns, E.; Willumsen, H.; Butson, J.; Fabry, R. y Ferrero, G. "Landfill Biogas. From Environment to Energy". Commission of the European Communities. Final Report EUR 14017/1 EN, Luxemburg, 1992.

Marticorena, B.; Attal, A.; Camacho, P.; Manem, J.; Hesnault, D.; Salmon, P. "Prediction rules for biogas valorisation in municipal solid waste landfills". *Wat. Sci. Tech.*, 27, 235-241, 1993.

Mutasem E.; Findikakis A.; James L. "Gas simulation models for solid waste landfills". *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v27 n3 (199797): 237-283.

Pacey, J.; DeGier, J. "The factors influencing landfill gas production" *Proc. Conf. "Energy from Landfill Gas"*, Solihull, Gran Bretaña, 1986.

Pohland, F.; Al-Yousfi, B. "Design and Operation of Landfills for Optimum Stabilization and Biogas Production". *Wat. Sci. Tech.*, 30, 117-124, 1995.

Rao Gurijala, K.; Sufliata, J. "Environmental factors influencing methanogenesis from refuse in landfill samples" *Environ. Sci. Technol.*, 27, 1176-1181, 1993.

Stegman, R.; Spendlin, H. "Research activities on enhancement of biochemical processes in sanitary landfills". *Water poll. Res. J. Canada*, 21, 1986.

Sufliata, J.; Gerba, C.; Ham, R.; Palmisano, A.; Rathje, W.; Robinson, J. "The World's Largest Landfill: A Multidisciplinary Investigation". *Environmental, Science and Technology*, 26, 1486-1495, 1992.