

CENTRO: ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACION. SANTANDER

TITULO: Revisión y propuesta de una metodología para la estimación de emisiones difusas de metano en un vertedero.

TRABAJO FIN DE MASTER (TFM)

MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA QUÍMICA
POR LA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA Y LA UNIVERSIDAD DEL
PAÍS VASCO/EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEA

Alumno: Jose Manuel Vadillo Abascal

Fecha: 19-10-2018

Firma:



Directores:

Curso Académico: 2018-2019

Ángel Irabien Gulías

Amaya Lobo García de Cortázar

RESUMEN

KEYWORDS

Climate change, Mathematical model, Biogas, Landfill.

SCOPE

When waste are deposited in landfills, their organic fraction slowly decomposes. During this process, landfill gas is created, a mixture of methane and carbon dioxide (Oonk, 2010). Methane emission provides approximately 3% to 4% of the worldwide anthropogenic emissions of greenhouse gas. Along with contributing to global warming, CH₄ can locally increase the risk of conflagration and explosion, bad odours and toxicity, harm in vegetation and polluting of Waters. (López y cols., 2018). National authorities are currently compelled to quantify methane emissions in landfills and notify them to UNFCCC. Individual landfills must annually inform EPRTR about emissions (Oonk, 2010)

The last revision of the estimating methodology on emissions coming from the deposit of solid waste in controlled landfills, published in the Sistema Español de Inventario de Emisiones (2018), they refer to the IPCC 2006 model as estimating model. However, since it is a global model, the uncertainty increases in the landfill gas generation rate (sensitive to environmental factors, including humidity, temperature, oxygen and waste degradation) when applied to individual landfills (GMI, 2012)

The main aim of this TFM is to create a new calculating tool to asses fugitive emissions of a landfill through the revision, update and sensitivity analysis of parameters from the IPCC 2006 model. Along with that, it is intended to check the calculating tool with a case study for an actual landfill, while contributing to carry an improved management of waste so as to be able to reach a higher control over fugitive emissions, which would lead to the likelihood of reaching greater levels of energy production.

RESULTS

To begin with, the models used currently have been analysed in landfills all over the world, concluding that the model based around the first order decay equation suggested by IPCC reports is the most studied and expanded. Secondly, a new calculating tool has been proposed in order to estimate the diffused emissions of methane of a landfill, based on the equations from the IPCC model previously mentioned above, yet with updated parameters.

This update was much needed since, after the proposition from 2006 of the IPCC model, many experimental studies have been carried out which have questioned the values of the parameters suggested by this model. Furthermore, the operating entities did already show great interest in the upgrade of the model and the decrease in doubtfulness, since the model proposed by IPCC with parameters by default can, in many occasions, overestimate the obtained results. Therefore, once the new calculating tool in Excel

format is created, a case study is carried out to estimate the methane emissions from the landfill in Meruelo.

First of all, it can be concluded that the new calculation tool always estimates less emissions (61% in 2017) than the model currently used by said landfill, with parameters proposed by 2006 IPCC Directive. Along with that, we can state that this new tool describes the expected changes in behavior due to the management performed in the landfill (composting and recycling).

Secondly, the obtained results in both models are compared to the ones from the field measurements with the goal of comparing results and checking whether the new calculating tool estimates results closer to the actual ones. It can be concluded that this new tool and provided in this Project estimates results that lay within the confidence Interval given by the in situ measurements while the other model (the one used currently by the studied landfill) overestimates by 11,6 times in comparison to the confidence Interval upper limit.

CONCLUSIONS

The new measurement tool has been developed based on the multiphase first order decay, widely accepted, proposed by the IPCC Directive. The amount of methane generated in a year was calculated in accordance to with the Degradable Organic Carbon (DOC) of each waste placed over the years, showing us the difference in goods consumption, recycling and removal strategies. Weather conditions such as precipitation, evapotranspiration and temperature are also included when calculating the total amount of generated methane. Several factors define the bioavailability of DOC deposited were also identified through literature and were incorporated in the calculation of generated biogas throughout the landfill lifetime. Besides, to calculate the methane fugitive emissions within a year, the oxidation of methane in the surface and the biogas obtained by the extraction system are taken into account.

It can be concluded that, in spite of it being impossible to quantify the exact generation of biogas, the estimation of gas calculated with the new calculating tool is much closer to the real value when compared to the estimation of other existing models. This model was developed so as to gather data and available knowledge, making the most of the time in the landfill in Meruelo to try the tool with field measurements.

REFERENCES

GMI (2012) 'International Best Practices Guide for LFGE Projects'. Global Methane Initiative.

López, A. et al. (2018) 'Emissions from mechanically biologically treated waste landfills at field scale', International Journal of Environmental Science and Technology.

Oonk, H. (2010) 'Literature review: methane from landfills', Sustainable Landfill Foundation.

INDICE

1.	PLANTEAMIENTO.....	1
1.1.	OBJETIVO	1
1.2.	LEGISLACIÓN APLICABLE.....	1
1.3.	ESTADO DEL ARTE	2
1.3.1.	Vertederos controlados de residuos sólidos	2
1.3.2.	Gas de vertedero de residuos sólidos (biogás)	5
1.3.3.	Modelo de estimación de emisiones.....	10
2.	METODOLOGÍA. Desarrollo.....	15
2.1.	ANÁLISIS Y MODELADO DEL SISTEMA.....	15
2.2.	REVISIÓN Y PROPUESTA DE PARÁMETROS	17
2.2.1.	Análisis de sensibilidad de los parámetros.....	24
2.3.	HERRAMIENTA DE CALCULO	25
2.3.1.	Método matemático de la herramienta de cálculo.....	26
2.3.2.	Diseño de la nueva hoja de calculo	28
2.4.	CASO DE ESTUDIO. VERTEDERO DE MERUELO	32
2.4.1.	Descripción del vertedero	33
2.4.2.	Selección de parámetros.....	36
2.4.3.	Ensayo y mediciones en campo	38
2.4.4.	Resultados	41
3.	CONCLUSIONS AND FUTURE RECOMMENDATIONS.....	46
3.1.	CONCLUSIONS	46
3.2.	FUTURE RECOMMENDATIONS	47
4.	NOMENCLATURA.....	48
5.	BIBLIOGRAFIA	49
6.	ANEXOS	53

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tendencia general de las emisiones de metano de un vertedero desde la apertura hasta años posteriores del cierre.	5
Figura 2. Fases del proceso de formación de biogás en un vertedero de residuos sólidos.	6
Figura 3. Esquema conceptual de las diferentes vías de escape del biogás generado en un vertedero	10
Figura 4. Árbol de decisión para las emisiones de CH ₄ provenientes de los sitios de eliminación de los desechos sólidos	15
Figura 5. Diagrama de bloques general del Modelo IPCC (2006) correspondiente al nivel 1.	16
Figura 6. Parámetros del modelo IPCC 2006 revisados en este trabajo (área color blanco) y condiciones de las que dependen (área color azul).	16
Figura 7. Diagrama de bloques general del Modelo IPCC (2006) correspondiente al nivel 3.	17
Figura 8. Análisis de sensibilidad de alguno de los parámetros más importantes del modelo a partir de datos para el año 2017 del vertedero estudiado.	25
Figura 9. Diagrama de flujo de las operaciones matemáticas que realiza la herramienta de cálculo una vez que el usuario introduce los valores de entrada.	28
Figura 10. Captura de la hoja de cálculo. Introduccion de los datos correspondientes a el lugar donde se encuentra instalado el vertedero de estudio	29
Figura 11. Captura de la hoja de cálculo. Introduccion de los datos correspondientes a las toneladas depositadas en el vertedero de cada clase de residuo en un año en concreto. 30	
Figura 12. Captura de la hoja de cálculo. Introduccion de los datos correspondientes a los metros cúbicos del biogás captado, el quemado en antorcha y el porcentaje de metano del biogás captado.....	30
Figura 13. Captura de la hoja de cálculo. Parámetros por defecto que usa la hoja de cálculo como resultado de la revisión y actualización del Apartado 2.2	31
Figura 14. Captura de la hoja de cálculo. Metano captado y el total de las emisiones difusas de metano en toneladas para cada año.....	31
Figura 15. Esquema de explotación de la primera fase del vertedero de estudio. Celdas de vertido	34
Figura 16. Secciones tipo del sistema de drenaje inferior en las celdas del vertedero estudiado	34

Figura 17. Imagen de la situación actual del vertedero de Meruelo (2018). Imagen tomada en una de las visitas de campo realizadas.	35
Figura 18. Representación de la superficie total del vertedero a partir de las líneas de nivel	39
Figura 19. Comparación de emisiones de metano en el vertedero de estudio en gigagramos por año. “modelo actual” vs “Modelo nuevo”	41
Figura 20. Desviación del modelo actual y de los diferentes escenarios del modelo actualizado con respecto al resultado obtenido en las mediciones de campo.....	43
Figura 21. Límites temporales de estudio para cada uno de los modelos y escenarios propuestos teniendo en cuenta el sellado completo del vertedero realizado 2011.	44

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición y generación de residuos en España (2006) (Gobierno de España. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2009)	3
Tabla 2. Composición típica del gas de vertedero (biogás), porcentaje en volumen de cada componente y características (Tchobanoglous y cols., 1994) (CAMEO Chemicals, 2018).	7
Tabla 3. Valores de la constante de velocidad de generación de metano (k).	18
Tabla 4. Valor del parámetro MCF en función del tipo de vertedero.....	21
Tabla 5. Valores de DOC para las diferentes clases de residuo de la hoja de cálculo de la Directiva IPCC (drcha.) y según la clasificación de la nueva hoja de cálculo creada (izq.)	21
Tabla 6. Composición en porcentaje de peso del rechazo de compostaje	22
Tabla 7. Estimación de DOCF para componentes de desechos (papel, madera, alimentos y recortes de jardín) utilizando los resultados de las pruebas BMP.	23
Tabla 8. Comparación de los parámetros usados actualmente con los parámetros actualizados propuestos y su contribución en las emisiones totales de metano en porcentaje para un año en concreto.....	36
Tabla 9. Emisión total anual calculada para cada una de las campañas realizadas	40
Tabla 10. Emisión media ponderada utilizando los valores obtenidos para las tres campañas.....	40
Tabla 11. Toneladas de metano emitido a la atmosfera en el vertedero de Meruelo durante el año 2016 según las medidas de campo y la estimación con modelos.....	42
Tabla 12. Toneladas de metano emitido durante el año 2016 estimadas con los diferentes modelos y medidas de campo	44

INDICE DE ANEXOS

ANEXO I. Clasificación de residuos usada en la herramienta de cálculo en base al código correspondiente en la lista europea de residuos.....	53
--	----

1. PLANTEAMIENTO

1.1. OBJETIVO

El objetivo específico de este Trabajo de Fin de Máster es desarrollar una herramienta de cálculo en formato Excel que permite la evaluación de las emisiones de metano a la atmósfera que provienen de vertederos de residuos sólidos urbanos. Esta herramienta está basada en el modelo matemático propuesto por la directiva IPCC 2006 y unos parámetros actualizados en base a los avances experimentales en la caracterización de residuos.

Además, se realiza un caso de estudio para la aplicación de la herramienta de cálculo en un vertedero situado en el norte de España y se lleva a cabo la comparación de los resultados de las mediciones de campo del vertedero estudiado con los resultados del modelo que se aplica en la actualidad y la nueva herramienta de cálculo creada.

1.2. LEGISLACIÓN APLICABLE

Actualmente en España la legislación vigente por la que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, es el Real Decreto 1481/2001, de 27 de Diciembre.

Dicho Real Decreto es la transposición al ordenamiento jurídico español de la Directiva 1999/31/CE, del Consejo, de 26 de Abril, relativa al vertido de residuos, la cual establece un régimen concreto para la eliminación de los residuos mediante su depósito en vertederos.

Los aspectos básicos de dicha legislación es la categorización de los vertederos en tres categorías, la definición de los tipos de residuos aceptables en cada una de dichas categorías, el establecimiento de una serie de requisitos técnicos exigibles a las instalaciones, la obligación de gestionar los vertederos después de su clausura y una nueva estructura e imputación de los costes de las actividades de vertido de residuos. Recientemente, la Directiva 1999/31/CE ha sido modificada de la Directiva 2018/850 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de Mayo de 2018, para reforzar los objetivos establecidos en la anterior directiva del Consejo que imponen restricciones al depósito en vertederos, a fin de que reflejen mejor la ambición de la Unión de avanzar hacia una economía circular.

En el marco de la Ley 22/2011, de 28 de Julio, de residuos y suelos contaminados, y demás normativa aplicable, particularmente la legislación sobre prevención y control integrados de la contaminación, el Real Decreto 1481/2001 establece el régimen jurídico aplicable a las actividades de eliminación de residuos mediante su depósito en vertederos. Asimismo, delimita los criterios técnicos mínimos para su diseño, construcción, explotación, clausura y mantenimiento. También aborda la adaptación de los vertederos existentes a las exigencias del Real Decreto y los impactos ambientales a considerar en la nueva situación.

Una de las conclusiones básicas a partir de la Ley 22/2011, de residuos y suelos contaminados, es la necesidad de que cada Comunidad Autónoma elabore un Plan de Residuos a su medida, que, desde una referencia global e integradora, propicie la redacción de unos Planes Sectoriales y políticas comunes para todos los residuos concluyéndose, de esa forma, con la dispersión planificadora existente hasta este momento. Así, en Cantabria, la planificación en materia de residuos ha venido inicialmente fijada por el Plan de Residuos de Cantabria 2006-2010 y, desde el año 2010, por los Planes Sectoriales de Residuos de Cantabria, que contenían los principios, directrices y medidas necesarias para lograr una adecuada gestión de los Residuos Municipales, del Sector Primario, Sanitario y Veterinario, Residuos Industriales, Peligrosos, RCD y Mineros y Residuos Especiales para el período 2010-2014. La finalización de su periodo de vigencia y prórroga, así como los cambios legislativos acontecidos, se han incorporado al vigente Plan de Residuos de la Comunidad Autónoma de Cantabria 2017-2023 como instrumento de ordenación.

Este nuevo Plan de Residuos, presenta naturaleza integradora, tratando en un solo texto la totalidad de los flujos de residuos generados en la Comunidad Autónoma y amparados por la Ley 22/2011, de 28 de Julio, haciendo especial hincapié en los aspectos ambientales, económicos y sociales. Este plan se plantea como un instrumento que dé continuidad a los anteriores planes y dota a Cantabria de herramientas para cumplir con los objetivos establecidos en la legislación y en el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos, aprobado en Noviembre de 2015, para el periodo que abarca del año 2016 al año 2022.

Se espera que el desarrollo de dicho plan, así como la aplicación de las disposiciones sobre información incluidas en la Ley 22/2011, en particular la puesta en marcha del Registro de Producción y Gestión, y la transmisión electrónica de la información, contribuirán a mejorar significativamente la información sobre producción y gestión de todos los flujos de residuos, a mejorar la trazabilidad de la recogida y tratamiento y a facilitar la inspección y el control.

1.3. ESTADO DEL ARTE

1.3.1. Vertederos controlados de residuos sólidos

Un vertedero controlado es una instalación para el almacenamiento de residuos en superficie o subterráneo por tiempo indefinido en condiciones de total seguridad para el medio ambiente, provisto de las medidas constructivas y de control oportunas para garantizar que no se produzca la contaminación del medio. Así, los criterios específicos de diseño para la construcción y explotación de un vertedero controlado estarán encaminados a minimizar y controlar la posibilidad de contacto entre la carga contaminante contenida en los residuos y el entorno circundante.

El depósito de residuos sólidos en vertederos controlados constituye el principal sistema de tratamiento de estos residuos en España, con un porcentaje, en 2016, del 56,6% sobre el total de residuos tratados. Cabe señalar que de este porcentaje prácticamente un 58% son rechazos de otras instalaciones de tratamiento donde se tratan previamente los residuos, principalmente retirando y/o bioestabilizando la fracción orgánica. En este contexto, conviene destacar que la Directiva 2018/850 plantea como objetivo para el 2035

reducir a un 10% la cantidad de residuos municipales gestionados en vertedero, incluyendo los rechazos de otras plantas.

El control ambiental del vertedero es fundamental para garantizar el equilibrio de los ecosistemas y la protección del medio ambiente. Desde este punto de vista, la correcta gestión del lixiviado y del biogás producido en las operaciones habituales desarrolladas en la instalación resulta crucial. Cabe destacar que la producción de biogás depende en gran medida del tipo de residuo depositado, por tanto, el conocimiento de la composición de los desechos es determinante en la estimación del biogás generado.

1.3.1.1. Composición de los residuos

Residuos sólidos urbanos (RSU) es el nombre que se le da a la mezcla heterogénea de residuos domiciliarios, comerciales, algunos industriales y de origen urbano. La fracción y la composición de residuos de diferentes orígenes sólo se puede obtener a partir de una minuciosa caracterización de dichos residuos (Gobierno de España. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2009)

La composición de los residuos es muy variable y en ella influyen factores muy diversos (económicos, sociales, ambientales):

- Las características de la población: urbana o rural, con grandes áreas residenciales, turística o industrial, etc.
- La época de producción de los residuos: el clima y las estaciones influyen en la composición de los RSU.
- El nivel social de la población: a mayor nivel social, mayor producción de residuos.
- Los hábitos de consumo de la población.

A modo de ejemplo, la Tabla 1 muestra los datos de generación y composición de residuos en España recogidos en el Plan Nacional integral de Residuos 2008-2015.

Tabla 1. Composición y generación de residuos en España (2006) (Gobierno de España. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2009).

<i>Componente</i>	<i>Composición media (%)</i>	<i>Generación (2006) (t/año)</i>
Materia orgánica	48,9	11.222,8
Papel-cartón	18,5	4.245,8
Plástico	11,7	2.685,2
Vidrio	7,6	1.744,2
Metales férricos	2,5	573,7
Metales no férricos	1,6	367,2
Madera	0,6	137,7
Textiles	3,7	849,1
Celulosa	2,0	459,0
Otros	2,9	665,5
Totales	100	22.950,6

La fracción orgánica de los residuos sólidos municipales en el vertedero se descompone principalmente en metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O) a través de una serie de reacciones bioquímicas. Mientras el agua desciende a través de las capas de desechos en el vertedero, formando "lixiviado", el metano y dióxido de carbono junto con otros gases, migran mayoritariamente a la cubierta del vertedero, formando "Gas de vertedero" (LFG), también llamado biogás.

Por tanto, el conocimiento de la composición de los residuos sólidos urbanos es necesario, ya que la producción de biogás depende de su contenido en materia orgánica y del origen de esta. El papel y el cartón y, en general, todos los derivados de la madera, forman un grupo de residuos orgánicos de lenta degradación. Esto se debe a que presentan en su composición química moléculas orgánicas no solubles en agua, y para ser degradadas biológicamente, es necesaria su hidrólisis previa. Por otro lado, los restos de comida, así como los lodos de EDAR forman el grupo de residuos orgánicos de degradación rápida y los otros orgánicos (no alimentos) y los residuos de parques y jardines forman el grupo de residuos de degradación intermedia. El resto, vidrio, metales, cenizas, trapos, etc. se consideran materiales no biodegradables.

1.3.1.2. Problemática ambiental

Las inevitables consecuencias de la práctica de la eliminación de residuos sólidos en vertederos son la generación de gases y lixiviados debido principalmente a la descomposición microbiana, las condiciones climáticas, las características de los desechos y las operaciones de vertido. La migración de gas y lixiviados fuera de los límites del vertedero y su liberación en el entorno circundante presenta serias preocupaciones ambientales tanto en las instalaciones existentes como en las nuevas (El-Fadel y cols., 1997). Además de posibles riesgos para la salud, estas preocupaciones incluyen otras de carácter medioambiental. Principalmente incendios y explosiones, daños a la vegetación, olores desagradables, asentamiento de vertederos, producción de lixiviado, contaminación del aire y calentamiento global.

En relación a los impactos ambientales provocados por los lixiviados, el principal es la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas. Los efectos que produce en las aguas superficiales son:

- El agotamiento del oxígeno en parte de las aguas superficiales
- La asfixia de las crías de peces debido a la acumulación de sustancias oxidantes del hierro en las branquias
- Alteraciones en la flora y fauna del fondo y toxicidad del amoníaco para los peces

Una correcta ubicación del vertedero, así como un control cuidadoso del lixiviado y de la evacuación de las aguas, pueden prevenir los casos de contaminación de las aguas superficiales por el lixiviado.

El impacto de los vertederos en el cambio climático radica en sus emisiones de CO_2 y CH_4 , junto con varios otros componentes gaseosos. Estos gases son el subproducto de la descomposición anaeróbica de los residuos orgánicos, característicos de los vertederos convencionales, y tienden a acumularse en el vertedero (USEPA, 1998). Solo se tiene en cuenta el CH_4 en la estimación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)

procedentes de vertederos y no de CO_2 a pesar de su potencial de calentamiento global (GWP) de acuerdo a los criterios establecidos (IPCC, 2006). Esto se debe al consenso general de que el CO_2 proveniente de la descomposición de desechos es de origen biogénico y, por lo tanto, no aumenta las emisiones globales de GEI que contribuyen al calentamiento global (IPCC, 2006).

Hay dos etapas de vida en un vertedero, su etapa operativa, donde se desechan los residuos sólidos urbanos y su etapa de clausura, donde se completa la capacidad de almacenamiento. Los vertederos en funcionamiento emiten más CH_4 que los vertederos cerrados debido a que la mayor parte de la degradación se produce en los primeros años después de la eliminación con tasas de emisión decrecientes con el tiempo después del cierre. Tras el cierre, un vertedero sigue emitiendo GEI, posiblemente durante varios cientos de años. La tendencia general de las emisiones de GEI de los vertederos se puede ver en la Figura 1. Se puede observar en la Figura 1 que incluso si los vertederos fueran eliminados en este momento, la emisión de CH_4 en los vertederos actuales seguirá existiendo durante muchos años. Por lo tanto, los gerentes de vertederos de hoy se enfrentan al desafío de gestionar con las emisiones de GEI de vertederos actuales y antiguos (Lou y Nair, 2009).

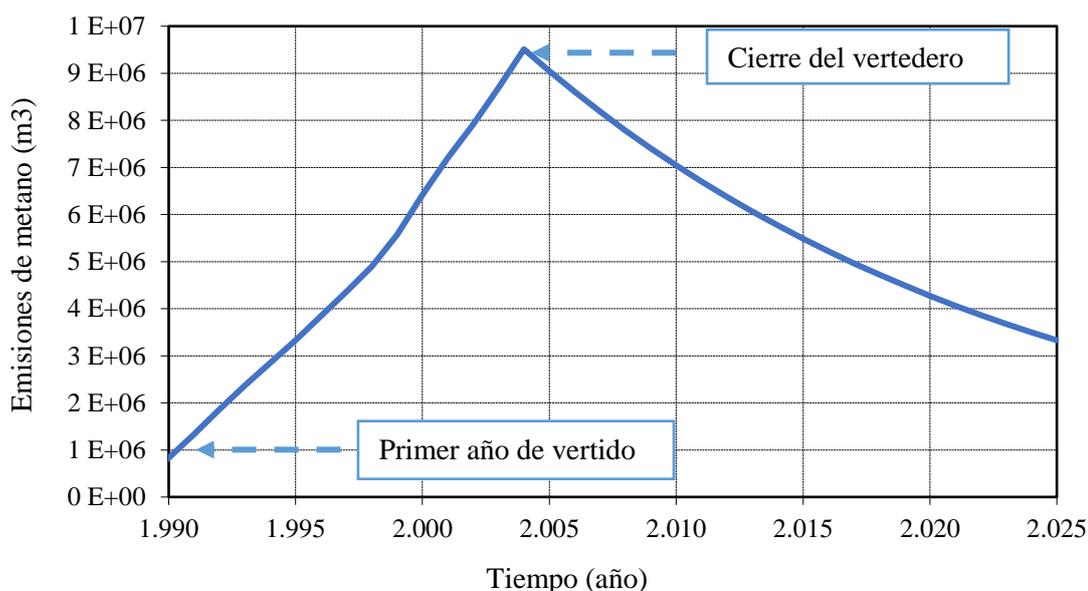


Figura 1. Tendencia general de las emisiones de metano de un vertedero desde la apertura hasta años posteriores del cierre.

1.3.2. Gas de vertedero de residuos sólidos (biogás)

El gas de vertedero o biogás se produce como resultado de una secuencia de procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren dentro de un vertedero (Faour y cols., 2007).

El biogás está formado principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Ambos gases contribuyen del efecto invernadero, sin embargo, como se ha comentado anteriormente, cuando el origen de las emisiones es un vertedero, el dióxido de carbono emitido no se contabiliza al ser de origen biogénico. Por otro lado, el metano presenta un potencial de calentamiento entre 28 y 36 veces superior al del dióxido de carbono.

Cuando los residuos sólidos urbanos (RSU) se depositan por primera vez en un vertedero, se produce un proceso de descomposición aeróbica (con oxígeno) generándose poco metano. Posteriormente, en menos de 1 año, se establecen las condiciones anaerobias y las bacterias comienzan a descomponer los desechos y generar metano. La Figura 2 ilustra los cambios en la composición típica de gas de vertedero a lo largo del tiempo (USEPA, 2017).

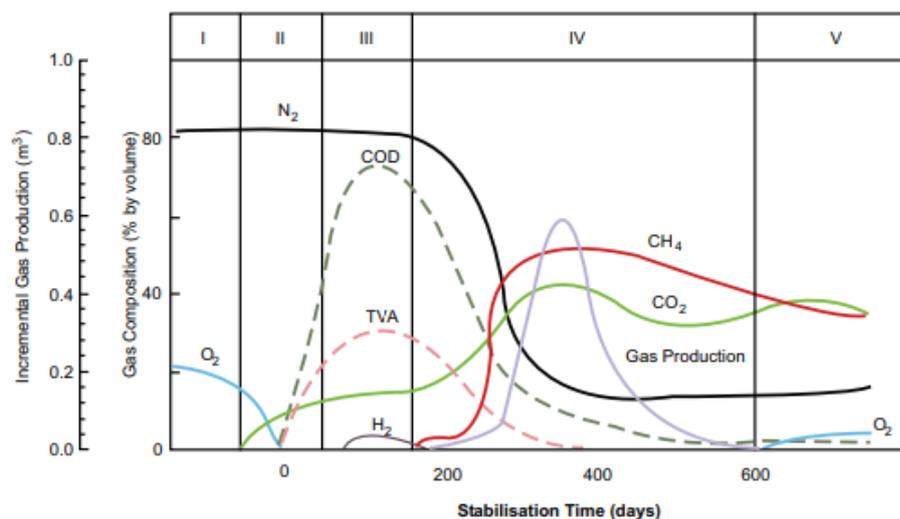


Figura 2. Fases del proceso de formación de biogás en un vertedero de residuos sólidos (ATSDR, 2001a).

Como los vertederos admiten residuos durante un periodo de tiempo comprendido normalmente entre los 8 y los 20 años, los residuos depositados suelen experimentar diferentes fases de descomposición a la vez. Es decir, los residuos más antiguos de una determinada zona se pueden encontrar en una fase de descomposición distinta a la de los residuos más recientes depositados en otra zona. La duración de cada una de las fases de degradación, así como las características del biogás producido, varía con las condiciones existentes en cada vertedero.

En la fase I, las bacterias aeróbicas descomponen las largas cadenas moleculares de carbohidratos, proteínas y lípidos que se encuentran en los desechos con contenido orgánico en los vertederos en presencia de oxígeno disponible, esta fase puede durar días o meses hasta que se agote el oxígeno total. Los productos finales de esta fase son CO₂, calor y agua. El contenido de nitrógeno es alto, pero se irá descomponiendo a medida que la fase continúa.

El proceso de descomposición continúa hasta la fase II, que comienza después de que se agota el oxígeno contenido entre los residuos depositados en el vertedero. En este proceso anaeróbico, las bacterias comienzan a producir ácido acético, láctico y fórmico y alcoholes tales como metanol y etanol. Los ácidos presentes en los desechos se combinan con la humedad y hace que ciertos nutrientes se disuelvan produciendo compuestos químicos como nitrógeno y fósforo en el vertedero. Entonces se generan dióxido de carbono e hidrógeno como productos finales, si el vertedero se ve afectado y entra aire, la fase II se remonta al proceso de la fase I.

La fase III es principalmente donde comienza el proceso de metanogénesis. Las bacterias anaeróbicas usan el ácido generado en la fase II para formar acetato y las bacterias productoras de metano comienzan a emerger.

La fase IV es cuando ha llegado el momento del equilibrio, lo que hace que la tasa de producción y la composición sean constantes. Aproximadamente 45% - 60% de CH₄, 40% - 60% de CO₂ y 2% - 9% de otros gases son producidos. Esto puede continuar por un período de 20 años después del cierre del vertedero.

Finalmente, el proceso de descomposición alcanza la fase V en la que se reducen las emisiones de biogás (Njoku y cols., 2018).

A pesar de que la distribución porcentual exacta variará según la edad del vertedero, la composición de los residuos y otros factores, la distribución porcentual más habitual de los gases que se encuentran en un vertedero, así como sus características quedan recogidas en la Tabla 2. Estas composiciones son las correspondientes a la fase IV, fase en la que se llega al equilibrio.

Tabla 2. Composición típica del gas de vertedero (biogás), porcentaje en volumen de cada componente y características (Tchobanoglous y cols., 1994) (CAMEO Chemicals, 2018).

Componente	Porcentaje en volumen	Características
Metano	45 - 60	El metano es un gas incoloro e inodoro. Los vertederos son la fuente más grande de emisiones de metano antropogénicas en Europa.
Dióxido de carbono	40 - 60	El dióxido de carbono se encuentra naturalmente en pequeñas concentraciones en la atmósfera (0,03%). Es incoloro, inodoro y ligeramente ácido.
Nitrógeno	2 - 5	El nitrógeno comprende aproximadamente el 79% de la atmósfera. Es inodoro, insípido e incoloro.
Oxígeno	0,01 - 0,6	El oxígeno comprende aproximadamente el 21% de la atmósfera. Es inodoro, insípido e incoloro.
Amoniaco	0 - 1	El amoníaco es un gas incoloro con un olor acre.

NMOCs (non-methane organic compounds)	0,1 - 0,6	Los NMOC son compuestos orgánicos (es decir, compuestos que contienen carbono). (El metano es un compuesto orgánico, pero no se considera un NMOC). Los NMOC pueden ocurrir de forma natural o formarse mediante procesos químicos sintéticos. Los NMOC que se encuentran con más frecuencia en los vertederos incluyen acrilonitrilo, benceno, 1,1-dicloroetano, dicloroetileno 1,2-cis, diclorometano, sulfuro de carbonilo, etilbenceno, hexano, metil etil cetona, tetracloroetileno, tolueno, tricloroetileno, cloruro de vinilo y xilenos. .
Sulfuros	0 - 1	Los sulfuros (por ejemplo, sulfuro de hidrógeno, sulfuro de dimetilo) son gases generados de forma natural que le dan a la mezcla de gases del vertedero su olor a huevo podrido. Los sulfuros pueden causar olores desagradables incluso a concentraciones muy bajas.
Hidrogeno	0 - 0,2	El hidrógeno es un gas incoloro e inodoro.
Monóxido de carbono	0 - 0,2	El monóxido de carbono es un gas incoloro e inodoro.

1.3.2.1. Factores que afectan la producción de biogás

Existen numerosos factores que influyen tanto en la cantidad de biogás generado como en la velocidad de formación o en su composición. A continuación, se desarrollan brevemente algunas de las variables principales que influyen en la generación del biogás en vertederos de RSU (García y cols., 2013) (Martín González, 1999) (ATSDR, 2001b).

Composición de desechos. Mientras más desecho orgánico presente un vertedero, más gas de vertedero se produce por la descomposición bacteriana. Algunos tipos de desechos orgánicos contienen nutrientes, como sodio, potasio, calcio y magnesio que ayudan a las bacterias a desarrollarse. Cuando estos nutrientes están presentes, la producción de gas de vertedero aumenta. Alternativamente, algunos desechos contienen compuestos que dañan las bacterias y provocan la producción de menos gases. Por ejemplo, las bacterias productoras de metano pueden inhibirse cuando los desechos tienen altas concentraciones de sal.

Oxígeno en el vertedero. El gas metano comienza a ser producido por las bacterias anaerobias solo cuando el oxígeno en el vertedero es consumido por las bacterias

aeróbicas; por lo tanto, cualquier cantidad de oxígeno restante en el vertedero reducirá la producción de metano.

Mientras más oxígeno presente en un vertedero, más larga es la descomposición aeróbica de las bacterias representada como la fase 1 en la Figura 2. Si los desechos se entierran o alteran con frecuencia, hay más oxígeno disponible, de modo que las bacterias dependientes del oxígeno viven más tiempo y producen dióxido de carbono y agua durante períodos más largos. Sin embargo, si los residuos están muy compactados, la producción de metano comenzará antes, ya que las bacterias aeróbicas son reemplazadas por bacterias anaeróbicas productoras de metano representadas en la fase III de la Figura 2.

Contenido de humedad. La presencia de una cierta cantidad de agua en un vertedero aumenta la producción de gas porque la humedad fomenta el crecimiento bacteriano y transporta nutrientes y bacterias a todas las áreas dentro de un vertedero. Un contenido de humedad del 40% o superior, basado en el peso húmedo de los desechos, promueve la producción máxima de gas (por ejemplo, en un vertedero cubierto). La compactación de los residuos ralentiza la producción de gas porque aumenta la densidad del contenido del vertedero, disminuyendo la velocidad a la que el agua puede infiltrarse en los desechos. La tasa de producción de gas es más alta si las lluvias intensas y / o las cubiertas permeables al vertedero introducen agua adicional en un vertedero.

Temperatura. Las temperaturas cálidas aumentan la actividad bacteriana, que a su vez aumenta la tasa de producción de gas de vertedero. Por lo general, la actividad bacteriana cae dramáticamente por debajo de 10 °C. Los cambios climáticos tienen un efecto mucho mayor en la producción de gas en vertederos poco profundos. Esto se debe a que las bacterias no están tan aisladas de los cambios de temperatura en comparación con los vertederos profundos donde una capa gruesa de tierra cubre los desechos. Un vertedero generalmente mantiene una temperatura estable, maximizando la producción de gas. La actividad bacteriana libera calor, estabilizando la temperatura de un vertedero entre 25 °C y 45 °C, aunque se han observado temperaturas de hasta 70 °C. Los aumentos de temperatura también promueven la volatilización y las reacciones químicas.

Historial de deposición. Casi todo el gas se produce dentro de los 20 años posteriores a la descarga de los desechos; sin embargo, pequeñas cantidades de gas pueden continuar siendo emitidas desde un vertedero por 50 o más años. Los vertederos generalmente producen cantidades apreciables de gas dentro de 1 a 3 años y la producción pico de gas generalmente ocurre de 5 a 7 años después de que se depositan los desechos, por tanto, los residuos depositados recientemente producirán más gas que los residuos más antiguos. Diferentes partes del relleno sanitario pueden estar en diferentes fases del proceso de descomposición al mismo tiempo, dependiendo de cuándo se colocaron originalmente los desechos en cada área. La cantidad de material orgánico en los desechos es un factor importante en la duración de la producción de gas.

Los aspectos anteriores difieren significativamente entre las diferentes localizaciones de los vertederos. Como resultado, la cantidad de biogás generado por tonelada de residuos y la velocidad de formación también varían de forma significativa. Por tanto, la predicción de la generación de biogás está sujeta a una gran incertidumbre.

1.3.3. Modelo de estimación de emisiones

El modelado de gas de vertedero es la práctica de pronosticar la generación y recuperación de gas en base a los historiales de eliminación de desechos pasados, previsiones futuras y las estimaciones de la eficiencia del sistema de recolección. Es un paso importante en el proceso de desarrollo de un proyecto de recuperación de gas de vertedero porque proporciona una estimación de la cantidad de biogás recuperable que se generará a lo largo del tiempo. El modelado de gas de vertedero se realiza con fines regulatorios y no regulatorios. (USEPA, 2017). Las aplicaciones no regulatorias de los modelos de biogás generalmente incluyen cualquiera de los siguientes:

- Evaluar la viabilidad de un proyecto de energía de biogás.
- Determinación de los requisitos de diseño del sistema de recolección y control de gases.
- Realización de evaluaciones de diligencia debida del rendimiento potencial o real del proyecto.

Con fines regulatorios, como se ha revisado en el marco legal (Apartado 1.2), es obligatorio el disponer de un valor anual para las emisiones de metano en el vertedero por ser un gas de efecto invernadero de origen antropogénico que tiene que ser reportado en el inventario anual de emisiones de efecto invernadero elaborado por el Sistema Español de Emisiones, así como por el E-PRTR. Además, el hecho de que sea obligatorio disponer de un sistema de recuperación del gas de vertedero hace imprescindible conocer con la mínima incertidumbre posible la generación potencial de biogás en el vertedero.

El siguiente esquema muestra las diferentes fuentes de emisión:

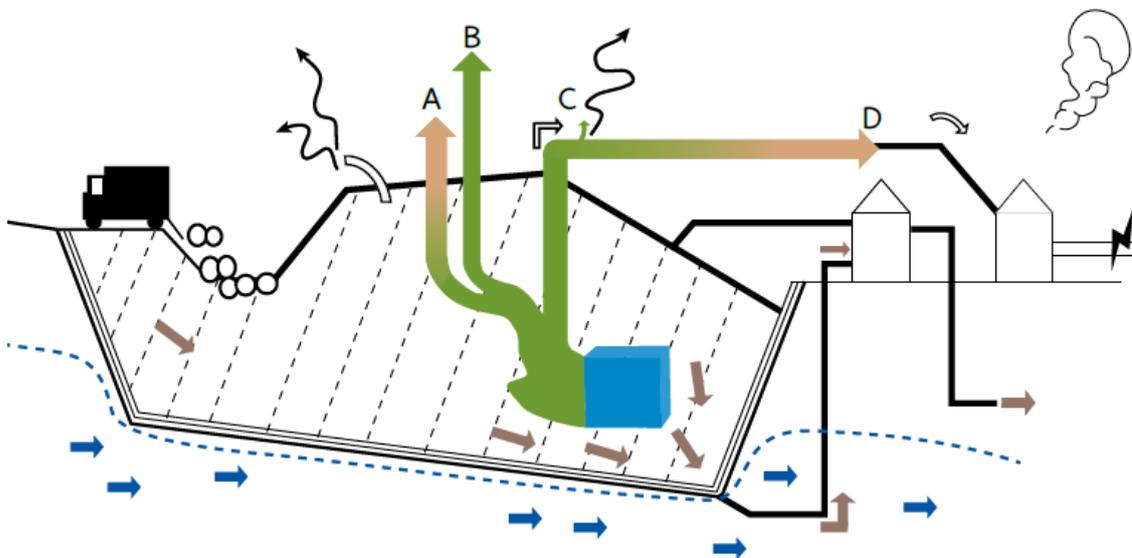


Figura 3. Esquema conceptual de las diferentes vías de escape del biogás generado en un vertedero. (ASEGRE, 2010)

Donde:

A: El gas se oxida dentro de la capa de cobertura y migra a la atmósfera: únicamente CO₂.

B: Difusión del gas de vertedero a la atmósfera: CO₂ y CH₄.

C: Fuga en el sistema de recogida de gas del vertedero: CO₂ y CH₄.

D: Eliminación o valorización del gas en una turbina o en una caldera: CO₂.

Por tanto, el cálculo de las emisiones de metano se puede aproximar al siguiente balance de masa:

$$\text{Emisiones} = \text{Generación} - \text{Captación} - \text{Oxidación}$$

Donde la generación de metano se calcula como

$$\text{Generación de metano} = \text{Generación gas de vertedero} * \text{Contenido de metano}$$

Cuando se modelan las emisiones de metano, la mayoría de las discusiones tratan de modelar la generación de metano o la formación de gas de vertedero. Modelar la oxidación ha recibido menos atención. En la mayoría de los casos, se supone que el 10% del flujo de metano a través de la capa superior se oxida. Sin embargo, más recientemente se están desarrollando otras formas de estimar la oxidación, que consideran que la oxidación representa el 10-36 % del flujo de metano (Oonk, 2010).

Los gases de efecto invernadero capturados se calculan mediante la lectura de los caudalímetros del sistema de recogida de gas y analizando su composición. Sin embargo, calcular las emisiones difusas tiene sus limitaciones debido a la dificultad de determinar, en campo, la cantidad de gas emitido a la atmósfera. De hecho, se pueden hacer mediciones de las emisiones difusas, pero su ejecución es cara, compleja y no del todo precisa. Para solucionar este problema, diversas investigaciones han desarrollado modelos que permiten estimar las emisiones de gas de los vertederos (Majdinasab y cols., 2017). Generalmente, el modelado de la generación de biogás se puede lograr utilizando los modelos siguientes:

Modelo de orden cero: la generación de biogás es constante en el tiempo. La edad de los residuos no está incluida en el modelo.

Modelo de primer orden: la generación de biogás decrece exponencialmente.

Modelo modificado de primer orden: se considera un tiempo de desfase en la generación de biogás. Inicia lentamente para luego crecer hacia un pico que decrece exponencialmente, como en el modelo de primer orden.

Modelo multifase de primer orden: se consideran diferentes fracciones de residuos y diferentes tasas de producción.

Modelos de segundo orden: describen las complejas reacciones que ocurren durante la degradación de los residuos, a partir de reacciones de primer orden con diferentes tasas.

Oonk y Boom (1995) estudiaron la eficiencia de predicción de modelos de cero, primera, multifase y de segundo orden utilizando datos de generación de gas de 9 vertederos holandeses. El estudio concluyó que el modelo multifásico describe mejor la generación de biogás con un error relativo del 18 por ciento, seguido de los modelos de segundo y

primer orden, cada uno con un error relativo del 22 por ciento y el orden cero como el menos confiable con un relativo error del 44 por ciento. Oonk y Boom (1995) utilizaron la ecuación de primer orden multifásica clasificando los residuos en 3 categorías (desechos de degradación lenta, moderada y rápida). Sin embargo, los autores comentaron que una mayor división de los desechos puede ayudar a mejorar el rendimiento del modelo (Oonk y Boom, 1995).

Dos de los modelos multifase de primer orden más usados son el modelo de generación de gas de vertedero de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los EE. UU. (LandGEM), y el modelo de generación de metano del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), respectivamente. EPA 2005, IPCC 2006) (Karanjekar, 2012).

El Modelo IPCC fue lanzado en 2006 y tiene varias características que lo hacen más adecuado que LandGEM para evaluar los vertederos en todo el mundo, incluyendo la aplicación de cálculos de descomposición de primer orden para diferentes categorías de desechos orgánicos con tasas de descomposición variables. El modelo fue desarrollado para que los países puedan estimar las emisiones de metano de la eliminación de desechos utilizando las tasas regionales de generación de desechos per cápita y las estimaciones de población, con deducciones para la captación y oxidación de biogás en la superficie. A pesar de que fue diseñado para estimar la generación de metano de países enteros, el Modelo del IPCC puede modificarse para estimar la generación de vertederos específicos (GMI, 2012). La metodología estándar de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero para proyectos de vertederos que buscan el registro bajo el Clean Development Mechanism (CDM), se deriva del Modelo del IPCC, y utiliza los mismos parámetros y cálculos que los propuestos en la directiva. Además, En la última revisión sobre la metodología de estimación de emisiones procedentes del depósito de residuos sólidos en vertederos controlados (Sistema Español de Inventario de Emisiones, 2018) hace referencia al modelo IPCC 2006 como modelo de estimación de emisiones de metano a la atmósfera.

1.3.3.1. Ecuaciones matemáticas

En el modelo IPCC 2006, la cantidad de metano generado por la eliminación de residuos en el vertedero se calcula en base a un modelo de descomposición de primer orden (FOD). El modelo diferencia entre los diferentes tipos de residuos con sus respectivas tasas constantes de descomposición (k) y fracciones de carbono orgánico degradable (DOC). El modelo calcula la generación de metano que ocurre en el año basado en las corrientes de cada tipo de desechos (W) depositados en el vertedero durante un período de tiempo específico (años o meses) (CDM, 2011). Una parte del CH_4 generado se oxida en la cubierta de los vertederos o puede recuperarse para obtener energía o la quema en antorcha. La cantidad de CH_4 realmente emitido, calculado en la Ecuación (1), a partir de los residuos depositados en el vertedero será, por lo tanto, inferior a la cantidad generada (Penman y cols., 2000). El CH_4 recuperado debe restarse de la cantidad de CH_4 generada. Sólo la fracción de CH_4 que no se recupera está sujeta a la oxidación en la capa de la cubierta del vertedero.

$$CH_4 \text{ emitido}_T = \left(\sum_x CH_4 \text{ generado}_{x,T} - R_T \right) * (1 - OX_T) \quad (1)$$

Donde:

Emisiones de CH₄ = CH₄ emitido durante el año T, Gg

T = año del inventario

x = categoría o tipo de desecho y/o material

R_T = CH₄ recuperado durante el año T, Gg

OX_T = factor de oxidación durante el año T, fracción

Las ecuaciones para estimar el potencial de generación de CH₄ se muestran a continuación.

El DDOCm correspondiente a la cantidad depositada de cada tipo de residuo (W) en un año (T), se calcula mediante la Ecuación (2) y es igual al producto de la fracción de carbono orgánico degradable en el desecho (DOC), la fracción del carbono orgánico degradable que se descompone en condiciones anaeróbicas (DOCf), y la porción del desecho que se descompondrá en condiciones aeróbicas (antes de que las condiciones se vuelven anaeróbicas) en el vertedero, que se interpreta con el factor de corrección de metano (MCF). (Machado y cols., 2009)

$$DDOCmd_T = W_T * DOC * DOCf * MCF \quad (2)$$

Donde:

DDOCm = Cantidad de carbono orgánico degradable que se puede descomponer de un residuo, Gg

DDOCmd_T = DDOCm depositado en los SEDS durante el año T, Gg

W = masa de los desechos depositados, Gg

DOC = carbono orgánico degradable, fracción, Gg de C/Gg de desechos

DOCf = fracción del DDOC que puede descomponerse, fracción

MCF = Factor de corrección de CH₄ para la descomposición aeróbica durante el año de deposición, fracción

Cuando se conoce la cantidad de material en descomposición en el vertedero al comienzo del año, en el método de estimación, cada año puede considerarse como el año 1 y los cálculos básicos de primer orden pueden efectuarse de manera simple con las Ecuaciones (3) y (4), donde la reacción de descomposición comienza el 1° de enero de cada año posterior a la eliminación (deposición de residuo en vertedero).

$$DDOCma_T = DDOCmd_T + DDOCma_{T-1} * e^{-k} \quad (3)$$

$$DDOCm_{decomp_T} = DDOCma_{T-1} * (1 - e^{-k}) \quad (4)$$

Donde:

T = año del inventario

DDOC_{maT} = DDOCm acumulado en los SEDS al final del año T, Gg

DDOC_{maT-1} = DDOCm acumulado en los SEDS al final del año (T-1), Gg

DDOCm descomp_T = DDOCm descompuesto en los SEDS durante el año T, Gg

k = constante de reacción

Para determinar la generación de CH₄ formada a partir de la cantidad de carbono orgánico degradable que se puede descomponer (DDOCm), se multiplica la fracción de CH₄ contenida en el gas de vertedero generado por el cociente de pesos moleculares CH₄/C.

$$CH_4 \text{ generado}_T = DDOCm \text{ descomp}_T * F * \frac{16}{12} \quad (5)$$

Donde:

CH₄ generado_T = cantidad CH₄ generado a partir del material en descomposición

DDOCm descomp_T = CH₄ descompuesto durante el año T, Gg

F = fracción volumétrica de CH₄ en el gas de vertedero generado (fracción)

16/12 = cociente de pesos moleculares CH₄/C (cociente)

Una vez calculado la cantidad de metano generado durante un año determinado de cada tipo de residuo tenido en cuenta en el modelo, la emisión difusa de metano a la atmósfera para un año se calcula a partir de la Ecuación (1).

2. METODOLOGÍA. Desarrollo

2.1. ANÁLISIS Y MODELADO DEL SISTEMA

El modelo propuesto por la Directiva IPCC (a partir de ahora en el documento, Modelo IPCC) fue desarrollado por un equipo internacional de expertos, y tiene como objetivo brindar orientación a las autoridades nacionales sobre la cuantificación de las emisiones de metano de todos los vertederos de un país (Oonk, 2010). Sin embargo, debido a que es un modelo global, no permite especificar las condiciones de lugares concretos, en particular las precipitaciones y sus efectos en la generación de gases de vertedero (GMI, 2012). El Modelo IPCC ofrece varios niveles de aplicación (Figura 4) con el objetivo de brindar a los países una estimación de sus emisiones incluso cuando no se dispone de datos de calidad.

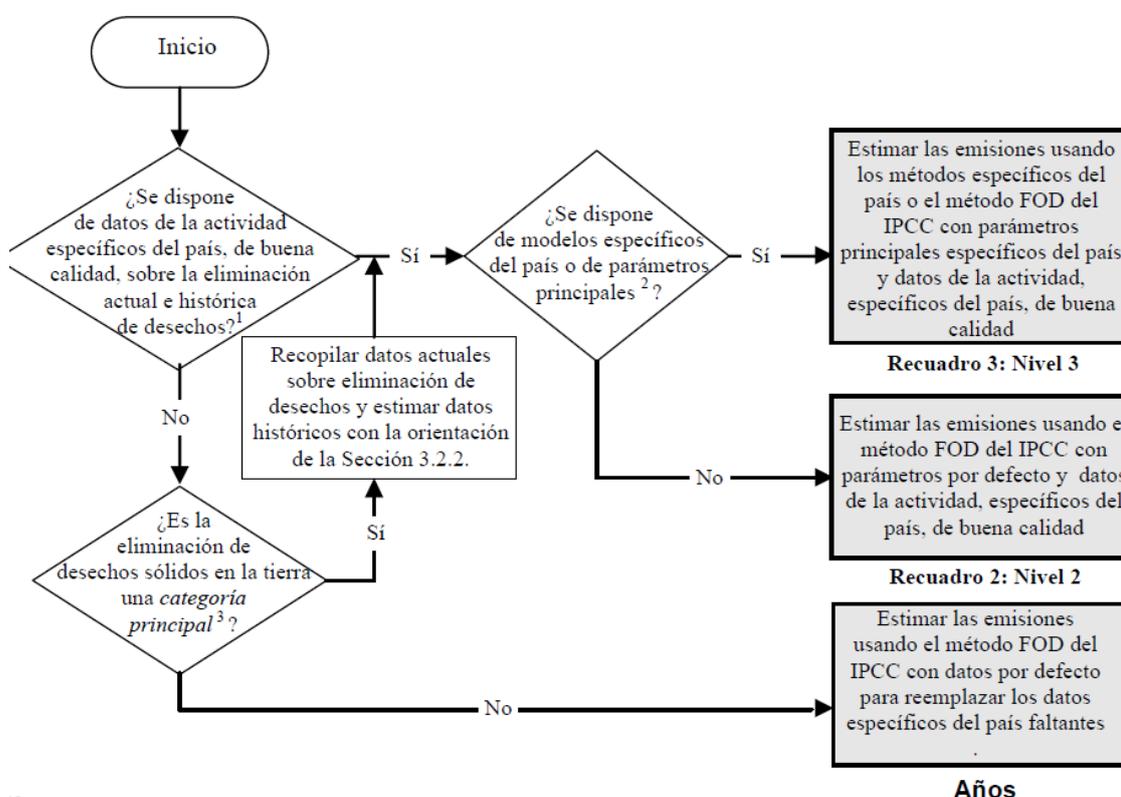


Figura 4. Árbol de decisión para las emisiones de CH₄ provenientes de los sitios de eliminación de los desechos sólidos (IPCC, 2006).

En la actualidad, la mayor parte de los vertederos españoles utilizan un nivel 1 del modelo IPCC 2006 en el que, a pesar de la obligatoriedad de clasificar los residuos depositados en el vertedero, los parámetros del modelo no dependen del tipo de residuo, sino que se tiene en cuenta la cantidad total. Es decir, las ecuaciones matemáticas se corresponden a las de un modelo modificado de primer orden (explicado en el apartado 1.3.3. Modelo de estimación de emisiones). En este nivel, la única entrada del modelo es la cantidad de residuos anuales clasificados según el tipo y la cantidad de metano captado para valorización energética o quema en antorcha (Figura 5). El modelo por defecto asigna a

todas las zonas de España unas mismas condiciones climáticas y, por tanto, en el nivel 1 no exige introducir datos en ese sentido.

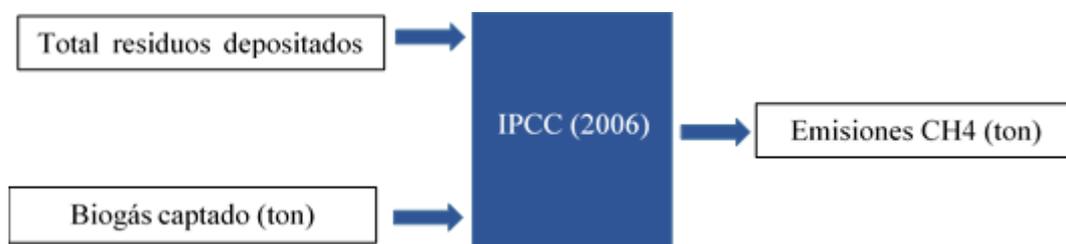


Figura 5. Diagrama de bloques general del Modelo IPCC (2006) correspondiente al nivel 1.

Por lo tanto, como se ha mencionado a lo largo del documento, el objetivo es obtener la información necesaria sobre los parámetros del modelo para poder aplicar el modelo multifase de primer orden (explicado en el apartado 1.3.3. Modelo de estimación de emisiones) a un vertedero concreto con un nivel 3 y, con ello, reducir la incertidumbre de las estimaciones resultantes. A continuación, en la Figura 6 se muestra un diagrama con todos los parámetros que han sido revisados y actualizados basados en la bibliografía del modelo IPCC 2006, así como las condiciones de las que dependen estos parámetros (área azul). En el apartado 2.2 de este trabajo se desarrolla la revisión de los parámetros del modelo y la propuesta fundamentada en fuentes bibliográficas de los nuevos valores para estos parámetros.

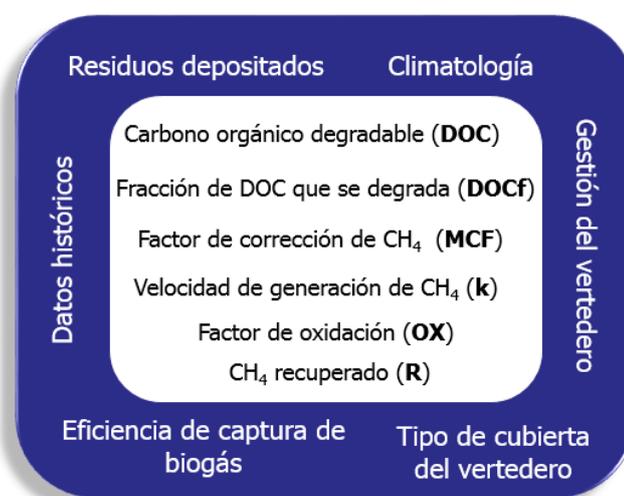


Figura 6. Parámetros del modelo IPCC 2006 revisados en este trabajo (área color blanco) y condiciones de las que dependen (área color azul).

Por tanto, se concluye que con el objetivo de poder aplicar un nivel 3 del Modelo IPCC (2006) para determinar la cantidad de biogás generado y la velocidad con la que se genera, se necesita conocer las condiciones climatológicas (precipitación, evapotranspiración, temperatura y humedad), la forma de gestión del vertedero (anaerobio controlado, semi-aerobio, aerobio y no controlado) y el tipo de residuo depositado. En la Figura 7 se muestra el diagrama de flujo del modelo IPCC 2006 de nivel 3, donde los datos de entrada corresponden a las variables que debe introducir el usuario.

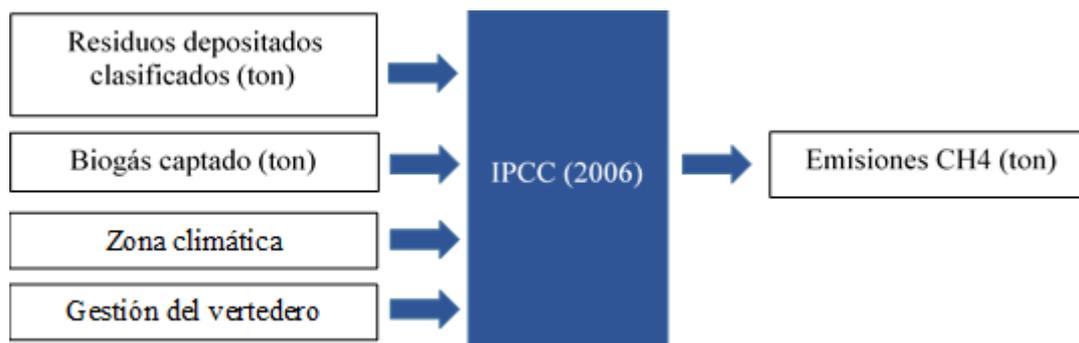


Figura 7. Diagrama de bloques general del Modelo IPCC (2006) correspondiente al nivel 3.

Además, se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo mostrados en la Figura 6. El objetivo es determinar cuál de los parámetros es más sensible a cambios en las condiciones de un vertedero de estudio, para así, proponer un análisis en mayor profundidad de ese parámetro para futuros proyectos.

Por otro lado, como este trabajo pretende servir como protocolo de estimación de emisiones difusas de metano para cualquier vertedero, se ha elaborado una herramienta de cálculo en formato Excel. Esta herramienta utiliza las ecuaciones matemáticas propuestas por la Directiva IPCC y los parámetros por defecto actualizados. Además, el usuario deberá introducir información específica del vertedero de estudio. Esta herramienta se explica de manera detallada en el apartado 2.3 de este trabajo.

Por último, se ha llevado a cabo un caso de estudio en el que se aplica la herramienta de cálculo elaborada en este proyecto para estimar las emisiones difusas de metano en un vertedero situado en el norte de España. La elección de este vertedero se basa en que se cuenta con información en detalle sobre su operación, entrada de residuos y monitoreo del biogás captado. Además, se conocen los resultados de las medidas de campo realizadas en la superficie del vertedero en el año 2011 para el cálculo de las emisiones superficiales de metano. Estas medidas permiten validar la nueva herramienta de cálculo y comparar los resultados con los obtenidos con el modelo IPCC (2006) de nivel 1 con valores por defecto, modelo con el que estiman las emisiones este vertedero en la actualidad.

2.2. REVISIÓN Y PROPUESTA DE PARÁMETROS

Caracterización de los residuos

La Lista Europea de Residuos (LER) es una relación armonizada de residuos que se revisa periódicamente. La inclusión de un material en la lista no significa que dicho material sea un residuo en todas las circunstancias. Un material sólo se considera residuo cuando se ajusta a la definición de residuo prevista en la legislación vigente. Los diferentes tipos de residuos de la lista se clasifican mediante códigos de seis cifras para los residuos, y de cuatro y dos cifras para los subcapítulos y capítulos respectivamente. Los capítulos y subcapítulos definen los tipos de actividades que generan los residuos (EUR-Lex, 2014).

Los residuos depositados en los vertederos controlados europeos se clasifican mediante el código LER mostrado en la lista del Anexo I. Estos datos de entrada no se corresponden con la caracterización de residuos que utiliza la herramienta de cálculo creada.

Por tanto, es necesario que una vez obtenidas las producciones por componentes del residuo según la clasificación LER empleada por la administración de la región, haya que operar para obtener los valores de generación según la clasificación establecida en la herramienta de cálculo. En cuanto a la clasificación de residuos utilizada en la herramienta de cálculo se ha tomado como base la caracterización de los residuos propuesta por la Directiva IPCC, la Agencia USEPA, el Inventario Español de Gases de Efecto Invernadero y la caracterización de los residuos producidos en España publicada por el Ministerio de Medio Ambiente (2001). Esta caracterización se basa en 9 clases de residuos: Papel, Textiles, Otros putrescibles orgánicos (no alimenticios), Alimentos, Parques y Jardines, Madera, Rechazo de Compostaje, Lodos de EDAR y otros/inertes.

Tasa de generación de metano (k):

La constante de velocidad de generación de metano (k) describe la velocidad a la cual el residuo se descompone y produce metano y se relaciona con la vida media de los desechos en base a la siguiente ecuación: vida media = $\ln(2) / k$.

A bajos valores de k, la generación de metano es limitada debido a que una fracción relativamente pequeña de los desechos depositados se descompone cada año. A valores más altos de k, un mayor porcentaje de desechos se descompone, lo que resulta en mayores tasas de generación de metano.

La nueva herramienta de cálculo asigna valores del parámetro k en función de la degradabilidad de los residuos. Este enfoque de "multi-fase" evita el problema del uso de un solo valor de k para toda clase de residuo, del enfoque que normalmente se tiene en cuenta en el nivel 1 del modelo IPCC 2006. Por tanto, se reconoce que las diferencias significativas en los tipos de desechos eliminados requieren cambios en la estructura del modelo, así como en los valores de las variables de entrada. Si bien varios factores influyen en el valor k, se controlan principalmente por el tipo de residuo (degradabilidad de los residuos orgánicos) y contenido de humedad (estimado en base a las condiciones climatológicas) (Oonk, 2010)(Scharff, 2015)(GMI, 2012).

Para este enfoque "multi-fase" la herramienta de cálculo utiliza los valores por defecto propuestos por la Guía IPCC 2006 (Tabla 3.3, Cap.3, Vol.5) según el tipo de residuo y zona climática, para la clasificación por tipo realizada en esta herramienta de cálculo de residuos gestionados. A continuación, en la Tabla 3 se muestran los valores del parámetro k empleados según el tipo de residuo para un vertedero.

Tabla 3. Valores de la constante de velocidad de generación de metano (k).

Tipo de residuo	Zona climática			
	Templada húmeda	Templada seca	Tropical húmeda	Tropical seca
Papel	0,06	0,04	0,07	0,045
Textiles	0,06	0,04	0,07	0,045
Parques y Jardines	0,1	0,05	0,17	0,065

Otros putrescibles orgánicos (no alimenticios)	0,1	0,05	0,17	0,065
Alimentos	0,185	0,06	0,4	0,085
Madera	0,03	0,02	0,035	0,025
Rechazo compost	0,185	0,06	0,4	0,085
Lodos EDAR	0,185	0,06	0,4	0,085
Otros	-	-	-	-

En la herramienta de cálculo creada se introduce la posibilidad de evaluar la tasa de generación de metano cada mes. Por tanto, un mismo vertedero puede comportarse de forma diferente (en términos climatológicos) a lo largo del año. El usuario únicamente debe introducir los datos climáticos mensuales que se piden en la hoja de cálculo. El programa calcula unos valores medios de este parámetro en función de los datos introducidos por el usuario, valores que se usaran en las ecuaciones del modelo matemático.

Factor de oxidación (OX):

La oxidación del metano en el suelo de la cubierta del vertedero reduce las emisiones de gases de efecto invernadero de los vertederos y, en algunos casos, incluso reduce la concentración atmosférica de metano (Abedini, 2014). Varios estudios han informado fracciones de oxidación de metano a través del suelo de la cubierta del vertedero del 22% al 55% (Whalen, 1990) (Chanton y Powelson, 2009).

En un estudio exhaustivo sobre cuatro vertederos holandeses con condiciones climáticas similares a las de Vancouver, midieron la fracción de oxidación de metano en aproximadamente 20% a 40% (Scharff H y cols., 2003). USEPA (2004), también reportó una fracción promedio de oxidación de metano de 10 a 25% con valores más bajos para los suelos de cobertura de arcilla y tasas más altas para la capa superior del suelo. Sin embargo, debido a los desafíos de medir con precisión la oxidación de metano y la falta de métodos de cuantificación estándar, recomendaron un valor predeterminado del 10% (USEPA, 2004).

La oxidación del metano depende del diseño de la capa superior, el flujo de metano a través de esta capa y las condiciones climáticas (precipitación, pervaporación y temperatura). Este parámetro es el más estudiado y contemplado en la bibliografía. En todas las referencias consultadas, la fracción de metano oxidado en los suelos de la cubierta es mayor que el valor predeterminado de 10% propuesto por la directiva IPCC y la agencia USEPA. A pesar de los hallazgos recientes, el IPCC no se ha desviado de los valores por defecto del 0-10% propuestos en 1995 (Oonk, 2010)(Chanton y cols., 2011)(SCS Engineers, 2007)(Chanton y Powelson, 2009) (Spokas y cols., 2011) (Mahieu y Visscher, 2006).

Por tanto, la nueva herramienta de cálculo introduce este parámetro con un valor del 10% por defecto. Este valor es una aproximación conservadora, dejando margen para la mejora.

Fracción de metano en el biogás (F):

Este parámetro hace referencia a la fracción de metano del gas de vertedero generado por la descomposición de los desechos. La incertidumbre de esta cifra es relativamente baja, en la medida en la que F depende mucho de la estequiometría de la reacción química que produce el CH₄ (IPCC, 2000).

Muchos de los vertederos con sistema de captación de biogás, tiene la capacidad de analizar el contenido de metano del gas captado y, por tanto, el valor de F que introducen en el modelo que utilizan, se corresponde a ese análisis. Este valor, suele ser superior al valor de 0,5 propuesto por la Directiva IPCC 2006.

En este análisis no se tiene en cuenta el fenómeno de absorción de CO₂ en el agua filtrada a los alrededores del pozo de extracción. Este fenómeno hace que parte del CO₂ se solubilice en el agua filtrada con el paso del biogás por el pozo de extracción, incrementando así el porcentaje de metano del biogás captado. Por tanto, la composición del biogás captado no se corresponde con el biogás contenido en el interior del vertedero. De modo que los valores de F estimados a partir del análisis del biogás captado no necesariamente serán representativos (Choi y cols., 2017) (SFT report, 2005).

Por tanto, la nueva herramienta de cálculo toma un valor por defecto de 50% para la fracción de metano del gas de vertedero. Esta elección se justifica con los valores establecidos en la propuesta de la Directiva IPPC 2006 y en la Edición 2018 del Inventario Nacional de Emisiones de Efecto Invernadero (IPCC, 2006) (Secretaría de Estado y Medio Ambiente, 2018).

Factor de corrección de metano (MCF):

La generación de metano solo ocurre en partes del vertedero que son estrictamente anaeróbicas. En la realidad, muchos vertederos no serán completamente anaeróbicos y tendrán zonas que debido a la actividad eólica y los cambios en la presión ambiental pueden contener oxígeno, y por tanto los residuos se descomponen de forma aerobia. Esto ocurre especialmente cuando el vertedero está menos controlado (no hay compactación de residuos, no hay cubiertas diarias, cubiertas temporales más delgadas o permeables) y en vertederos viejos donde la presión interna se debe a la producción de gas esta reducido (Oonk, 2010).

El factor de corrección para el metano (MCF) da cuenta del hecho de que los vertederos no controlados producen menos CH₄ a partir de una determinada cantidad de desechos, que los vertederos controlados, debido a que la fracción de desechos que se descompone aeróbicamente en las capas superiores de los vertederos no controlados es mayor (IPCC, 2006).

Según la directiva IPCC 2006, los valores que toma este parámetro en función de cómo es gestionado el vertedero se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Valor del parámetro MCF en función del tipo de vertedero.

Tipo de vertedero	MCF
Gestionado anaerobio	1
Gestionado semi-aerobio	0,5
No gestionado (> 5m de profundidad)	0,8
No gestionado (< 5m de profundidad)	0,4

La nueva herramienta de cálculo toma un valor de 0,95 del factor de corrección de metano (MCF) para vertederos controlados anaerobios. La hoja de cálculo toma este parámetro por defecto ya que, en España, todos los vertederos registrados en la actualidad se consideran vertederos controlados anaerobios (Secretaría de Estado y Medio Ambiente, 2018).

Esta disminución del parámetro es una propuesta elaborada por la directiva IPCC 2006 que hace referencia a la ausencia de condiciones anaerobias en el frente de vertido, capas superiores, grietas, etc. Además, el modelo de gestión del vertedero puede variar al cabo de algunos años en la medida en la que se implementan políticas nacionales de gestión de desechos (Oonk, 2010) (IPCC, 2006) (SFT report, 2005).

En el caso de que el vertedero no se corresponda con un vertedero controlado anaerobio, la hoja de cálculo permite cambiar el valor del parámetro MCF en función de los valores mostrados en la Tabla 4.

Carbono orgánico degradable (DOC):

El DOC es el contenido de materia orgánica que contiene cada tipo de residuo. Los valores por defecto proporcionados por la directiva IPCC 2006, mostrados en la Tabla 5, tienen validez suficiente como para usarlos en la herramienta de cálculo creada.

Tabla 5. Valores de DOC para las diferentes clases de residuo de la hoja de cálculo de la Directiva IPCC (drcha.) y según la clasificación de la nueva hoja de cálculo creada (izq.)

Clasificación Modelo IPCC 2006		Clasificación nueva	
Tipo de residuo	DOC	Tipo de residuo	DOC
Papel	0,4	Papel	0,4
Textiles	0,24	Textiles	0,24
Alimentos	0,15	Alimentos	0,15
Madera	0,43	Madera	0,43
Parques y jardines	0,2	Parques y jardines	0,2

Lodos EDAR	0,05	Lodos EDAR	0,05
Otros putrescibles orgánicos (no alimenticios)	0,2	Otros putrescibles orgánicos (no alimenticios)	0,2
		Rechazo Compost	0,12
		Otros	0

El único grupo de residuos que no se contempla en esta directiva es “Rechazo de compostaje”. Este parámetro se ha introducido en el modelo actual con un valor de $DOC=0,12$. Este valor de 0,12 para la clase “rechazo de compostaje” se ha calculado analizando la composición habitual de esta clase de residuos y calculando un DOC promedio. A continuación, en la Tabla 6 se muestra el cálculo tomando como ejemplo la composición del “rechazo de compostaje” de la planta de tratamiento situada en Meruelo, Cantabria (Gobierno de Cantabria, 2017).

Tabla 6. Composición en porcentaje de peso del rechazo de compostaje

Tipo de Residuo	% peso
Papel	7,46
Parques y jardines	28,29
Alimentos	23,23
Madera	0,8
Otros	40,22

Por tanto,

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{DOC_{Rechazo\ de\ compostaje}} = \\
 & \frac{7,46\ DOC_{Papel} + 28,29\ DOC_{Parques\ y\ jardines} + 23,23\ DOC_{Alimentos} + 0,008\ DOC_{Madera}}{100} \\
 & = \mathbf{0,12}
 \end{aligned}$$

Además, este resultado obtenido tiene sentido de acuerdo a las suposiciones del Inventario Nacional de Emisiones de GEI (2018), donde señalan reducciones de DOC del 40% al 60%, e incluso hasta el 90%, debido a los cambios de composición de los residuos después de los tratamientos previos realizados a los desechos hasta la deposición final en el vertedero (Secretaría de Estado y Medio Ambiente, 2018) (Sistema Español de Inventario de Emisiones, 2001)(López y cols., 2018).

Fracción del DOC que se degrada en el vertedero (DOCf):

En el modelo propuesto por la Directiva IPCC se supone que el 50% del DOC en los residuos vertidos se descompone, y el resto permanece en el vertedero. A diferencia de los otros parámetros medidos, este valor está sujeto a enormes incertidumbres, y no es razonable usar un DOCf fijo para todos los tipos de desechos (Lee y cols., 2017).

La porción biodegradable (BF) del residuo, o lo que es lo mismo, la fracción orgánica con respecto a un componente de desecho específico que se degrada en el vertedero (DOCf), se puede obtener a través de pruebas que cuantifican el potencial de metano bioquímico (BMP). El valor de BF puede calcularse usando la relación entre el valor de BMP y los valores predichos por ecuaciones estequiométricas, que asume una conversión completa de materia orgánica a productos gaseosos (Lobo, 2003b). Los valores de las ecuaciones estequiométricas varían de acuerdo con el componente considerado, pero normalmente están entre 400 y 500 L de CH₄ / kg seco (Barlaz y cols., 1990).

La Tabla 7, presenta los valores de BF (o DOCf) para diferentes componentes de los residuos sugeridos por varios autores (Machado y cols., 2009) (Patino y cols., 2015).

Tabla 7. Estimación de DOCF para componentes de desechos (papel, madera, alimentos y recortes de jardín) utilizando los resultados de las pruebas BMP.

		Clase de residuo				
		Papel	Alimentos	Madera	Textil	Jardín
BF (o DOCf)	Fuente					
	(Tchobanoglous y cols., 1994)	0,44	0,58	0,61	0,4	0,45
	(Barlaz y cols., 1997)	0,19-0,56	0,7	0,14	-	0,70-0,34
	(Harries y cols, 2001)	0,3-0,4	-	0,3-0,33	0,17-0,25	0,2-0,51
	(Lobo, 2003b)	0,4	0,64	0,17	0,32	0,35

En base a bibliografía se han actualizado los valores del parámetro DOCf para 5 de los 9 grupos clasificados mientras que en el resto se ha mantenido el valor por defecto del 50% proporcionado por la directiva IPCC 2006.

Los valores actualizados del parámetro DOCf teniendo en cuenta la exhaustividad de los métodos utilizados y el año de publicación de los resultados de cada autor, han sido 40%, 32%, 64% y 17% para las clases de residuos papel, textiles, alimentos, madera respectivamente. Además, para residuos de degradación intermedia (Otros putrescibles orgánicos (no alimenticios)/ parques y jardines)) el DOCf toma valores de 35%.

Por otro lado, el parámetro DOCf para los residuos recogidos en el grupo “Rechazo de Compostaje” se ha calculado, como en el caso del parámetro DOC, analizando la composición habitual de esta clase de residuos y calculando un DOCf promedio. A continuación se muestra el cálculo y el valor del parámetro DOCf para “Rechazo de Compostaje”

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{DOCf}_{\text{Rechazo de compostaje}} = \\
 & \frac{7,46 \text{ DOCf}_{\text{Papel}} + 28,29 \text{ DOCf}_{\text{Parques y jardines.}} + 23,23 \text{ DOCf}_{\text{Alimentos}} + 0,008 \text{ DOCf}_{\text{Madera}}}{100} \\
 & = \mathbf{0,27}
 \end{aligned}$$

Tiempo de retardo

Por otro lado, otro problema que surge en el análisis es la determinación del tiempo que tarda el residuo a descomponerse mediante reacción anaerobia. El modelo actual no tiene en cuenta las reacciones previas que se llevan a cabo antes de la metanogénesis por lo que considera que todo el residuo depositado en un año concreto comienza a generar metano desde el inicio de ese mismo año. Profundizando el estudio de las reacciones químicas que se dan en la materia orgánica contenida en los residuos depositados se ha comprobado que se necesitan varios meses hasta que comience la degradación anaerobia. Por ello, en el nuevo modelo, se ha considerado que la generación de metano para los residuos depositados durante un año concreto comienza el 1 de enero del año siguiente, coincidiendo así con la propuesta desarrollada en la directiva IPCC 2006.

2.2.1. Análisis de sensibilidad de los parámetros

Los resultados del análisis de sensibilidad presentados en la Figura 8 muestran el impacto de cada parámetro en las emisiones estimadas de GEI de los vertederos. Se muestran únicamente los resultados del análisis de sensibilidad de los residuos depositados correspondientes a la clase “Residuos alimenticios”. Las demás clases de residuos muestran comportamientos similares.

El caso base (que hace referencia a el 0% del eje vertical) se corresponde con los parámetros propuestos en el apartado anterior aplicados al caso de estudio que se desarrolla en este proyecto. Es decir, el vertedero situado en el norte de España, más concretamente, en Meruelo. Los parámetros de simulación actualizados correspondientes a este vertedero para los residuos depositados del tipo “Residuo alimenticio” son 0,15 para el Carbono Orgánico Degradable (DOC), 0,1 para el Factor de Oxidación (OX), 0,64 para la fracción de DOC que se degrada (DOCf) y un clima templado y húmedo. Las emisiones totales de GEI para el caso base se estimaron en torno a 55 Gg de CO₂-eq/año.

Los cambios en las condiciones climáticas influyen en la velocidad de decaimiento y conducen a cambios en las eficiencias de captura. Por ejemplo, las condiciones climáticas húmedas tropicales (Wet, en la Figura 8) provocan un deterioro rápido y reducen la eficiencia de la captación al liberar biogás antes de que se instalen colectores de biogás en cada celda de vertedero. Por otro lado, cuando se usa el factor de oxidación del 0% propuesto por la Directiva IPCC para vertederos controlados en lugar del actualizado (OX=0,1), las emisiones de GEI estimadas aumentan en un 10% porque se reduce menos CH₄ en CO₂.

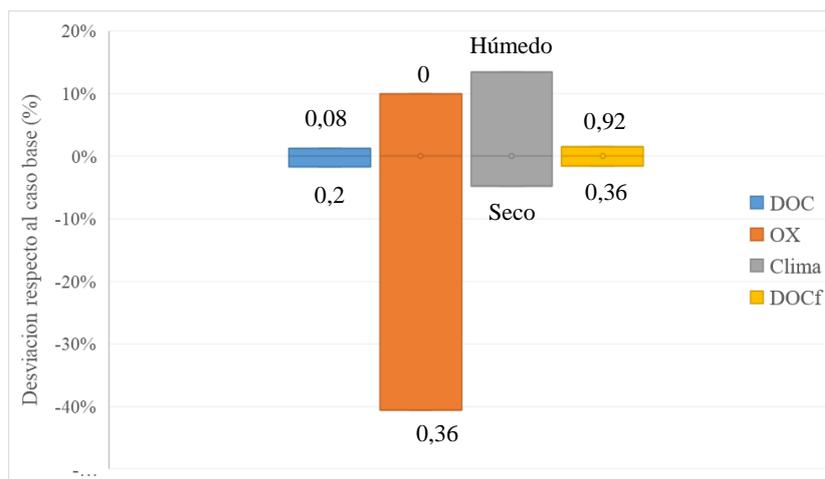


Figura 8. Análisis de sensibilidad de alguno de los parámetros más importantes del modelo a partir de datos para el año 2017 del vertedero que se tiene en cuenta en el caso de estudio posterior.

Si bien todos los parámetros estudiados tienen un alto impacto en las emisiones de GEI de los vertederos, es poco probable que sean controlados. Sin embargo, los operadores de vertedero pueden captar activamente y quemar más CH₄ para reducir las emisiones de GEI. Generar electricidad a través de la combustión del biogás captado puede reducir indirectamente las emisiones de GEI al desplazar la energía eléctrica que de otro modo se generaría. Cuando el biogás se recolecta activamente desde la etapa inicial de explotación, las emisiones de GEI se pueden reducir en un 27% en comparación con el caso de recolección moderada (Lee y cols., 2017). Cuando se aplican tanto la estrategia activa de recolección como la generación de energía, la reducción general de las emisiones de GEI en relación con el caso predeterminado es del 37%.

Cuando se estudian otros tipos de residuos, los análisis de sensibilidad muestran una tendencia similar, mientras que las emisiones de los residuos que se degradan de forma rápida como desechos alimenticios y el rechazo de compostaje (Figura 8) están más influenciadas por parámetros distintos al DOCf, en comparación con otras clases de residuos, debido a la baja eficiencia de la captación del biogás producido por estos desechos que se genera rápidamente, incluso antes de instalar el sistema de captación.

2.3. HERRAMIENTA DE CALCULO

En la investigación realizada y presentada en el estado del arte, no se han identificado modelos matemáticos para la estimación de la generación de biogás en el vertedero de libre distribución con mayor validez que el modelo proporcionado por la Directiva IPCC 2006.

Uno de los objetivos principales del presente TFM es elaborar una herramienta de cálculo basado en las ecuaciones propuestas por la Directiva IPCC 2006 pero usando parámetros actualizados y soportados por fuentes bibliográficas. Los parámetros actualizados se pueden clasificar en parámetros por defecto (F, MCF, OX) y parámetros específicos en función de las condiciones climáticas del vertedero (k) y de la clasificación del residuo depositado (DOC, DOCf). Dicha herramienta servirá de apoyo para la toma de decisiones de forma que debe ser capaz de responder a las necesidades en la gestión real de un

vertedero de RSU concreto, sometido a unas determinadas condiciones meteorológicas, que recibe una cantidad conocida de RSU previamente caracterizados.

Dada la relevancia de las cuestiones anteriores, tanto desde el punto de vista medioambiental como desde el punto de vista económico relacionado con la obtención de energía a partir del sistema de captación de biogás, tener a disposición un modelo de gestión que informe acerca de las reglas de operación óptimas resulta de capital importancia para cumplir los objetivos planteados por la legislación vigente en materia de protección medioambiental (Rodrigo, 2016).

2.3.1. Método matemático de la herramienta de cálculo

Como se ha comentado anteriormente, la herramienta de cálculo se fundamenta en las ecuaciones expuestas más arriba proporcionadas por la Directiva IPCC. En el Modelo de desechos del IPCC, la formación de CH_4 se calcula por separado para cada año de eliminación y la cantidad total de CH_4 generado se determina por una suma final. El hecho de que para un método de exponencial de primer orden necesite considerar periodos largos de tiempo (alrededor de 50 años) hace que la matriz de cálculo sea bastante grande.

Con el objetivo de simplificar la hoja de cálculo se utiliza un enfoque más compacto y elegante para realizar los cálculos. Esto se hace sumando los DDOCm eliminados dentro del sitio durante un año a los DDOCm restantes de los años precedentes. La emisión de CH_4 para el año siguiente se calcula entonces a partir del «total en curso» del DDOCm que permanece en el sitio. De esta manera, el cálculo completo para un año puede efectuarse en solamente tres columnas, en vez de dedicar una columna completa a cada año. La sencillez de este enfoque es que cuando se conoce la cantidad de DDOCm en el vertedero al comienzo del año, en el método de estimación cada año puede considerarse como si fuera el año 1 ya que, en una reacción de primer orden, la cantidad de producto (aquí, el DDOCm descompuesto) siempre es proporcional a la cantidad de material reactante (aquí, el DDOCm) y por tanto lo único que cuenta es el total de DDOCm restante en el sitio. El modelo calcula luego la cantidad de CH_4 generada a partir del DDOCm mediante el cálculo de la cantidad de DOC que se descompone en CH_4 y CO_2 cada año y resta el CH_4 recuperado y el CH_4 oxidado en el material de la cubierta y produce como resultado la cantidad de CH_4 emitido.

Al hacerlo de esta manera, los cálculos se pueden hacer en líneas individuales utilizándose únicamente 1 hoja de trabajo en un libro de Excel. El usuario debe aportar como dato de entrada los datos climatológicos anuales (precipitación y evaporación), la cantidad de residuos depositada de cada clase desde el inicio de la explotación (Papel, Textiles, Otros putrescibles orgánicos (no alimenticios), Alimentos, Parques y Jardines, Madera, Rechazo de Compostaje, Lodos de EDAR y otros/inertes) y tendrá que tener en cuenta si se trata de un vertedero controlado o no controlado para la elección de varios parámetros. Por otro lado, en esa misma hoja se muestran directamente las emisiones generadas por cada clase de residuos para cada año, así como las emisiones difusas totales en toneladas de metano.

A continuación, se muestra el conjunto completo de ecuaciones utilizadas. Como son ecuaciones que se resuelven en serie hasta generar el resultado final, se han ocultado en la herramienta de cálculo diseñada con el objetivo de dar más claridad a los resultados.

Calculo del DDOCm depositado (DDOCmd) con los datos sobre eliminación de desechos.

$$(A) \quad DDOCmd_T = W_T * DOC * DOCf * MCF$$

DDOCm acumulado (DDOCma) en el vertedero al término del año T.

$$(B) \quad DDOCma_T = DDOCmd_T + DDOCma_{T-1} * e^{-k}$$

DDOCm descompuesto en el vertedero al término del año T

$$(C) \quad DDOCm_{decomp_T} = DDOCma_{T-1} * (1 - e^{-k})$$

Metano generado a partir del DDOCm descompuesto

$$(D) \quad CH_4_{generado_T} = DDOCm_{decomp_T} * F * \frac{16}{12}$$

El CH₄ generado por cada categoría de desechos eliminada se suma para obtener el total del CH₄ generado durante el año. Por último, las emisiones de CH₄ se calculan restando primero el gas CH₄ recuperado desde el sitio de eliminación y luego el CH₄ oxidado en dióxido de carbono en la capa de la cubierta.

$$(E) \quad CH_4_{emitido_T} = \left(\sum_x CH_4_{generado_{x,T}} - R_T \right) * (1 - OX_T)$$

Donde:

DDOCm = Cantidad de carbono orgánico degradable que se puede descomponer de un residuo, Gg

DDOCmd_T = DDOCm depositado durante el año T, Gg

W_T = masa de los desechos eliminados durante el año T, Gg

DOC = Carbono orgánico degradable durante el año del depósito (fracción)

DOCf = fracción del DOC que puede descomponerse en condiciones anaeróbicas (fracción)

MCF = Factor de corrección del CH₄ para el año de la eliminación (fracción)

T = año T (año del inventario)

k = tasa de la constante de reacción (año⁻¹)

DDOCma_T = DDOCm acumulado en los SEDS al final del año T, Gg

DDOCma_{T-1} = DDOCm acumulado en los SEDS al final del año (T-1)

DDOCm_{descomp_T} = DDOCm descompuesto durante el año T, Gg

$\text{CH}_4 \text{ generado}_T =$ cantidad de CH_4 generado a partir del DDOCm que se descompone

$F =$ fracción volumétrica de CH_4 en el gas de vertedero generado

$16/12 =$ cociente de peso molecular CH_4/C (cociente).

$\text{CH}_4 \text{ emitido}_T =$ CH_4 emitido durante el año T, Gg

$x =$ categoría o tipo de desecho y/o material

$R_T =$ CH_4 recuperado durante el año T, Gg

$\text{OX}_T =$ factor de oxidación durante el año T, (fracción)

La figura siguiente ilustra cómo funciona el modelo con el inicio de la reacción el 1 de enero del año posterior al vertido. Las ecuaciones descritas anteriormente con letras (A; B; C; D; E) se muestran en el diagrama de bloques de la Figura 9 con la misma letra. La cantidad depositada (W) hace referencia a la cantidad de desecho de depositada de cada clase de residuo. Por tanto, el metano emitido se calcula para cada clase de residuo individualmente. El total se obtendría mediante la suma de las emisiones individuales de metano generado para un año en concreto.

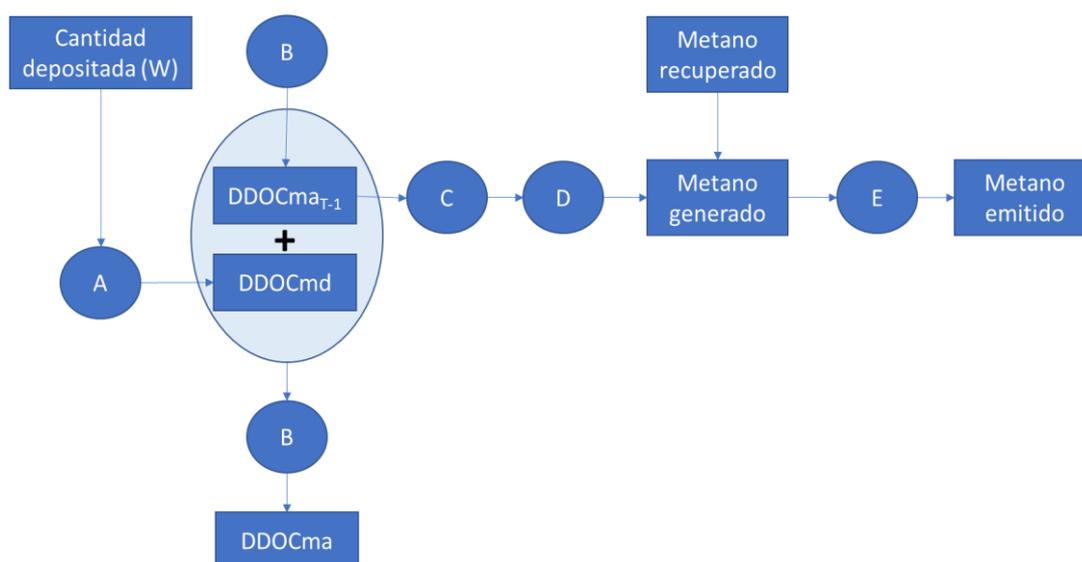


Figura 9. Diagrama de flujo de las operaciones matemáticas que realiza la herramienta de cálculo una vez que el usuario introduce los valores de entrada.

2.3.2. Diseño de la nueva hoja de calculo

Con esta nueva hoja de cálculo no solo se pretende actualizar los parámetros por defecto del modelo IPCC y reducir la incertidumbre cuando se estiman las emisiones de un vertedero concreto en lugar de todo un País (para lo que fue creado el modelo en cuestión). También, se pretende mostrar el método matemático que proporciona la directiva IPCC de una forma más simple y clara para el usuario.

A continuación, se comentan las diferentes partes de la herramienta de cálculo.

Introducción de variables de entrada

Las únicas variables de entrada en esta herramienta son la cantidad en toneladas de cada tipo de residuos a los que se asigna un color diferente, las condiciones climáticas del lugar donde se encuentra el vertedero de estudio y la cantidad de biogás captado por el sistema de recuperación de gas de vertedero.

Para definir las condiciones climáticas basta con introducir la media mensual de precipitaciones (L/m^3), la media mensual de la evapotranspiración (mm) y la temperatura media anual ($^{\circ}C$). Si el vertedero se encuentra en España, estos datos están disponibles en el Geoportal de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). A continuación, en la Figura 10 se muestra cómo se introducen estos datos en la herramienta de cálculo (Gobierno de España. Ministerio de Agricultura y Pesca y Alimentación, 2018).

	Precipitación media mensual (L/m ³)	Evapotranspiración media anual (mm/mes)	Temperatura media Anual ($^{\circ}C$)
Enero	110,35	58,33	14,86
Febrero	85,26	58,33	
Marzo	80,66	58,33	
Abril	86,66	58,33	
Mayo	67,88	58,33	
Junio	52,47	58,33	
Julio	46,48	58,33	
Agosto	56,79	58,33	
Septiembre	79,57	58,33	
Octubre	104,14	58,33	
Noviembre	156,61	58,33	
Diciembre	105,11	58,33	

Figura 10. Captura de la hoja de cálculo proporcionada. En las casillas de color amarillo habría que introducir los datos correspondientes a el lugar donde se encuentra instalado el vertedero de estudio. En este caso, los datos se corresponden a el vertedero de Meruelo contemplado en el caso de estudio del apartado siguiente.

Las cantidades en toneladas depositadas de cada tipo de residuo (Papel, Textiles, Otros putrescibles orgánicos (no alimenticios), Alimentos, Parques y Jardines, Madera, Rechazo de Compostaje, Lodos de EDAR y otros/inertes) se introducen de manera trivial en el modelo. A cada clase de residuo le corresponde un color. En la Figura 11 puede observarse una captura de la hoja de cálculo donde se muestran 2 de los 9 grupos de residuos. El clasificar los residuos permite al usuario ver qué tipo de residuos genera más metano para un año determinado y puede ser de gran utilidad para la gestión del vertedero.

AÑO	Textiles		Papel	
	Cantidad depositada	CH4 generado	Cantidad depositada	CH4 generado
	W	$D = C * 16/12 * F$	W	$D = C * 16/12 * F$
	Ton	Ton	Ton	Ton
1967	0,0	0,0	0,0	0,0
1968	0,0	0,0	0,0	0,0
1969	0,0	0,0	0,0	0,0
1970	0,0	0,0	0,0	0,0
1971	0,0	0,0	0,0	0,0
1972	0,0	0,0	0,0	0,0

Figura 11. Captura de la hoja de cálculo proporcionada. En las casillas coloreadas habría que introducir los datos correspondientes a las toneladas depositadas en el vertedero de estudio de cada clase de residuo en un año en concreto. En este caso, los datos se corresponden a el vertedero de Meruelo contemplado en el caso de estudio del apartado siguiente.

Por otro lado, es necesario introducir las cantidades de biogás captado total mediante los pozos de extracción y la cantidad de este biogás que se quema en antorcha que no puede ser aprovechada por los motores. Estos datos son muy fáciles de obtener debido a la fiabilidad del sistema de control de captura y utilización de biogás. A continuación, en la Figura 12 se muestra una captura de la hoja de cálculo en la que el usuario debe introducir estos datos en las unidades correspondientes.

AÑO	TOTAL CH4 GENERADO	BIOGAS CAPTADO	BIOGAS CAPTADO ANTORCHA	% METANO DEL BIOGAS
	Ton	m3	m3	%
1989	0,0			
1990	292,3			
1991	618,0			
1992	975,2			
1993	1341,7			
1994	1677,4			
1995	1987,0			
1996	2286,3			
1997	2603,7			
1998	2909,9			
1999	3227,7			
2000	3643,8	9193868		55,0

Figura 12. Captura de la hoja de cálculo proporcionada. En las casillas coloreadas habría que introducir los datos correspondientes a los metros cúbicos de biogás captado por el sistema de recuperación de gas de vertedero, los metros cúbicos de biogás que se queman en antorcha y el porcentaje de metano del biogás captado. En este caso, los datos se corresponden a el vertedero de Meruelo contemplado en el caso de estudio del apartado siguiente.

Parámetros

En la Figura 13 puede observarse una captura de la hoja de cálculo donde se muestran la sección de parámetros de 2 de los 9 grupos de residuos. Estos parámetros se toman por defecto en esta hoja de cálculo y son el resultado de la revisión y actualización (ver Apartado 2.2. Revisión y propuesta de parámetros) del modelo propuesto por la Directiva

IPCC 2006. Entre los parámetros que son independientes de las variables de entrada se pueden distinguir los que dependen de la clase de residuo (DOC y DOCf) y los que dependen de la gestión del vertedero de estudio (MCF y F).

Por otro lado, está el parámetro (k) que hace referencia a la velocidad de generación de metano y que depende de las condiciones climáticas introducidas por el usuario. Por tanto, en la hoja de cálculo, el parámetro (k) toma valores diferentes en función de los datos mensuales del clima, precipitaciones y evapotranspiración del lugar donde se encuentra el vertedero estudiado.

Parametros		Textiles	Papel
Carbono Organico Degradable	DOC	0,240	0,400
DOCf	DOCf	0,320	0,400
Methane generation rate constant	k	0,055	0,055
Half-life time (t1/2, years):	$h = \ln(2)/k$	12,6	12,6
exp1	$\exp(-k)$	0,95	0,95
Fraccion de CH4	F	0,500	0,500
Factor de correccion de metano	MCF	0,950	0,950

Figura 13. Captura de la hoja de cálculo proporcionada. En las casillas se muestran los parámetros por defecto que usa la hoja de cálculo como resultado de la revisión y actualización del Apartado 2.2. En este caso, los datos del parámetro k corresponden a las condiciones climáticas del vertedero de Meruelo contemplado en el caso de estudio del apartado siguiente.

Resultados

En la herramienta de cálculo se obtienen las emisiones de metano en toneladas para cada año. Se ha elegido esta forma de presentar con el objetivo de facilitar el reporte de datos al Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero. De esta manera, para conocer las emisiones difusas de metano en un año concreto basta con fijarse en la casilla correspondiente al año de estudio, representada mediante una captura de la hoja de cálculo en la Figura 14.

	METANO CAPTADO	TOTAL EMISIONES CH4
AÑO	Ton	Ton
1989	0,00	0
1990	0,00	263,0352591
1991	0,00	556,1624062
1992	0,00	877,6698776
1993	0,00	1207,504089
1994	0,00	1509,683655
1995	0,00	1788,287915
1996	0,00	2057,68405
1997	0,00	2343,326439
1998	0,00	2618,900534
1999	0,00	2904,889768
2000	3615,49	25,46348385

Figura 14. Captura de la hoja de cálculo proporcionada. Se muestra el metano captado (dato introducido por el usuario) y el total de las emisiones difusas de metano en toneladas para cada año. En este caso, los resultados corresponden al vertedero de Meruelo contemplado en el caso de estudio del apartado siguiente.

En la herramienta de cálculo se muestra por defecto el año 1967 como año inicial de deposición ya que se considera que residuos depositados en ese año (Hace 50 años) pueden estar generando biogás aún. Esto permite que la hoja de cálculo sea de utilidad para todo vertedero de estudio ya que permite al usuario introducir los datos de residuos depositados con una antigüedad de 50 años, suficiente para evaluar la generación de biogás en la actualidad debido a el total de residuos depositados desde la apertura del vertedero.

Por otro lado, la caracterización habitual de residuos depositados en vertederos españoles se corresponde con el código LER. Con el objetivo de agrupar la clasificación LER en la clasificación usada en la herramienta de cálculo (Papel, Textiles, Otros putrescibles orgánicos (no alimenticios), Alimentos, Parques y Jardines, Madera, Rechazo de Compostaje, Lodos de EDAR y otros/inertes) se ha creado una hoja de cálculo adicional en la que usando los mismos colores que en el modelo ya presentado, es sencillo pasar de una clasificación a otra. Con esto, se ha conseguido crear una herramienta, basada en fuentes bibliográficas, que introduce 3 grupos de residuos adicionales a la clasificación general por defecto creada por la Directiva IPCC.

En el Anexo I se muestra la equivalencia entre la clasificación por el Código LER y la de la herramienta de cálculo. En el Anexo I únicamente se tienen en cuenta los residuos registrados en el vertedero del caso de estudio. Por tanto, si se quiere aplicar la herramienta a otro vertedero es posible que haya que añadir más códigos LER en función del tipo de residuo depositado. Además, el usuario debe asignarle el color correspondiente a ese nuevo código en función de la nueva clasificación basada en 9 grupos.

2.4. CASO DE ESTUDIO. VERTEDERO DE MERUELO

Para la realización de un Estudio de cuantificación de biogás generado en el vertedero situado en el norte de España, se proponen tres estrategias complementarias entre sí:

- Un estudio de las condiciones generales del vertedero controlado. Este estudio debe analizar aspectos tales como las condiciones ambientales de la zona, cantidades de residuos vertidas y previsiones de futuro, composición de los residuos, morfología del vertedero y técnicas de vertido.
- La aplicación de la herramienta de cálculo de producción de biogás basada en las ecuaciones matemáticas propuestas por la Directiva IPCC y con los nuevos parámetros actualizados. Con la herramienta proporcionada con este proyecto se estima la generación de biogás en el vertedero, o lo que es lo mismo, el caudal de biogás recuperable en el momento presente y en el futuro. Este modelo se calibrará con los datos obtenidos al estudiar las condiciones generales del vertedero.
- Un estudio mediante ensayos y mediciones en campo de la cantidad de biogás recuperable y su composición química. Este estudio es de gran importancia para complementar los resultados obtenidos en la nueva herramienta de cálculo para determinar el valor de generación de biogás con menor incertidumbre. Además, ayuda a comparar los valores obtenidos entre la herramienta de cálculo que se utiliza en la actualidad en este vertedero con y la nueva herramienta de cálculo con los parámetros actualizados.

2.4.1. Descripción del vertedero

En Cantabria, el vidrio, los envases livianos y las fracciones de papel y cartón se recogen por separado. El vertedero de Meruelo se clasifica como un vertedero de residuos no peligrosos, cuyo aporte fundamental de residuos procede de residuos urbanos o asimilables a urbanos (por tanto, residuos orgánicos), una vez tratados.

El vertedero puede admitir residuos no peligrosos municipales y asimilables según lo establecido en la Ley 10/1998 de residuos y en la 1481/2001 de vertederos, siempre que se trate de los no prohibidos, y otros residuos asimilables a urbanos procedentes o entregados por otras entidades o particulares. También se lleva a cabo la recepción los residuos no peligrosos procedentes de las plantas de transferencia y puntos limpios que MARE gestiona, así como los residuos no peligrosos que constituyen el rechazo de la Planta de Tratamiento de Residuos (PTR) de Cantabria en la que la mezcla de residuos se trata para obtener varias corrientes de material reciclable recuperado, que incluye combustible derivado de desechos y material bioestabilizado utilizado como acondicionador de suelos. Los rechazos de la PTR después de la bioestabilización se envían al vertedero, junto con la escoria de la planta de recuperación de energía y otros desechos. Los rechazos previos al tratamiento representan hoy en día aproximadamente el 40% del total de residuos que llegan al vertedero, pero se espera que esta proporción aumente a medida que aumente la cantidad de residuos sometidos a pretratamiento.

Los residuos, clasificados por su código LER, que se pueden admitir en el vertedero (por tratarse de un vertedero controlado) son los correspondientes a la clasificación mostrada en el Anexo I.

El vertedero controlado recibe residuos generados en un área que abarca medio centenar de municipios (300000 habitantes) desde 1992. El vaso de vertido se asienta sobre espesores cercanos a los 2000 m de marga masiva de color gris-azulado con estratificación poco marcada. El área disponible, cercana a los 595000 m² ha sido explotada desde su apertura mediante la creación de celdas que oscilan entre los 5000 y los 10000 m². Estas celdas van siendo rellenadas sucesivamente previa preparación para el vertido que consiste en la excavación del terreno hasta alcanzar la marga sana (espesores de 2 a 5 m). La excavación se complementa en los casos necesarios, según la cota que alcanza el terreno original, con la construcción de un muro de contención de separación entre celdas adyacentes con material del propio vaso de vertido. El sistema operativo incluye el vertido de residuos compactados en capas de aproximadamente 4 m de espesor, con cubiertas intermedias de arcilla de aproximadamente 30 cm. Estas capas se extienden a lo largo de toda la superficie de la celda (López y cols., 2018).

En la Figura 15 se muestra un esquema de explotación de la primera fase del vertedero en el que se observa la configuración en celdas del mismo.

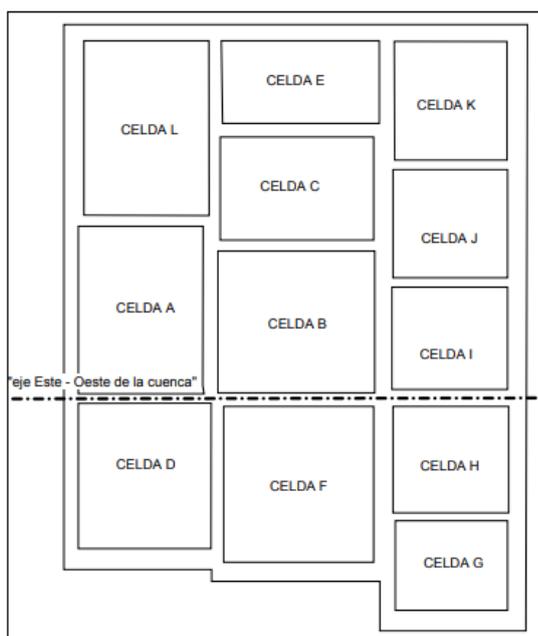


Figura 15. Esquema de explotación de la primera fase del vertedero de estudio. Celdas de vertido. (Lobo, 2003a)

Además, sobre el fondo impermeable se excavan los conductos de drenaje, zanjas de sección trapezoidal rellenas de grava. La configuración habitual del sistema de drenaje es la disposición de espinas de pez con ejes paralelos separados entre sí aproximadamente 20 m, que desembocan en un conducto transversal a los mismos que los une con la tubería colectora general de los lixiviados de todas las celdas (de diámetro 315 mm). En la Figura 16 se muestran las dimensiones de los conductos de drenaje de la base de cada celda (sección A de la Figura 16) y del colector general (Lobo, 2003a).

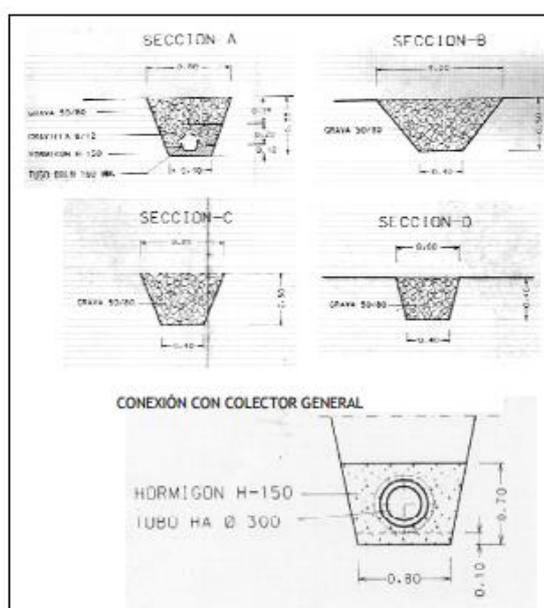


Figura 16. Secciones tipo del sistema de drenaje inferior en las celdas del vertedero estudiado. (Lobo, 2003a)

En el año 2011, se realizó una cubierta final del área total del vertedero aislado de acuerdo con la Directiva del Consejo 1999/31 / CE (Consejo Europeo 1999) y se comenzó una nueva fase de operación, en noviembre de ese año, ubicada en un área hundida en el antiguo vertedero. El material depositado en la nueva fase se mantiene completamente separado del desecho previamente vertido por medio de un forro de doble fondo que tiene dos capas de arcilla y dos geomembranas de polietileno de alta densidad y luego una capa de grava de drenaje seguida de un geotextil (UPM-ETSII, 2018).

En la Figura 17 se muestra una fotografía del área total ocupado por el antiguo vertedero y el área correspondiente a los residuos depositados a partir del 2011 (área señalada con flechas)



Figura 17. Imagen de la situación actual del vertedero de Meruelo (2018). Imagen tomada en una de las visitas de campo realizadas.

En cuanto al clima de la región en que se asienta el vertedero se caracteriza por un clima submediterráneo, entre atlántico y mediterráneo. Su pluviometría oscila entre los 500 y los 800 mm anuales donde las mayores precipitaciones suelen producirse en primavera y todos los meses excepto Julio (seco) y Agosto (subseco) se consideran húmedos. Por otro lado, las temperaturas medias anuales se sitúan entre 12 y 15°C siendo enero y febrero los meses más fríos y la evapotranspiración potencial, calculada según la fórmula de Thornthwaite, está comprendida entre 700 y 800 mm anuales (Montaner y Sánchez-Almohalla, 1988).

Por otro lado, desde el comienzo de su explotación el vertedero de Meruelo ha sido sometido a desgasificación. Hasta 1997 el sistema de eliminación del biogás extraído en las chimeneas se limitaba a su combustión en una antorcha móvil. Entonces se instaló un sistema de captura con el que los gases del vertedero son recolectados por drenajes verticales en estrella (cuyos brazos se colocan después de haber cerrado la capa correspondiente) y conducidos mediante tuberías aéreas a una central de conversión mientras que el excedente de gas se quema en una antorcha dotada de reencendido automático con capacidad de 500 – 1000 m³ /h.

El biogás se utiliza como combustible de seis grupos motor-alternador, de 477 KW de potencia cada uno, que producen energía eléctrica. Una parte de esta energía se emplea en el propio consumo de la planta y el resto se exporta a la red (MARE, 2013).

2.4.2. Selección de parámetros

Una vez propuestos los nuevos parámetros actualizados para la aplicación del modelo, es necesario realizar una revisión de los parámetros por defecto que se utilizan en la actualidad en el vertedero estudiado para la estimación de las emisiones difusas de metano. En la Tabla 3, se muestra una comparación de los parámetros del modelo IPCC 2006 por defecto (usado actualmente) y los parámetros actualizados en base a la bibliografía como se ha desarrollado en el apartado 2.2. El cambio en las emisiones totales respecto al modelo actual se ha realizado en base a un análisis de sensibilidad de cada uno de los parámetros sobre las emisiones totales de metano estimadas para el año 2017.

Tabla 8. Comparación de los parámetros usados actualmente con los parámetros actualizados propuestos y su contribución en las emisiones totales de metano en porcentaje para un año en concreto.

		Parámetros por defecto (Utilizado en Meruelo en la actualidad)	Parámetros actualizados	Cambios en las emisiones totales respecto a modelo actual
k	Papel	0,05	0,055	26%
	Textiles		0,055	
	Otros putrescibles orgánicos (no alimenticios)		0,088	
	Parques y jardines		0,088	
	Alimentos		0,154	
	Madera		0,028	
	Rechazo compost		0,08	
	Lodos EDAR		0,154	
	Otros	-		
DOC	Papel	0,4	0,4	-6%
	Textiles	0,4	0,24	
	Otros putrescibles orgánicos (no alimenticios)	0,17	0,2	
	Parques y jardines	-	0,2	
	Alimentos	0,15	0,15	
	Madera	0,3	0,43	
	Rechazo compost	0,2	0,12	
	Lodos EDAR	0,05	0,05	
	Otros	0,04	0	
DOCf	Papel	0,5	0,4	-49%
	Textiles		0,32	
	Otros putrescibles orgánicos (no alimenticios)		0,35	
	Parques y jardines		0,35	
	Alimentos		0,64	
	Madera		0,17	
	Rechazo compost		0,27	
	Lodos EDAR		0,5	
	Otros	0		
F		0,55	0,5	-12%
MCF		1	0,95	-6%
OX		0	0,1	-10%
Comienzo reaccion		Año 0	Año 1	4%
Emisiones CH4 2017 (Ton)		6637	2621	-61%

Como se observa en la Tabla 8 anterior, los parámetros actualizados consiguen rebajar la cantidad total de metano emitido en 61 % (6637 toneladas frente a 2621 toneladas de metano emitido) cuando se compara con el modelo que se utiliza en la actualidad. Por tanto, el modelo IPCC de nivel 1 actualmente utilizado sobreestima las emisiones cuando se compara con el modelo IPCC con parámetros actualizados.

Después de realizar una revisión exhaustiva de los parámetros del modelo utilizado para estimar las emisiones difusas de metano en el vertedero de Meruelo, se recogen a continuación las principales características que lo diferencian de la nueva herramienta de cálculo actualizada:

- El comienzo de la reacción se realiza desde la deposición de los residuos, es decir, no se tiene en cuenta el retardo que existe en la generación de metano debido a la necesidad de condiciones anaeróbicas. Este parámetro no afecta en la cantidad de biogás generado, pero sí que afecta en la estimación de las emisiones de un año en concreto. En cambio, en el modelo actualizado se tiene en cuenta que la generación de biogás comienza el 1 de enero del año siguiente al año de deposición de los residuos.
- El usuario introduce las toneladas de cada residuo depositadas en un año en concreto y clasificado por el código LER. La hoja de cálculo calcula directamente las toneladas correspondientes a cada clase de residuo con la que opera el modelo (se recuerda que el modelo opera con 9 clases de residuos donde se agrupan todos los desechos identificados por su LER).
- Usa un único valor de k para toda clase de residuos, correspondiente a un clima seco. Como se ha observado a lo largo del trabajo las condiciones climatológicas juegan un papel muy importante en la generación de biogás, por tanto, es imprescindible tener en cuenta valores de k específicos para cada tipo de residuo, así como el clima correspondiente a la región.
- El factor de corrección de metano es igual a $MCF= 1$ desde la apertura del vertedero a diferencia del valor de $MCF= 0,95$ de la nueva herramienta de cálculo. Un valor de 1 tiene sentido para un vertedero controlado relativamente nuevo. Para vertederos antiguos puede ser interesante tomar diferentes valores a lo largo de los años (a medida que la legislación va actualizándose en relación a una mejor gestión del vertedero controlado) de manera que para una edad temprana del vertedero el valor podría estar más próximo a 0,5 a diferencia del valor aproximado de 1 que se puede dar en la actualidad.
- Utiliza un factor de oxidación de $OX=0$ a diferencia de $OX=0,1$ de la nueva herramienta de cálculo. La oxidación en la superficie en uno de los parámetros más estudiados desde que la Directiva IPCC 2006 propusiera un valor de cero para vertederos controlados. El valor de la nueva herramienta de cálculo se presenta, aun así, como un valor conservador para este parámetro.
- Tiene en cuenta una fracción de metano en el biogás del 55%. La fracción de metano en biogás por defecto en todos los modelos revisados es de 0,5 por lo que

el uso de 0,55 actual debe estar comprobado y documentado. Esta justificación se desarrolla en el Apartado 2.2. Revisión y propuesta de parámetros.

- Al igual que la nueva herramienta de cálculo propuesta, el modelo que se usa en la actualidad toma por defecto el parámetro “Carbono Orgánico Degradable” DOC establecido por la Directiva IPCC 2006 para las clases de residuo (Papel, Alimentos y lodos EDAR). Por otro lado, para la categoría de residuo “rechazo de compostaje”, que no aparece especificada en la directiva, toma un valor de $DOC=0,2$ a diferencia del valor de $DOC=0,12$ que se toma en la nueva herramienta de cálculo una vez revisado y actualizado el parámetro, a partir de la composición de ese rechazo (Dato obtenido del plan de residuos de la comunidad de Cantabria 2017-2023).

En el modelo que se aplica en la actualidad, las categorías de “Textiles, Otros Putrescibles (no alimenticios), Parques y Jardines, Madera y Otros” toman valores diferentes del parámetro DOC a los proporcionados por la Directiva IPCC. En la nueva herramienta de cálculo, se han modificado y se han definido los valores por defecto propuestos por la Directiva IPCC, ya que son los únicos soportados por bibliografía de calidad.

- Toma un único valor del parámetro “fracción de DOC que se degrada” (DOCf) para toda clase de residuo. En la herramienta de calculo actualizado se han cambiado, en base a bibliografía, los valores por defecto de DOCf como se puede observar en la Tabla 8, con el objetivo de obtener resultados con menor incertidumbre.

El siguiente paso, como se comenta al inicio del capítulo, es realizar un estudio mediante ensayos y mediciones en campo de la cantidad de biogás recuperable y comparar los resultados obtenidos con los resultados del modelo que se utiliza actualmente en el vertedero y con los resultados de la herramienta de cálculo con parámetros actualizados creada en este proyecto.

2.4.3. Ensayo y mediciones en campo

Como se ha comentado, estos ensayos están encaminados a determinar la cantidad y calidad del biogás recuperable mediante la realización de medidas y ensayos en el vertedero. Más concretamente en este proyecto, se espera comparar las mediciones de campo con los dos modelos planteados en el apartado anterior (el modelo que se utiliza en la actualidad y el creado a partir de parámetros actualizados) y comprobar que el nuevo modelo proporciona resultados con menor incertidumbre.

En este apartado se revisa, en primer lugar, los equipos de medida utilizados para los ensayos y medidas. A continuación, se describe la ubicación y el número de sondas de muestreo necesarias, así como la duración de los ensayos. Finalmente, se explica la información obtenida del ensayo con el fin de determinar la cantidad de metano que se emite a la atmosfera a través de la superficie del vertedero. La metodología está basada en las recomendaciones de la Environment Agency de Reino Unido (UK-EA 2010) y se ha utilizado en tres campañas de mediciones realizadas en mayo, julio y diciembre de

2016. A partir del tratamiento estadístico de los datos recogidos en estas campañas se ha estimado la emisión anual del vertedero.(UPM-ETSII, 2018)

2.4.3.1. Instrumentos analíticos

Las diferentes medidas necesarias para determinar las emisiones superficiales de biogás en el vertedero de Meruelo, se han realizado utilizando dos analizadores portátiles.

El Sensit PMD, es un instrumento portátil que cuantifica la concentración de metano en una mezcla gaseosa por medio de un sensor de espectroscopía de absorción en el infrarrojo, combinado con un filtro electrónico de paso de banda estrecha. Además, consta de un sistema de geoposicionamiento GPS y registro de datos. Este instrumento funciona mediante baterías recargables, lo cual facilita en gran medida su uso en trabajo de campo.

EL analizador KIMO HQ210P, es un analizador multifunción capaz de determinar medidas de temperatura y humedad. Además, puede determinar la concentración de dióxido de carbono en un rango entre 0 y 5000 ppm, con una resolución de 1 ppm y una precisión de $\pm 3 \%$. La cuantificación del dióxido de carbono se lleva a cabo, también, por medio de un sensor de espectroscopía de absorción en el infrarrojo. Este instrumento también cuenta con un sistema de registro de datos y opera con baterías recargables.(Armstrong y Gregory, 2007)

2.4.3.2. Determinación de la superficie emisora

Para calcular la emisión total del vertedero, es necesario calcular en primer lugar la tasa de emisión media por unidad de área del mismo. La emisión total se calculará multiplicando este valor por el de la superficie emisora que se está estudiando.

El resultado obtenido en el cálculo fue 59500 m² para la superficie emisora total. Se debe tener en cuenta, que la superficie total calculada está referida a la zona de vertido de residuo sobre el primer sellado tal como se representa en la Figura 18. En este trabajo se supuso que la emisión del resto de la superficie del vertedero, es decir, la del área del vertedero sellada y sobre la que aún no se ha depositado nuevo residuo, es despreciable.

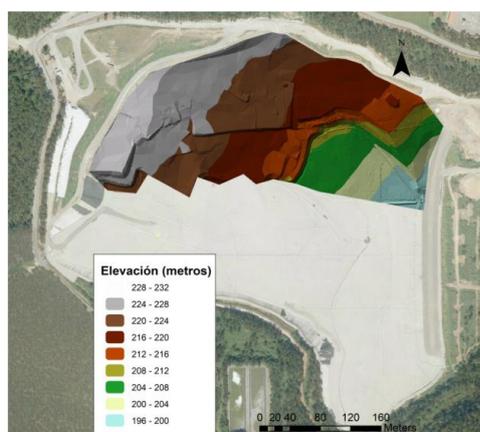


Figura 18. Representación de la superficie total del vertedero a partir de las líneas de nivel. (UPM-ETSII, 2018)

Antes de mostrar los resultados, el alcance de los mismos debe ser evaluado teniendo en cuenta los siguientes condicionantes:

- Las emisiones evaluadas corresponden al área de residuos vertidos sobre la obra de sellado finalizada en el año 2011. Se ha hecho la suposición de que las emisiones en el área restante son despreciables.
- El número de medidas realizado en cada campaña es limitado. Esto hace que los intervalos de confianza tomen valores del 95%.
- Las mediciones realizadas tan solo tienen en cuenta las emisiones superficiales, despreciando las debidas a la presencia de estructuras en la propia superficie, como pozos de extracción de biogás o de control de lixiviados. El análisis cualitativo llevado a cabo durante la primera campaña de medición no apunta la necesidad de realizar medidas adicionales para determinar las emisiones en este tipo de estructuras.

2.4.3.3. Resultados de las mediciones

Para tratar obtener una emisión media de cada campaña que sea representativa y con unos intervalos de confianza algo más estrechos, se ha seguido el enfoque estadístico llamado estimador no sesgado de varianzas mínimas (de sus siglas en inglés MVUE). De este modo, los resultados obtenidos para las tres campañas se muestran a continuación en la Tabla 9.

Tabla 9. Emisión total anual calculada para cada una de las campañas realizadas

Campaña	Emisión (Ton/año)	Limite inf. (95%)	Limite sup. (95%)
Primavera 2016	228	74,8	697
Verano 2016	1320	322	5410
Invierno 2016	120	38,4	376

Con estos datos, la emisión anual ponderada y sus intervalos de confianza, que pueden verse en la Tabla 10, se calculan suponiendo que los valores de emisión calculados para cada una de las campañas realizadas se extienden durante 1/3 del año. (UPM-ETSII, 2018)

Tabla 10. Emisión media ponderada utilizando los valores obtenidos para las tres campañas

Emisión total ponderada (Ton/año)	Limite inf. (95%)	Limite sup. (95%)
556	145	2160

Una vez mostrado los resultados obtenidos (en términos de toneladas emitidas a la atmosfera de metano por año) de las mediciones de campo realizadas por un grupo de

investigadores de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Complutense de Madrid, el objetivo es comparar los resultados con los obtenidos de las estimaciones realizadas con el modelo que se aplica actualmente en el vertedero y con la nueva herramienta de cálculo creada con los parámetros actualizados.

2.4.4. Resultados

En primer lugar, se ha comparado los resultados obtenidos, con el modelo que se utiliza en la actualidad y con la nueva herramienta de cálculo, de la estimación de las emisiones de metano en gigagramos (1 Gg = 1000 toneladas) por año desde la apertura del vertedero. Esta evolución de las emisiones a lo largo de los años se puede observar en la Figura 19, donde “Modelo actual” hace referencia a los resultados obtenidos con el modelo que se utiliza en el vertedero en la actualidad y “Modelo actualizado” hace referencia a los resultados obtenidos con la nueva herramienta de cálculo creada.

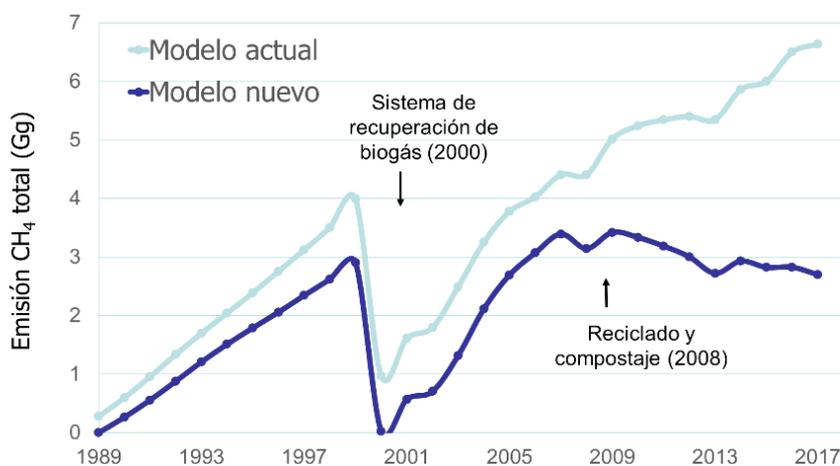


Figura 19. Comparación de emisiones de metano en el vertedero de estudio en gigagramos por año. “modelo actual” vs “Modelo nuevo”

Como se observa en la Figura 19, el modelo nuevo modelo creado a partir de los parámetros actualizados siempre estima unas emisiones menores que el modelo que utiliza actualmente el vertedero con parámetros por defecto propuestos por la Directiva IPCC 2006. Por otro lado, se observa que este nuevo modelo describe acciones de gestión llevadas a cabo en el vertedero como son la instalación de un sistema de recuperación de biogás en el año 2000 (se observa una reducción drástica de las emisiones de metano) y la consideración de comenzar con el reciclado y compostaje de residuos a partir del año 2008. El reciclado y compostaje reduce la cantidad de contenido orgánico degradable de los residuos depositados en el vertedero generando menos cantidad de biogás y, por tanto, disminuyendo las emisiones de metano a la atmósfera. Como se observa en la Figura 19, el comportamiento de la disminución de las emisiones debido al reciclado y compostaje solo se describe en el nuevo modelo.

Estas diferencias, se deben en primer lugar a la actualización de parámetros por defecto usados en este nuevo modelo y, en segundo lugar, por la consideración de las condiciones climáticas y la especificación de los parámetros para cada tipo de residuo de este nuevo modelo. Por ejemplo, el considerar que todos los residuos tienen una misma velocidad de degradación (como hace el modelo actual asumiendo un valor de k igual para toda clase

de residuo) hace que la introducción del reciclado y compostaje no sea predicha por el modelo.

Como se observa en la Tabla 11, los resultados obtenidos en ambos modelos se comparan con los obtenidos de las mediciones de campo que se llevaron a cabo en el año 2016 (mostrados en la Tabla 10). El objetivo es comparar los resultados y comprobar que el nuevo modelo con parámetros actualizados estima unos resultados más próximos a la realidad.

Tabla 11. Toneladas de metano emitido a la atmosfera en el vertedero de Meruelo durante el año 2016 según las medidas de campo y la estimación con modelos.

	Medidas de campo	Modelo actual	Modelo actualizado
Emisiones CH4 2016 (Ton)	145 - 2160	6503	2547

Las emisiones obtenidas con la nueva herramienta de cálculo se reducen en un 61% comparándolas con las estimadas con la hoja de cálculo que se utiliza en la actualidad (Modelo actual). Los resultados de las medidas de campo se muestran en un rango amplio de confianza de resultados, esto se debe a las simplificaciones que se han tenido en cuenta a la hora de realizar las mediciones.

Se puede observar que el nuevo modelo estima valores próximos al intervalo de confianza de las mediciones. Aun así, proporciona estimaciones 17% mayores al límite superior del rango de resultados de las medidas de campo.

Mientras que el nuevo modelo evalúa las emisiones de metano desde el año 1989 (año en el que se empezaron a depositar desechos), las mediciones únicamente se realizaron sobre los residuos depositados a partir del año 2011, suponiendo que en el área que ocupan residuos depositados en años anteriores al 2011 no existen emisiones de metano. Esta suposición se debe a que, en ese año, el vertedero fue sellado completamente y se comenzó de nuevo a depositar los residuos encima de la cubierta.

Por tanto, con el objetivo de comparar ambos resultados, se han creado varios escenarios y se ha representado en la Figura 20 el porcentaje de desviación, en base a los resultados obtenidos de las mediciones de campo, de los resultados estimados con los diferentes modelos y escenarios.

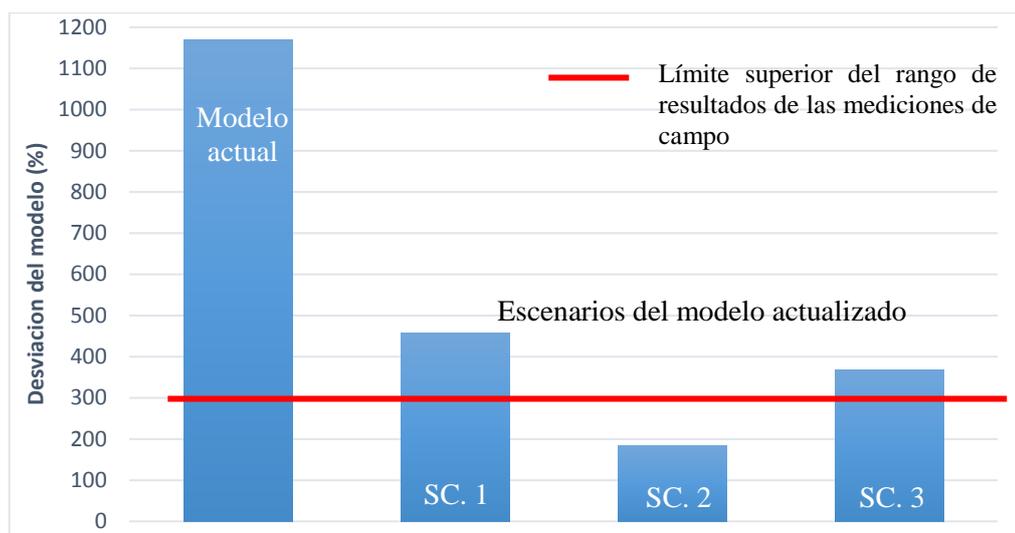


Figura 20. Desviación del modelo actual y de los diferentes escenarios del modelo actualizado con respecto al resultado obtenido en las mediciones de campo

Donde:

El límite superior de resultados de las mediciones de campo hace referencia al valor de 2160 toneladas de metano en el año 2016. Obtenido a partir de la estimación media de emisiones (Ton/año) medidas in-situ teniendo en cuenta las consideraciones citadas en el apartado 2.4.3. Ensayo y mediciones en campo.

El modelo actual y el modelo actualizado (escenario 1) muestra la desviación con respecto a las mediciones de los resultados obtenidos con cada modelo (con los parámetros por defecto mostrados en la Tabla 8). Tienen en cuenta la generación de metano producida por los residuos depositados desde la apertura del vertedero en el año 1989. Los resultados que se representan en la Figura 16 hacen referencia a los mostrados en la Tabla 11 para cada modelo.

El modelo actualizado (Escenario 2) muestra la desviación con respecto a las mediciones de los resultados obtenidos teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se considera que los residuos depositados en los años anteriores al 2011 no generan emisiones. Por tanto, es como si se abriese un nuevo vertedero en ese año.
- La mayor parte de pozos de extracción están ubicados fuera del área que se tiene en cuenta en este escenario, por tanto, el metano capturado por el sistema no se evalúa en este escenario.

El modelo actualizado (Escenario 3) muestra la desviación con respecto a las mediciones de los resultados obtenidos teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se divide el vertedero en 2, el vertedero 1 se corresponde a los residuos depositados (1989-2011) y el vertedero 2 (2011-Actualidad). 2011 se corresponde al año en el que se sella completamente el vertedero.

- En el vertedero 1 se considera que los residuos depositados en los años anteriores al 2011 generan a partir de este año unas emisiones con una tasa de reacción correspondiente a clima seco. Mientras que en el vertedero 2 se consideran los residuos depositados a partir de 2011.
- Las emisiones generadas para un año determinado corresponden a la suma para ese año de cada vertedero.

Un resumen gráfico sobre los límites temporales de estudio de cada uno de los escenarios se muestra a continuación en la Figura 21.

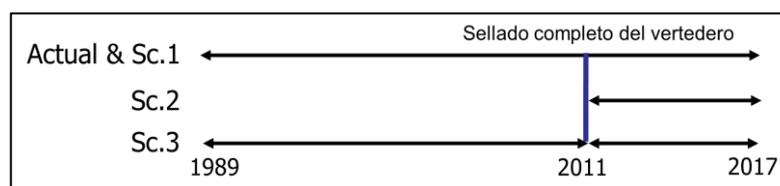


Figura 21. Límites temporales de estudio para cada uno de los modelos y escenarios propuestos teniendo en cuenta el sellado completo del vertedero realizado 2011.

Una vez que se contemplan los resultados mostrados en la tabla de los diferentes escenarios, se observa que los nuevos escenarios creados (Sc.1 y Sc.2), con el objetivo de comparar los resultados de las mediciones de campo con el modelo actualizado, estiman valores dentro del rango de las mediciones. Por tanto, parece que este nuevo modelo estima unas emisiones de metano bastante próximas a la realidad.

Tabla 12. Toneladas de metano emitido durante el año 2016 estimadas con los diferentes modelos y medidas de campo

	Medidas de campo	Modelo actual	Modelo actualizado		
			Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Emisiones CH4 2016 (Ton)	145 - 2160	6503	2547	1018	2041

Además, si las mediciones se hubieran llevado a cabo sobre el área total del vertedero, cubriendo todos los residuos depositados desde el año 1989, cabe esperar que los resultados de las mediciones estarían próximos al escenario 3. Este último escenario no es más que una modificación del modelo actualizado (escenario 1) que describe una acción de gestión que se realiza en el vertedero en el año 2011 (sellado total) y, por tanto, resta incertidumbre a la estimación.

Como conclusión sobre la comparación de resultados obtenidos de la estimación con el modelo que se utiliza en la actualidad, el modelo actualizado y las mediciones de campo, se obtiene que la nueva herramienta de cálculo creada y proporcionada en este proyecto estima resultados más próximos a la realidad y, por tanto, resulta interesante extender su aplicación a vertederos que utilizan aun el modelo de nivel 1 por defecto proporcionado por la directiva IPCC 2006.

El sellado final que se realizó en el año 2011 no es una práctica habitual en los vertederos por lo que se aconseja al usuario utilizar por defecto la hoja de cálculo proporcionada en este proyecto sin crear ningún escenario específico.

En el caso de que se estudie un vertedero que, al igual que el vertedero de Meruelo, ha sellado su superficie para comenzar a depositar residuos de nuevo, se aconseja usar la herramienta de cálculo siguiendo las consideraciones realizadas para el escenario 3 de este caso de estudio. Es decir, suponiendo que las emisiones totales de metano para un año en concreto se obtienen de la suma de las emisiones de un vertedero que opera desde la apertura hasta el año del sellado y otro vertedero que opera desde el año de sellado hasta el año del que se desean conocer las emisiones.

3. CONCLUSIONS AND FUTURE RECOMMENDATIONS

3.1. CONCLUSIONS

According to the current legal framework, the sustainable environmental management of a RSU requires the use of all available techniques to guarantee the proper collection and treatment of the produced gases throughout the exploitation, closing, sealing and checking processes. To move on in this aspect, is important to have methods for the precise estimation of uncontrolled gas emissions, since that would allow to evaluate the impact of the management improvement measures. It not only lays on the scientific and updated bibliography, but also in the in situ experience that comes with, mainly, the works in the landfill in Meruelo. It has allowed to gather a series of concepts about generation, recovery and diffused emissions of methane. A new calculating method with updated parameters has been created, allowing to theoretically, with less uncertainty, the diffused methane emissions of any given landfill when having the needed information. In order to do so:

- The legal framework on collecting, treatment and emissions of greenhouse gases has been clearly introduced, while also developing the state of art about the generation of biogas in controlled landfills and existing models for the estimation of diffused emissions.
- The factors that influence the emission of greenhouse gases have been classified, distinguishing among meteorological factors, composition and amount of collected waste, design of the landfill and waste treatment. Defying these factors and their effect on methanogenesis have been useful to update the parameters introduced in the newly created calculating tool.
- A calculating tool in Excel format has been created for the generation of biogas and yearly diffused methane emissions in a controlled landfill. It has been done from the data of the poured amounts of each kind of waste and weather conditions, that allows to predict results throughout the life of the landfill and after its closing. This model is useful and necessary since it helps to alleviate the lack of updated methods with controlled uncertainty to estimate the emissions of a certain landfill. Moreover, this tool is purposeful, for instance, to know, in a first approximation, what is the recoverable biogas flow and to decide, according to it, the energetic exploitation viability of said landfill, achieving this way a reduction of diffused emissions.

The new calculating tool has been developed based around the first order multiphase degradation reaction, greatly accepted and included in the IPCC Directive's proposal. The amount of methane generated in a year was calculated from the degradable organic carbon from all waste historically deposited in the landfill, reflecting all changes in goods consumption, recycling and treatment strategies prior to elimination. Weather conditions such as precipitation, evapotranspiration and temperature are also included in the calculating of the total methane generated amount. Other varied factors that define the bioavailability of the total deposited DOC are also identified through literature and incorporated in the development of the historical and future projection of biogas generated each year through the life of the landfill. Also, for the calculating of diffused

methane emissions in a year, the surface oxidation of methane and biogas captured by the extracting system are taken into account in the model.

To verify the results of the developed model, the calculating tool was used to estimate the diffused methane emissions in the area of Meruelo's landfill, corresponding to the waste collected from 2011 and they were compared to real in situ data. The results pointed out a quite low deviation of real medium in the year of the study, falling among the trust interval provided by the entity that does the in situ measures.

It can be concluded that, although nowadays is not possible to precisely quantify the generation of biogas, the estimations calculated with the new tool are closer to the real value, in comparison to existing models.

3.2. FUTURE RECOMMENDATIONS

One of the recommendations for the future in order to reduce the uncertainty in the estimation of diffused methane emissions in a landfill is to keep a proper record of the composition of received waste in the landfill and the biogas capture system since they allow to assess with higher precision the biogas generation and estimate diffused emissions.

On the other hand, the updating of parameters in the new calculating tool has been possible thanks to the new techniques used for the characterization of waste and the current knowledge on methanogenesis reaction of organic matter from them. Therefore, it is to be expected that with the improvement in knowledge of the field, the less uncertainty there will be when estimating the diffused methane emissions in landfills.

Moreover, from the sensibility analysis of the parameters developed in this Project allows us to conclude that the parameters that provide more uncertainty are the organic fraction of waste that degrades (DOCf), the constant reaction rate (k) and the oxidation factor (OX). It would be advisable to pay more attention to deeper study of these parameters. In order to do so, it is important to be updated in all advancements and bibliographic publications and to do experimental testing of waste characterization.

As stated, it is wanted that the new calculating tool is applicable to any landfill when keeping into account weather, technical, geographical and operational specifications. Thereupon, with the goal of contrasting the validity of the given tool, it is highly useful to carry out other study cases where estimated diffused emissions of a certain landfill are compared to real field measures.

4. NOMENCLATURA

CH_4 generador _T	Cantidad CH_4 generado a partir del material en descomposición durante el año T, Gg
CH_4 emitido _T	Cantidad CH_4 emitido durante el año T, Gg
DDOC _m	Cantidad de carbono orgánico degradable que se puede descomponer de un residuo, Gg
DDOC _{maT}	DDOC _m acumulado en los SEDS al final del año T, Gg
DDOC _{maT-1}	DDOC _m acumulado en los SEDS al final del año (T-1), Gg
DDOC _{mdT}	DDOC _m depositado en los SEDS durante el año T, Gg
DDOC _m descomp _T	DDOC _m descompuesto en los SEDS durante el año T, Gg
DOC	Carbono orgánico degradable durante el año de deposición, fracción, Gg de C/Gg de desechos
DOC _f	Fracción del DDOC que puede descomponerse, fracción
F	Fracción volumétrica de CH_4 en el gas de vertedero generado, fracción
k	Tasa de la constante de reacción, año ⁻¹
MCF	Factor de corrección de CH_4 para la descomposición aeróbica durante el año de deposición, fracción
OX _T	Factor de oxidación durante el año T, fracción
R _T	CH_4 recuperado durante el año T, Gg
T	Año del inventario
WT	Masa de los desechos depositados durante el año T, Gg
x	Categoría o tipo de desecho y/o material

5. BIBLIOGRAFIA

Abedini, A. R. (2014) *Integrated approach for accurate quantification of methane generation at municipal solid waste landfills*. The University of British Columbia.

Armstrong, K. y Gregory, R. (2007) *Review of Landfill Surface Emissions Monitoring*.

ASEGRE (2010) «Protocolo para la cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero en actividades de gestión de residuos», p. 46.

ATSDR (2001a) *Landfill gas primer: an overview of environmental health professionals*. Disponible en: <https://www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/html/intro.html> (Accedido: 30 de julio de 2018).

ATSDR (2001b) *Landfill Gas Primer, An Overview For Environmental Health Professionals*. Disponible en: <http://www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/html>.

Barlaz, M.A., Eleazer, W.E., Odle, W.S., Qian, X., Wang, Y.-S. (1997) *Biodegradative analysis of municipal solid waste in laboratory-scale landfills*.

Barlaz, M.A., Ham, R.K., Schaefer, D. M. (1990) «Methane production from municipal refuse: a review of enhancement techniques and microbial dynamics», *Crit. Rev. Environ. Control*, 19(6), pp. 557–584.

CAMEO Chemicals (2018) *Database of Hazardous Materials*. Disponible en: <https://cameochemicals.noaa.gov/> (Accedido: 21 de agosto de 2018).

CDM (2011) *Methodological Tool: Emissions from solid waste disposal sites, EB 65 Report*. Disponible en: <http://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-04-v6.0.0.pdf>.

Chanton, J. P., D. K. Powelson, and R. B. G. (2009) «Methane Oxidation in Landfill Cover Soils, is a 10% Default Value Reasonable?», *J. Environ. Qual.*, 38, pp. 654-663. doi: 10.2134/jeq2008.0221.

Chanton, J. *et al.* (2011) «Landfill methane oxidation across climate types in the U.S.», *Environmental Science and Technology*, 45(1), pp. 313-319. doi: 10.1021/es101915r.

Choi, E. *et al.* (2017) «The application and development of country-specific parameters for accurate estimations of methane emissions from solid-waste disposal sites», *Journal of Material Cycles and Waste Management*. Springer Japan, 19(3), pp. 1117-1126. doi: 10.1007/s10163-016-0507-y.

El-Fadel, M., Findikakis, A. N. y Leckie, J. O. (1997) «Environmental impacts of solid waste landfilling», *Journal of Environmental Management*, 50(1), pp. 1-25. doi: 10.1006/jema.1995.0131.

EUR-Lex (2014) «2014/955/EU: Commission Decision of 18 December 2014 amending Decision 2000/532/EC on the list of waste pursuant to Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council Text with EEA relevance». Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dec/2014/955/oj>.

Faour, A. A., Reinhart, D. R. y You, H. (2007) «First-order kinetic gas generation model parameters for wet landfills», *Waste Management*, 27(7), pp. 946-953. doi: 10.1016/j.wasman.2006.05.007.

García, F. *et al.* (2013) «Influencia de las variables climáticas en la generación de biogás en un relleno sanitario de México», en *VSIIR-REDISA*.

GMI (2012) «International Best Practices Guide for LFGE Projects». Global Methane Initiative, pp. 63-76.

Gobierno de Cantabria (2017) «Plan de residuos de la comunidad Autónoma de Cantabria 2017-2023». Disponible en: <http://www.cantabria.es/documents/16894/4699136/PLAN+RESIDUOS+CANTABRIA+2017-2023+%28BOC+30-3-2017%29.pdf/acba2296-4953-6f4b-899d-cb86e8d2c2e6>.

Gobierno de España. Ministerio de Agricultura y Alimentación y Medio Ambiente (2014) «Metodología de seguimiento para proyectos CLIMA de tratamiento de residuos cuando la actividad del proyecto CLIMA tiene lugar íntegramente en vertedero».

Gobierno de España. Ministerio de Agricultura y Pesca y Alimentación (2018) *Infraestructura de Datos Espaciales (IDE)*. *GeoPortal*. Disponible en: <https://www.mapama.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/geoportal/> (Accedido: 31 de julio de 2018).

Gobierno de España. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2009) *Plan Nacional Integrado de Residuos 2008- 2015 (PNIR)*, *Boletín Oficial del Estado* 49. Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/2009/02/26/pdfs/BOE-A-2009-3243.pdf>.

Harries, C.R., Cross, C.J., Smith, R. (2001) «Development of a biochemical methane potential (BMP) test and application to testing of municipal solid waste samples.», en *Sardinia 2001*. Cagliari, Italy, pp. 579–588.

IPCC (2000) *Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*.

IPCC (2006) «CH₄ Emissions from Solid Waste Disposal», *IPCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*, pp. 419-439. Disponible en: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/5_1_CH4_Solid_Waste.pdf.

Karanjekar, R. V. (2012) *An Improved Model For Predicting Methane Emissions From Landfills Based On Rainfall , Ambient Temperature, And Waste Composition*. UNIVERSITY OF TEXAS AT ARLINGTON. Disponible en: http://dspace.uta.edu/bitstream/handle/10106/11641/Karanjekar_uta_2502D_11623.pdf?sequence=1.

Lee, U., Han, J. y Wang, M. (2017) «Evaluation of landfill gas emissions from municipal solid waste landfills for the life-cycle analysis of waste-to-energy pathways», *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 166, pp. 335-342. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.08.016.

- Lobo, A. (2003a) *Desarrollo de MODUELO 2: herramienta para la evaluación de la contaminación producida en vertederos de residuos sólidos urbanos*. Universidad de Cantabria.
- Lobo, A. (2003b) *Moduelo 2: A tool to be used to evaluate municipal solid waste landfills contamination*. PhD Thesis, University of Cantabria.
- López, A. *et al.* (2018) «Emissions from mechanically biologically treated waste landfills at field scale», *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15(6), pp. 1285-1300. doi: 10.1007/s13762-017-1497-6.
- Lou, X. F. y Nair, J. (2009) «The impact of landfilling and composting on greenhouse gas emissions - A review», *Bioresource Technology*. Elsevier Ltd, 100(16), pp. 3792-3798. doi: 10.1016/j.biortech.2008.12.006.
- Machado, S. L. *et al.* (2009) «Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results», *Waste Management*. Elsevier Ltd, 29(1), pp. 153-161. doi: 10.1016/j.wasman.2008.02.017.
- Mahieu K., Visscher A. D., V. P. A. and C. O. V. (2006) «Carbon and hydrogen isotope fractionation by microbial methane oxidation: Improved determination.», *Waste Management*, 26(4), pp. 389-398.
- Majdinasab, A., Zhang, Z. y Yuan, Q. (2017) «Modelling of landfill gas generation: a review», *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. Springer Netherlands, 16(2), pp. 361-380. doi: 10.1007/s11157-017-9425-2.
- MARE (2013) *Contrato de Adjudicación, procedimiento de emergencia, de los servicios de explotación, mantenimiento y conservación del vertedero de residuos no peligrosos de Meruelo*. Disponible en: <http://www.mare.es/> (Accedido: 16 de agosto de 2018).
- Martín González, S. (1999) *Producción y Recuperación del Biogás en Vertederos Controlados de Residuos Sólidos Urbanos*.
- Montaner Salas, M. E. y Sánchez-Almohalla Serrano, E. (1988) «Aproximación, por el Método De Thornthwaite, al cálculo de la infiltración de la lluvia útil», *Papeles de Geografía*, 14, pp. 223-235.
- Njoku, P. O. *et al.* (2018) «A Review of Landfill Gas Generation and Utilisation in Africa», pp. 1-15. doi: 10.2174/1876325101810010001.
- Oonk, H. (2010) «Literature review: methane from landfills», *Sustainable Landfill Foundation*, (April). Disponible en: <http://www.sustainablelandfillfoundation.eu/>.
- Oonk, H. y Boom, T. (1995) «Validation of landfill gas formation models», *Studies in Environmental Science*. Elsevier, 65, pp. 597-602. doi: 10.1016/S0166-1116(06)80251-7.
- Patino, A. F. L. *et al.* (2015) *Uncertainty Assesment of Models for Landfill Biogas, International Congress of Mechanical Engineering (COBEM)*.

Penman J., Kruger D., Galbally I., Hiraishi T., Nyenzi B., Enmanuel S., Buendia L., H. R. y Martinsen T., Meijer J., M. K. and T. K. (2000) «Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories», *IPCC*.

Rodrigo Clavero, M. E. (2016) *BIOLEACH: un modelo matemático para la evaluación conjunta de la producción de lixiviados y biogás en vertederos de RSU*.

Scharff H., D.M.M.v.Rijn, Hensen A., Oonk J., A. de Visscher, Flechard C., V. R. and B. P. (2003) «A comparison of measurement methods to determine landfill methane emissions.» The Netherlands: NV Afvalzorg.

Scharff, H. (2015) «Documento guía sobre la reducción de las emisiones de gases de vertedero 2015», *Gobierno Vasco. Departamento de Medio Ambiente y Política Territorial*.

SCS Engineers (2007) «Current MSW Industry Position and State-of-the-Practice on LFG Collection Efficiency, Methane Oxidation, and Carbon Sequestration in Landfills», (June), pp. 1-59.

Secretaría de Estado y Medio Ambiente (2018) *Inventario Nacional de Emisiones de Efecto Invernadero*.

SFT report (2005) *Methane emissions from solid waste disposal sites, Statistics*.

Sistema Español de Inventario de Emisiones (2001) «Deposito de residuos solidos en vertederos controlados», *Metodologias de estimacion de emisiones*.

Spokas, K., Bogner, J. y Chanton, J. (2011) «A process-based inventory model for landfill CH₄ emissions inclusive of seasonal soil microclimate and CH₄ oxidation», *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116(4). doi: 10.1029/2011JG001741.

Tchobanoglous, G.; Theisen, H. Vigil, S. (1994) *Gestión integral de residuos sólidos*. McGraw-Hil. New York.

UPM-ETSII (2018) *Determinación de las emisiones superficiales en el vertedero de Meruelo*.

USEPA (2004) *Direct Emissions from Landfilling Municipal Solid Waste*. Washington, D.C.

USEPA (2017) *LFG Energy Project Development Handbook*. Disponible en: <http://www.epa.gov/lmop/publications-tools/handbook.html>.

Whalen S. C., R. W. S. and S. K. A. (1990) «Rapid Methane Oxidation in a Landfill Cover Soil.», *Applied and Environmental Microbiology*, 56(11), pp. 3405-3411.

6. ANEXOS

ANEXO I. Clasificación de residuos usada en la herramienta de cálculo en base al código correspondiente en la lista europea de residuos.

Clasificación herramienta de calculo	Clasificación LER	
	Código LER	Grupo
Residuos vegetales y orgánicos no alimentarios	040210	Materia orgánica de productos naturales (por ejemplo grasa, cera)
	160306	Residuos orgánicos distintos de los especificados en el código 16 03 05.
	190502	Fracción no compostada de residuos de procedencia animal o vegetal
	190503	Compost fuera de especificación
	200108	Residuos biodegradables de cocinas y restaurantes.
	200125	Aceites y grasas comestibles
	200201	Residuos biodegradables.
	200301	Mezclas de residuos municipales.
	200302	Residuos de mercados.
	200303	Residuos de la limpieza viaria.
	200304	Lodos de fosas sépticas.
	200306	Residuos de la limpieza de alcantarillas.
	200399	Residuos municipales no especificados en otra categoría.
Rechazo compostaje	190501	Fracción no compostada de residuos municipales y asimilados.
Lodos EDAR	070212	Lodos del tratamiento in situ de efluentes, distintos de los especificados en 070211
	190206	Lodos de tratamientos físico-químicos distintos de los especificados en el código 19 02 05.

	190801	Residuos de cribado.
	190802	Residuos de desarenado.
	190805	Lodos del tratamiento de aguas residuales urbanas.
	190812	Lodos procedentes del tratamiento biológico de aguas residuales industriales distintos de los especificados en el código 19 08 11
	190814	Lodos procedentes de otros tratamientos de aguas residuales industriales, distintos de los especificados en el código 19 08 13
	190902	Lodos de la clarificación del agua
Madera y similares	030101	Residuos de corteza y corcho
	030105	Serrín, virutas, recortes, madera, tableros de partículas y chapas distintos de los mencionados en el código 03 01 04
	030301	Residuos de corteza y madera
	150103	Envases de madera
	170201	Madera.
	191207	Madera distinta de la especificada en el 191206
	200138	Madera distinta de la especificada en el código 20 01 37.
	200307	Residuos voluminosos.
Papel y textiles	030307	Desechos de pasta elaborada a partir de residuos de papel y cartón
	030308	Residuos procedentes de la clasificación de papel y cartón destinados al reciclado
	030310	Desechos de fibras y lodos de fibras, de materiales de carga y de estucado
	040221	Residuos de fibras textiles no procesadas

	040222	Residuos de fibras textiles procesadas
	150101	Envases de papel y cartón
	150109	Envases textiles
	150203	Absorbentes, materiales de filtración, trapos de limpieza y ropas protectoras distintos de los especificados en el código 15 02 02
	191201	Papel y cartón
	191208	Textiles
	200101	Papel y cartón.
	200110	Ropa.
	200111	Tejidos
Otros	010409	Residuos de arena y arcillas
	010504	Lodos y residuos de perforaciones que contienen agua dulce
	020199	Residuos no especificados en otra categoría
	061303	Negro de carbón
	070213	Residuos de plástico
	070299	Residuos no especificados en otra categoría
	080410	Residuos de adhesivos y sellantes, distintos de los especificados en el código 08 04 09
	110110	Lodos y tortas de filtración distintos de los especificados en el código 11 01 09
	150102	Envases de plástico.
	150105	Envases compuestos.
	150106	Envases mezclados.
	150107	Envases de vidrio

	160103	Neumáticos fuera de uso.
	160216	Componentes retirados de equipos desechados distintos de los especificados en 160215
	170202	Vidrio
	170203	Plástico procedente de la construcción y demolición.
	170604	Materiales de aislamiento distintos de los especificados en los códigos 17 06 01 y 17 06 03
	170904	Residuos mezclados de construcción y demolición distintos de los especificados en los códigos 17 09 01, 17 09 02 y 17 09 03
	180104	Residuos cuya recogida y eliminación no es objeto de requisitos especiales para prevenir infecciones
	180203	Residuos cuya recogida y eliminación no es objeto de requisitos especiales para prevenir infecciones
	190112	Cenizas de fondo de horno y escorias distintas de las especificadas en el código 19 01 11.
	190114	Cenizas volantes distintas de las especificadas en el 190113
	190116	Polvo de caldera distinto del especificado en el 190115
	190118	Residuos de pirolisis distintos de los especificados en el 190117
	190119	Arenas de lechos fluidizados
	190703	Lixiviados de vertedero que no contienen sustancias peligrosas
	190809	Mezclas de grasas y aceites procedentes de la separación de agua/sustancias aceitosas que contienen sólo aceites y grasa

	190901	Residuos sólidos de la filtración primaria y cribado.
	190904	Carbón activo usado
	190905	Resinas intercambiadoras de iones saturadas o usadas
	190999	Residuos no especificados en otra categoría
	191204	Plástico y caucho.
	191205	Vidrio
	191209	Minerales (por ejemplo, arena, piedras)
	191212	Otros residuos (incluidas mezclas de materiales) procedentes del tratamiento mecánico de residuos, distintos de los especificados en el código 19 12 11
	200102	Vidrio
	200128	Pinturas, tintas, adhesivos y resinas distintos de los especificados en el código 20 01 27.
	200139	Plásticos.
	200141	Residuos del deshollinado de chimeneas
	200199	Otras fracciones no especificadas en otra categoría.
	200203	Otros residuos no biodegradables
Residuos alimentarios	020101	Lodos de lavado y limpieza
	020102	Residuos de tejidos de animales.
	020103	Residuos de tejidos de vegetales.
	020104	Residuos de plásticos (excepto embalajes).
	020106	Heces de animales, orina y estiércol (incluida paja podrida) y efluentes recogidos selectivamente y tratados fuera del lugar donde se generan

	020201	Lodos de lavado y limpieza
	020202	Residuos de tejidos de animales.
	020203	Materiales inadecuados para el consumo o la elaboración.
	020204	Lodos del tratamiento in situ de efluentes
	020301	Lodos de lavado, limpieza, pelado, centrifugado y separación
	020304	Materiales inadecuados para el consumo o la elaboración.
	020305	Lodos del tratamiento in situ de efluentes
	020501	Materiales inadecuados para el consumo o la elaboración.
	020502	Lodos del tratamiento in situ de efluentes
	020601	Materiales inadecuados para el consumo o la elaboración.
	020603	Lodos del tratamiento in situ de efluentes
	020701	Residuos de lavado, limpieza y reducción mecánica de materias primas
	020704	Materiales inadecuados para el consumo o la elaboración.
	020705	Lodos del tratamiento in situ de efluentes