

DOCUMENTO GUÍA SOBRE LA REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE GASES DE VERTEDERO

2015



DOCUMENTO GUÍA SOBRE LA REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE GASES DE VERTEDERO

2015

Fecha	Abril 2015
Autores	Heijo Scharff – NV Afvalzorg Holding Richard Gronert – NV Afvalzorg Holding
Propietario	Gobierno Vasco. Departamento de Medio Ambiente y Política Territorial



<http://www.euskadi.eus/web01->

[s2ing/es/contenidos/manual/guia_gas_vertederos/es_def/guia_gas_vertederos.html](http://www.euskadi.eus/web01-s2ing/es/contenidos/manual/guia_gas_vertederos/es_def/guia_gas_vertederos.html)



PREFACIO	5
1	
CONSIDERACIONES PRELIMINARES	11
1.1 ¿QUÉ SON LOS GASES DE VERTEDERO?	11
1.2 COMPONENTES DE LOS GASES DE VERTEDERO.....	14
1.2.1 <i>Metano</i>	14
1.2.2 <i>Dióxido de carbono</i>	15
1.2.3 <i>Componentes traza</i>	15
1.3 PROBLEMAS DE LOS VERTEDEROS Y DE LOS GASES DE VERTEDERO	17
1.4 LEGISLACIÓN DE LA UE	18
1.5 NORMATIVA DEL PAÍS VASCO	20
1.5.1 <i>Medidas de control de los gases de vertedero</i>	20
1.5.2 <i>Vigilancia de los gases de vertedero</i>	21
2	
FASE DE PLANIFICACIÓN	22
2.1 ACCIONES	22
2.2 DATOS NECESARIOS.....	23
2.3 GENERACIÓN DE GASES DE VERTEDERO	25
2.3.1 <i>Potencial de generación de gases de vertedero</i>	25
2.3.2 <i>¿A qué ritmo se producen los gases de vertedero?</i>	27
2.3.3 <i>Modelos para estimar la generación en volumen de gases de vertedero</i>	30
2.3.4 <i>Ventajas y desventajas de los modelos</i>	32
2.3.5 <i>Precisión de los modelos</i>	33
2.3.6 <i>Gestión de la incertidumbre</i>	35
2.4 PREVISIÓN DE LA GENERACIÓN DE METANO Y ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES	35
2.4.1 <i>Nivel 1: Modelo de descomposición de primer orden</i>	36
2.4.2 <i>Nivel 2: Modelo de descomposición de primer orden de etapas múltiples</i>	37
2.4.3 <i>Nivel 3: Modelo de descomposición de primer orden basado en mediciones de vertederos específicos</i>	38
2.4.4 <i>Nivel 4: Estimación de las emisiones basada en mediciones</i>	38

2.5 SOLICITUD, EVALUACIÓN Y CONCESIÓN DE AUTORIZACIONES.....	39
--	----

3

FASE DE EXPLOTACIÓN	44
----------------------------------	-----------

3.1 ACCIONES	44
--------------------	----

3.2 PLAN DE CONTROL DE LOS GASES DE VERTEDERO.....	45
--	----

3.2.1 Principios del control de los gases de vertedero.....	46
---	----

3.2.2 Algunos conceptos relevantes.....	50
---	----

3.2.3 Control de gases de vertedero «puntero» y basado en la mejor tecnología disponible...54	
---	--

3.2.4 Aspectos técnicos de la recuperación «puntera» de los gases de vertedero.....	55
---	----

3.2.5 Evaluación del plan de control de gases de vertedero	58
--	----

3.3 OPCIONES PARA EL CONTROL DE LOS GASES DE VERTEDERO	59
--	----

3.3.1 Control de gases pasivo y activo	59
--	----

3.3.2 Sistemas de pozo.....	61
-----------------------------	----

3.3.3 Recuperación de gases durante la explotación	62
--	----

3.3.4 Disposición de los pozos	64
--------------------------------------	----

3.4 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE POZOS DE GAS.....	68
--	----

3.4.1 Construcción de pozos verticales.....	68
---	----

3.4.2 Construcción de pozos horizontales	77
--	----

3.4.3 Selección de las válvulas de control.....	80
---	----

3.5 TUBERÍAS DE CAPTACIÓN DE GASES DE VERTEDERO	85
---	----

3.5.1 Tuberías.....	85
---------------------	----

3.5.2 Conexiones temporales	88
-----------------------------------	----

3.5.3 Colectores del condensado.....	89
--------------------------------------	----

3.6 SOPLANTE Y ANTORCHA	91
-------------------------------	----

3.6.1 Soplane (compresor o booster).....	91
--	----

3.6.2 Antorcha para gases de vertedero	93
--	----

3.6.3 Control de las emisiones de gases de vertedero en antorcha	95
--	----

3.6.4 Seguridad	98
-----------------------	----

3.7 APROVECHAMIENTO DE LOS GASES DE VERTEDERO	100
---	-----

3.7.1 Uso directo de los gases de vertedero como combustible.....	101
---	-----

3.7.2 Generación de electricidad.....	102
---------------------------------------	-----

3.7.3 Cogeneración de calor y electricidad.....	104
---	-----

3.7.4 Depuración de los gases de vertedero para obtener gas de la calidad del gas natural .104	
--	--

3.7.5	<i>Crterios de eleccin entre las distintas opciones</i>	105
3.8	OXIDACIN DE METANO.....	106
3.8.1	<i>Introduccin</i>	106
3.8.2	<i>Tecnologas disponibles</i>	108
3.8.3	<i>Capas de los sistemas de oxidacin de metano</i>	112
3.8.4	<i>Requisitos relativos a las propiedades fsicas de los materiales minerales</i>	114
3.8.5	<i>Requisitos relativos a las propiedades qumicas de los materiales minerales</i>	116
3.8.6	<i>Materiales orgnicos</i>	117
3.8.7	<i>Aplicabilidad en climas hmedos y ridos</i>	117
3.8.8	<i>Diseo de los sistemas de oxidacin de metano</i>	118
3.9	OPERACIN Y MANTENIMIENTO.....	120
3.9.1	<i>Comprobacin de fugas antes de la puesta en marcha</i>	120
3.9.2	<i>Puesta en marcha segura</i>	120
3.9.3	<i>Ajuste de la vlvula de control</i>	121
3.9.4	<i>Gestin del condensado</i>	122
3.9.5	<i>Inspeccin y mantenimiento</i>	123
3.9.6	<i>Mantenimiento de los sistemas de oxidacin de metano</i>	124
3.10	VIGILANCIA Y OBLIGACIN DE INFORMAR.....	124
3.10.1	<i>Eficiencia de recuperacin</i>	124
3.10.2	<i>Control de la migracin subterrnea</i>	129
3.10.3	<i>ontrol de las emisiones y de la oxidacin</i>	129
3.10.4	<i>Disminucin de la generacin de los gases</i>	135
3.10.5	<i>Evaluacin y obligacin de informar</i>	136
3.10.6	<i>Evaluacin, aprobacin y toma de decisiones</i>	138
4		
	FASE DE MANTENIMIENTO POST-CLAUSURA	140
4.1	ACCIONES	140
4.2	SOLICITUD DE INICIO DE LA FASE DE MANTENIMIENTO POST-CLAUSURA	140
4.3	OPERACIN Y MANTENIMIENTO	143
4.4	VIGILANCIA Y OBLIGACIN DE INFORMAR	144
4.5	FIN DE LA VIGILANCIA DEL CONTROL DE LOS GASES DE VERTEDERO	144
5		
	OTRAS OPCIONES PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE METANO	148

5.1 RECIRCULACIÓN DE LIXIVIADOS	148
5.2 VERTEDEROS BIORREACTORES	156
5.3 VERTEDEROS AERÓBICOS.....	157

6

ANÁLISIS COSTE/BENEFICIO	163
---------------------------------------	------------

6.1 EFICIENCIA DE LA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE METANO.....	163
6.2 COSTES O RENTABILIDAD	165
6.3 ¿QUÉ COSTES SON ACEPTABLES?	166
6.4 CUANTIFICACIÓN DE COSTES Y RENTABILIDAD	167
6.5 ALGUNOS EJEMPLOS DE COSTES Y RENTABILIDAD.....	170

7

ANEXOS	176
---------------------	------------

PREFACIO

Este documento tiene un triple objetivo:

- Transferir el conocimiento sobre generación de gases de vertedero y tecnología disponible para su recuperación y aprovechamiento a las entidades explotadoras y las autoridades competentes y proporcionar orientación para el desarrollo del proyecto;
- Definir y explicar los métodos y la tecnología más avanzados para minimizar las emisiones de metano en los vertederos.
- Fomentar el cumplimiento de las pautas/normativas vascas y europeas relativas a la reducción de emisiones procedentes de vertederos.

Este documento guía se ha estructurado según las diferentes fases que conforman la operativa de un vertedero:

- Fase de planificación;
- Fase de explotación;
- Fase de mantenimiento post-clausura.

Fase de planificación

Una vez seleccionada la ubicación del vertedero, al preparar la documentación relativa a la Declaración de Impacto Ambiental o solicitar una autorización para explotar un vertedero determinado, la entidad explotadora debe presentar los planes y toda la información pertinente a el órgano ambiental. Entre la información que es necesaria presentar, se encuentran, entre otros, los datos relativos a las dimensiones y el volumen del vertedero, los tipos de residuos que pretende admitir, la cantidad anual de residuos admitidos y cualquier característica específica del vertedero en cuestión. Estos datos se emplean para realizar una estimación sobre los gases de vertedero que se generarán a lo largo del tiempo. La entidad explotadora debe incluir en la documentación una estimación de gases de vertedero generados y una evaluación acerca de si es necesario o no implantar medidas para su control a partir del momento en que se inicien los vertidos. En caso de que la entidad explotadora dicte que (todavía) no es necesario implantar medidas de control de los gases de vertedero generados, deberá demostrarlo a el órgano ambiental basándose en las condiciones específicas del vertedero.

Fase de explotación

En aquellos casos en los que se considere necesario implantar medidas de control de gases de vertedero conforme a los requisitos estipulados en la autorización, la entidad explotadora

deberá presentar un plan de control de dichos gases. Este plan debe ser verificado y aprobado por el órgano ambiental. A continuación, y en base al plan de control de gases de vertedero aprobado, la entidad explotadora iniciará la puesta en marcha de las medidas de control pertinentes. Estas medidas se pondrán en práctica y serán sometidas a un mantenimiento y control. Durante la fase de explotación del vertedero, los cambios (im)previstos en la cantidad y composición de los residuos, las tasas de generación de gases de vertedero y la calidad del gas, pueden estimar oportuno modificar las medidas de control adoptadas. El órgano ambiental, por su parte, establecerá un sistema de control que permita controlar la producción de gases de vertedero en todos los vertederos, independientemente de las particularidades específicas de cada uno de ellos. La entidad explotadora debe notificar periódicamente toda la información pertinente sobre el vertedero a el órgano ambiental. La entidad explotadora debe evaluar asimismo, con carácter anual, la cantidad de gas de vertedero generado y recuperado, así como la reducción obtenida en las emisiones de gas. De forma periódica, la entidad explotadora debe evaluar o reconsiderar las medidas de control aplicadas y así notificarlo a el órgano ambiental para que esta proceda a su aprobación. Ante una reducción progresiva de los objetivos establecidos para los residuos biodegradables, podría incluso considerarse la opción de dar por finalizado el control activo de los gases de vertedero durante la fase de explotación.

Fase de mantenimiento post-clausura

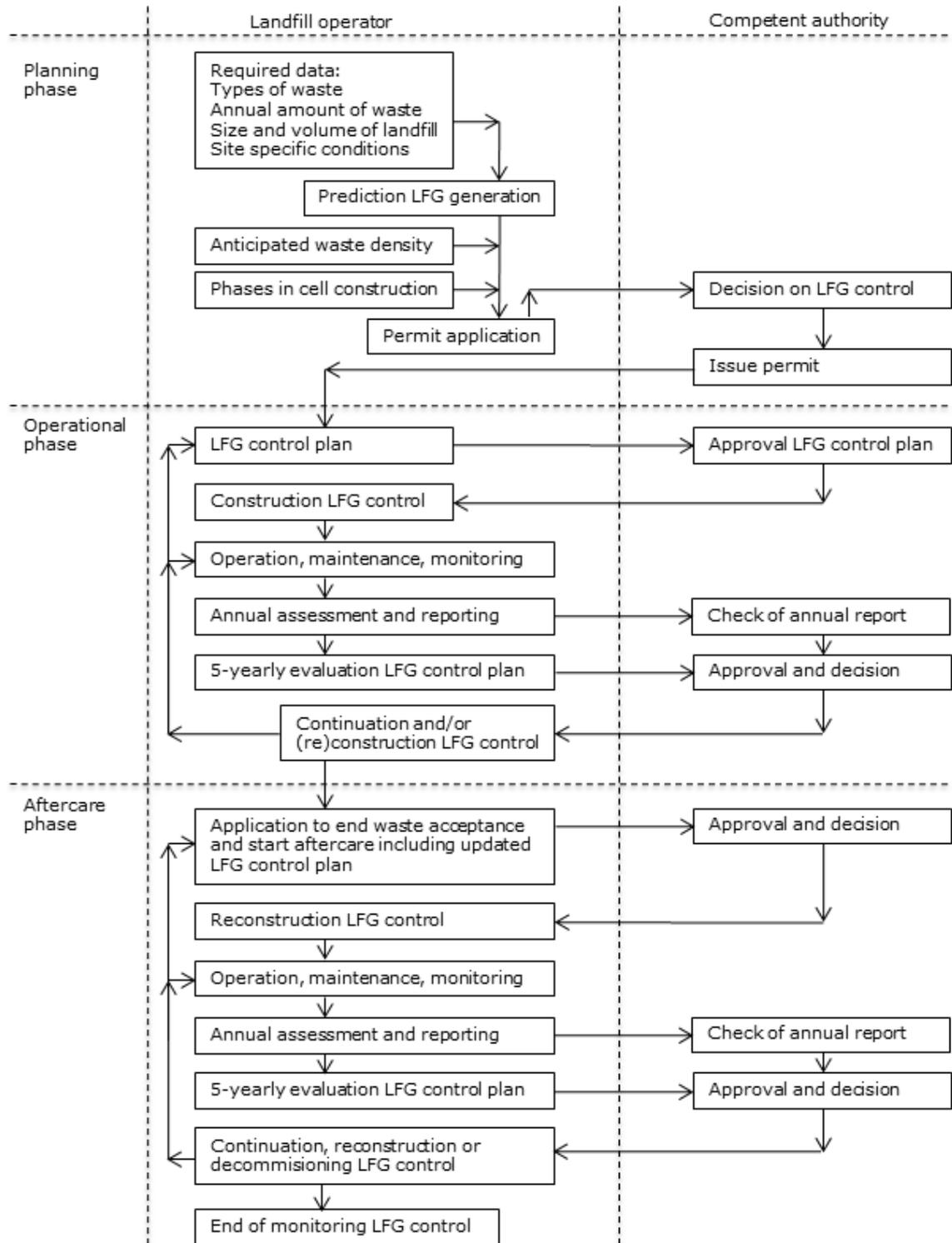
Llegará un momento en que se alcanzará el volumen de vertidos autorizado y el vertedero ya no admitirá más residuos. En este punto se inicia la fase de mantenimiento post-clausura. Durante esta fase hay que tener en cuenta básicamente los mismos aspectos que en la fase de explotación: la operación, el mantenimiento, el control y la notificación periódica de la información pertinente. En los vertederos que contienen cantidades significativas de residuos biodegradables es más probable que la evaluación llevada a cabo considere viable finalizar el control de los gases de vertedero generados en la fase de mantenimiento post-clausura en lugar de en la fase de explotación.

Las fases descritas anteriormente se incluyen en el diagrama de flujo de la página siguiente (gráfico 1.1).

Las técnicas de recuperación de gases de vertedero de última generación están determinadas, en gran parte, por el diseño y funcionamiento de los pozos, los compresores y las antorchas.

La legislación actual sobre vertederos exige que los costes generados por el proceso de recuperación de los gases de vertedero queden cubiertos por la tasa de vertido. El coste de la recuperación del gas no debe, por lo tanto, influir en la decisión de aprovechar los gases de vertedero recogidos. La rentabilidad del sistema de aprovechamiento es un factor importante para impulsar la puesta en práctica de un proyecto de aprovechamiento de los gases recuperados. Sin embargo, el proceso de recuperación de gases y de mitigación de las emisiones es el que ejerce una mayor influencia sobre el medio ambiente. El hecho de quemar o aprovechar los gases, así como qué técnica se utiliza para su aprovechamiento, son factores de menor importancia medioambiental. Es por ello, que en este documento guía presta una menor atención a la fase de aprovechamiento de los gases recuperados.

GRÁFICO 0-1. DIAGRAMA DE FLUJO DE LAS ACCIONES Y RESPONSABILIDADES RELATIVAS AL CONTROL DE GASES DE VERTEDERO



Este documento guía tiene por objeto proporcionar una orientación práctica a las entidades explotadoras de vertederos y a las autoridades competentes para facilitar el desarrollo de proyectos de recuperación de gases de vertedero que minimicen las emisiones de metano. Este documento no sustituye en ningún caso el diseño, la instalación y la operativa adecuados en cada caso particular. Tampoco se trata de un análisis científico. Esto significa que en este documento se hace poca o nula referencia a informes y artículos que apoyen la información facilitada. En algunos casos, se hace referencia a determinadas bases documentales que pueden resultar útiles. Este proyecto se basa en gran medida en las directrices sobre recuperación de gases de vertedero existentes en el Reino Unido, los Estados Unidos y los Países Bajos. La mayoría de la información proviene de:

- Estados Unidos: El «Project Development Handbook», elaborado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos en el marco del programa Landfill Methane Outreach, disponible en el siguiente enlace: <http://www.epa.gov/lmop/publications-tools/handbook.html> 1.
- Reino Unido: El documento «Guidance on the management of landfill gas» elaborado por la Agencia de Medio Ambiente del Reino Unido, disponible en: <http://www.environment-agency.gov.uk/business/sectors/108918.aspx>
- Países Bajos: «Handleiding stortgaswinning» (en neerlandés, directrices sobre la recuperación de los gases de vertedero), de M. Scheepers y B. van Zanten, Adviescentrum Stortgas 1994 y Handreiking Methaanreductie Stortplaatsen (en neerlandés, pautas adicionales para la reducción de las emisiones de metano en vertederos, http://www.senternovem.nl/robstortplaatsen/publicaties/handreiking_methaanreductie.asp) de AgentschapNL, publicado en el año 2007.

El capítulo sobre la oxidación de metano se basa principalmente en dos documentos austriacos y alemanes:

- Gebert, J., Streese-Kleeberg, J., Melchior, S. (2011): Methanoxidation zur passiven Restgasbehandlung. Müllhandbuch Kennzahl 4383, Lieferung 1/11, Erich Schmidt-Verlag Berlin, ISSN 0176-4969.
- Österreichischer Verein für Altlastenmanagement (2008): Technischer Leitfaden Methanoxidationsschichten, 37. S., Gelbdruck, Wien, Österreich, disponible para su descarga en: http://cms.altlastenmanagement.at/documents/aktl/Leitfaden_Methanox%20.docx

¹ Enlaces disponibles a partir de abril de 2015. Estos enlaces pueden no estar disponibles tras un cierto periodo de tiempo. De ser así, utilice un motor de búsqueda para localizar los documentos o modelos.

La información sobre la infiltración de lixiviados y vertederos aeróbicos se basa en un estudio de viabilidad sobre la mejora de la estabilidad de los vertederos, llevado a cabo por el Royal Haskoning y el IFAS-Hamburg para la Dutch Sustainable Landfill Foundation. Este documento puede [descargarse](http://www.sustainablelandfilling.com/webfiles/DuurzaamStortenNL/files/R00001_Final_gen_eric_report.pdf) en: http://www.sustainablelandfilling.com/webfiles/DuurzaamStortenNL/files/R00001_Final_gen_eric_report.pdf

Cabe destacar que cada vertedero es único y, por lo tanto, es posible que el diseño o los procesos descritos no sean aplicables en todos los casos. Asimismo, no será necesario adoptar todos los elementos de este documento en todos los vertederos o por parte de todas las entidades explotadoras. Sin embargo, la adopción de estos enfoques u otros similares de igual o mejor calidad debería ser suficiente para establecer unas buenas prácticas de gestión de los gases de vertedero.

Importante:

La recuperación de los gases de vertedero es un proceso complejo y potencialmente peligroso. Todas las personas presentes en un vertedero, así como aquellas involucradas en la toma de decisiones sobre el mismo, deben comprender a la perfección las tareas implicadas y las decisiones a tomar.

1

CONSIDERACIONES PRELIMINARES

1.1 ¿Qué son los gases de vertedero?

Los gases de vertedero (LFG, por sus siglas en inglés) son el producto final de la descomposición por parte de bacterias del carbono orgánico degradable presente en los residuos y están formados principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). El metano es un gas con un potente efecto invernadero que posee un potencial de calentamiento mundial entre 21 y 25 veces superior al del dióxido de carbono (CO_2).

Las bacterias descomponen el carbono orgánico degradable presente en los residuos depositados en los vertederos en cuatro fases. La composición de los gases producidos varía en cada una de las cuatro fases de descomposición. Los vertederos suelen admitir residuos durante un período de 20 a 30 años, por lo que los residuos depositados pueden experimentar diferentes fases de descomposición a la vez. Esto significa que los residuos más antiguos de una determinada zona pueden encontrarse en una fase de descomposición diferente a la de los residuos más recientes depositados en otra zona. En el gráfico 1.2 se muestran las diferentes etapas del proceso de degradación.

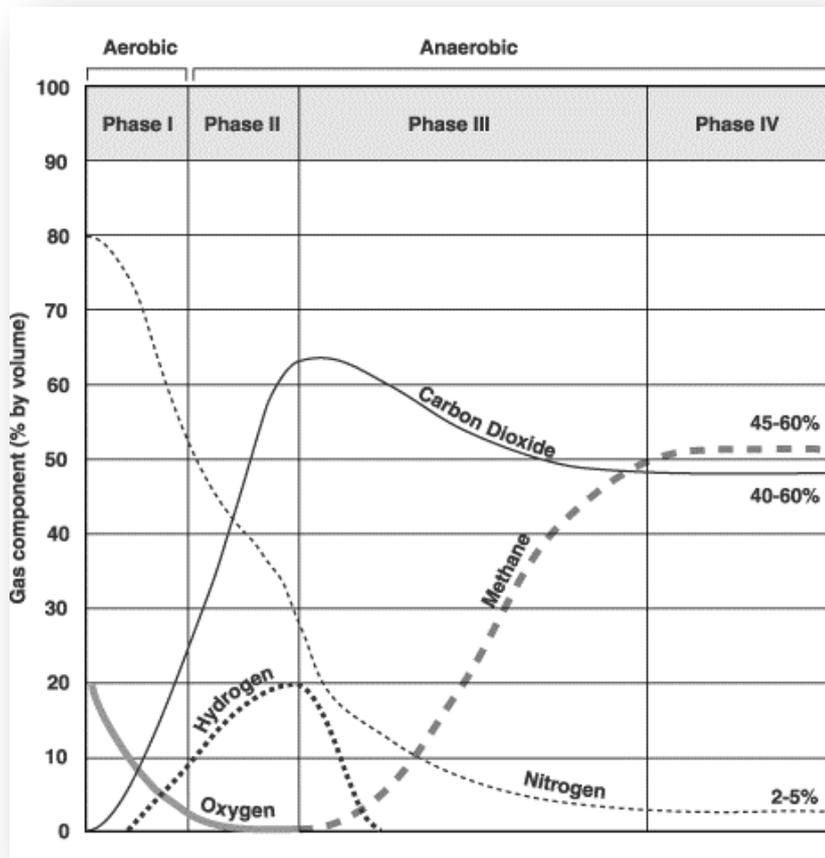


GRÁFICO 1-1. FASES DE PRODUCCIÓN DE LOS GASES DE VERTEDERO A LO LARGO DEL TIEMPO

En la fase I del proceso se consume de todo el oxígeno presente en los residuos, básicamente a través de un proceso aeróbico microbiano. El resultado principal de este proceso es la generación de dióxido de carbono, agua y calor. Siempre que no haya ninguna fuente que aporte aire a los residuos y reponga el oxígeno consumido en esta etapa, la concentración de oxígeno disminuirá. Los niveles de nitrógeno también se reducen, ya que los gases producidos lo extraen de la masa de residuos.

En la fase II del proceso de degradación, las condiciones aeróbicas presentes en la masa de residuos se convierten en anaeróbicas, proceso que conlleva la generación de ácido acético, acetatos, etanol, amoníaco, dióxido de carbono, hidrógeno, agua y calor. El hidrógeno y el dióxido de carbono producidos en este proceso continúan purgando el nitrógeno restante de la atmósfera dentro de la masa de los residuos.

En la fase III del proceso de degradación se inicia el proceso de metanogénesis y se empieza a generar metano y dióxido de carbono. Durante este período, el hidrógeno alcanza sus niveles más elevados, al igual que la demanda química de oxígeno y la concentración total de ácidos volátiles en los lixiviados.

En la fase IV se alcanza un período de equilibrio en el proceso de degradación. Las condiciones presentes en la masa de residuos dan lugar a una etapa estable en la que los gases de vertedero contienen entre un 45 % y un 60 % de metano en volumen y entre un 40 % y un 60 % de dióxido de carbono. Este periodo puede prolongarse durante muchos años, hasta que los compuestos orgánicos degradables disponibles en la masa de residuos se conviertan en gas.

El contenido de humedad presente en los residuos puede modificar la composición de los gases de vertedero tras su generación. Dado que el dióxido de carbono es más soluble en agua que el metano, la presencia de un contenido elevado de humedad en el vertedero puede intensificar la disolución del dióxido de carbono y, en consecuencia, aumentar el contenido de metano calculado en los gases de vertedero recuperados. En el proceso de recuperación de los gases de vertedero es posible que penetre aire en la masa de vertido (aproximadamente un 20 % de oxígeno y un 80 % de nitrógeno) como consecuencia de la depresión generada en el sistema de recuperación. El oxígeno puede consumirse en los procesos aeróbicos de descomposición bacteriana y convertirse principalmente en dióxido de carbono. El dióxido de carbono y el nitrógeno restante del aire se mezclan con los gases de vertedero generados modificando la composición de los gases cuando estos se miden en el sistema de recuperación.

Es un error general considerar que solo los residuos procedentes de los alimentos generan gases de vertedero/metano. Los residuos comerciales y los residuos que provienen del reciclaje de residuos de la construcción y demolición pueden contener grandes cantidades de papel seco y cartón. Tanto el papel como el cartón son biodegradables en las condiciones presentes en un vertedero. Este tipo de residuos contienen más kilogramos de carbono biodegradable por tonelada de residuos que los residuos procedentes de los alimentos, que tienen un elevado contenido de humedad.

1.2 Componentes de los gases de vertedero

La composición de los gases de vertedero varía a lo largo de la vida útil del vertedero, a medida que se alcanzan diferentes etapas del proceso de degradación (véase el gráfico 1.2: Fases de la producción de gases de vertedero a lo largo del tiempo). Los factores que afectan a la composición de los gases de vertedero en las diferentes etapas suelen ser:

- la composición de los residuos (en particular, la cantidad de material orgánico degradable disponible)
- la antigüedad de los residuos depositados
- la densidad de los residuos depositados
- el contenido de humedad y su distribución en la masa de residuos
- la acidez/alcalinidad (pH)
- la disponibilidad de nutrientes (para alimentar a los microbios)
- la temperatura
- la presencia de agentes tóxicos y de inhibidores químicos

El carbono orgánico degradable está formado en gran medida por carbohidratos. La degradación de carbohidratos genera aproximadamente cantidades iguales de metano (CH_4) y de dióxido de carbono (CO_2). La degradación de grasas y proteínas genera más metano que dióxido de carbono. Por lo general, el contenido de proteínas y de grasas en los residuos es bajo. Es por ello que el IPCC recomienda generar un 50 % de metano y un 50 % de dióxido de carbono (CO_2). Los gases de vertedero también contienen componentes traza, tales como ácidos orgánicos y ésteres, H_2S y mercaptanos (véase el apartado 1.2.3 y el apéndice 1).

1.2.1 Metano

El metano (CH_4) es un gas inodoro e inflamable a temperatura y presión atmosférica normales. Es explosivo en concentraciones de entre el 4,4 % y el 16,5 % (en volumen) en aire con un mínimo del 14,3 % de oxígeno a 20 °C y una presión atmosférica de un bar. Estos límites se conocen como límite inferior de explosividad (LIE) y límite superior de explosividad (LSE) del metano. Sin embargo, estas concentraciones sirven tan solo como pauta, ya que la presencia de otros componentes en el gas altera el rango de explosividad (véase el apartado 3.6.3). En consecuencia, los límites de inflamabilidad de los gases de vertedero también variarán, por lo que estos no deben subestimarse.

1.2.2 Dióxido de carbono

El dióxido de carbono (CO₂) es un gas inodoro, no inflamable, que se encuentra presente en la atmósfera con una concentración del 0,04 % en volumen. Es también un producto normal del metabolismo humano (por ejemplo) y actúa en funciones vitales de diferentes formas. En concentraciones elevadas aumenta el ritmo cardíaco y respiratorio y modifica los niveles de acidez del organismo. Cuando sus niveles son elevados, desplaza al oxígeno del organismo y produce asfixia.

1.2.3 Componentes traza

A pesar de que los gases de vertedero están formados básicamente por una mezcla de metano y dióxido de carbono, también contienen un gran número de componentes traza, la naturaleza de los cuales depende del tipo de residuos.

Estos elementos traza pueden provocar malos olores y es asimismo necesario tenerlos en cuenta a la hora de considerar la opción de aprovechar los gases de vertedero. La concentración de los componentes traza varían de forma significativa. Esta depende de la composición de los residuos y, por lo general, se reduce a medida que los residuos envejecen.

Los constituyentes menores de los gases de vertedero variarán en función de la composición de los residuos, su antigüedad y el nivel de degradación. Normalmente no representan más del 0,5 % del volumen de gas total. Sin embargo, los constituyentes menores son los responsables del olor distintivo de los gases de vertedero y de su naturaleza corrosiva. Estas características se han visto modificadas a medida que desde los vertederos se desvían cantidades más elevadas de residuos orgánicos, lo que conlleva, por ejemplo, un aumento en los niveles de sulfuro de hidrógeno (H₂S), que hace necesario un control del olor.

El ácido sulfhídrico también puede resultar nocivo para la salud humana:

- 0,0005 ppm: umbral olfativo;
- < 1,6 ppm: no presenta efectos negativos tras una exposición diaria de 8 horas;
- < 7 ppm: no presenta efectos negativos tras una exposición diaria de 15 min;
- 10–20 ppm: nivel de concentración más bajo que puede producir irritación ocular;
- 50–100 ppm: produce lesiones en los ojos;
- 100–150 ppm: parálisis del olor, ya no se percibe el olor;
- 320–530 ppm: produce embolia pulmonar;
- 530–1000 ppm: afecta al sistema nervioso central, aumenta el ritmo respiratorio;

- 800 ppm: mortal para el 50 % de la población tras una exposición de 5 min;
- 1000 ppm: provoca la pérdida inmediata de la consciencia y un paro respiratorio, en ocasiones tras unas pocas inhalaciones.

Antes de entrar en los pozos o en cualquier construcción cerrada es necesario comprobar el aire de los mismos para determinar las concentraciones de hidrocarburos, sulfuro de hidrógeno, oxígeno, dióxido de carbono (y posiblemente monóxido de carbono). Al entrar en los pozos y otras construcciones cerradas, los trabajadores del vertedero deben llevar consigo monitores que les adviertan de las concentraciones nocivas de gases.

Los gases de vertedero también pueden contener siloxanos. Los siloxanos no son tóxicos, pero pueden provocar problemas en el tratamiento o aprovechamiento del gas. Los siloxanos son compuestos orgánicos creados por el hombre que contienen, silicio, oxígeno y grupos metilo, y que se utilizan en la fabricación de productos de higiene personal, productos sanitarios y productos industriales. El uso extendido de estos productos hace que los siloxanos se encuentren presentes en los residuos sólidos depositados en los vertederos. Los siloxanos de bajo peso molecular pueden volatilizarse generando gases de vertedero. Al quemar los gases de vertedero en antorchas o en las unidades de aprovechamiento, los siloxanos se transforman en dióxido de silicio (SiO_2), que puede depositarse en la superficie del interior de la antorcha o, por ejemplo, en los intercambiadores de calor o en los motores alternativos y producir daños significativos en los equipos.

A parte de las consecuencias que determinados componentes traza pueden tener en temas de salud y seguridad y del potencial de los gases de vertedero de generar molestias, algunos componentes también pueden interferir en los equipos de control (especialmente en los analizadores portátiles). Por ejemplo, aunque el H_2S , normalmente solo se encuentra presente en una concentración de partes por millón (ppm), algunos equipos portátiles a menudo lo detectan erróneamente como monóxido de carbono. Es importante reconocer esta interferencia y saber interpretarla al analizar los resultados.

1.3 Problemas de los vertederos y de los gases de vertedero

Las emisiones no controladas de gases de vertedero pueden generar diversos problemas:

- A escala local, los gases de vertedero pueden provocar malos olores que pueden contribuir a unas condiciones laborables insalubres en el vertedero y pueden generar problemas con la población que vive en sus inmediaciones.
- En determinadas situaciones, los gases de vertedero también pueden provocar problemas más serios, por ejemplo, al acumularse gas en recintos poco ventilados, generando una elevada concentración de metano y dióxido de carbono. Las mezclas de metano y aire pueden provocar incendios e incluso explosiones. Las concentraciones elevadas de dióxido de carbono producen asfixia. Existe un gran número de ejemplos de accidentes graves en los vertederos provocados por gases de vertedero.
- En ocasiones, una gestión ineficaz del gas ha dado lugar a la generación de grandes bolsas de gas en los sistemas de recubrimiento con geomembranas. Las bolsas de gas pueden provocar explosiones o el derrumbe de taludes. El uso de materiales geosintéticos junto con un control poco eficaz de los gases, puede dar lugar a explosiones al realizar pruebas de chispa en las geomembranas o bien cuando se genera una chispa de forma espontánea en las herramientas de pulimento.
- A escala global, las emisiones de metano contribuyen al calentamiento de la tierra, problemática que actualmente está impulsando de forma muy notoria la toma de medidas para disminuir dichas emisiones. Se estima que la emisión anual de metano procedente de vertederos es aproximadamente de 45 Tg de CH₄, lo que representa el 3 % del total de las emisiones de gases de efecto invernadero expresadas en equivalentes de CO₂. Además, las emisiones van al alza, principalmente como consecuencia del aumento observado en la cantidad de residuos depositados en los vertederos en gran parte del mundo.
- La generación de gases de vertedero conlleva la reducción de volumen de los residuos, lo que, por lo general, provoca un asentamiento gradual del vertedero. No obstante, si el vertedero se construye de forma inadecuada y se ubica, por ejemplo, en pendientes (vertederos en vaguada y vertederos en ladera), puede ser más inestable. En este caso, una explosión de gas o un aumento puntual del contenido de humedad, puede provocar aludes de residuos (deslizamientos en masa) que en ocasiones tienen unas consecuencias catastróficas para las personas que se encuentran en ese momento en el vertedero o que viven en la zona limítrofe inferior del mismo. Son numerosos los casos que se pueden citar a nivel internacional, y a nivel estatal, cabe citar el caso del vertedero de Bens, A Coruña, que en 1996 sufrió el deslizamiento de 200.000 m³ de residuo.
- La formación de lixiviados es otro problema relacionado con los vertederos, ya que puede provocar la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas. Los lixiviados son los líquidos que se liberan en la parte inferior del vertedero y que se generan cuando el agua de la lluvia percola a través de los residuos. Existe una clara correlación entre las

precipitaciones y la producción de lixiviados, aunque estos también se generan en climas secos, como consecuencia, por ejemplo, de la descomposición de residuos orgánicos que liberan la humedad contenida inicialmente en el material natural. Los lixiviados pueden estar muy contaminados, por ejemplo con componentes orgánicos (DBO, DQO), NKj, metales pesados y sales. Las concentraciones de muchos de los contaminantes (a excepción de las sales) pueden relacionarse con la generación de gases de vertedero. La cantidad y concentración de los lixiviados no se ven alteradas por el proceso de recuperación de los gases. Sin embargo, es importante destacar la producción de lixiviados en este documento guía dado su potencial para estimular la generación de gases de vertedero como consecuencia de la recirculación de lixiviados (véase el apartado 5.1).

1.4 Legislación de la UE

El marco legal de la Unión Europea con respecto al control de gases de vertedero se establece en la Directiva 1999/31/CE del Consejo del 26 de abril de 1999 relativa al vertido de residuos. Esta directiva **no es directamente vinculante** para las entidades explotadoras. Se trata de una guía dirigida a los Estados miembros y autoridades competentes donde se recogen los aspectos que deben incluirse en la autorización de un vertedero. El considerando (16) resulta de interés en cuanto al control de los gases de vertedero: «Considerando que deberían tomarse medidas para reducir la producción de gas metano de vertederos, entre otras cosas, con objeto de reducir el calentamiento global mediante la limitación del vertido de residuos biodegradables y el establecimiento de requisitos sobre control de los gases de vertedero;».

El artículo 1 aclara el objetivo general de la Directiva 1999/31/CE: «A fin de cumplir los requisitos de la Directiva 75/442/CEE y, en particular, de sus artículos 3 y 4, el objetivo de la presente Directiva es establecer, mediante rigurosos requisitos técnicos y operativos sobre residuos y vertidos, medidas, procedimientos y orientaciones para impedir o reducir, en la medida de lo posible, los efectos negativos en el medio ambiente del vertido de residuos, en particular la contaminación de las aguas superficiales, las aguas subterráneas, el suelo y el aire, y del medio ambiente mundial, incluido el efecto invernadero, así como cualquier riesgo derivado para la salud humana, durante todo el ciclo de vida del vertedero.»

Los artículos 7 (Solicitud de autorización), 8 (Condiciones de la autorización) y 9 (Contenido de la autorización) establecen los datos que debe incluir la autorización de un vertedero relativos a los procedimientos de explotación, vigilancia y control, incluido el control de gases (uno de los efectos medioambientales que debe mitigarse).

La letra d) del artículo 13 relativo al procedimiento de cierre y mantenimiento post-clausura, requiere que: «mientras el órgano ambiental considere que un vertedero puede constituir un riesgo para el medio ambiente y sin perjuicio de la legislación comunitaria o nacional en relación con la responsabilidad civil del poseedor de los residuos, la entidad explotadora será responsable de la vigilancia y análisis de los gases y los lixiviados del vertedero y del régimen de aguas subterráneas en las inmediaciones del mismo, conforme a lo dispuesto en el Anexo III.»

La Sección 4 del Anexo I establece los requisitos específicos para el control de los gases de vertedero. Control de gases:

- 4.1. Se tomarán las medidas oportunas para controlar la acumulación y emisión de gases de vertedero (Anexo III).
- 4.2. En todos los vertederos que reciban residuos biodegradables se recogerán los gases de vertedero, se tratarán y se utilizarán. Si el gas recogido no puede utilizarse para producir energía, deberá hacerse quemar.
- 4.3 La recogida, tratamiento y uso de gases de vertedero con arreglo al apartado 2 de la Sección 4 se llevará a cabo de forma tal que reduzca al mínimo el daño o deterioro del medio ambiente y el riesgo para la salud humana.

El anexo III de la Directiva 1999/31/CE recoge los requisitos de vigilancia y control de los gases de vertedero (Procedimientos de control y vigilancia en las fases de explotación y de mantenimiento post-clausura).

La Comisión Europea ha elaborado un documento de orientación no vinculante para el control de gases de vertedero

(<http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/guidance%20on%20landfill%20gas.pdf>). Su

objetivo es:

- Ayudar a las autoridades competentes a mejorar la recogida de metano a través del cumplimiento de los requisitos de la Directiva relativa al vertido de residuos;
- Proporcionar claridad sobre los requisitos de control de gases de vertedero en el contexto de los requisitos técnicos y reglamentarios de la Directiva relativa a vertido de residuos;
- Establecer los principales criterios que garanticen una recogida, tratamiento y utilización eficaces de los gases de vertedero.

El documento de orientación de la UE sobre el control de gases de vertedero ha sido consultado con los Estados miembros y aprobado tras la reunión del Comité Técnico de Adaptación celebrada el 17 de diciembre de 2013.

1.5 Normativa del País Vasco

La normativa actualmente en vigor en la Comunidad Autónoma del País Vasco, el Decreto 49/2009 de 24 de febrero, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero y la ejecución de los rellenos, menciona lo siguiente:

- Anexo I, Sección 4 (Control de gases): Breve referencia indicando que la entidad explotadora tomará las medidas adecuadas para controlar la acumulación y emisión de gases de vertedero.
- Anexo IV (Procedimiento de control y vigilancia en las fases de explotación y mantenimiento post-clausura): Los parámetros de emisión de gas (presión atmosférica, CH₄, H₂S, H₂, CO₂, O₂) deben vigilarse con periodicidad mensual (fase de explotación) y cada seis meses (fase de mantenimiento post-clausura).

No obstante, el Decreto 49/2009 no contiene artículos pormenorizados sobre el control de gases de vertedero. Considerando la Directiva 1999/31/CE del Consejo de 26 de abril de 1999 relativa al vertido de residuos, la Decisión 2003/33/CE del Consejo de 19 de diciembre de 2002 por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CE, y el documento de orientación de la UE sobre el control de gases de vertedero, los requisitos genéricos relativos a las medidas de control y vigilancia de gases de vertedero pueden describirse de la manera siguiente.

1.5.1 Medidas de control de los gases de vertedero

- El órgano ambiental incluye en la autorización ciertos requisitos, que implican:
- La aplicación desde el inicio de los vertidos de las medidas pertinentes para recuperar y tratar los gases de vertedero generados.
- El aprovechamiento u oxidación de los gases de vertedero que se recuperen.
- El control mensual de la eficiencia del proceso de recuperación de gases y de su composición, a no ser que el órgano ambiental determine lo contrario.
- Cuando se opte por oxidar los gases de vertedero generados, la entidad explotadora deberá hacer lo posible para obtener la máxima eficiencia en el proceso de oxidación.
- La eficiencia máxima de oxidación no es aplicable a las antorchas que se utilizan de manera exclusiva durante menos de 400 horas al año (o un 5 % del tiempo total si se considera el periodo de un año) durante los trabajos de mantenimiento y en caso de un fallo de las medidas de control, tal y como se describe en el primer punto.
- Lo anterior no es aplicable si la entidad explotadora, basándose en el tipo de residuos admitidos, puede demostrar a el órgano ambiental que en el vertedero tan solo se generarán cantidades insignificantes de gas y que los beneficios medioambientales

derivados de la aplicación de las medidas de control de gases de vertedero mencionadas son limitados.

1.5.2 Vigilancia de los gases de vertedero

- El órgano ambiental debe asegurarse de que en la autorización otorgada se especifique claramente que las medidas de control de los gases de vertedero requeridas según se establece en el primer punto, incluyen:
- La medición de las horas de funcionamiento del sistema de recuperación.
- La medición del caudal volumétrico, la temperatura, la presión y las concentraciones de metano, dióxido de carbono y oxígeno en la entrada y salida del sistema de recuperación.
- La medición de la presión y de las concentraciones de metano, dióxido de carbono y oxígeno en todos los pozos de gas de manera individual.
- El órgano ambiental puede determinar que las medidas de control de los gases de vertedero requeridas según se establece en el primer punto se apliquen con menor periodicidad si la evaluación de los parámetros de control indica que su aplicación a intervalos de tiempo más largos es igual de efectiva.
- Si se prevé proceder al aprovechamiento de los gases de vertedero, el órgano ambiental incluirá en la autorización los métodos de control adicionales necesarios para garantizar un rendimiento óptimo de este sistema.
- Si por el contrario, los gases de vertedero se queman en antorcha, el órgano ambiental incluirá en la autorización la necesidad de llevar a cabo un control anual de los gases de escape con el objeto de verificar la eficiencia de destrucción de la antorcha.
- El órgano ambiental incluirá en la autorización el requisito de tomar muestras, con carácter anual, de los gases de vertedero en la entrada del sistema de recuperación para proceder a su análisis y determinar de la presencia de compuestos clorados, fluorados y sulfúricos.

2

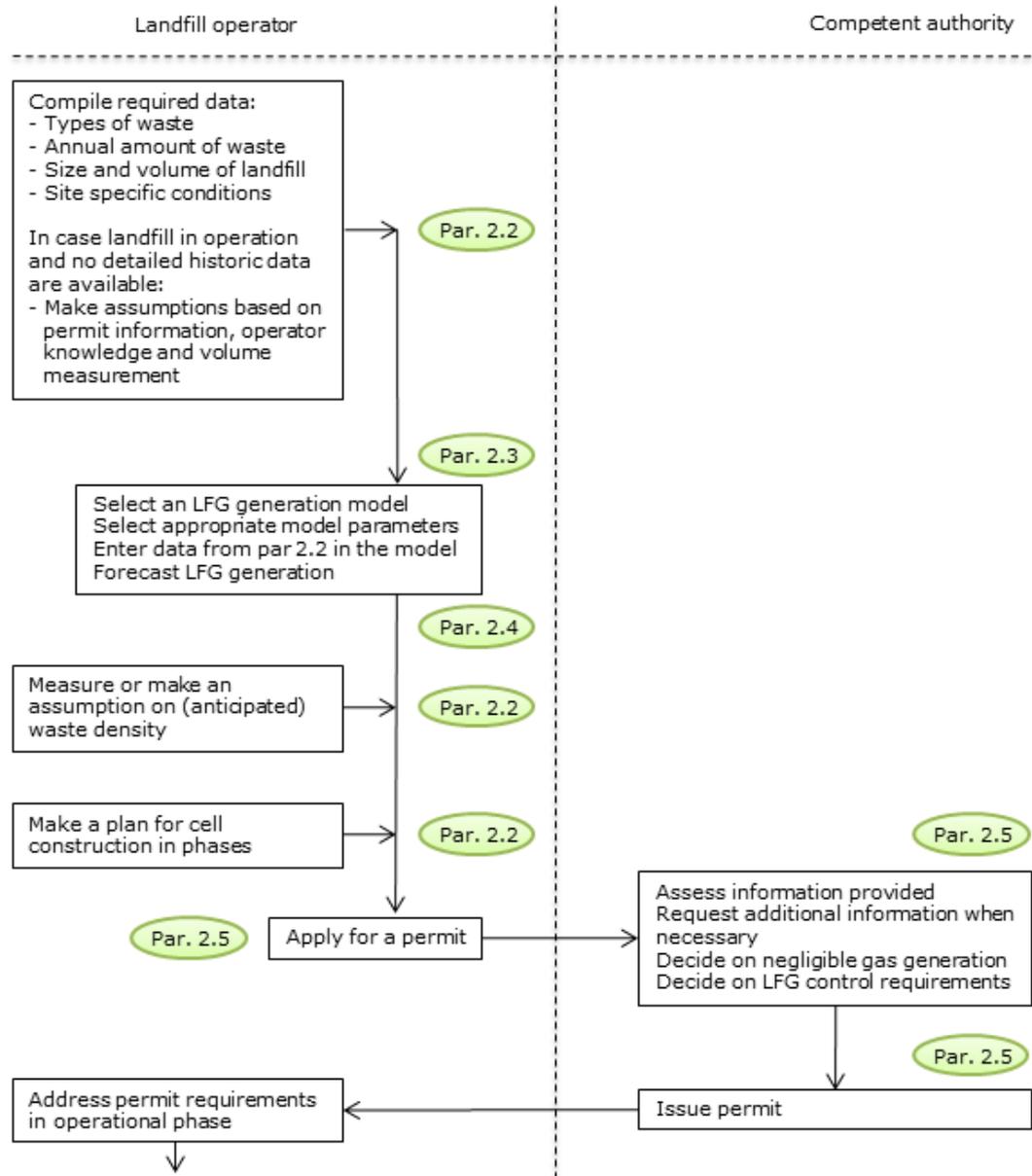
FASE DE PLANIFICACIÓN

2.1 Acciones

- La entidad explotadora recoge la siguiente información: tipos de residuos a depositar, cantidad anual de residuos, dimensiones y volumen del vertedero, condiciones específicas (apartado 2.2).
- La entidad explotadora notifica la densidad de residuos prevista tras la compactación y la previsión de la fase de construcción de la celda (apartado 2.2).
- La entidad explotadora realiza una estimación de los gases de vertedero que se generarán (apartados 2.3 y 2.4).
- La entidad explotadora solicita la autorización (apartado. 2.5).
- El órgano ambiental decide si es necesario o no establecer medidas de control de los gases de vertedero (apartado 2.5).
- El órgano ambiental expide la autorización (apartado. 2.5).

El gráfico 2.1 muestra un diagrama de flujo en el que se describen las acciones y responsabilidades relativas al control de los gases de vertedero en la fase de planificación.

GRÁFICO 2-1. DIAGRAMA DE FLUJO SOBRE LAS ACCIONES Y RESPONSABILIDADES RELATIVAS AL CONTROL DE LOS GASES DE VERTEDERO EN LA FASE DE PLANIFICACIÓN



2.2 Datos necesarios

Los vertederos que admiten residuos biodegradables están obligados a recoger los gases de vertedero que se generen a no ser que la entidad explotadora pueda demostrar a el órgano ambiental que no es necesario. Para ello, se debe demostrar que la tipología de residuos admitidos en el vertedero tan solo producirá cantidades insignificantes de gases de vertedero

o que la aplicación de medidas de control no será económicamente viable (capítulo 6). Cabe destacar que todos los vertederos pueden recibir residuos biodegradables, inclusive los vertederos de residuos industriales no peligrosos. Los residuos alimentarios y los orgánicos de origen domiciliario no son, por lo tanto, los únicos residuos biodegradables. El papel y el cartón presentes en los residuos comerciales o en los residuos de construcción y demolición también pueden constituir una fuente importante de generación de gases de vertedero.

La Decisión 2003/33/CE del Consejo Europeo, del 19 de diciembre de 2002, por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al Anexo II de la Directiva 1999/31/CE establece unos procedimientos uniformes para la clasificación y admisión de los residuos. Debido a los límites impuestos en los residuos admitidos en base a los Criterios de Admisión de Residuos no se espera que los vertederos de residuos inertes, los vertederos de residuos peligrosos y los vertederos (o celdas) que admiten residuos peligrosos estables no reactivos (así como otros residuos no peligrosos de características similares) generen cantidades significativas de gases de vertedero formados por metano y dióxido de carbono. En este tipo de vertederos, los valores límite de admisión de residuos oscilan entre el 3 % y el 6 % del carbono orgánico total. Por consiguiente, los vertederos que admitan de forma exclusiva estos tipos de residuos solo tienen que indicar en la fase de planificación los tipos de residuos que desean incluir en la autorización y, de acuerdo con este documento guía, en estos casos no es necesario establecer ningún tipo de control de los gases de vertedero.

La tasa de generación de metano no solo está determinada por la naturaleza de los residuos, sino también por la cantidad de los mismos. Así pues, la información relativa a la cantidad anual de residuos, las dimensiones y el volumen del vertedero son factores de igual importancia a la hora de realizar una evaluación sobre el metano que se generará y la necesidad de instalar o no medidas de control de los gases producidos.

La necesidad de recoger los gases de vertedero quedará bien clara en la mayoría de los vertederos de residuos no peligrosos debido a los tipos y cantidades de residuos biodegradables que estos admiten. No obstante, puede que haya algunos vertederos que, debido a la naturaleza de los residuos que admiten o a sus características físicas (vertederos poco profundos o muy pequeños), no quede claro si producen o producirán cantidades superiores de gas. Dichos vertederos deberán demostrar a el órgano ambiental que no es

necesario recoger los gases de vertedero producidos. Para ello, será indispensable realizar una estimación o modelización de la cantidad de gases que se generarán. En los apartados que siguen a continuación se detalla cómo llevarla a cabo. Dicha estimación puede incluir también un cálculo de la viabilidad económica de las medidas para reducir las emisiones. En el capítulo 6 se describe cómo realizar este cálculo.

Es asimismo posible que haya vertederos que no dispongan de datos históricos relativos al tipo y a la cantidad de residuos depositados anualmente, o bien que los datos de que se dispone sean muy escasos o poco fiables. En estos casos, es necesario basar la estimación en los tipos de residuos incluidos en la autorización o en las autorizaciones, o bien en el conocimiento de la entidad explotadora, lo que en muchas ocasiones implicará seleccionar una o más categorías de residuos. La cantidad de residuos depositada debe estimarse mediante la medición del volumen del vertedero actual, es decir, la diferencia entre la altura y perímetro actual y la altura y perímetro antes de iniciar el vertido de residuos. A continuación, habrá que estimar la densidad de la compactación en base a las diferentes categorías de residuos seleccionadas. Si no se dispone de dicha información, se considerará que los residuos se depositaron siguiendo una tasa anual estable y que estos tenían la misma composición.

Es importante demostrar a el órgano ambiental cómo se construye el vertedero por fases. Como se pondrá de manifiesto en el apartado 3.2.1, con el fin de reducir las emisiones globales de metano en los vertederos en la mayor medida posible, es importante finalizar las operaciones de vertido en cada celda del vertedero lo antes posible e iniciar la recuperación de los gases de vertedero inmediatamente en cuanto sea posible. Las dimensiones de la celda del vertedero deben adaptarse a la cantidad de residuos admitida anualmente. En el caso de los residuos biodegradables, es preferible que las celdas no superen el volumen admitido durante un periodo de dos a cuatro años.

2.3 Generación de gases de vertedero

2.3.1 Potencial de generación de gases de vertedero

El material orgánico presente en un vertedero se obtiene a partir de los residuos que originariamente se generan por naturaleza, como por ejemplo, residuos orgánicos de origen domiciliario, orgánicos industriales, de jardinería y poda, de madera y de materiales textiles. Así pues, existe una correlación entre la cantidad de gases de vertedero producidos y la

cantidad de material orgánico presente en los residuos. La tabla 2.1 muestra un resumen de las cantidades de carbono orgánico presentes en los residuos europeos según el capítulo 3 de las Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero: Eliminación de residuos sólidos (<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>)

TABLA 2-1. CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO PRESENTE EN LOS RESIDUOS DE DIFERENTES REGIONES EUROPEAS (EN KG/KG DE RESIDUO HÚMEDO. RANGO DE VALORES ENTRE CORCHETES), SEGÚN EL IPCC

	Europa del Norte	Europa del Este	Europa del Sur	Europa occidental
Desperdicios de productos alimenticios	0,15 (0,08-0,20)	0,15 (0,08-0,20)	0,15 (0,08-0,20)	0,15 (0,08-0,20)
Jardín	0,20 (0,18-0,22)	0,20 (0,18-0,22)	0,20 (0,18-0,22)	0,20 (0,18-0,22)
Papel	0,40 (0,36-0,45)	0,40 (0,36-0,45)	0,40 (0,36-0,45)	0,40 (0,36-0,45)
Madera y paja	0,43 (0,39-0,46)	0,43 (0,39-0,46)	0,43 (0,39-0,46)	0,43 (0,39-0,46)
Textiles	0,24 (0,20-0,40)	0,24 (0,20-0,40)	0,24 (0,20-0,40)	0,24 (0,20-0,40)
Pañales desechables	0,24 (0,18-0,32)	0,24 (0,18-0,32)	0,24 (0,18-0,32)	0,24 (0,18-0,32)
RSU	0,21 (0,12-0,28)	0,18 (0,12-0,28)	0,17 (0,12-0,28)	0,19 (0,12-0,28)
Lodos de depuración	0,05 (0,04-0,05)	0,05 (0,04-0,05)	0,05 (0,04-0,05)	0,05 (0,04-0,05)
Residuos industriales	0,15 (0-0,54)	0,15 (0-0,54)	0,15 (0-0,54)	0,15 (0-0,54)

En la práctica, no todo el material orgánico se convierte en gas de vertedero. Una parte del material orgánico simplemente no se degrada en condiciones anaeróbicas. Otra parte del material orgánico no se degrada debido a que las condiciones específicas de los residuos evitan su degradación, por ejemplo porque los residuos están demasiado secos o debido a que se inhibe la conversión biológica como consecuencia de una elevada concentración de sal o ácidos en el lugar. En el cálculo del potencial de generación de gases de vertedero de los residuos (la cantidad de gases de vertedero producida por cada tonelada de residuos), se incluye un factor de desasimilación que describe qué fracción del material biogénico se degrada en condiciones anaeróbicas. Si no se dispone de datos específicos para un país, el modelo del IPCC sugiere utilizar un factor de 0,5.

La generación de gases de vertedero precisa condiciones anaeróbicas rigurosas. Solo la presencia de trazas de oxígeno ya inhibe la generación de gases de vertedero. Si la concentración de oxígeno es superior, el material biogénico puede convertirse directamente en dióxido de carbono mediante un proceso comparable al compostaje. En aquellos vertederos en los que se explota no desarrollando un proceso de compactación sistemático y no realizando cubiertas temporales por celdas o áreas, puede que no se obtengan condiciones anaeróbicas en la parte superior del vertedero. En el cálculo del potencial de generación de

gases de vertedero de los residuos, el factor de corrección del metano define qué condiciones anaeróbicas son suficientes para producir gas.

TABLA 2-2. FACTORES DE CORRECCIÓN DEL METANO PARA DIFERENTES TIPOS DE VERTEDEROS SEGÚN EL IPCC

Controlado - anaeróbico	1,0
No controlado - profundo (> 5 m) o capa freática elevada	0,8
No controlado - poco profundo (< 5 m)	0,4
Sin categorizar	0,6

En última instancia, el potencial de generación de gases de vertedero (producidos en un período de muchos años) se puede calcular a partir de:

$$\text{Gases de vertedero}_0 = 1,87 * \text{COD} * \text{CODf} * \text{FMC}$$

En esta fórmula:

- Gases de vertedero₀ es el potencial de generar gases de vertedero
- El factor 1,87 de esta ecuación es la cantidad de gases de vertedero (en m³) producidos por kg de carbono biogénico biodegradado.
- COD es la cantidad de carbono biogénico en kg.
- CODf es el factor de desasimilación.
- FCM es el factor de corrección del metano.

2.3.2 ¿A qué ritmo se producen los gases de vertedero?

La velocidad y la magnitud en la que los materiales biogénicos se transforman en gas dependen de una serie de factores. Dos de los factores más importantes son el clima (temperatura ambiente y precipitación) y la composición de los residuos.

- Por lo general, la degradación de residuos tiene lugar de forma más rápida en los climas más cálidos y húmedos. En climas relativamente fríos, por ejemplo en los países europeos nórdicos, y en los climas secos (regiones con una precipitación anual inferior al potencial de evaporación anual), se reduce la velocidad de degradación de los residuos.
- Asimismo, los residuos alimentarios se degradan por lo general más rápidamente que la madera o los residuos textiles. Generalmente, los materiales biogénicos presentes en los residuos se dividen en tres clases de degradabilidad, tal y como se indica en la tabla 2.3.

La generación de gases de vertedero a menudo se describe como un proceso de primer orden, caracterizado por una vida media (en años) de biodegradación. Es de esperar que la generación de gas alcance su máximo, con un tiempo de retardo de 4 a 12 meses, tras el

vertido de los residuos y que, a continuación, se reduzca en un 50 % una vez superada la vida media. En un modelo de descomposición de primer orden, la degradabilidad de los residuos se expresa matemáticamente como k , la tasa constante de biodegradabilidad. k se relaciona con la vida media de biodegradación ($t_{1/2}$) mediante la ecuación:

$$k = \ln(2)/t_{1/2} = 0,7/t_{1/2}$$

De modo que un valor de k de $0,1 \text{ años}^{-1}$ implica un tiempo de vida media de 7 años. En la tabla 2.3, en residuos brutos, se indican los valores de k según las recomendaciones del IPCC para las diferentes regiones climáticas.

Algunos modelos de generación de gases de vertedero dan un paso más y utilizan tiempos de vida media independientes para los residuos que se degradan a una velocidad rápida, moderada o lenta, tal como se indica en la tabla 2.3. Este tipo de modelos se denominan a menudo modelos de etapas múltiples. Los modelos de etapas múltiples parecen aportar unos resultados más precisos que los modelos simples de descomposición de primer orden. Sin embargo, no hay ninguna razón mecanicista ni prueba empírica de que su resultado sea más fiable. De acuerdo con el IPCC, ambos enfoques tienen que ser considerados como equivalentes, sobre todo cuando la calidad de la información sobre la cantidad y composición de los residuos depositados es limitada.

TABLA 2-3. DEGRADABILIDAD (VALORES DE k EN AÑOS⁻¹) DE LOS RESIDUOS EN DIFERENTES CLIMAS, SEGÚN EL IPCC

fase	materiales	boreal seco y templado	boreal húmedo y templado	tropical seco	tropical húmedo
rápida	residuos brutos	0,05 (0,04-0,06)	0,09 (0,08-0,1)	0,065 (0,05-0,08)	0,17 (0,15-0,2)
	alimentos y lodos de depuración	0,06 (0,05-0,08)	0,185 (0,1-0,2)	0,085 (0,07-0,1)	0,4 (0,17-0,7)
moderada	otros materiales putrescibles (distintos a los alimentos). Residuos de jardines y parques	0,05 (0,04-0,06)	0,1 (0,06-0,1)	0,065 (0,05-0,08)	0,17 (0,15-0,2)
lenta	papel, textiles, madera y paja	0,04 (0,03-0,05) 0,02 (0,01-0,03)	0,06 (0,05-0,07) 0,03 (0,02-0,04)	0,045 (0,04-0,06) 0,025 (0,02-0,04)	0,07 (0,06-0,085) 0,035 (0,03-0,05)

NOTAS A LA TABLA 2.3:

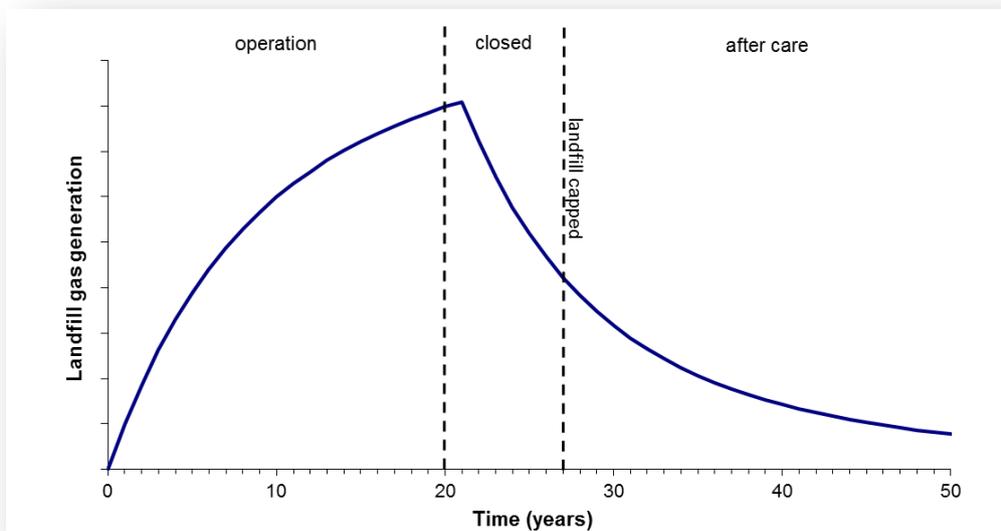
«BOREAL SECO Y TEMPLADO» SIGNIFICA QUE LA PRECIPITACIÓN ANUAL ES INFERIOR AL POTENCIAL DE EVAPOTRANSPIRACIÓN. «BOREAL SECO Y TEMPLADO» SIGNIFICA QUE LA PRECIPITACIÓN ANUAL ES INFERIOR AL POTENCIAL DE EVAPTRANSPIRACIÓN.

«TROPICAL SECO» SIGNIFICA UNA PRECIPITACIÓN ANUAL INFERIOR A LOS 1000 MM. «TROPICAL SECO» SIGNIFICA UNA PRECIPITACIÓN ANUAL INFERIOR A LOS 1000 MM.

BOREAL Y TEMPLADO SIGNIFICA QUE LA TEMPERATURA ANUAL ES INFERIOR A LOS 20 °C. TROPICAL SIGNIFICA QUE LA TEMPERATURA MEDIA ANUAL SUPERA LOS 20 °C.

Durante el vertido de residuos, la cantidad de gas generada aumenta con la cantidad de residuos depositados. Cuando se clausura el vertedero, la cantidad de gas producido se reduce de forma gradual con el paso del tiempo (véase el gráfico 2.2).

GRÁFICO 2-2. GENERACIÓN DE GASES DE VERTEDERO A LO LARGO DEL TIEMPO (CÁLCULO DE EJEMPLO). EL PERIODO DE EXPLOTACIÓN DE LOS VERTEDEROS ES A MENUDO SUPERIOR A LOS 20 AÑOS. EL TIEMPO QUE TRANSCURRE ENTRE SU CLAUSURA Y SU SELLADO DEFINITIVO VARÍA EN CADA VERTEDERO Y DEPENDE DE LAS CONDICIONES ESPECÍFICAS DE CADA CASO.



2.3.3 Modelos para estimar la generación en volumen de gases de vertedero

La cantidad de gases de vertedero generada puede estimarse combinando la información citada hasta ahora. El potencial de generación de gases de vertedero proporciona la cantidad total de gas producida a lo largo del tiempo y la descomposición de primer orden describe la rapidez con la que se desarrolla dicho potencial. Los vertederos existentes actualmente mantienen residuos depositados durante muchos años, lo que dificulta el cálculo de la generación de gases. El enfoque habitual consiste en calcular la cantidad de gas de vertedero anual generada por los residuos y, a continuación, añadir la contribución de cada año en la producción total de gas. Así, por ejemplo, si un vertedero está en funcionamiento desde el año 2000 y se desea calcular la cantidad de gas generada en el año 2015, se calcula la cantidad de gas generada en el vertedero en el año 2015 por los residuos depositados en el año 2000 y, a continuación, se calcula la cantidad de gas generada por los residuos depositados en el año 2001, etc. Finalmente, se suma la contribución de cada año.

Este cálculo es bastante laborioso y actualmente es factible gracias a modelos computacionales aplicados a la generación de gases de vertedero. Estos modelos a menudo se basan en una hoja de cálculo y disponen de la cantidad y composición de los residuos a lo largo de los años como parámetros de entrada. Como resultado se obtiene una estimación de los gases de vertedero o del metano que se generará a lo largo de los años.

Con el fin de cuantificar las emisiones de gases de vertedero/metano, se han desarrollado diferentes modelos. Para determinar las emisiones de metano se aplica la siguiente fórmula:

$$\text{emisiones de metano} = (\text{metano generado} - \text{metano recuperado}) \times (1 - \text{porcentaje de oxidación})$$

En esta fórmula (véase el apartado 3.8) la oxidación se expresa como el porcentaje de metano que se oxida en una capa de recubrimiento. Todos los modelos parten del cálculo de los gases de vertedero que se generarán.

El documento guía sobre la implantación del Registro Europeo de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (<http://prtr.ec.europa.eu/pgDownloadGuidance.aspx>) sugiere utilizar uno de los seis modelos existentes para estimar las emisiones de gases de vertedero: el modelo de primer orden TNO, el modelo por etapas múltiples de AFVALZORG para estimar la generación

y las emisiones de gases de vertedero, el modelo de etapas múltiples GasSim, el modelo GasSim (LandGEM), el modelo francés EPER y el modelo LandGEM desarrollado la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. A continuación se indican algunos de los modelos a los que se puede acceder fácilmente en línea:

- El modelo del IPCC ha sido desarrollado por un equipo internacional de expertos y pretende proporcionar una información uniforme y comparable de las emisiones de efecto invernadero a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, ofreciendo a las autoridades nacionales orientación sobre cómo cuantificar las emisiones de metano procedentes de todos los vertederos de un país. Este modelo se utiliza a menudo en vertederos individuales, aunque el IPCC no lo creó con este fin. Está disponible como software gratuito y puede descargarse desde el sitio web del IPCC. El modelo del IPCC tiene en cuenta cuatro regiones climáticas: boreal húmeda o templada; boreal seca o templada; tropical húmeda y tropical seca. Las condiciones climáticas elegidas afectan al valor k elegido, pero no a la desasimilación. El modelo del IPCC puede encontrarse en:

http://www.ipccngip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/IPCC_Waste_Model.xls

- El modelo de etapas múltiples de AFVALZORG para estimar la generación y las emisiones de gases de vertedero está desarrollado por la empresa holandesa explotadora de vertederos AFVALZORG. Desde los años 70, Afvalzorg ha depositado una cantidad muy baja de residuos sólidos urbanos en sus vertederos. Sin embargo, todos los modelos disponibles hasta la fecha están basados en los residuos sólidos urbanos y, por lo tanto, sobrestiman la generación de metano que se produce en los vertederos de Afvalzorg. Es por ello que Afvalzorg creyó en la necesidad de desarrollar un modelo que tuviera en cuenta otros tipos de residuos a parte de los RSU. Este modelo se ha validado en tres vertederos de Afvalzorg. Dada su idoneidad para los vertederos con «bajas cantidades de carbono orgánico», los Países Bajos y Dinamarca, países en los que está prohibido depositar residuos biodegradables, han recomendado emplear este modelo en los vertederos.

Este modelo puede obtenerse como software gratuito en:

http://afvalzorg.nl/EN/Landfill-sites/Emissions-management/Methane-emissions/Download_MLGGR_Model.aspx.

- GasSim Lite, modelo desarrollado por GOLDER ASSOCIATES para la Agencia de Medio ambiente de Inglaterra y Gales. Por el momento (marzo de 2010) GasSim 2.1 es la última versión y se encuentra disponible en el mercado. Sin embargo, también es posible acceder a la versión simplificada 1.5 de forma gratuita, diseñada para ayudar a las entidades explotadoras a realizar su inventario sobre contaminación. GasSim se basa en las

estadísticas sobre residuos del RU. El modelo GasSim Lite puede descargarse en: <http://www.gassim.co.uk/download.htm>

- LandGEM es un modelo desarrollado y puesto a disposición del público por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. Se trata de un modelo de descomposición de primer orden, con diferentes valores por defecto de k para las regiones más secas y húmedas. La última versión es la 3.02, de mayo de 2005. El modelo puede obtenerse en: <http://www.epa.gov/ttn/catc/products.html#software> en software (ejecutables y manuales).
- El modelo simple de AFVALZORG para estimar la generación y las emisiones de gases de vertedero es un modelo simple de descomposición de primer orden que se fundamenta en los valores por defecto, los parámetros y la base matemática del IPCC. Este modelo puede aplicarse en vertederos y celdas de vertedero para las que no se dispone de datos históricos detallados relativos a la actividad (masa de residuos y contenido de carbono). Si desea obtener más información, consulte el manual que incluye el modelo. Este modelo puede obtenerse como software gratuito en: <http://afvalzorg.nl/EN/Landfill-sites/Emissions-management/Methane-emissions.aspx>.

2.3.4 Ventajas y desventajas de los modelos

De los cinco modelos, el modelo del IPCC es el que combina los conocimientos más avanzados con una operativa relativamente sencilla. **El modelo del IPCC** se ha elaborado conjuntamente con las Directrices del IPCC de 2006 relativas a las emisiones de las plantas de eliminación de residuos sólidos. Puede considerarse, por lo tanto, que el modelo del IPCC y los parámetros en los que se basa, han sido revisados en profundidad y cuentan con un gran respaldo. El modelo del IPCC también ofrece la posibilidad de utilizar los datos propios sobre la composición de residuos, siempre que sea adecuado. Este modelo puede aplicarse en todo el mundo, ya que tiene en cuenta las condiciones climáticas. No obstante, no ha sido validado para las regiones más áridas, tropicales o frías. Una desventaja a la hora de aplicar el modelo del IPCC en los vertederos individuales radica en que este depende de la información sobre las fracciones de carbono presentes en los residuos (por ejemplo, en alimentos, papel, cartón, madera...) y, normalmente, los vertederos no disponen de dicha información.

Los modelos Afvalzorg utilizan los estándares y métodos de cálculo del IPCC y son más fáciles de aplicar en los vertederos individuales que el modelo del IPCC. El modelo de etapas múltiples de Afvalzorg para estimar la generación y las emisiones de gases de vertedero parece ajustarse mejor a aquellos vertederos con cantidades pequeñas de residuos

domésticos ubicados en climas templados y húmedos. Su aplicación permite una distribución de los residuos depositados en hasta 15 categorías de residuos. Por otro lado, el modelo simple de Afvalzorg para estimar la generación y las emisiones de gases de vertedero resulta muy útil para aquellos vertederos o celdas de vertedero que no disponen de datos históricos detallados sobre su actividad.

GasSim también es un modelo apropiado, aunque predice cantidades algo menores de generación de gas. Una clara desventaja del modelo GasSim es su complicada estructura, la cual requiere un mayor grado de experiencia con el modelo, antes de poder hacer estimaciones.

LandGEM parece ser menos aplicable. El modelo LandGEM no ofrece la posibilidad de adaptar el potencial de generación de metano a la composición de los residuos. Además, este modelo considera que la vida media de los residuos es elevada, lo que conlleva una estimación relativamente baja de los gases de vertedero durante el periodo de explotación y justo tras este.

2.3.5 Precisión de los modelos

Los resultados obtenidos mediante estos modelos son imprecisos en cierta medida, como consecuencia de diferentes factores:

- La generación de gases de vertedero es un proceso imprevisible por naturaleza. La generación de gas depende en cierto grado de la falta de homogeneidad en los residuos derivada de las condiciones locales más o menos favorables para la conversión de metano. Cuánto gas se genere y la velocidad en lo que suceda depende, en parte, de la casualidad.
- Si nos centramos en un vertedero determinado, las incertidumbres derivan del hecho de que no se conoce con exactitud ni la cantidad de residuos ni su composición. Para poder hacer una estimación adecuada del gas que se generará, es necesario disponer de la información relativa a los residuos depositados durante décadas y, a menudo, resulta difícil recuperar estos datos históricos.
- Por lo general, los modelos se construyen a partir de las estimaciones sobre cuánto material biogénico se deposita, qué fracción del material biogénico se transforma en gases de vertedero y la rapidez con la que avanza el proceso. En general, los modelos no se han validado apenas ni se ha determinado su precisión en situaciones prácticas. Sin embargo, se dispone de cierto inventario relativo al diseño y aprovechamiento de los gases de vertedero, que sugiere que los modelos podrían ser bastante correctos, especialmente durante los primeros 5 a 20 años de formación del gas.

- Gran parte de esta experiencia se basa, no obstante, en proyectos sobre vertederos del noreste de Europa y de América del Norte que contienen mayoritariamente residuos domésticos. Se dispone de menos experiencia en la predicción del gas generado a partir de otros residuos (por ejemplo, cuando hay menos residuos domésticos y predominan los residuos industriales) o en otras regiones del mundo (más cálidas, frías, secas o húmedas). Las diferencias en las prácticas de gestión de los residuos (la compactación de los residuos, el uso de coberturas diarias o temporales, la geometría del vertedero) también influyen en el proceso de generación de gases de vertedero.

El IPCC (2006) (<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>) proporciona una guía para estimar la precisión de las emisiones de metano mediante la propagación de errores. Este método puede aplicarse asimismo al resto de modelos. Según el IPCC, el error que se comete en el cálculo de la generación de gases de vertedero por tonelada de residuos consiste en:

- El error en la cantidad de carbono orgánico en los residuos (20 % si se basa en los valores por defecto del IPCC, 10 % si se basa en un muestreo y en la realización de análisis regulares);
- La fracción de carbono orgánico que realmente se descompone (20 % cuando se basa en los valores por defecto del IPCC y 10 % si se basa en datos experimentales de vertederos reales recogidos durante períodos de tiempo más prolongados);
- El error asociado al factor de corrección de metano (10 % para los vertederos controlados y posiblemente entre el 20 % y el 30 % en los vertederos no controlados).

La suma total de los errores en el cálculo de la generación de metano por tonelada de residuos, de acuerdo con el IPCC, oscila entre el 35 % y el 65 %, dependiendo de la información disponible del lugar. Sin embargo, algunos de los parámetros dependen unos de otros, por lo que el error total podría ser inferior al especificado. Así, por ejemplo, el contenido de carbono orgánico solo se conoce con una precisión limitada, y lo mismo ocurre con la fracción de carbono orgánico que en realidad se descompone y el factor de corrección de metano. El producto de estos tres elementos da la cantidad de gases de vertedero producidos por tonelada de residuos, y este valor se conoce con mayor precisión que la suma de la incertidumbre de los tres factores. Así, la incertidumbre real en la cantidad de metano producido por tonelada de residuos será menor del 35 % al 65 % y puede encontrarse alrededor del 20 % al 50 %.

2.3.6 Gestión de la incertidumbre

Los modelos descritos en los apartados anteriores, se han desarrollado principalmente con el propósito de informar sobre las emisiones (por ejemplo, para informar sobre la información relativa a las emisiones de los vertederos al Registro Europeo de Emisiones y Transferencias de Contaminantes, así como las emisiones generadas por los diferentes países a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático) o bien para garantizar que los vertederos cumplen los requisitos reglamentarios (como es el caso de LandGEM, por ejemplo). Tal como se ha descrito anteriormente, las estimaciones sobre la generación de gases de vertedero o las emisiones de metano poseen una precisión limitada. Este factor debe tenerse en cuenta al utilizar los resultados obtenidos de la modelización como base para el diseño y la construcción de las instalaciones de recuperación y aprovechamiento de los gases. Hay numerosos ejemplos de proyectos que no han alcanzado los niveles de recuperación de gases previstos y que al final no han resultado rentables. Otros proyectos, por contra, se dimensionan a la baja, lo que limita la eficiencia del proceso de recuperación del gas.

Es recomendable elaborar los proyectos de recuperación de gases en diferentes fases y obtener cierta experiencia en este proceso in situ antes de proceder a dimensionar los sistemas de aprovechamiento. El diseño de los pozos de gas, la distancia entre los pozos, el diseño de las tuberías de conexión y el diseño del transporte son factores relativamente independientes de las incertidumbres en los volúmenes de gas recuperables. Para garantizar la estabilidad y prevenir la generación de obstrucciones provocadas por el condensado, es recomendable aplicar unos márgenes de seguridad en el diseño de pozos y en el sistema de captación (sobredimensionado). Tanto las soplantes como las antorchas disponen a menudo de una cierta flexibilidad en su capacidad. Así pues, desde un punto de vista económico, es relativamente seguro construir primero el sistema de captación y extraer y quemar los gases de vertedero durante varios meses antes de tomar una decisión definitiva en relación con la capacidad de aprovechamiento.

2.4 Previsión de la generación de metano y estimación de las emisiones

Este apartado ofrece algunas recomendaciones sobre cómo cuantificar la generación de gas metano y sus emisiones. En realidad, existen diferentes tipos de vertederos con diferentes niveles de información disponible. Además, en un vertedero determinado, la calidad de la

información también varía y es posible que, con el paso del tiempo, se disponga de información más detallada. Con el fin de tolerar diferentes niveles de información disponible y estar preparados para futuros desarrollos, este documento guía propone un enfoque escalonado para estimar la generación y las emisiones de metano. En base a las consideraciones anteriores, proponemos utilizar los parámetros y la base matemática del IPCC (véase el capítulo 2.3) como el enfoque armonizado más adecuado que, a la vez, permite tener en cuenta diferentes condiciones climatológicas.

2.4.1 Nivel 1: Modelo de descomposición de primer orden

En vertederos y celdas de vertedero que no disponen de datos históricos detallados sobre su actividad (masa de los residuos y contenido de carbono), es preferible aplicar un modelo de descomposición sencillo de primer orden. En el enlace siguiente es posible descargar el software gratuito de un ejemplo de modelo de descomposición de primer orden que se fundamenta en los parámetros por defecto y la base matemática recomendados por el IPCC: http://afvalzorg.nl/EN/Landfill-sites/Emissions-management/Methane-emissions/Download_SPGGR_Model.aspx.

Al aplicar este modelo (o los modelos simples en general), el primer paso a seguir consiste en realizar una estimación de la masa total de residuos y de los años en que se inició y finalizó su vertido. Si no se dispone de estos datos, debe suponerse que la masa total de residuos se distribuyó de forma uniforme durante todo el periodo de explotación. La masa de residuos puede estimarse a partir de la medición del volumen de los residuos, multiplicando el valor obtenido por la densidad apropiada (entre 800 y 1000 kg/m³). Si no se dispone de información detallada, se parte de que todos los residuos son residuos sólidos municipales.

A continuación, es necesario seleccionar diferentes parámetros basados en la geometría del vertedero, su operativa y las condiciones climáticas. El modelo, ofrece entonces una estimación de la producción de metano en kg por año o de la producción de gases de vertedero en m³ por hora.

Tras restar el metano recuperado por el sistema de captación de gases, el modelo hace una estimación las emisiones de metano. Las buenas prácticas para determinar la cantidad de metano recogido en el pasado utilizan un caudalímetro para llevar a cabo las mediciones. El caudal de gas se corrige en lo que refiere a la temperatura y la presión en el punto de

medición y se expresa en kg por año. Para obtener la recuperación futura de gas es necesario hacer una estimación basada en la eficiencia de recuperación. En aquellos casos en los que se emplea un sistema de captación de gases sin caudalímetro, el IPCC recomienda utilizar un valor por defecto para la recuperación de los gases del 20 % (del gas producido). Este valor es un valor medio que puede emplearse al realizar los informes del inventario nacional (que abarcan todos los vertederos de un país). No obstante, no es un valor adecuado para describir las diferencias que se producen en la recuperación de los gases de vertedero a lo largo de toda la vida útil de un vertedero. Este modelo sugiere valores de recuperación de los gases basándose en el período de explotación y las características de la cobertura.

2.4.2 Nivel 2: Modelo de descomposición de primer orden de etapas múltiples

Los vertederos activos tienen la obligación de registrar los datos relativos a la actividad de los residuos, incluyendo la masa de los residuos y el código del Catálogo Europeo de Residuos (CER). Dado que se dispone de información sobre la masa anual de residuos en función de la categoría de residuos a la que estos pertenecen, es posible obtener una estimación más precisa del metano generado. El contenido de carbono no se analiza en todos los lotes de residuos que se admiten en el vertedero. El contenido de carbono anual puede determinarse mediante el contenido de carbono medio de las diferentes categorías de residuos del CER (tal como se hace en Finlandia y los Países Bajos). Se recomienda seguir un modelo de descomposición de primer orden de etapas múltiples fundamentado en los parámetros por defecto y la base matemática del IPCC como, por ejemplo, el modelo de etapas múltiples de Afvalzorg para estimar la generación y las emisiones de gases de vertedero (http://afvalzorg.nl/EN/Landfill-sites/Emissions-management/Methane-emissions/Download_MLGGR_Model.aspx).

Deben llevarse a cabo los siguientes pasos:

- Determinar la aportación de carbono orgánico biodegradable anual en el vertedero a partir del contenido en carbono establecido en función de la masa y la categoría de los residuos (por ejemplo, según CER).
- Estimar la producción de metano en kg por año con un modelo que se fundamente en los parámetros por defecto variables según el clima y la base matemática del IPCC.
- Estimar el potencial de emisión de metano restando el metano recogido por el sistema de captación de gases. La cantidad de metano recogido se determina empleando un caudalímetro. El caudal de gas se corrige en lo que refiere a la temperatura y la presión en

el punto de medición y se expresa en kg por año. En lo que a la recuperación futura de gas se refiere, estimar la eficiencia de recuperación basándose en el período operativo y las características de la cobertura.

- Estimar las emisiones de metano restando el metano oxidado presente en la cobertura del vertedero. Aplicar el valor por defecto establecido por el IPCC de 0,1 para las áreas cubiertas con un material adecuado para llevar a cabo la oxidación del metano y el valor por defecto fijado por el IPCC de 0,0 para las áreas no cubiertas con un material adecuado para la oxidación del metano.

2.4.3 Nivel 3: Modelo de descomposición de primer orden basado en mediciones de vertederos específicos

Si se dispone de una mejor información o de datos específicos para un vertedero, la entidad explotadora puede aplicar los pasos del modelo de nivel 2 con parámetros modificados para el vertedero en cuestión siempre que los resultados de los análisis o las mediciones se notifiquen a el órgano ambiental junto con el pertinente informe relativo a las emisiones. En caso de que se disponga de datos sobre el clima de la región y los materiales de cobertura empleados en el vertedero, la entidad explotadora también podría utilizar la Herramienta de Oxidación de Metano desarrollada con la colaboración de Agentschap NL (dentro del programa «Reducción de otros gases de efecto invernadero») por el Instituto de Ciencias del Suelo de la Universidad de Hamburgo y la Universidad Técnica de Hamburgo-Harburg en el marco del proyecto MiMethox y de NV Afvalzorg Holding (<http://www.afvalzorg.nl/EN/Landfill-sites/Emissions-management/Methane-oxidation.aspx>)

2.4.4 Nivel 4: Estimación de las emisiones basada en mediciones

Cuando en un vertedero que se encuentra en la fase de explotación, los modelos de nivel 1 a 3 no pueden ofrecer una estimación correcta de las emisiones de los gases de vertedero como consecuencia de las condiciones específicas que en él se dan, la entidad explotadora está autorizada a cuantificar las emisiones en base a un número suficiente de mediciones apropiadas de las emisiones globales del vertedero. Queda claramente constatado que no es posible medir las emisiones durante la fase de planificación. Se han propuesto varias técnicas para medir las emisiones, tales como mediciones en cámaras de flujo, mediciones micrometeorológicas, métodos de equilibrio de masas y mediciones de penachos. No obstante, hasta la fecha, ninguno de estos métodos de medición está aceptado de forma general como un método suficientemente preciso y rentable a la vez. La idoneidad de un

método de medición depende de su capacidad para tener en cuenta la variación temporal y espacial de las emisiones de metano. Así, por ejemplo, la humedad del suelo y la temperatura (variación mensual), las precipitaciones (variación semanal) y la humedad y los cambios de presión barométrica (variación diaria, por horas) influyen en los resultados, ya que muchos de estos aspectos afectan a la porosidad del suelo, que a su vez modifica las condiciones del flujo del gas. En lo a que las variaciones temporales se refiere, debe clarificarse si es posible aplicar estos métodos en todas las condiciones meteorológicas y, en consecuencia, en todas las estaciones. También debe determinarse el número de mediciones que es necesario realizar en un año, así como la duración de las mismas, para poder obtener una tasa anual media fiable de las emisiones de metano. La presencia de focos de emisión y vías preferenciales se traduce en fluctuaciones espaciales en los valores medidos. Si se tiene en cuenta la variación temporal y espacial, es preferible utilizar métodos de medición global en distintos momentos del año para incluir así todas las influencias estacionales. En diversos métodos se generan incertidumbres al relacionar el parámetro medido con la superficie emisora. La evaluación de la superficie o las mediciones en cámaras de flujo, no son un método adecuado para obtener una tasa anual media fiable de las emisiones de metano. No obstante, son una herramienta útil para otras aplicaciones, como por ejemplo, la localización de focos de emisión o la reducción de la incertidumbre en caso de que tan solo se disponga de una información limitada sobre la composición de los residuos o bien cuando el resultado de la modelización parece inapropiado.

2.5 Solicitud, evaluación y concesión de autorizaciones

Los vertederos que admiten residuos biodegradables están obligados a recoger los gases de vertedero que se generen a no ser que la entidad explotadora pueda demostrar a el órgano ambiental que no es necesario. La necesidad de recuperar los gases de vertedero quedará bien clara en la mayoría de los vertederos debido a los tipos y cantidades de residuos biodegradables que estos admiten. En caso de que la entidad explotadora solicite una autorización que incluya la admisión de residuos biodegradables, dicha solicitud deberá incluir siempre una previsión del gas de vertedero que se generará. Ello permite tanto a la entidad explotadora como a el órgano ambiental evaluar las medidas de control de los gases de vertedero más adecuadas en cada caso. Tras recibir la solicitud de autorización, el órgano ambiental procederá a evaluar la información que la entidad explotadora del vertedero haya

incluido en o junto a la solicitud de autorización. El órgano ambiental puede solicitar información adicional a la entidad explotadora si lo considera necesario.

Con el objetivo de evaluar la información aportada por la entidad explotadora en la solicitud de la autorización, el órgano ambiental puede tener en cuenta los siguientes elementos:

- ¿Son los datos relativos a los residuos (tipos de residuos, carbono orgánico biodegradable, cantidades anuales de residuos, dimensiones y volumen del vertedero) en relación con la generación de gases, coherentes y conformes con la autorización actual o con la solicitud de permiso?
- ¿La categoría del vertedero o los criterios de admisión de los residuos hacen prever una generación insignificante de gases de vertedero? En caso afirmativo, no es necesario implantar ninguna medida para mitigar los gases de vertedero aparte de comprobar de forma periódica que se mantienen dichas condiciones a lo largo de la fase de explotación del vertedero.
- En caso de que no pueda descartarse la presencia de ciertas cantidades de carbono orgánico biodegradable, la entidad explotadora debe presentar una estimación del gas que se generará. ¿Ha realizado la entidad explotadora (o su consultor) una distribución coherente de las cantidades de residuos en las diferentes categorías de residuos con diferentes contenidos de carbono orgánico? ¿Ha utilizado la entidad explotadora (o su consultor) un modelo conocido y aceptado o basado en las recomendaciones del IPCC en lo que a la base matemática y a los parámetros se refiere? En caso afirmativo, el modelo puede considerarse aceptable.
- ¿En qué grado es la previsión de generación de gas comparable con los «valores límite» aceptados en el resto de Estados miembros de la UE? En muchos casos será claramente necesario llevar a cabo una recuperación activa de los gases de vertedero generados. En estos casos, el órgano ambiental puede incluir en la autorización la necesidad de establecer medidas para llevar a cabo la recuperación activa del gas producido (incluyendo la presentación de un plan de control de gases de vertedero al inicio de la fase de explotación). En los casos menos claros, el órgano ambiental puede posponer la decisión de optar por la implantación de medidas activas o pasivas para la recuperación y tratamiento de los gases y solicitar que se presente un plan de control de gases de vertedero al inicio de la fase de explotación, el cual incluya una evaluación de la rentabilidad del sistema de control activo de los gases en comparación con el control pasivo.

En varios Estados miembros de la UE se ha propuesto el establecimiento de criterios para determinar cuándo es necesario aplicar medidas activas (recuperación, combustión o aprovechamiento) o medidas pasivas. Únicamente Finlandia ha incorporado estos criterios a las normativas relativas a los vertederos. En la tabla 2.4 se muestran algunos ejemplos.

TABLA 2-4. CRITERIOS ESTABLECIDOS PARA LA ADOPCIÓN DE MEDIDAS DE CONTROL DE LOS GASES DE VERTEDERO

País	Austria	Finlandia	Alemania
Recuperación activa		$> 5 \text{ m}^3 \text{CH}_4 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$	$> 25 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{h}$ y $> 5 \text{ m}^3 \text{CH}_4 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$
Aprovechamiento		$> 25 \text{ m}^3 \text{CH}_4 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 1	$> 40 \% \text{CH}_4$
Antorcha		$E < 0,5 \text{ MW}$	$> 25 \% \text{CH}_4$
Antorcha para gases de bajo poder calorífico			$> 25 \% \text{CH}_4$
Recuperación pasiva y tratamiento	$> 5 \text{ m}^3 \text{CH}_4 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$	$> 5 \text{ m}^3 \text{CH}_4 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$	$< 25 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{h}$ y $< 5 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 1

NOTA: TODOS LOS m^3 SON m^3 DE METANO A UNA TEMPERATURA (273,15 K) Y UNA PRESIÓN (101,325 KPA) ESTÁNDARES.

Es posible que en los vertederos muy grandes o que se encuentren a una gran altura, se superen los valores de la tabla 2.4. Ello podría conllevar la necesidad de aplicar medidas específicas. Sin embargo, también es posible que la generación de metano por tonelada de residuos eliminados sea tan baja, que la rentabilidad que de ella se deriva (gastos por tonelada de CO_2 equivalente reducido) sea inaceptable. Es recomendable, pues, que los valores de la tabla 2.4 se empleen únicamente como una primera referencia. Una vez finalizada la fase de planificación, en el plan de control de gases de vertedero (véase el apartado. 3.2), es posible comparar los diferentes enfoques y realizar una propuesta basada en la rentabilidad. En el capítulo 6 se describe cómo determinar la rentabilidad de las medidas de control de los gases de vertedero.

Asimismo, puede que haya algunos vertederos en los que, debido a la naturaleza de los residuos que admiten o bien dadas sus características físicas (vertederos poco profundos o muy pequeños) es posible que se generen o se puedan generar cantidades insignificantes de gas. Estos vertederos deberán demostrar a el órgano ambiental que no es necesario recoger los gases de vertedero producidos. Las pruebas presentadas deberán demostrar que el tipo de residuos admitidos en el vertedero tan solo producirá cantidades insignificantes de gas. La

cantidad de gases de vertedero que se considere insignificante dependerá del contenido de metano y el volumen de gas de vertedero que puede extraerse de forma sostenible de la masa de residuos. La prueba de una desgasificación sostenible y, con ello, del establecimiento de la presencia de cantidades insignificantes de gas, radica en la utilización en el emplazamiento de un método activo de tratamiento del metano rentable y técnicamente viable. En los vertederos, en los que los tipos de residuos admitidos o las características físicas del vertedero determinen que únicamente se generarán cantidades muy pequeñas de gases de vertedero, la entidad explotadora deberá demostrar que la recogida, extracción y tratamiento activos de los gases mediante técnicas de bio-oxidación o antorchas para gases de bajo poder calorífico no es económicamente sostenible. En aquellos casos en los que el órgano ambiental acepte que no es necesario recoger los gases de vertedero, pero considere que se generan niveles bajos de gas, deberá considerarse la implantación de sistemas pasivos de oxidación de metano.

En cualquier caso, el análisis coste/beneficio y el estudio de sostenibilidad económica, para cualquier tipo de vertedero, debe sustentarse en un análisis técnico riguroso que incluya; una modelización del potencial de generación de gas basado en las entradas históricas de residuos, mediciones in situ de gas generado mediante técnicas de captación pasiva, un análisis de viabilidad técnica de las diferentes alternativas de tratamiento y un análisis financiero de dichas alternativas.

En los Estados miembros de la UE en los que se ha propuesto un valor cuantitativo entre la recuperación y el tratamiento activo y pasivo, el «valor límite» es siempre de $5 \text{ m}^3 \text{CH}_4 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. El origen de este valor se remonta a unos 20 años atrás. Desde entonces, la investigación que se ha llevado a cabo en relación con la oxidación de metano ha revelado que los sistemas biológicos de oxidación de metano bien diseñados pueden alcanzar unas tasas de oxidación anual superiores al 80 % con cargas de hasta $40 \text{ m}^3 \text{ de } \text{CH}_4 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$.

Incluso con una tasa de generación de gas inferior a los $5 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, no resulta improbable que en los vertederos de grandes dimensiones se generen cantidades significativas de gas. Es por ello que en Alemania se ha propuesto un segundo «valor límite» de $25 \text{ m}^3 \text{CH}_4 \cdot \text{h}^{-1}$ para todo el vertedero. Se cree que este valor está relacionado con la capacidad mínima de las antorchas de alta temperatura disponibles en el mercado.

Actualmente, en el mercado se encuentran antorchas de alta temperatura con una capacidad mínima de $1 \text{ m}^3\text{CH}_4\cdot\text{h}^{-1}$ a una concentración mínima de metano de alrededor del 15 %.

Puede concluirse pues que en los vertederos existe un notable solapamiento técnico entre la quema en antorcha y la oxidación biológica del metano. Si se aplican los valores de la tabla 2.4 de forma muy estricta, el coste de la mitigación de las emisiones de metano del vertedero podría resultar inaceptable. En este caso, es recomendable que en la fase de explotación del vertedero, la entidad explotadora elabore un plan de control de gases de vertedero y determine la rentabilidad de las medidas activas de control del gas en comparación con los sistemas de control pasivos.

En caso de que el órgano ambiental acepte que no es necesario recoger los gases de vertedero, debe establecerse un proceso de revisión continua para garantizar que solo se produce gas en cantidades insignificantes. Este proceso de revisión puede respaldarse con pruebas obtenidas, por ejemplo, a partir de las medidas de control del vertedero.

El órgano ambiental, en base a la evaluación de la estimación de los gases de vertedero que se generarán y la necesidad de implantar o no las medidas de control pertinentes, incluirá los artículos oportunos en la autorización.

3

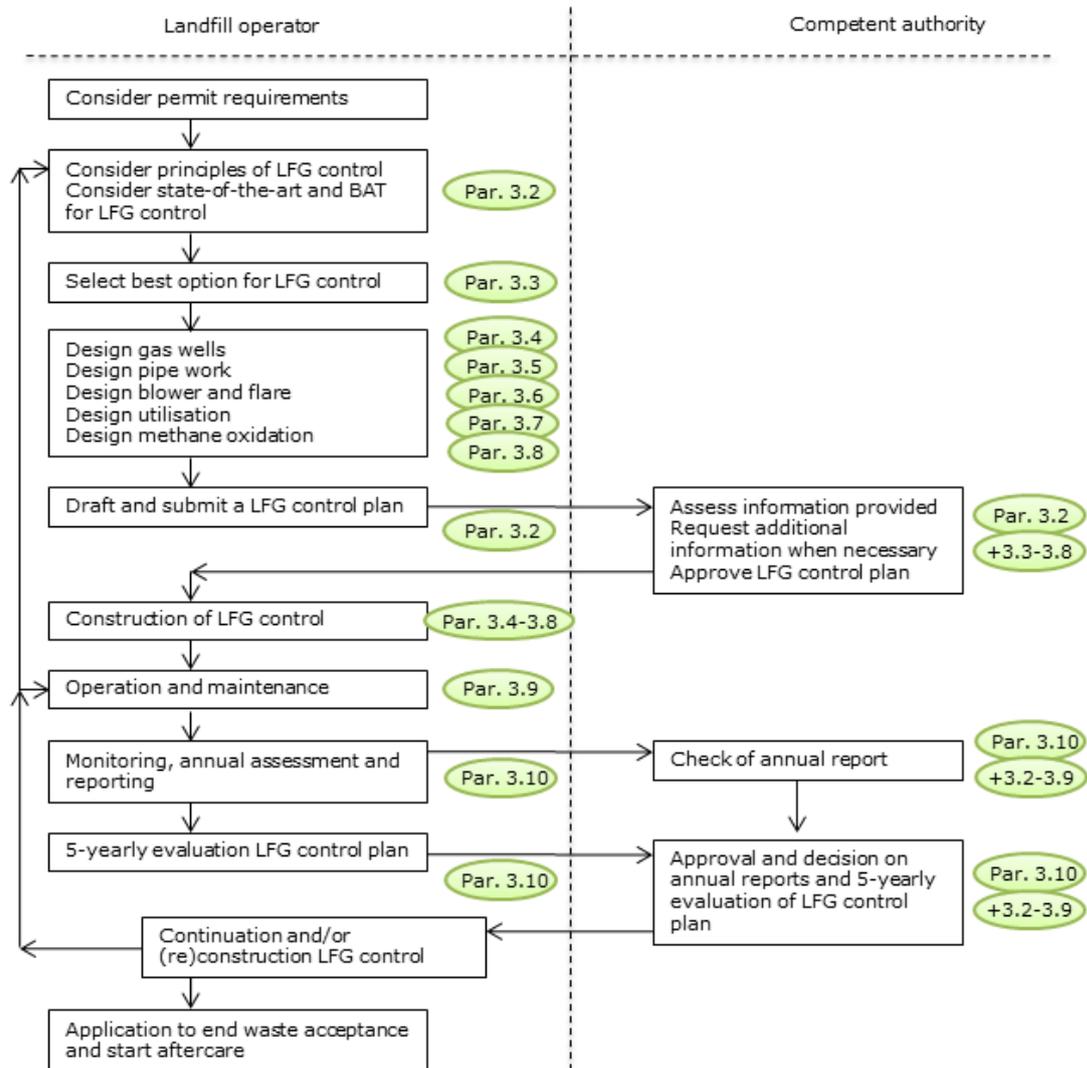
FASE DE EXPLOTACIÓN

3.1 Acciones

- La entidad explotadora diseña un sistema de control de gases de vertedero y presenta un plan de control a el órgano ambiental.
- El órgano ambiental evalúa y aprueba el plan de control de gases de vertedero.
- La entidad explotadora instaure las medidas de control de los gases de vertedero.
- La entidad explotadora lleva a cabo la operación, el mantenimiento y la vigilancia de las medidas de control de gases de vertedero pertinentes.
- La entidad explotadora lleva a cabo una evaluación y presentación anual de informes sobre los gases de vertedero generados (modelo), su recuperación (medición) y una estimación de las emisiones (cálculo).
- Cada 5 años, la entidad explotadora presenta una evaluación/reevaluación del plan de control de gases de vertedero.
- El órgano ambiental evalúa y aprueba la evaluación/reevaluación del plan de control de gases de vertedero y decide si es necesario introducir modificaciones en la metodología de control de dichos gases.
- La entidad explotadora continúa realizando la evaluación o (re)instauración de las medidas de control, en caso necesario.

En el gráfico 3.1 se muestra un diagrama de flujo sobre las acciones y responsabilidades en lo que refiere al control de los gases de vertedero en la fase de explotación.

GRÁFICO 3-1. DIAGRAMA DE FLUJO SOBRE LAS ACCIONES Y RESPONSABILIDADES EN RELACIÓN CON EL CONTROL DE LOS GASES DE VERTEDERO EN LA FASE DE EXPLOTACIÓN



3.2 Plan de control de los gases de vertedero

Una vez diseñadas las medidas de control de los gases de vertedero ya puede redactarse un plan de control de gases de vertedero y presentarlo ante el órgano ambiental. Un plan de control de gases de vertedero incluye, en primer lugar, la información relativa a la generación de gases de vertedero obtenida a partir de la estimación de los gases que se generarán. La estimación de los gases de vertedero que vayan a generarse no solo posibilita el diseño de los componentes individuales del sistema de control, sino que, además, esta información permite llevar a cabo una instauración por fases del mismo y ampliar o reducir el número de

componentes según sea conveniente. El plan de control de gases de vertedero contiene una descripción y un esquema de las medidas de control que la entidad explotadora considere más adecuadas y tiene como objeto obtener la autorización por parte de el órgano ambiental.

El diseño de las medidas de control de gases de vertedero hace necesario comprender con exactitud algunos principios sobre la recuperación de los gases, sobre cómo se transportan los gases en los residuos y en las tuberías y sobre los últimos avances producidos en el control de los gases de vertedero. En los apartados 3.2.1 y 3.2.2 se describen algunos de los principios y experiencias relevantes. En el apartado 3.2.3 se describen los últimos avances y la mejor tecnología disponible para el control de los gases de vertedero. **Tal y como se explica en los apartados 3.2.2 y 3.2.4, los últimos avances en el control de los gases de vertedero incluyen la instauración/aplicación y uso de las medidas de control o de reducción de las emisiones tan pronto como sea posible tras iniciar el vertido de los residuos.**

Antes de proceder a elaborar un diseño detallado es necesario decantarse por una de las varias opciones de control de gases de vertedero existentes en función de las particularidades de cada vertedero. Las opciones disponibles se describen en el apartado 3.3. Los aspectos relativos al diseño se recogen en los apartados 3.4 a 3.8. La operación y el mantenimiento se describen en el apartado 3.9. La vigilancia y la obligación de informar se describen en el apartado 3.10.

La entidad explotadora presenta el plan de control de gases de vertedero a el órgano ambiental. Tras la evaluación y aprobación por parte de el órgano ambiental, la entidad explotadora inicia la instauración y aplicación de las medidas de control de los gases de vertedero pertinentes.

3.2.1 Principios del control de los gases de vertedero

Se ha demostrado que el control de los gases de vertedero es una manera rentable de reducir las emisiones de metano de los vertederos en los que se genera este gas. Tras los primeros proyectos pioneros de los años 70, la tecnología avanzó enormemente en los años 80. En los años 90 la tecnología se implantó a gran escala en el noreste de Europa y en los Estados Unidos. En otras regiones del mundo, el progreso no ha sido tan rápido, aunque se han descrito diferentes proyectos en el este de Asia, en Oriente Medio, en la zona del Mediterráneo y en América del Sur.

En los proyectos de desgasificación, el gas se recupera mediante pozos de captación ubicados entre los residuos. En prácticamente todos los casos, el gas se recupera de forma activa, utilizando soplantes para generar una presión de aspiración en los pozos. El gas se capta y se transporta a una instalación donde se aprovecha o bien se quema en antorcha. En los vertederos que aprovechan el gas, este se convierte en energía que puede venderse (en la mayoría de proyectos se utiliza para generar electricidad, aunque en algunos casos también se emplea para generar calor o como sustituto del gas natural). En los últimos años, se ha prestado especial atención a los sistemas de recuperación pasiva de metano y a los sistemas de oxidación de dicho gas.

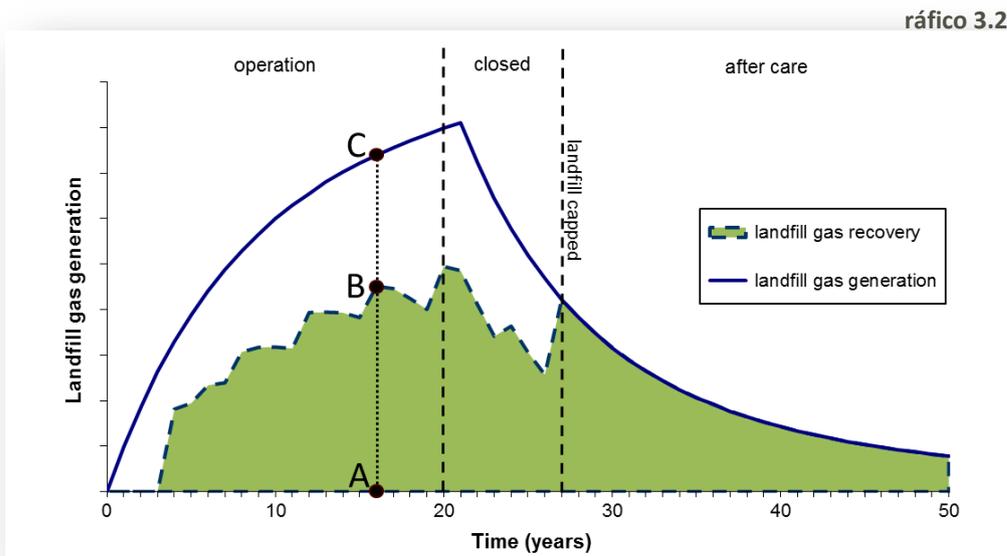
Eficiencia de la recuperación

La eficiencia de la recuperación de los gases de vertedero se define como el ratio entre la cantidad de gas recuperado y la cantidad de gas generado. Hay dos formas de analizar la eficiencia de recuperación del gas:

- La eficiencia en un determinado momento (hora, día, años) y
- la eficiencia total durante el período de explotación del vertedero.

La diferencia entre ambas se ilustra en el gráfico 3.2, que representa la cantidad de gas de vertedero generado y recuperado a lo largo del tiempo en un vertedero (o celda de vertedero) tradicional en el que se inicia el control de los gases lo antes posible después del inicio del vertido de residuos. La eficiencia instantánea es la ratio entre la cantidad de gas recuperado y la cantidad de gas generado en un momento determinado (por ejemplo, la duración de AB dividida por AC). La eficiencia integral durante la vida útil del vertedero se define como la ratio entre las superficies que se encuentran por debajo de ambas curvas.

GRÁFICO 3-2. GENERACIÓN Y RECUPERACIÓN DE GASES DE VERTEDERO A LO LARGO DEL TIEMPO EN UN VERTEDERO TRADICIONAL



Causas de la ineficiencia

Un sistema de recuperación de gases de vertedero debe evaluarse en base a su eficiencia integral. Cantidad de metano que se recupera de las emisiones generadas durante la vida útil de un vertedero.

La definición y visualización de la eficiencia integral también permite identificar las causas de la ineficiencia, es decir los motivos que provocan una disminución en la eficiencia de la recuperación de los gases de vertedero. El gráfico 3.3 identifica 4 causas. Las causas de la ineficiencia en la recuperación de los gases de vertedero son los siguientes:

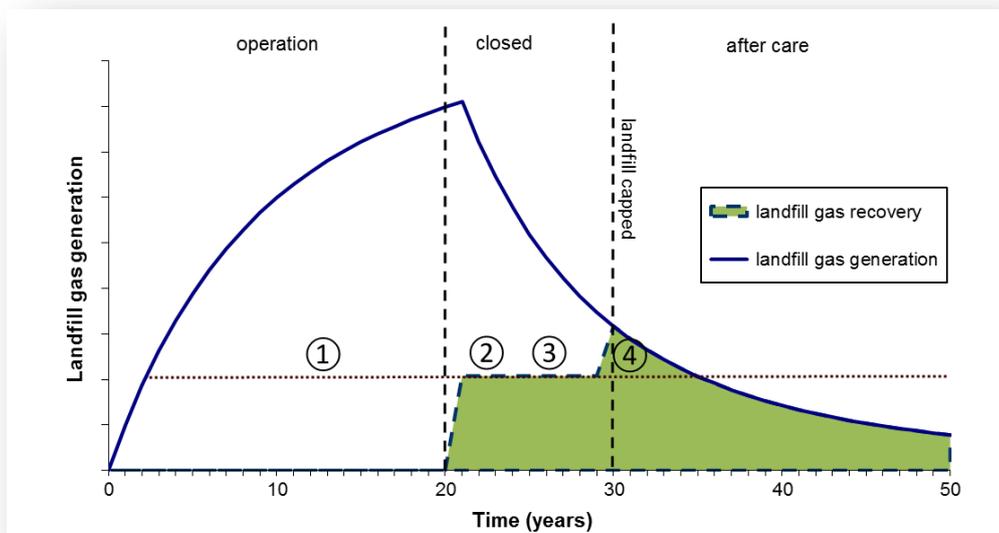
- Gran parte de la ineficiencia es debida al metano generado durante la fase de explotación. Si durante la fase de explotación no se recupera el gas producido, se generan emisiones y se reduce de forma significativa la eficiencia integral del proceso. Si, por ejemplo, se depositan cantidades similares de residuos durante 10 años y, se asume una vida media de biodegradación de 7 años, puede observarse que durante este periodo se genera aproximadamente un 50 % del metano.
- Otra causa de la ineficiencia en los primeros años de extracción del gas está relacionada con la magnitud de aprovechamiento de gases de vertedero. La capacidad, por ejemplo, de

un motor de gas para producir electricidad se basa principalmente en la cantidad de gas de vertedero estimada a largo plazo. Esta decisión es de índole económica. La rentabilidad de un proyecto de gases de vertedero se reduce cuando un motor no se puede utilizar a su máxima capacidad. Una vez seleccionada esta capacidad de aprovechamiento, no existe ningún tipo de incentivo para maximizar la recuperación de gas de vertedero por encima de la capacidad establecida, lo que conlleva, por ejemplo, la combustión del gas que no puede aprovecharse. Si se supone que un vertedero genera de manera estimada 1000 m³ de gas de vertedero por hora, podemos considerar técnicamente recuperable un máximo de 650 m³ por hora. Dado que a largo plazo estas cantidades disminuirán, puede establecerse una capacidad de tan solo 400 m³.h⁻¹ por hora basándose en motivos económicos. A medida que la generación de gas disminuye, se espera que estos 400 m³ constituyan la cantidad de gas de vertedero recuperable a lo largo de un periodo de 5 a 10 años. Una vez establecida esta capacidad de aprovechamiento, no existe ningún tipo de incentivo para maximizar la recuperación de gas más allá de los 400 m³.h⁻¹. Las normas o disposiciones estipuladas en las autorizaciones que requieren quemar el exceso de gases de vertedero podrían aportar tal incentivo.

- Cuando la generación de gases de vertedero se reduce y cada vez es necesario realizar un mayor esfuerzo para recuperar una cantidad suficiente de gas para su aprovechamiento, mayor será la eficiencia del proceso de recuperación y esta estará determinada por las limitaciones técnicas del sistema. La eficiencia de recuperación de los gases de vertedero depende del sistema de pozos (construcción, número de pozos por ha, presencia de pozos en los taludes, mantenimiento), pero también de la composición y la densidad de los residuos, la geometría del vertedero y el tipo de cobertura del vertedero.
- Es posible maximizar la recuperación de los gases de vertedero si los vertederos están impermeabilizados mediante un sistema de revestimiento u otro tipo de material de cobertura impermeable. No obstante, al evitar la entrada de agua, se inhibe la generación de metano y, por lo tanto, es de esperar que esta se reduzca a una velocidad más elevada de la predicha en los modelos. El retraso en la aplicación de un sistema de revestimiento impermeable o el uso de una cobertura semipermeable influye en la eficiencia de la recuperación de los gases de vertedero. En la mayoría de casos, el impacto sobre la eficiencia de recuperación integral es limitado, ya que gran parte del potencial de generación de gases de vertedero se ha generado antes de sellar el vertedero.

GRÁFICO 3-3. CAUSAS DE LA INEFICIENCIA EN LA RECUPERACIÓN DE GASES DE VERTEDERO

- (1) NO SE RECUPERAN GASES DE VERTEDERO DURANTE LA EXPLOTACIÓN; (2) LA EFICIENCIA DE RECUPERACIÓN ESTÁ LIMITADA POR LA CAPACIDAD DE APROVECHAMIENTO; (3) EXISTEN LIMITACIONES TÉCNICAS PARA RECUPERAR LOS GASES DE VERTEDERO Y (4) LA IMPERMEABILIZACIÓN O SELLADO DEL VERTEDERO SE REALIZA DE FORMA TARDÍA.



3.2.2 Algunos conceptos relevantes

La permeabilidad horizontal supera la permeabilidad vertical

El vertido y compactación de los residuos hace que queden estratificados por capas, motivo por el cual la permeabilidad horizontal supera a la vertical. Se estima que la proporción o ratio entre la permeabilidad horizontal y vertical de los residuos domésticos depositados oscila entre 7:1 y 10:1. Por tanto, la migración horizontal de los gases de vertedero es mucho más rápida que la vertical. Sin este fenómeno, la recuperación de gases de vertedero resultaría mucho más complicada.

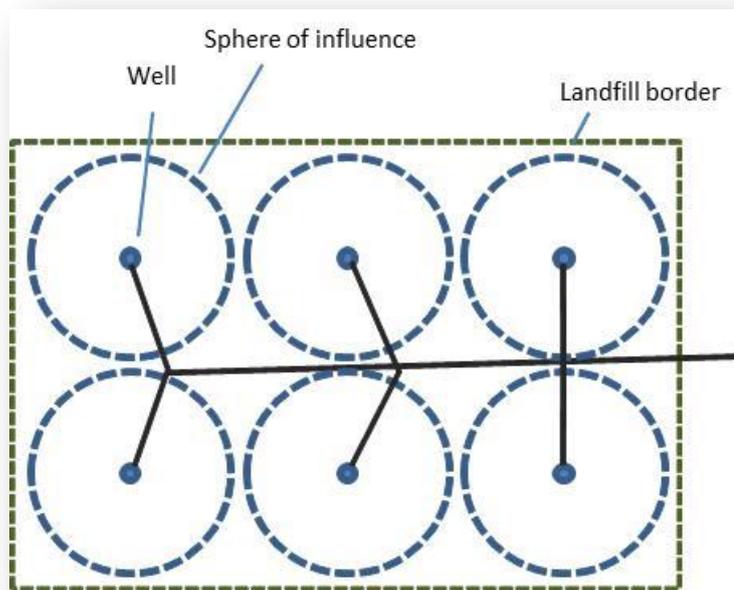
Zona de influencia

Una cuestión fundamental en el diseño de un sistema de recuperación de gases de vertedero es la zona de influencia prevista de los pozos. Este concepto es válido para todo tipo de pozos

(verticales y horizontales, zanjas; véase más adelante); no obstante, son los pozos verticales los que se explicarán aquí con mayor detalle por ser los que se utilizan con mayor frecuencia.

Un pozo de gas tiene normalmente una zona de influencia de alrededor de 40 a 70 m en el caso de vertederos que contienen residuos municipales. La zona de influencia viene determinada por el diseño del pozo (por ejemplo, su profundidad, la longitud del tramo ciego de la tubería), el método de construcción (por ejemplo, un pozo excavado tiene una pared más permeable que uno perforado), el sistema de extracción (por ejemplo, con control de la presión de aspiración) y las características de los residuos (por ejemplo, la permeabilidad). Así, utilizar la ratio entre la superficie total del vertedero y la superficie bajo la influencia de los pozos es una manera simplificada de calcular su eficiencia de captación.

GRÁFICO 3-4. ZONA DE INFLUENCIA DE LOS POZOS VERTICALES



Huelga decir que las zonas de influencia reales no son círculos perfectos de un tamaño uniforme y predecible. También es obvio que la eficiencia de captación disminuye a mayor distancia entre los pozos, cuando no se optimiza periódicamente (por ejemplo, dos veces por semana) la presión de aspiración en cada uno de los pozos o cuando se altera la permeabilidad de los residuos debido a cambios en su composición. La obtención de unas

eficiencias elevadas requiere un diseño avanzado de los pozos y unos conocimientos y dedicación importantes por parte de la entidad explotadora.

Como se ha comentado anteriormente, es importante un correcto mantenimiento de la presión de aspiración en los pozos. Normalmente la presión de aspiración en cada pozo se controla mediante válvulas situadas en la campana del pozo. Cuando la presión de aspiración en un pozo es nula o muy pequeña, la presión interna en los residuos es la que permite extraer los gases generados relativamente ricos en metano, aunque en un caudal reducido.

La elevación de la presión de aspiración en el pozo aumenta el caudal. No obstante, la presión de aspiración es limitada dado que, con elevadas diferencias de presión, el aire entra en el sistema a través de las grietas y fisuras existentes en la capa superior. Por tanto, la elevación de la presión de aspiración conlleva un aumento de la zona de influencia del pozo y un incremento en la cantidad de gases recogidos, aunque en detrimento de su contenido de metano. Además, la intrusión de aire de la atmósfera puede generar condiciones explosivas en la tubería de captación. Por este motivo debe controlarse la concentración de oxígeno en los pozos de gas y en las tuberías. Los asentamientos y las precipitaciones provocan cambios constantes en la permeabilidad de la capa superior. Así, cuando deban mantenerse unas altas eficiencias de recogida de gases, particularmente durante los primeros años tras la clausura del vertedero, ha de prestarse una atención constante a la presión de aspiración y a la calidad del gas de cada pozo.

Efectos de la composición de los residuos y de las prácticas operativas en el vertedero

Como se ha descrito anteriormente, el ratio entre la permeabilidad horizontal y la vertical es la base para el diseño del sistema de recuperación de los gases de vertedero. Por tanto, un ratio entre 7:1 y 10:1 resulta esencial. Es factible que un cambio en los residuos o en las prácticas operativas del vertedero repercuta en este ratio e incida en las posibilidades de recuperación:

- Los propios residuos ejercen su propio impacto. El ratio de permeabilidad puede verse reducido cuando se reduce el uso o vertido de objetos con materiales en forma laminar, como es el caso de bolsas de plástico, periódicos o revistas. Cuando se depositan cantidades reducidas de residuos domésticos y aumenta la contribución de otros desechos, el ratio se vuelve menos predecible.

- La gestión del vertedero (por ejemplo, una mejor compactación) aumenta el ratio de permeabilidad. La compactación y las coberturas intermedias ejercen su influencia en el ratio entre permeabilidad horizontal y vertical. La permeabilidad de los residuos puede ser mayor en vertederos incontrolados. La zona de influencia de los pozos puede ser menor en vertederos incontrolados que en los controlados. En los vertederos incontrolados existe riesgo de intrusión de aire incluso con baja presión de aspiración en los pozos.
- Los materiales empleados para las coberturas diarias también pueden incidir en el ratio de permeabilidad. La calidad de una cobertura temporal o permanente repercute igualmente en la eficiencia de la recuperación. Cuanto menos permeable sea la cobertura, mayor será la eficiencia de recuperación.

Pruebas de bombeo de gas

En ocasiones pueden efectuarse pruebas de bombeo de gas o ensayos de bombeo para determinar el posible rendimiento de los pozos de gas y su zona de influencia. Para dichas pruebas se realizan uno o dos pozos y se comprueba la cantidad de gas que se pretende recuperar. Además, se miden las depresiones en la masa de residuos. Estas pruebas de bombeo se llevan a cabo normalmente antes del diseño y ejecución definitivos del sistema de captación.

No obstante, la experiencia práctica indica que las pruebas de bombeo con uno o dos pozos tienen un valor limitado. En la mayoría de ocasiones no permiten determinar la zona de influencia y las cantidades recuperadas del pozo no suelen ser representativas de las que pueden recuperarse en superficies mayores.

Cuando existan serias dudas sobre las distancias entre pozos, resultará más práctico realizar una prueba de bombeo a mayor escala, que permitirá, por ejemplo:

- Diseñar, construir y conectar diferentes pozos en una única sección aplicando el mejor criterio posible;
- Adquirir una experiencia operativa de varios meses con el sistema y valorar su efectividad (por ejemplo, cambios en la cantidad y calidad de los gases con diferentes presiones de aspiración en los pozos, comparaciones entre conceptos teóricos y realidad, y una medición cualitativa de las emisiones de metano; véase el capítulo 8.5);
- Utilizar las conclusiones para concebir y construir un sistema de recuperación de gases de vertedero en la parte restante del emplazamiento.

3.2.3 Control de gases de vertedero «puntero» y basado en la mejor tecnología disponible

El presente documento guía pretende promover un control «puntero» de los gases de vertedero. Este control «puntero» supone la aplicación de las mejores tecnologías y mejores prácticas de explotación disponibles a unos costes «aceptables». Todas las tecnologías descritas en este documento han sido utilizadas con éxito en la práctica y pueden considerarse las mejores tecnologías disponibles en el año 2015. Véase en el capítulo 6 la cuantificación de los «costes aceptables» y los cálculos indicativos facilitados a modo de ejemplo.

Razones para la reducción de las emisiones de metano

Son varias las razones a favor de la recuperación de los gases de vertedero o la reducción de las emisiones de metano. Dejando a un lado las cuestiones relacionadas con la salud y la seguridad (reducción de olores molestos y aumento de la seguridad en los vertederos y sus alrededores), las dos principales razones son las siguientes:

- Mitigar las emisiones de metano. El metano es un gas de efecto invernadero; la emisión de 1 kg de metano equivale a la emisión de 21-25 kg de CO₂. Muchos países, entre ellos los integrantes de la Unión Europea, están en proceso de comprometerse con una mayor reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. La consecución de nuevas reducciones implica necesariamente unos costes significativos. La reducción de las emisiones de metano en vertederos permite evitar la aplicación de otras medidas más costosas; por ello, la reducción de las emisiones de metano representa un determinado valor.
- Producción de energía. Gracias al aprovechamiento de los gases de vertedero se produce electricidad, calor o se obtiene un sustituto del gas natural. Dependiendo de la organización del proyecto, los gases de vertedero se venden a empresas para su aprovechamiento o se genera electricidad que se vende a consumidores o a empresas de distribución eléctrica. Al producir energía con los gases, se evita la utilización de

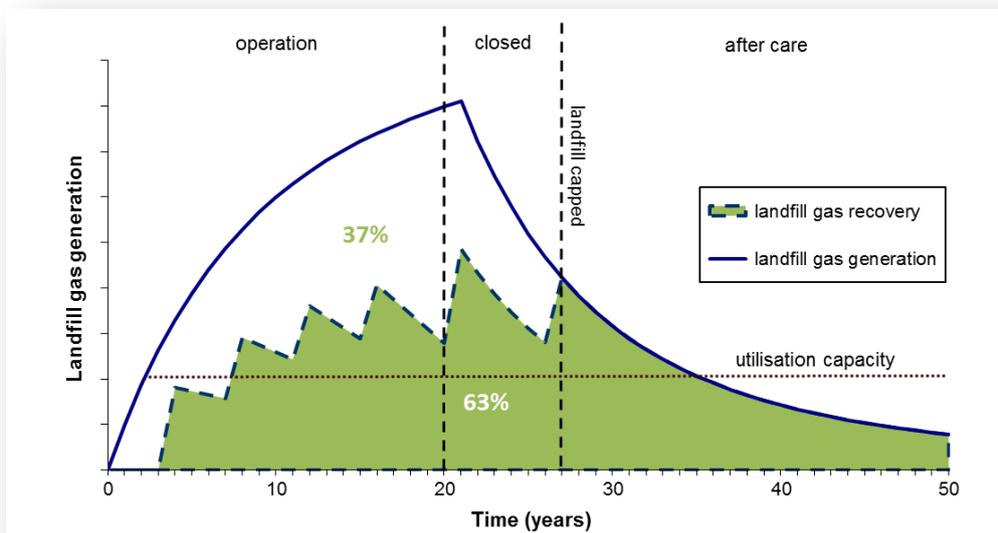
² El factor de conversión se basa en el potencial de calentamiento mundial (PCM) del metano, cuando se integran sus efectos a lo largo de 100 años y se incluyen también los efectos indirectos. El PCM de 25 lo aporta el IPCC en su Cuarto Informe de Evaluación de 2007 y está aceptado de forma general como el factor de conversión para las emisiones de metano. El índice de 21 corresponde a un valor anterior que no está armonizado con los conocimientos científicos actuales. Sin embargo, sigue utilizándose, por ejemplo, para los cálculos del comercio de emisiones de carbono.

combustibles fósiles, lo que se traduce en una reducción de las emisiones de dióxido de carbono de aproximadamente 1 kg de CO₂ por m³ de gases de vertedero aprovechados³.

3.2.4 Aspectos técnicos de la recuperación «puntera» de los gases de vertedero

Tal como se refleja en el gráfico 3.3 y en el texto a continuación, las iniciativas de recuperación de los gases de vertedero no conllevan automáticamente un sistema con una alta eficiencia integral (véase el gráfico 3.5). A fin de conseguir una elevada eficiencia integral, es fundamental que se instauren medidas de control de gases inmediatamente después de que comience el vertido de residuos y que estas se pongan en funcionamiento a la mayor brevedad tras el citado vertido. La eficiencia alcanzada en muchos proyectos se ve limitada por varias razones: porque no se realiza la extracción de gases durante la explotación, porque la capacidad de aprovechamiento determina los esfuerzos encaminados a maximizar la recuperación y porque la recuperación de los gases de vertedero cuenta con un diseño técnico inadecuado.

GRÁFICO 3-5. RECUPERACIÓN PUNTERA DE LOS GASES DE VERTEDERO



³ La cantidad exacta está en función de la opción elegida (generación de electricidad con motores o turbinas, con o sin aprovechamiento de calor; uso directo de los gases, depuración a calidad de gas natural) y de los combustibles a los que sustituye (combinación de carbón, petróleo, gas natural, energía hidroeléctrica o nuclear)

Una mejora de la recuperación de los gases de vertedero por encima de la eficiencia, tal como se muestra en el gráfico 3.3, debe combinar varios elementos: la sensibilización y conocimientos de las entidades explotadoras y autoridades legislativas, la disposición a hacer un esfuerzo y optimizar la recuperación de los gases producidos a niveles superiores a la cantidad que puede llegar a aprovecharse y, en cierta medida, la movilización de inversiones adicionales. Este documento guía pretende fomentar la implantación de una recuperación «puntera»; todos los aspectos relevantes de la misma se describen en los capítulos anteriores.

Esta recuperación puntera puede entenderse como un conjunto de medidas cuya viabilidad tecnológica y rentabilidad han quedado ya demostradas en muchas situaciones. Básicamente, y en situaciones reales óptimas, puede estimarse que la eficiencia integral se sitúa entre el 40 % y el 65 %. Por ejemplo, la situación mostrada en el gráfico 3.5. representa una eficiencia integral de recuperación del 63 %.

Los aspectos relevantes de un proyecto normal de desgasificación pueden resumirse del modo siguiente:

1) Recuperación durante la explotación (véase el apartado 3.3.3.):

- Minimización del tiempo entre el vertido de los residuos y el momento en el que una celda alcanza su cota final, se aplica una cobertura temporal y se procede a recuperar los gases de manera eficiente. Técnicamente es posible limitar este tiempo a unos pocos años siempre que las diferentes celdas no sean demasiado grandes en comparación con la masa de residuos a depositar.
- Recuperación de los gases durante la explotación empleando un sistema de pozos horizontales o verticales colocados durante el vertido de residuos. Los pozos deben mantenerse conectados al sistema de captación en funcionamiento tanto como sea posible.
- Pozos temporales, estructuras provisionales destinadas a maximizar la recuperación de gases durante la explotación. Su eficacia y rentabilidad no está todavía demostrada, y por ello no se consideran medidas «punteras» para la reducción de las emisiones de metano. No obstante, esta circunstancia podría variar en el futuro. En situaciones delicadas (por ejemplo, en el caso de malos olores) los pozos temporales pueden constituir la solución.
- Reducción de la zona activa de vertido de residuos a fin de minimizar el riesgo de incidentes y accidentes que obstaculicen la recogida de gases.
- El proceso de recuperación durante la explotación exige una perfecta coordinación entre el vertido de residuos y la recuperación y captación de los gases de vertedero. La mejor manera de conseguirlo es que una sola organización, en este caso la entidad explotadora, asuma ambas actividades. La externalización de la recuperación de gases, por ejemplo, a

una empresa de aprovechamiento energético, complica la recuperación durante la explotación (véase también el apartado 3.9.5.).

2) Optimización de la recuperación por encima de la cantidad que puede aprovecharse:

- Diseño y elección de la capacidad del sistema de captación, de la soplante y de la antorcha atendiendo a la cantidad prevista de gases de vertedero recuperables en el momento de máxima generación, inmediatamente después de finalizar el periodo de explotación.
- Prestar la atención adecuada a la optimización de la recuperación de gases aunque se haya alcanzado la capacidad máxima de aprovechamiento. Esto conlleva una vigilancia frecuente (dos veces por semana) de la calidad de los gases y la regulación de la presión de aspiración en cada pozo de captación individual con vistas a que el gas contenga, como máximo, un 50 % de metano en volumen (véase también el apartado 3.10.3.).
- Control de las emisiones fugitivas mediante inspección visual y, tal vez también, la identificación de focos de emisiones empleando tecnologías de medición cualitativas (véase también el apartado 3.11.3.).
- La optimización de la recuperación de gases por encima de la capacidad de aprovechamiento requiere que la entidad explotadora esté comprometida con minimizar las emisiones y no se limite a operar un proyecto rentable de generación de energía a partir de gases de vertedero. Resulta improbable que pueda conseguirse este punto si la empresa de aprovechamiento energético posee y explota la recuperación de los gases de vertedero. Es muy recomendable que el propietario del vertedero explote y se sienta/sea responsable de la eficiencia de la recuperación de los gases, por lo menos mientras la cantidad recuperable supere la capacidad de aprovechamiento (véase también el apartado 3.9.5.).
- Esto requiere además que las autoridades competentes y otras partes interesadas consideren la combustión en antorcha de los gases de exceso como la solución a un problema y no como un problema o una oportunidad perdida. Puede demostrarse que el 90 % de la reducción de GEI se debe a la recuperación de los gases de vertedero y a la limitación de las emisiones de metano. La importancia de generar energía a partir de una fuente de origen no fósil es limitada.
- Cuando se prevea que la cantidad recuperada de gases de vertedero va a superar la capacidad de aprovechamiento, puede optarse por un aumento temporal de dicha capacidad. Los motores alimentados por gas, por ejemplo, presentan una gran modularidad, y pueden incorporarse fácilmente un motor de menor tamaño. No obstante, esta es una decisión de índole económica que corresponde a la empresa u organización que realice el aprovechamiento energético y el resultado de la misma no debería repercutir en la pretensión de maximizar la recuperación de los gases de vertedero.
- No obstante, la posibilidad de añadir módulos temporales para la recuperación de energía no puede considerarse un factor de reducción de las emisiones de metano. Las entidades explotadoras y las autoridades legislativas no pueden depender de este factor de

naturaleza económica para optimizar la recuperación de los gases de vertedero. La secuencia correcta es la descrita anteriormente: optimizar la recuperación de los gases y, posteriormente, valorar la ampliación modular del aprovechamiento. Cuando no pueda conseguirse un aumento temporal de la capacidad de aprovechamiento, es mejor quemar en antorcha los gases de exceso recuperados que reducir los volúmenes de recuperación. En consecuencia, deben quemarse en antorcha los gases de vertedero de exceso.

3) Sistema de recuperación técnicamente sólido:

- Los sistemas horizontales y verticales para la recuperación de gases de vertedero pueden considerarse punteros.
- La distancia media entre pozos verticales es de 40-70 m. En el caso de vertederos grandes y profundos, pueden utilizarse mayores distancias en la parte superior siempre que se compensen con distancias menores en las cercanías de los taludes. En lo que respecta a vertederos con cotas superiores a 30 m, se recomienda emplear redes de pozos verticales con filtros a diferentes profundidades. Últimamente los pozos de extracción de gas con filtros profundos solo se han utilizado para aumentar la distancia entre pozos sin perder eficiencia.
- Los pozos horizontales deben situarse a intervalos aproximados de 30-50 m en horizontal y a un máximo de 5 m en vertical cuando se colocan en capas intermedias.
- Debe prestarse especial atención a la recuperación de los gases de vertedero en los taludes, especialmente si una gran parte de los residuos se localiza en los mismos, por ejemplo, debido a una geometría o dimensiones desfavorables del vertedero.

Se ofrecen mayores aclaraciones sobre estos aspectos «punteros» en el resto del presente documento guía.

3.2.5 Evaluación del plan de control de gases de vertedero

A fin de evaluar el plan de control de gases de vertedero, el órgano ambiental puede tomar en consideración las siguientes preguntas:

- ¿Contempla el plan de control de gases de vertedero, en su desarrollo del/de los (diferentes) planteamiento(s) de control de gases, los aspectos de control «punteros» que se describen en el presente documento guía?
- ¿Se considera en los planteamientos de control de gases la mejor tecnología disponible descrita en este documento guía?
- Nota: No corresponde a el órgano ambiental comprobar el correcto dimensionamiento de los sistemas. Este particular siempre será responsabilidad de la entidad explotadora. El órgano ambiental, no obstante, tiene un control indirecto sobre las dimensiones una vez que la entidad explotadora comience a vigilar y comunicar la eficiencia del sistema de control de gases (véase el apartado 3.11.8).

- ¿Se han aplicado, en caso de que el plan de control de gases de vertedero incluya cálculos de eficiencia del gasto, costes unitarios plausibles en relación con los elementos del sistema?
- ¿Se considera el coste de reducir las emisiones de metano, expresado en euros por tonelada de CO₂ equivalente, «aceptable» o «excesivo»? Atendiendo a la información reciente sobre el comercio de emisiones de carbono, las entidades explotadoras y las autoridades competentes pueden optar por considerar «aceptables» las medidas con una relación coste-eficacia inferior, por ejemplo, a 5 € por tonelada de CO₂ equivalente, y «excesivas» aquellas otras en las que esta relación supere los 15 € por tonelada de CO₂ equivalente. Esto reduce las medidas objeto de análisis a aquellas con un coste entre 5 € y 15 € por tonelada de CO₂ equivalente. El apartado 6.3 facilita más información sobre este particular.

3.3 Opciones para el control de los gases de vertedero

3.3.1 Control de gases pasivo y activo

El control de gases incluye la recuperación de gases y la prevención de migraciones subterráneas. Los gases de vertedero no solo contribuyen al calentamiento global; además, presentan riesgos de explosiones o asfixia. Las entidades explotadoras deben velar por que no existan riesgos significativos de que el gas se escape del vertedero a través del subsuelo o se acumule en el exterior de la instalación en una mezcla que pueda resultar explosiva o provocar asfixia.

La Sección 3 del Anexo I de la Directiva europea relativa al vertido de residuos recoge medidas para el control pasivo de gases, entre las que se incluyen:

- Revestimiento de la base y los lados del vertedero a fin de crear una barrera poco permeable que impida que los gases fluyan al subsuelo.
- Capas de drenaje de gases.
- Impermeabilización superficial, incluyendo capas minerales impermeables.

Existen medidas técnicas complementarias que pueden emplearse para controlar la migración de los gases y que no figuran en la Directiva relativa al vertido de residuos. Entre estas técnicas se incluyen drenajes de gas en los límites de los residuos (no obstante, debe tenerse especial cuidado y asegurarse de que no se conviertan en una fuente de entrada de aire o de salida de emisiones a la atmósfera). Las disposiciones de la Sección 3 del Anexo I contemplan cierta flexibilidad en la aplicación de las medidas atendiendo al riesgo para el medio ambiente. En caso de que se plantee utilizar un sistema para oxidar el metano, no siempre

resultará apropiado o económicamente eficiente combinarlo con una impermeabilización superficial.

La generación de gases de vertedero provoca un aumento de la presión en los residuos. Debido al gradiente de presión, los gases de vertedero se ven forzados a salir a la atmósfera. La recuperación pasiva de los gases de vertedero utiliza este aumento natural de la presión para forzar la entrada de gas en los pozos. En la mayoría de ocasiones, sin embargo, los pozos pasivos están conectados a un purgador y no a una tubería de captación. En estos sistemas los gases de vertedero simplemente se evacúan a la atmósfera.

Esta práctica no reduce los olores o la emisión de gases de efecto invernadero y por tanto es desaconsejable.

Los sistemas de recuperación pasivos deben estar dotados, como mínimo, de antorchas especiales o de un sistema eficiente de oxidación del metano. Los principales objetivos perseguidos al instalar pozos pasivos son evitar la migración de los gases de vertedero y prevenir el aumento de la presión y la formación de bolsas de metano. La recuperación pasiva de los gases puede formar parte de un sistema de revestimiento superior destinado a evitar el aumento de la presión debajo del revestimiento de impermeabilización. Si el objetivo pretendido es el aprovechamiento de los gases, los pozos de gas pasivos resultan inadecuados. En estos casos se requiere recuperar los gases de forma activa. Si el objetivo buscado es prevenir las emisiones de gases de vertedero, los pozos pasivos resultan igualmente inadecuados hasta que se haya reducido significativamente la generación de gases y las emisiones resultantes sean insignificantes.

La recuperación de los gases de vertedero es una medida adecuada para garantizar su control. La extracción activa de los gases dentro del vertedero puede resultar necesaria para evitar un aumento de la presión de los mismos en el emplazamiento que provoque su migración desde los residuos depositados hasta el subsuelo del entorno. Los sistemas activos de recuperación de gases emplean una soplante para crear una depresión en los pozos, aspirar los gases de los residuos circundantes hacia el interior de los pozos y transportarlo posteriormente a través de las tuberías de captación hasta la unidad de aprovechamiento, la antorcha o el sistema de oxidación de metano.

3.3.2 Sistemas de pozo

Existen varios tipos de pozos de captación de gases de vertedero:

Pozos verticales

La mayoría de sistemas de recuperación de gases de vertedero del mundo utilizan pozos verticales. Los pozos verticales se perforan o excavan en los residuos después de su vertido (véase «Pozos verticales perforados o excavados» en el apartado 3.4.1) o se instalan durante el vertido de los residuos (véase «Pozos verticales elevados» en el apartado 3.4.1).

Todos los pozos verticales requieren una profundidad mínima de residuos. Como norma general, no se utilizan pozos con una profundidad inferior a, por ejemplo, 10 metros (y con solo una cobertura de tierra) dado que resultan menos efectivos (riesgo de intrusión de aire). Los pozos verticales pueden instalarse con profundidades de residuos inferiores a 10 m si los filtros se sitúan, como mínimo, 4 m por debajo de la superficie y el diseño permite un radio de influencia menor, esto es, un aumento del número de pozos por hectárea con el consiguiente aumento de las inversiones necesarias.

Pozos horizontales

Los pozos horizontales también pueden utilizarse para la recuperación de gases. Los pozos horizontales consisten en tuberías perforadas en una capa de material grueso (por ejemplo, grava, escombros, astillas de madera) y dispuestas en zanjas, que se excavan en los residuos durante las operaciones de vertido. Los pozos se excavan a diferentes niveles en función de la cota del vertedero. Los pozos horizontales permiten recuperar los gases durante la explotación del vertedero. Se requiere una capa de residuos de aproximadamente 3 metros sobre el sistema para una recuperación de los gases eficaz.

El sistema de captación de los gases de los pozos puede situarse fuera de la zona activa de vertido, lo que implica una interferencia escasa o nula con las actividades normales del vertedero. Los pozos horizontales resultan más caros que los verticales sencillamente porque requieren más materiales.

Recuperación superficial

Cuando un vertedero está cubierto con un sistema de impermeabilización superficial, la recuperación de los gases existentes debajo del recubrimiento impermeable debe ser parte

integrante del sistema. El principal objetivo del sistema es evitar la acumulación de gases debajo de la impermeabilización superficial. La acumulación de dichos gases puede dañar la impermeabilización. Este sistema de recuperación consta generalmente de drenajes perforados horizontales en una capa de arena o grava drenante. Una posible alternativa es la utilización de esteras de drenaje.

Los gases se recogen en diversos puntos y se transfieren a través del sistema de revestimiento en elementos especialmente preparados.

La recuperación de los gases localizados bajo la impermeabilización superficial está relacionada con la cobertura final del vertedero y se realiza únicamente en la etapa final del ciclo de vida de las emisiones de metano (véase los gráficos 3.2 y 3.3). A fin de reducir las emisiones de metano, es muy importante centrarse en las primeras etapas de la vida útil del vertedero. Por este motivo no se aborda aquí esta cuestión con mayor detalle.

La única aplicación posible de recuperación superficial relevante a efectos de eficiencia integral está en los biorreactores, en los que los residuos se sellan en el plazo de un año tras el comienzo de la deposición de los mismos, tras lo cual se estimula la generación de gas mediante la recirculación de lixiviados (véase también el apartado 5.1)

Otros sistemas

Además de los pozos verticales y horizontales, en ocasiones se utilizan también otros sistemas diferentes. La mayoría son experimentales, de uso infrecuente o, por ejemplo, basados en la utilización de materiales de desecho. Sirvan como ejemplo las zanjas horizontales de desgasificación, con una anchura y profundidad típicas de aproximadamente 50-100 cm, que se excavan en los residuos y se rellenan con «pellets» de madera, neumáticos, etc. La recogida de gases de vertedero en estas zanjas puede realizarse mediante pozos verticales.

3.3.3 Recuperación de gases durante la explotación

Tal como muestra el gráfico 3.3, una gran parte de los gases de vertedero se genera durante la explotación. Resulta imposible alcanzar una elevada eficiencia integral del sistema si no se toma ninguna medida para recuperar los gases de vertedero.

La recuperación eficiente de gases de vertedero resulta un desafío mucho mayor durante la explotación que después de clausurado el emplazamiento y aplicada la cobertura final. Eso sucede por diversas razones:

- La recogida y recuperación de gases de vertedero puede obstaculizar las actividades habituales del vertedero, como son el vertido, extensión, compactación y recubrimiento diario de los residuos. El personal que trabaja en el frente de vertido no debe perder de vista la infraestructura de recuperación cuando conduce maquinaria pesada. Los incidentes y accidentes (por ejemplo, un vehículo compactador que daña una tubería de captación) tienen un efecto inmediato en la recuperación de los gases de vertedero.
- La recuperación conlleva dificultades técnicas. Los pozos de captación de gases de vertedero necesitan una determinada cantidad de residuos sobre el punto en el que se aplica la presión de aspiración para evitar la intrusión de aire. En el caso de los pozos verticales, esto se consigue instalando una tubería que carece de ranuras en la parte superior del pozo (véase el apartado 3.4.1.). Durante la explotación de los pozos han de adoptarse medidas similares; se requieren aproximadamente entre 3 y 5 metros de residuos sobre el filtro del pozo (vertical u horizontal; véanse los apartados 3.4.1. y 3.4.2.).
- La recogida de gases de los pozos también resulta un desafío de tipo técnico. No obstante, y como se describe más adelante, existen diversas soluciones.
- La posibilidad de intrusión de aire es mayor en las zonas en explotación que en las secciones clausuradas del vertedero. Aunque los residuos estén compactados, su asentamiento está todavía por iniciarse. Debido a ello, los residuos recién depositados presentan una mayor porosidad que los residuos antiguos. Por su parte, las coberturas diarias de materiales porosos y de poco espesor tampoco contribuyen a la recuperación de gases. En consecuencia, únicamente puede ejercerse una presión de aspiración limitada en los pozos de las secciones del vertedero en explotación, lo que se traduce en unas zonas de influencia también limitadas.
- A pesar de los retos expuestos, existen diversas opciones para maximizar la recuperación de gases durante la explotación. Algunas de ellas pueden implantarse de forma conjunta, lo que permite maximizar la eficiencia de recuperación en esta fase, algo fundamental para reducir las emisiones de metano:
- Las secciones del vertedero deben ser lo más pequeñas posible a fin de que alcancen su altura final en el menor tiempo posible. A continuación, y también lo antes posible, ha de realizarse una cobertura temporal que permita recuperar los gases de vertedero a la mayor brevedad.
- Aunque sus dificultades técnicas son mayores que las que entraña la recuperación de gases de una sección clausurada, es posible recuperar cierta cantidad de gas de una sección del vertedero que se encuentre en la fase de vertido. Los pozos verticales elevados con recogida en el fondo o dotados de un sistema de captación temporal en la parte superior son algunas opciones existentes. Los pozos horizontales son más adecuados para

la recuperación de gases durante la explotación, aunque resultan más caros. Véase el apartado 3.4.2. para mayor información.

- Los problemas que genera la interacción entre las actividades habituales de explotación (vertido, compactación, etc.) y la recuperación de gases pueden minimizarse reduciendo todo lo posible la zona activa de vertido. En ese caso, se pueden desconectar temporalmente los pozos de captación correspondientes y reubicar transitoriamente el sistema de captación en terrenos más seguros.
- También pueden utilizarse pozos temporales en las secciones en explotación, por ejemplo, para aumentar la densidad de los pozos, cuando los pozos en construcción tienen una zona de influencia limitada o en caso de que no resulte posible recuperar los gases de vertedero durante la explotación. Los pozos temporales pueden ser horizontales, verticales o consistir en «picas», y se construyen para permanecer activos durante un tiempo limitado. La experiencia documentada con pozos temporales es más bien escasa. Según la misma, los pozos horizontales ofrecen probablemente mejores resultados que los verticales. La zona de influencia y, en consecuencia, la efectividad de las «picas» resulta dudosa. Además, la rentabilidad de estos pozos temporales en lo que refiere a la reducción de las emisiones de metano es cuestionable. Esta circunstancia puede cambiar cuando se disponga de datos de medición adecuados obtenidos en ensayos en campo. Los pozos temporales pueden tener su utilidad, por ejemplo, cuando las operaciones de vertido provocan serios problemas de olores y estos tienen su origen en los gases generados por residuos recientes.
- El uso de un sistema de captación separado para recuperar los gases de vertedero de menor calidad es una opción para hacer frente a la alta permeabilidad de los residuos recientes y la pequeña zona de influencia de los pozos de recogida que se deriva de ello. En muchos casos, no obstante, este segundo sistema de captación no resulta rentable. La experiencia en la construcción y utilización de este tipo de sistemas es limitada. En situaciones concretas, por ejemplo, si se generan malos olores, un sistema temporal de captación puede ser parte de la solución.

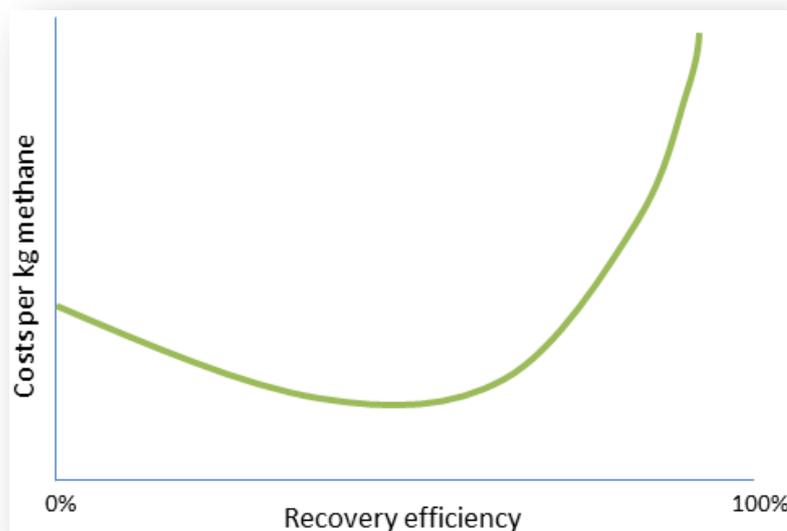
3.3.4 Disposición de los pozos

La disposición de los pozos de captación en el vertedero es fundamental en cuanto a la cantidad de gas que técnicamente resulta posible extraer una vez que está operativo el sistema de recuperación. La distancia entre pozos no es el único factor que determina la eficiencia de recuperación de gases de vertedero. La composición de los residuos, la geometría del vertedero y la cobertura también son importantes. Las eficiencias aumentan, por ejemplo, en el caso de vertederos más profundos, evitando la migración lateral de los gases (por ejemplo, cuando el emplazamiento se ubica en una depresión y sus lados están revestidos), o empleando coberturas temporales menos permeables. Que la cantidad

técnicamente recuperable pueda ser finalmente captada en la práctica depende de los esfuerzos de la entidad explotadora en el control de los equipos de recuperación. Entre otras cosas, depende de si se generan suficientes gases como para utilizar los equipos de aprovechamiento al 100 % de su capacidad, o de si la entidad explotadora cuenta con otros incentivos para optimizar la recuperación de gases de vertedero por encima de la plena utilización de la capacidad de aprovechamiento.

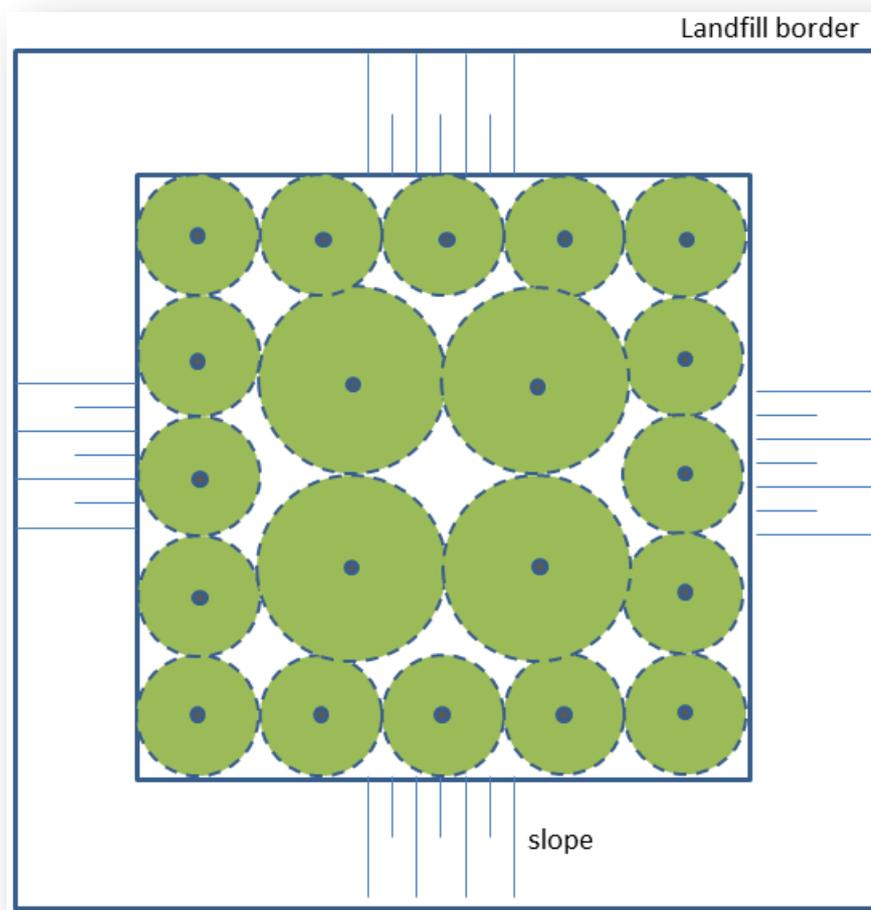
Existen pocos conocimientos cuantitativos sobre los efectos de la distancia entre pozos en la eficiencia de recuperación. Desde una perspectiva más cualitativa, puede esperarse una mayor eficiencia de recuperación cuando se aumenta la densidad o número de pozos. Dado el incremento en los costes de los pozos y del sistema de captación que conlleva el aumento de la densidad del pozo, puede establecerse una correlación entre el coste por tonelada de metano recuperado y la eficiencia de una red de pozos, tal como se muestra en el gráfico 3.6. No obstante, resulta complicado ofrecer pautas sobre la densidad de pozos necesaria para que los costes asumidos para reducir las emisiones resulten «aceptables». Las experiencias en recuperación de gases de vertedero indican que las distancias máximas entre pozos deben ser del orden de 70 m; no obstante, cuando se depositan residuos poco permeables, pueden ser necesarias mayores densidades (intervalos de 40 m).

GRÁFICO 3-6. RELACIÓN COSTE-EFICACIA DE LA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE METANO FRENTE A LA EFICIENCIA DE RECUPERACIÓN



La distancia citada anteriormente (40 a 70 metros) puede considerarse el valor promedio para un vertedero. Por ejemplo, las emisiones en la parte superior del vertedero son con frecuencia mucho menores que las emisiones en taludes. Por tanto, puede resultar más eficiente aumentar la densidad de pozos cerca de los taludes del vertedero y dejar distancias algo mayores en la parte superior (véase la figura 3.7).

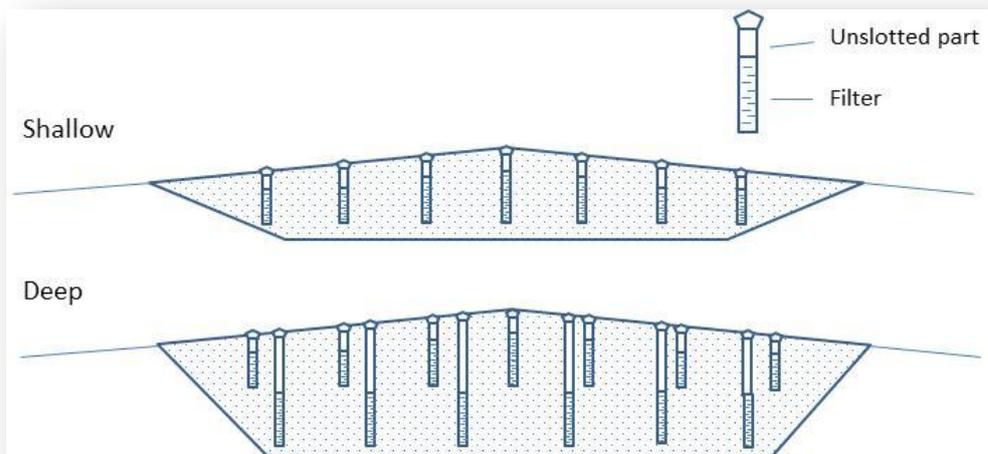
Gráfico 3-7. Disposición de ejemplo de pozos (vista superior) con zona de influencia prevista



La profundidad de los residuos puede tener también un efecto sobre la distancia entre los pozos. En vertederos de más de 25 m de profundidad, pueden utilizarse grupos de pozos con filtros dispuestos a diferentes profundidades. De este modo se consiguen mayores presiones de aspiración en las zonas más profundas de los residuos, allí donde la porosidad puede ser

menor y el control de la migración del metano en el fondo del vertedero resultaría, de lo contrario, problemática.

GRÁFICO 3-8. EJEMPLO DE DISPOSICIONES DE POZOS EN VERTEDEROS CON MENOR O MAYOR PROFUNDIDAD



Reducción de emisiones en taludes

Tal como se ha mencionado, los taludes de los vertederos pueden ser focos de emisiones. Los indicios que permiten apuntar a que una gran parte de las emisiones proceden de taludes son los siguientes:

- Falta de una barrera impermeable en los taludes, ausencia de recubrimiento de arcilla o revestimiento sintético junto con taludes construidos con materiales relativamente permeables (por ejemplo, tierra arenosa). Cuando, además, debe limitarse la presión de aspiración en los pozos cercanos a los taludes a fin de evitar la intrusión de aire, estos pueden emitir cantidades significativas de metano.
- Daños en la vegetación de los taludes, malos olores en las proximidades de los taludes, penachos visibles de gases de vertedero condensados saliendo de los taludes, por ejemplo, en mañanas frías.
- Vertederos de reducidas dimensiones pero relativamente elevados, o emplazamientos de geometría compleja, que dan lugar a una zona relativamente grande que cabe considerar como un talud. En situaciones extremas, el 30 % de los residuos pueden estar situados en taludes, fuera del alcance del sistema de recuperación convencional.
- Mediciones que indican emisiones significativas de metano en taludes.

En tal situación, deberá prestarse especial atención a la recuperación de gases procedentes de taludes. Esto es algo relativamente complicado, debido a una distancia horizontal

relativamente corta con respecto al aire del ambiente que aumenta el riesgo de intrusión de aire. No obstante, existen opciones que pueden utilizarse:

- Pozos verticales adicionales cerca de los taludes (véase la figura 3.7). Debe reducirse la distancia entre los pozos para compensar la pequeña zona de influencia.
- Pozos verticales poco profundos en los taludes con distancias menores entre pozos, o pozos horizontales en el área en talud.
- Recubrimiento de los taludes con materiales menos permeables, por ejemplo, arcilla o un material de revestimiento sintético, para evitar la intrusión de aire y facilitar mayores presiones de aspiración en los pozos cercanos a los taludes.

En caso de que la recuperación siga resultado problemática, una solución para limitar las emisiones de metano en taludes puede ser aumentar la oxidación del gas empleando materiales de revestimiento específicamente diseñados al efecto (véase el apartado 3.8.)

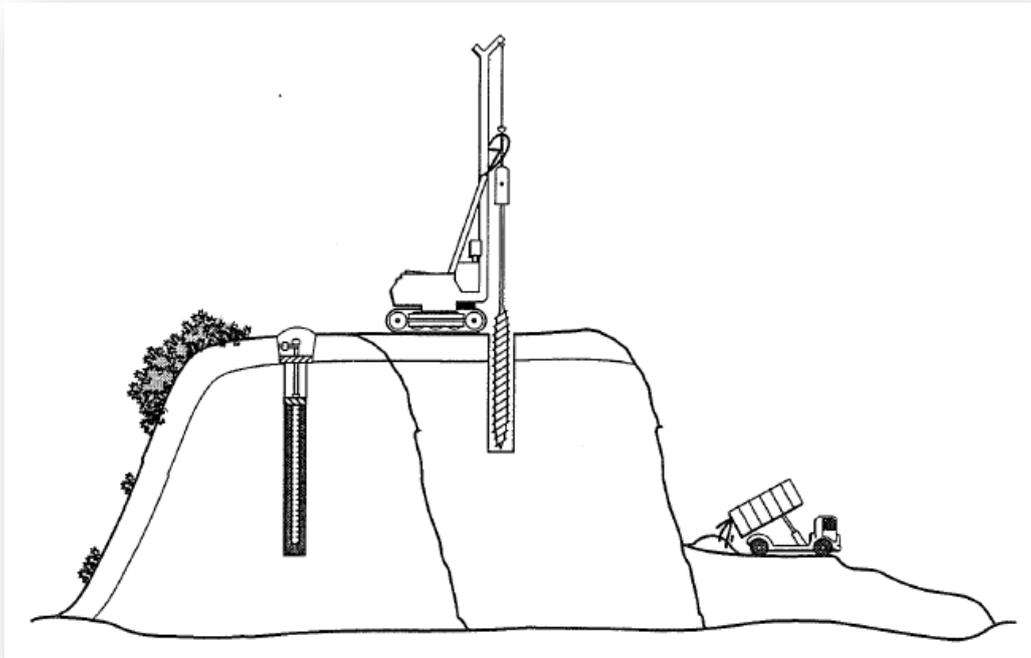
3.4 Diseño y construcción de pozos de gas

3.4.1 Construcción de pozos verticales

Pozos verticales perforados o excavados

Para este tipo de pozos se abre una cavidad (excavada o perforada) en la que posteriormente se coloca una tubería de HDPE en una capa de material grueso. La campana de pozo en la parte superior incorpora conexiones al sistema de captación así como otros elementos, como una válvula para controlar la presión de aspiración en el pozo, puntos de muestreo para el análisis de la calidad del gas o un sifón para reconducir el agua condensada al interior del pozo o directamente a los residuos. En el apartado 3.4 se ofrece una descripción detallada de un pozo vertical. Para la excavación se requiere maquinaria especializada. Su ventaja es que las paredes del pozo son más permeables que las de los pozos perforados. El giro de la barrena puede lanzar materiales arcillosos o laminares contra la pared de la celda y reducir la permeabilidad.

GRÁFICO 3-9. POZOS VERTICALES PERFORADOS

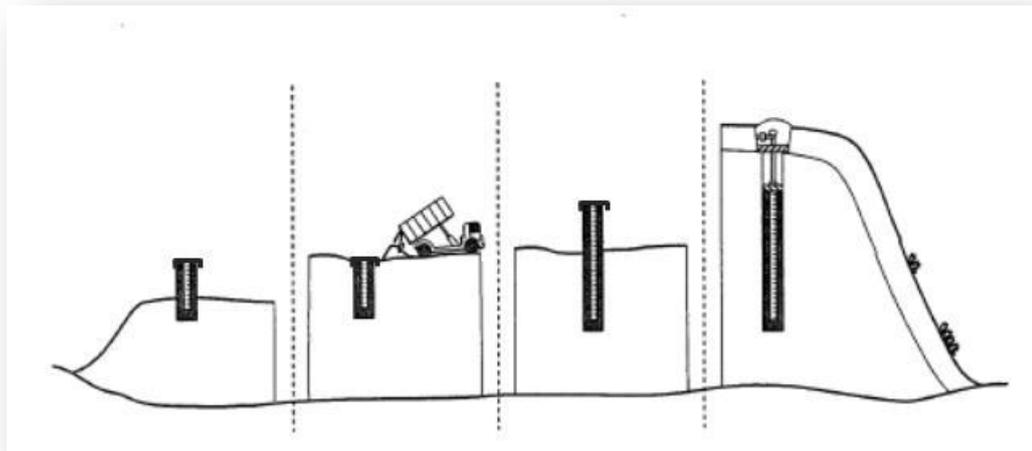


Pozos verticales elevados

Los pozos verticales elevados son una alternativa a los pozos perforados o excavados. Su instalación se realiza durante el vertido de residuos. Los residuos se depositan alrededor de un cilindro en el que va instalada la parte inferior de un pozo vertical (parte de la tubería filtro del pozo, rodeada de material grueso). Cuando los residuos llegan a la altura de la parte superior del cilindro, se procede a extender la tubería de HDPE y a elevar el cilindro. Cuando los residuos alcanzan su altura definitiva, se remata el pozo añadiéndole una campana. Las ventajas de los pozos verticales elevados frente a los excavados o perforados radican en los costes unitarios y en la posibilidad de utilizarlos también durante la explotación del emplazamiento para la captación de gases de vertedero. Su desventaja está en que complican el vertido de residuos. Los equipos móviles que circulan por la zona de vertido deben tener cuidado con los pozos en construcción. Debido a ello, los residuos en torno al pozo pueden estar menos compactados, lo que provoca la intrusión de aire y la reducción de la zona de influencia del pozo. También pueden producirse asentamientos irregulares cerca del pozo y daños en el mismo, en el sistema de captación o en la conexión entre ambos. Los gases de

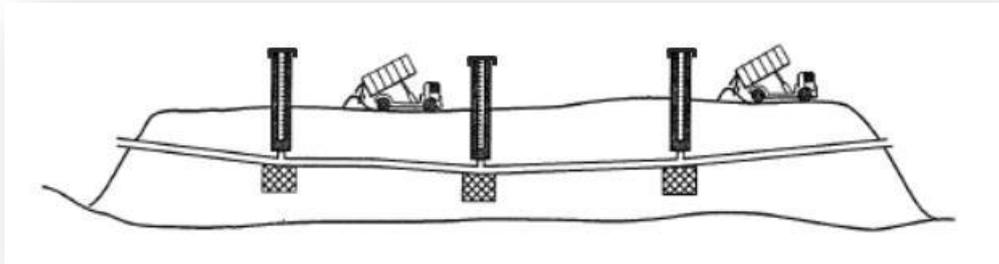
pozos verticales que no se recogen y queman en antorcha o no se aprovechan, son una fuente puntual de emisiones que pueden dar lugar a malos olores.

GRÁFICO 3-10. POZOS VERTICALES ELEVADOS



Cuando se instalan pozos elevados, se recomienda especialmente utilizarlos para la recuperación de gases de vertedero en cuanto sea técnicamente posible. Esto permite maximizar la eficiencia integral de la recuperación y minimizar las emisiones de olores desde pozos abiertos. La forma más sencilla de recoger los gases de vertedero en pozos elevados es conectar el fondo de los mismos a un sistema de captación, tal como se indica en la figura 3.11. Para evitar problemas con el agua condensada, han de incluirse puntos de drenaje con relleno de grava debajo de cada pozo. La desventaja de este sistema de captación instalado en los residuos es que tiene que soportar la fuerza de gravedad que ejercen los desechos situados encima. Por ello se requieren tuberías de captación con una resistencia considerable, comparable a la de las tuberías de drenaje de agua situadas en el fondo del vertedero. Otra de sus desventajas es la dificultad de realizar reparaciones en caso de producirse daños. En la práctica, cuando los residuos alcanzan su altura definitiva y se dispone la cobertura temporal o final, el sistema de captación conectado al fondo del pozo se sustituye por otro situado sobre el vertedero. El sistema de captación de fondo de pozo es temporal y solo se utiliza durante la explotación del emplazamiento.

GRÁFICO 3-11. CONEXIÓN DE POZOS VERTICALES ELEVADOS A UN SISTEMA DE CAPTACIÓN



Una alternativa a la recogida de gases en el fondo del pozo es una conexión en la parte superior del vertedero que emplee un sistema de captación temporal, por ejemplo, mediante mangueras flexibles. Este sistema tiene la desventaja de que complica las operaciones en el emplazamiento. Por ejemplo, deben adoptarse medidas para proteger las mangueras de captación temporal cuando las vías rodadas del vertedero se cruzan con una de ellas.

GRÁFICO 3-12. POZO ELEVADO LISTO PARA SU INSTALACIÓN.

EL POZO ESTÁ CONECTADO EN LA BASE

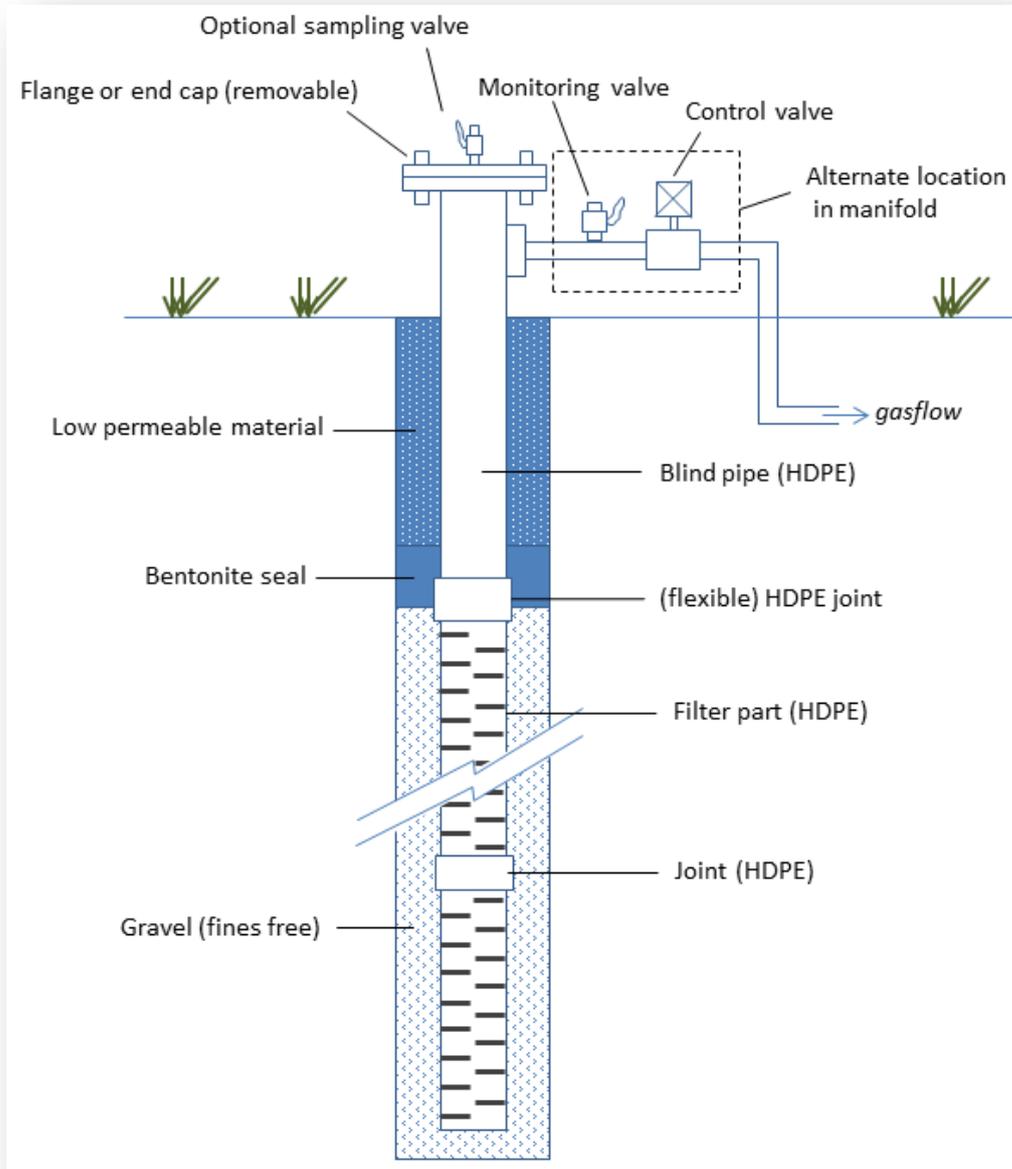


En la figura 3.13 se ofrece una descripción de un pozo vertical. Desde un punto de vista de diseño general, no existen grandes diferencias entre los pozos excavados o perforados y aquellos construidos en los residuos depositados. Un pozo vertical se compone de tres partes:

- La campana de pozo, que tiene varias funciones, incorpora la conexión al sistema de captación y puede contar con una válvula de control para regular la depresión en el pozo y un punto de muestreo para analizar la calidad del gas.
- La parte sin perforar (Sector o tramo ciego). La longitud de esta tubería y la manera de sellarla resultan fundamentales para una recuperación activa de gases sin que entre aire al interior.
- El filtro del pozo; la parte filtrante con ranuras o perforaciones, situada en el fondo del pozo a través de la cual se captan los gases de vertedero.

La tubería y el filtro del pozo suelen ser de polietileno (PE 100). El polietileno es un material resistente a la corrosión, rígido pero elástico en cierta medida, y por tanto resistente también a los asentamientos laterales. El diámetro del pozo (incluyendo la capa de material grueso, tipo grava) es de aproximadamente 80-120 cm. El diámetro exterior de la tubería de polietileno en el interior del pozo oscila entre 110-200 mm. En áreas con gran exceso de precipitaciones (o cuando se prevé que el sistema asuma grandes cantidades de agua), se recomiendan diámetros externos de 160 mm y superiores. Esto permite drenar el agua en caso de que los residuos situados en torno al pozo se sobresaturen.

GRÁFICO 3-13. DETALLE DE UN POZO VERTICAL



Base de los pozos verticales elevados

Debe prestarse una atención especial al asiento de los pozos efectuados en residuos. Con frecuencia se coloca una base de hormigón que tiene dos finalidades:

- Proporcionar un asiento estable al pozo, algo especialmente importante cuando la base del vertedero es de naturaleza inestable (o cuando el propio pozo se apoya sobre residuos).
- Proteger el sistema de revestimiento inferior del peso del pozo y de las fuerzas verticales que generan los residuos al asentarse.

En circunstancias especiales puede mejorarse el transporte de agua desde la base del pozo hasta el sistema de drenaje de lixiviados mediante la colocación de grava alrededor de la base. También puede conectarse la base de los pozos con los sistemas de drenaje en base, mediante zanjas filtrantes equipadas o no con tuberías porosas, de esta manera, el pozo será un importante elemento de drenaje vertical, independientemente de su utilización para la captación de gas.

Perforación de pozos

Cuando se perforen pozos hay que tener cuidado de no dañar el revestimiento inferior o el sistema de recuperación de lixiviados. La distancia entre la parte inferior del pozo y el sistema de contención situado en el fondo del vertedero depende de la exactitud con la que se conozca la posición del fondo, aunque debe ser de al menos 1 a 2 metros.

Cuando se perforen pozos en zonas de depósito previo, debe prestarse atención a posibles emisiones de malos olores u otras molestias. Si se prevé que se generen emisiones inaceptables, las actividades de perforación pueden interrumpirse mientras existan condiciones climatológicas adversas (ausencia de viento o viento que sopla en direcciones desfavorables).

Filtro

El filtro del pozo consta de una tubería de polietileno con ranuras o perforaciones. Estas ranuras son relativamente grandes (~5 mm) a fin de prevenir la pérdida de eficiencia (clogging) del filtro. Las ranuras se distribuyen uniformemente por todo el diámetro de la tubería. La superficie abierta de las ranuras o perforaciones debe ser equivalente aproximadamente al 12 % del diámetro interior de la tubería. La tubería filtro está rodeada por una capa de material grueso, por ejemplo, grava, escombros o piedra fragmentada.

Puede conectarse una junta telescópica (flexible) entre el filtro y la tubería ciega para hacer frente al asentamiento de los residuos. Este elemento telescópico permite el asentamiento de

los elementos superiores del pozo (la campana y la parte sin ranuras) mientras la base permanece en su posición. En relación con esto, el material grueso que rodea el filtro no debe sobrepasar la junta telescópica a fin de evitar fallos. Una solución sencilla consiste en introducir una tubería de pequeño diámetro (por ejemplo, de 125 mm de d. e./110 mm de d. i.) en la tubería filtrante (por ejemplo, de 160 mm de d. e./141 mm de d. i.). De forma alternativa, puede instalarse una junta telescópica entre dos partes de la sección no ranurada de la tubería del pozo.

Tramo ciego (no ranurado o perforado)

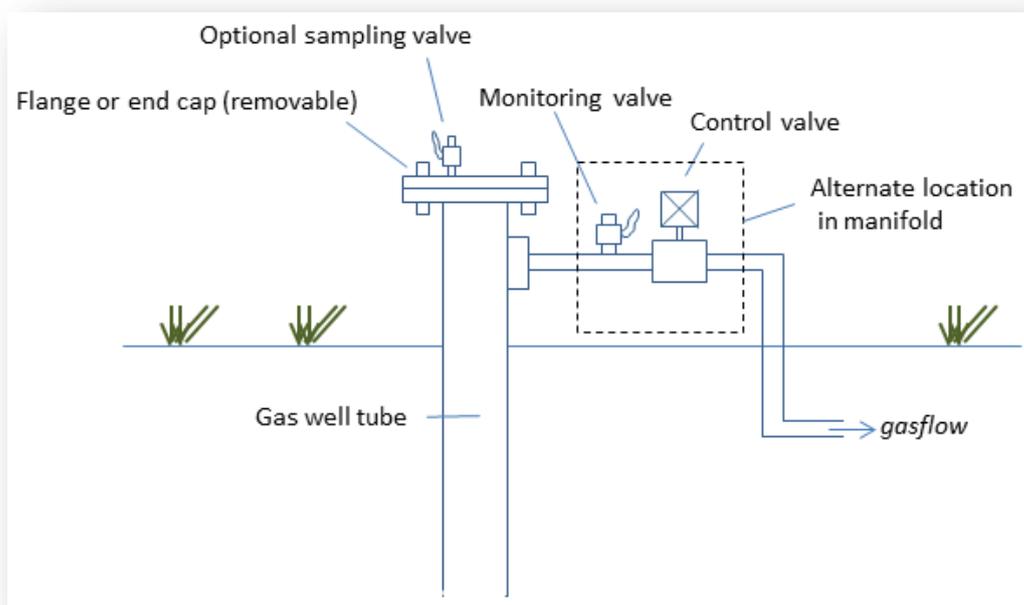
La parte sin ranuras es esencial para la zona de influencia del pozo. Su longitud está en función del ratio entre la permeabilidad horizontal y vertical de los residuos. Tal como se describe en el capítulo 3.2, este ratio es de aproximadamente 7:1 a 10:1 en vertederos controlados de residuos domésticos (por ejemplo, compactados por medios mecánicos, con coberturas diarias). En consecuencia, los efectos de la presión de aspiración pueden percibirse a distancias mucho mayores en dirección horizontal que en dirección vertical. Esta ratio es la base para calcular la longitud de la parte sin ranuras; por ejemplo, considerando un ratio de entre 7:1 y 10:1, un pozo que requiera un radio de influencia de 35 m necesitará una parte sin ranuras de entre 3,5 y 5 metros. El riesgo de intrusión de aire aumenta si la parte sin ranuras tiene una longitud menor. Para evitar la intrusión de aire, la columna de material grueso debe sellarse en toda la longitud de la parte sin ranuras con un material impermeable, por ejemplo una mezcla de arena y bentonita de 0,5 m de espesor. La utilización de un tramo ciego mucho más largo conlleva una menor eficiencia de captación desde la parte superior de la masa de residuos. Cuando el ratio de permeabilidad se reduce, por ejemplo, debido a un cambio en la composición de los residuos, debe aumentarse la longitud de la parte sin ranuras o bien colocar los pozos a menores distancias. La permeabilidad de los residuos es un factor que interviene en esta cuestión (véase también la información del apartado correspondiente a la disposición de los pozos).

En las partes poco profundas de un vertedero (< 15 metros), y por consiguiente en los pozos de poca profundidad, la parte sin ranuras debe tener como mínimo una longitud de 3 metros.

Campana de pozo

La campana está situada en la parte superior del pozo. La campana es un receptáculo con acceso superior que sirve para varias funciones, como la inspección, la toma de muestras de gases, el control del caudal y la presión, la recirculación de la humedad condensada al pozo y, en caso necesario, la extracción de agua del pozo. Algunas de estas funciones no se encuentran necesariamente en la campana de pozo, pudiendo estar ubicadas en el sistema de captación (por ejemplo, los puntos de muestreo y las válvulas de control de la presión de aspiración del pozo). En la figura 3.14 puede apreciarse una campana de pozo con sus diferentes elementos.

GRÁFICO 3-14. POSIBLE DISEÑO DE UNA CAMPANA DE POZO



La conexión entre la campana de pozo y el sistema de captación debe ser flexible para tener en cuenta sus respectivos asentamientos diferenciales.

Por motivos estéticos, la campana puede integrarse en un momento dado en las capas de restauración del vertedero (esto es, bajo tierra). Su parte superior, sin embargo, puede ubicarse también sobre la superficie. Dada su mayor facilidad de acceso, se recomienda esta última opción, dado que una eficiente recuperación de gases de vertedero requiere realizar

cada cierto tiempo ajustes en las válvulas de control situadas en la campana. La primera opción indicada puede resultar más conveniente por motivos de seguridad (por ejemplo, para protegerlo contra actos vandálicos y robos) una vez que se haya clausurado el vertedero y el espacio quede abierto al público.

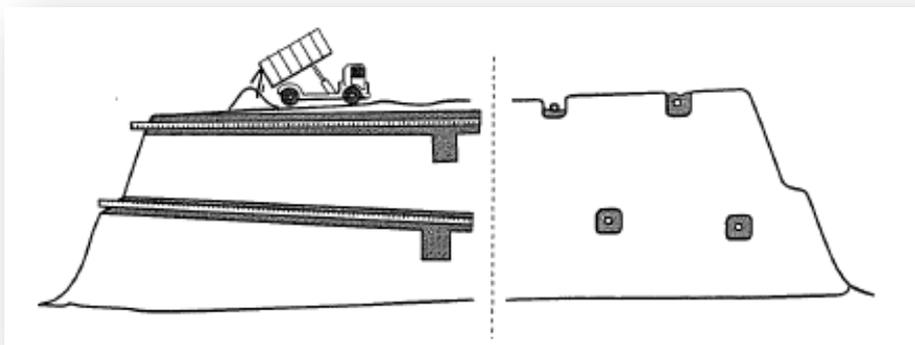
Paso a través de la cobertura o de la impermeabilización superficial del vertedero

Es necesario, en un momento dado, el paso de los pozos o tuberías de captación a través de la cobertura o de la impermeabilización superficial del vertedero. Esta operación resulta especialmente crítica cuando aumentan las exigencias de impermeabilidad de la cobertura. La manera en que se realiza este paso no tiene mayor importancia a efectos de la eficiencia de recuperación, dado que la mayor parte de los gases de vertedero se genera antes de colocar la impermeabilización superficial. No obstante, esta cuestión debe recibir atención suficiente con vistas a la integridad a largo plazo del sistema de revestimiento.

3.4.2 Construcción de pozos horizontales

La figura 3.15 muestra la sección longitudinal y transversal de pozos horizontales que deben construirse a una distancia vertical de aproximadamente 5 m.

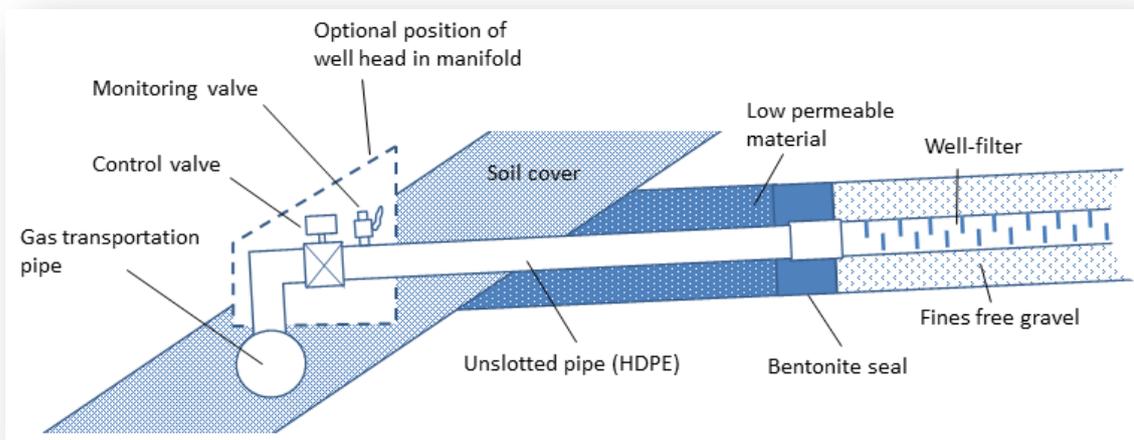
GRÁFICO 3-15. SISTEMA HORIZONTAL



La figura 3.16 ofrece detalles sobre la construcción de un pozo horizontal. Al igual que los pozos verticales, los horizontales constan de tres elementos principales:

- Una campana para conectar el pozo al sistema de captación, donde se localiza la válvula de control y el punto de muestreo de gases.
- Una parte no ranurada que evita la intrusión del aire ambiente.
- Una tubería filtrante con ranuras o perforaciones constituidas por una capa de material grueso que se utiliza para recoger los gases de vertedero.

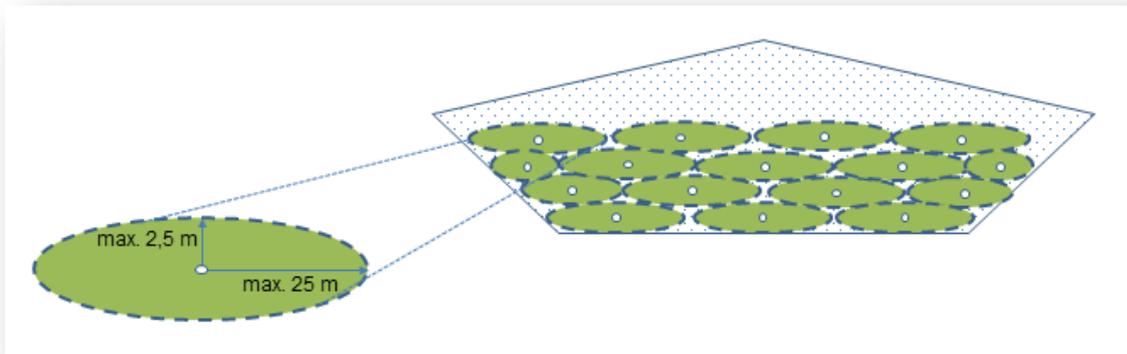
GRÁFICO 3-16. CONSTRUCCIÓN DE UN POZO HORIZONTAL



La tubería suele ser normalmente de polietileno (PE 100), un material que se caracteriza por ser resistente a la corrosión y por su rigidez no exenta de elasticidad para soportar asentamientos. Debe tener un diámetro suficiente que permita extraer la cantidad de gas prevista con una caída de presión razonable (velocidades de gas en las tuberías inferiores a 10 m s^{-1}). El diámetro no debe ser excesivamente grande para que no se produzca una pérdida de estabilidad mecánica. La tubería de PE tiene normalmente unos diámetros exteriores de entre 110- mm y 200 mm en una capa de material grueso que la rodea un espesor de entre 50 cm y 100 cm.

Dadas las diferencias en cuanto a permeabilidad horizontal y vertical, la zona de influencia de un pozo horizontal tiene forma elíptica, con una longitud prevista en dirección horizontal de 25 metros y de 2,5 metros en vertical. Esto implica unas distancias horizontales máximas entre pozos de aproximadamente 50 metros y unas distancias verticales entre capas de pozos de 3,5 a 5 metros.

GRÁFICO 3-17. ZONA DE INFLUENCIA DE POZOS HORIZONTALES (NOTA: LA ILUSTRACIÓN MUESTRA UN CORTE TRANSVERSAL DE VARIOS POZOS HORIZONTALES DISPUESTOS EN PERPENDICULAR)



Filtro

La tubería filtro debe ubicarse en una capa de material filtrante (grava). El lecho filtrante deberá tener un espesor aproximado entre 50 cm y 100 cm, y se compone de grava de cantera, escombros, etc. Ofrece cierta protección frente a actividades en el vertedero, siempre que las ranuras permanezcan abiertas. Si está previsto un tráfico intenso, deben adoptarse precauciones especiales (por ejemplo, refuerzos temporales del terreno) para evitar daños en el pozo horizontal.

La longitud máxima del filtro de un sistema horizontal debe ser de aproximadamente 100 m; cuando la longitud supera los 100 m, la caída de presión en las tuberías perforadas resulta excesiva y el sistema pierde su eficacia a medida que aumenta la distancia respecto a la campana. Cuando la captura de gases tiene lugar desde ambos lados de un pozo horizontal, la longitud máxima del filtro es de aproximadamente 200 metros. Para mantener una presión de aspiración constante en toda la longitud de un pozo horizontal, las ranuras del filtro deben ser de un tamaño relativamente pequeño. La caída de presión en las ranuras y en la tubería debe diferir al menos en 1 orden de magnitud.

Un pozo horizontal debe tener una pendiente mínima del 2 % para evitar acumulaciones de agua.

La capa de material grueso debe sellarse del sector ciego mediante el uso de, por ejemplo, arena-bentonita o una membrana de HDPE.

Zona no filtrante (ciega)

El tramo ciego del pozo tiene como función impedir la entrada de aire en el sistema. La longitud del tramo ciego depende de la pendiente, del ratio entre la permeabilidad vertical y horizontal y de la distancia entre las capas de las tuberías horizontales. La zona ciega debe disponerse con una pendiente mínima del 2 % con un sifón en el extremo inferior del sistema de captación para evitar acumulaciones de agua.

Campana (o cabeza) de pozo

Las campanas de pozo se sitúan en los taludes. La función de estas campanas es idéntica a la de las campanas de pozos verticales (véase más arriba).

3.4.3 Selección de las válvulas de control

Para la recuperación activa de gases de vertedero se genera una depresión en los pozos de captación de aproximadamente 2-10 mbar⁴.

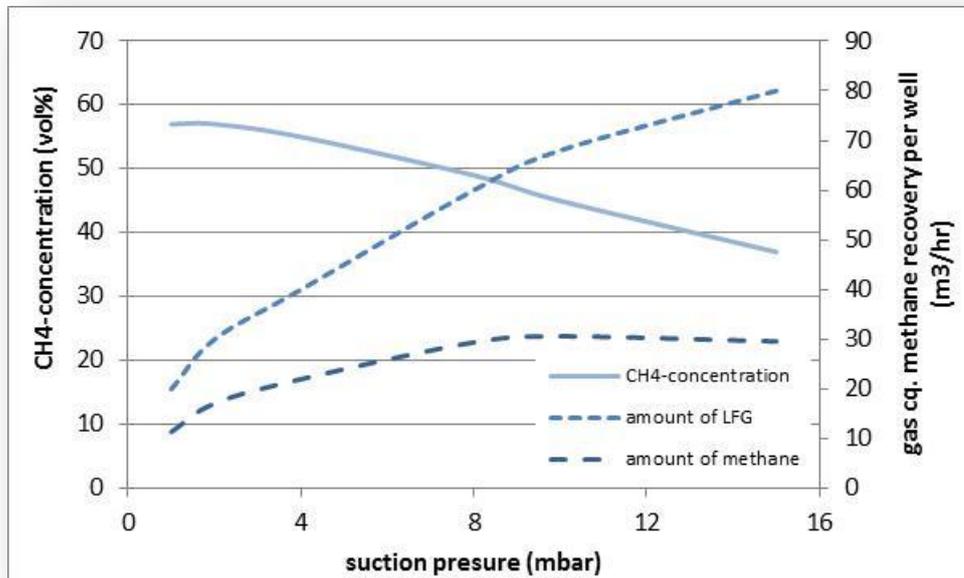
La presión de aspiración real en el pozo es un término medio entre la cantidad y la calidad de los gases de vertedero extraídos. Al aumentar la presión de aspiración, también se incrementa la zona de influencia real del pozo. Sin embargo, también conlleva un aumento del riesgo de intrusión de aire ambiente. Por tanto, al aumentar la presión de aspiración, primero se incrementa la cantidad recuperada de gases de vertedero. Pasado un determinado punto, se deteriora la calidad de los gases y estos se diluyen con aire, produciéndose cierta degradación aeróbica. En consecuencia, al superar este punto pueden descender las concentraciones de metano, con la misma rapidez con que aumenta la cantidad total de gases recuperados. Un nuevo aumento de la presión de aspiración no se traduce en menores emisiones de metano; los gases recuperados se diluyen (véase el gráfico 3.18). Las concentraciones de N₂ aumentan,

⁴ Las soplantes para la recuperación de gases de vertedero tienen a menudo un incremento de presión total de aproximadamente 100 mbar. De estos, se requieren cerca de 50-70 mbar con fines de aprovechamiento y otros 20-40 mbar son necesarios para superar la caída de presión en el sistema de captación y las válvulas de control. Los pozos profundos (con partes sin ranuras de mayor longitud) pueden tener mayores depresiones.

así como la posibilidad de unas mayores concentraciones de oxígeno en los gases recuperados⁵.

GRÁFICO 3-18. EFECTO DE LA PRESIÓN DE ASPIRACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE METANO Y LA RECUPERACIÓN DE GAS DE VERTEDERO Y METANO.

(NOTA: ESTE ES SOLO UN EJEMPLO. EN LA PRÁCTICA LOS VALORES SON DIFERENTES EN FUNCIÓN DE CADA POZO)



La figura 3.19 describe la misma situación con alguna pequeña diferencia. Al incrementarse la depresión en el pozo, también aumenta la zona de influencia hasta que esta entra en contacto con la capa superior permeable. Pasado este punto (indicado como P3), el incremento de la depresión se traduce sobre todo en un aumento de la intrusión de aire.

⁵ Las concentraciones de oxígeno en los gases de vertedero extraídos superiores a un 2 % en volumen deben considerarse un riesgo.

- **Calidad del gas:** la presión de aspiración en los pozos se regula de manera que se obtenga una concentración mínima de metano susceptible de ser aprovechada (véase la tabla mostrada en el gráfico 3.26). La cantidad recuperada de gases de vertedero es consecuencia de este ajuste y puede ser superior a la que puede aprovecharse. El excedente recuperado debe quemarse en antorchas. Las fluctuaciones diarias en la permeabilidad de la cobertura y la presión ambiente generan variaciones diarias en la cantidad de gas que puede recuperarse. Cuando la cantidad aprovechada es más o menos constante, la cantidad quemada en antorcha varía diariamente. El uso de un control de presión entre la soplante y el sistema de aprovechamiento permite enviar automáticamente a la antorcha una cantidad variable de excedente de gases.
- Otra opción consiste en extraer una calidad de gas solo apropiada para la quema en antorcha. Algunas antorchas para gas de bajo poder calorífico aceptan concentraciones de metano tan bajas como un 15 % (véase el cuadro 3.26)⁶. De esta manera se consigue maximizar la reducción de emisiones de metano. Aunque el contenido energético de los gases no se aprovecha, esta opción ofrece generalmente la mayor reducción total de emisiones de GEI. No obstante, la falta de los ingresos del aprovechamiento de los gases hace que las entidades explotadoras opten normalmente por otras opciones más interesantes desde una perspectiva económica pero menos desde una posición medioambiental.
- **Cantidad de gas:** la presión de aspiración en los pozos se regula de manera que se recupere una determinada cantidad de gas. La presión de aspiración puede ajustarse automáticamente, por ejemplo, mediante controladores de caudal másico situados en cada pozo o con un control de caudal másico general próximo a la soplante. Este control automático del caudal reduce la presión de aspiración, por ejemplo, cuando después de llover se requiere una menor presión para recuperar una cantidad fija de gases de vertedero.

La primera opción indicada se traduce en una máxima recuperación y aprovechamiento. Con la segunda opción aumenta la reducción de las emisiones de metano. No obstante, en algunos casos esta opción no resulta rentable. En situaciones delicadas, por ejemplo, con graves problemas de olores derivados de la fase metanogénica del vertedero, esta opción podría tenerse en cuenta. La última opción se adopta frecuentemente en proyectos de aprovechamiento motivados en gran medida por cuestiones económicas. Inevitablemente se

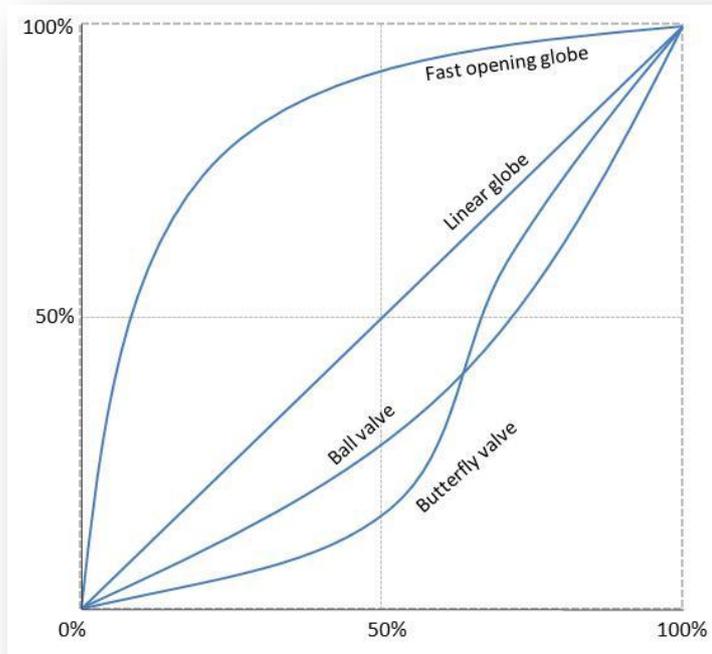
⁶ La orientación hacia unas bajas concentraciones de metano no siempre resulta satisfactoria debido a los problemas que provoca la aspiración de oxígeno. En estos casos el límite inferior al que se ajusta el sistema corresponde a un contenido de metano ligeramente superior, siendo la cantidad de oxígeno el factor limitativo.

producirán mayores emisiones de metano durante los periodos en los que las cantidades recuperables de metano excedan su capacidad de aprovechamiento.

Válvula de control

La elección de la válvula de control es esencial para poder controlar de la presión de aspiración en los pozos. También resulta fundamental la relación entre la apertura de la válvula y la cantidad de gas que fluye por la misma, que es lo más lineal posible (véase la válvula lineal de globo en el gráfico 3.20). Esta relación lineal garantiza una controlabilidad óptima de la presión de aspiración y del caudal en todo el rango de aperturas de válvula desde 0 % a 100 %. Una válvula de apertura rápida es la opción menos recomendable; una apertura de válvula del 25 % se traduce en más de un 75 % de caudal máximo, con lo que la controlabilidad del flujo en el rango de 0 % al 75 % de caudal máximo se ve seriamente limitada. Es posible emplear válvulas sub-lineales (por ejemplo válvulas de mariposa o de bola). Pueden optimizarse las características de estas válvulas optando por un diámetro de válvula inferior al diámetro de la tubería, por ejemplo, una válvula de mariposa NW 40 mm o NW 50 mm (diámetro nominal) en una tubería de 75 mm o 90 mm (diámetro exterior), y utilizando un adaptador para conectar ambas.

GRÁFICO 3-20. CARACTERÍSTICAS DE LA VÁLVULA



La selección de una válvula no se fundamenta solo en sus características, sino también en su estructura (p.ej., la posibilidad de recircular el agua condensada al pozo y los materiales empleados, que deben ser resistentes a la naturaleza corrosiva de los gases de vertedero húmedos). Por ello, en ocasiones es preferible optar por válvulas con características más básicas.

Para minimizar el efecto que ejercen los cambios de presión de aspiración en las tuberías de captación sobre la cantidad de gas recogida en un pozo, el ratio entre la caída de presión en la válvula y la caída de presión en todo el sistema de captación debe ser suficientemente alto. Se recomienda una caída de presión en la válvula de al menos un tercio de la caída de presión en todo el sistema de captación desde el pozo hasta la soplante.

3.5 Tuberías de captación de gases de vertedero

3.5.1 Tuberías

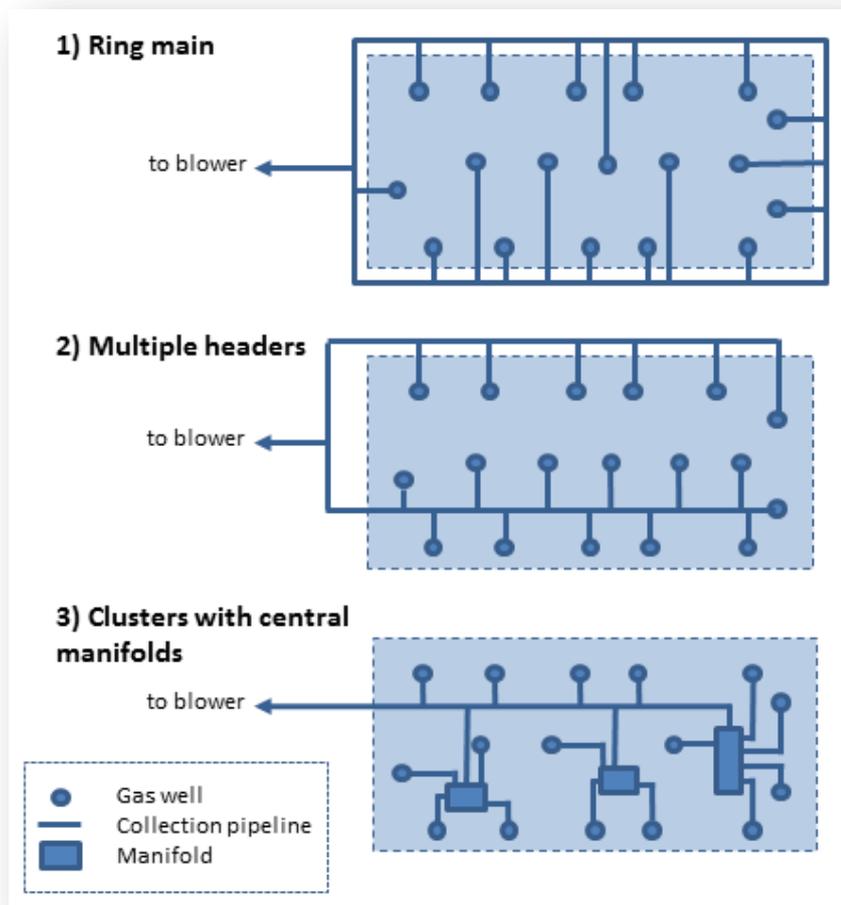
Un sistema de tuberías recoge los gases procedentes de los pozos y los transporta a la antorcha o a la unidad de aprovechamiento. Este sistema consta normalmente de tuberías de

HDPE instaladas en el sellado de cubierta del vertedero. Existen varias opciones para acometer la disposición general de la red de pozos. Los pozos pueden tener una tipología en anillo, disponerse en grupos o conectarse a una única tubería de captación principal. Todos los sistemas pueden considerarse avanzados.

La elección del sistema más adecuado depende, entre otras, de las siguientes cuestiones:

- La disponibilidad de terreno sin impedimentos (terreno en el que no se hayan depositado residuos y sin riesgo de asentamientos).
- La geometría del emplazamiento.
- El perfil de restauración y la topografía local.
- Restricciones normativas u otras limitaciones (por ejemplo, que dicten la ubicación de la unidad de aprovechamiento y de la antorcha).

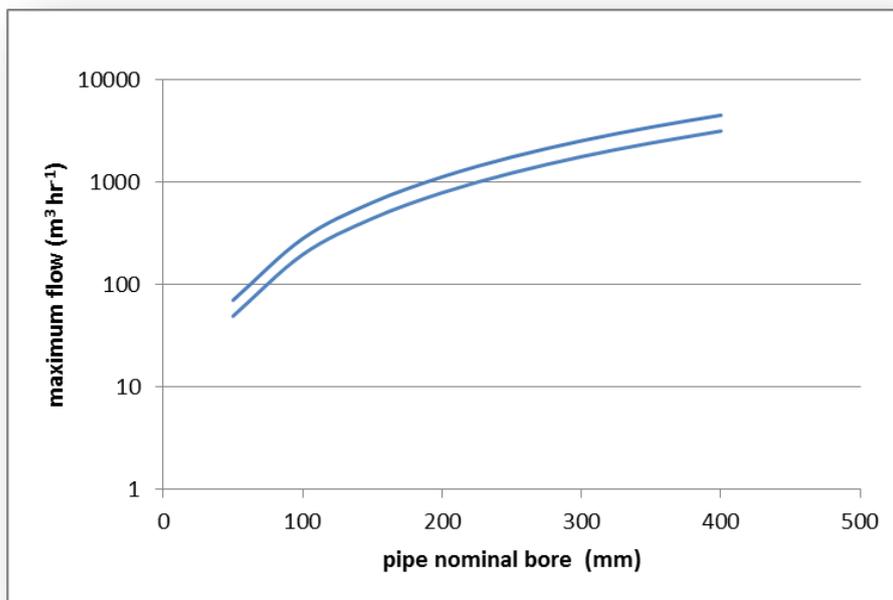
GRÁFICO 3-21. POSIBLE DISPOSICIÓN DEL SISTEMA DE TUBERÍAS DE CAPTACIÓN DE GAS



Aspectos importantes en relación con las tuberías:

- Por motivos de solidez, flexibilidad y resistencia contra la corrosión, es preferible optar por tuberías de captación de polietileno de alta densidad (HDPE) (PE 100), de polietileno de densidad media (MDPE) o de polipropileno (PP). El espesor de la pared de las tuberías ha de ser de tipo medio (con un ratio entre el diámetro de tubería y el espesor de la pared de 17) para poder hacer frente al menos a asentamientos irregulares.
- El sistema ha de dimensionarse en función de las cantidades máximas de gases que esté previsto que se generen. Como norma general, las velocidades de los gases en las tuberías no deben superar los 7-10 m.s-1. El límite inferior de este rango corresponde a tuberías de pequeño diámetro con eliminación del agua condensada a contracorriente de los gases. Esto da como resultado un diámetro nominal (DN) aproximado de entre 65 mm y 100 mm en el caso de tuberías que conducen a pozos individuales, un DN de hasta 300 mm en el caso de tuberías llevan a pozos múltiples y un DN de hasta 450 mm para tuberías conectadas a grandes campanas. A fin de facilitar la eliminación de los condensados, no deben utilizarse tuberías con un diámetro nominal inferior a 65 mm. No es muy frecuente el uso de tuberías con un DN superior a 450 mm; ello se debe a que generan mayores costes y ofrecen menor flexibilidad.

GRÁFICO 3-22. DIÁMETRO NOMINAL DE TUBERÍA (DIÁMETRO INTERIOR) FRENTE A CAUDAL MÁXIMO DE GAS, SUPONIENDO UNA VELOCIDAD MÁXIMA DE GAS DE 7 A 10 M S⁻¹



- Para evitar que el condensado acumulado pueda bloquear las tuberías, estas deben disponerse con una pendiente mínima del 2 % (una caída en altura de 2 cm por metro), aprovechando en lo posible la inclinación del propio vertedero. En caso de que haya que descargar el condensado a contracorriente (en sentido contrario al flujo del gas), se recomienda una pendiente del 4 % al 5 %. Para las tuberías instaladas en suelos estables en el exterior del vertedero, puede ser suficiente una pendiente del 2 % (véase a continuación para conocer otras medidas destinadas a evitar problemas con los condensados).
- Tanto en las especificaciones como en la elección de todos los elementos del sistema de captación debe tenerse presente la naturaleza potencialmente corrosiva del condensado (pH de 3-4; NH₄-N de 3-15 mg.l-1; Cl- de 1-4 mg.l-1).
- Las tuberías deben instalarse preferentemente en la cobertura a una profundidad mínima de 50 cm; pueden colocarse a menor profundidad cuando pueda descartarse un uso intensivo del suelo (por ejemplo si cabe excluir por completo el paso de camiones sobre las tuberías). Si las tuberías se instalan en los residuos depositados, han de ir rodeadas por una capa de arena para mejorar su estabilidad.
- Existen ejemplos de vertederos en los que las tuberías están instaladas sobre el nivel del suelo apoyado en postes. Este sistema tiene la ventaja de que las tuberías pueden controlarse y repararse fácilmente. También permite compensar sin dificultad los asentamientos. Su desventaja radica en que esta disposición es más vulnerable y las tuberías pueden obstruirse completamente por efecto de la congelación del condensado durante el periodo invernal en climas fríos.
- Las conexiones entre tuberías y las conexiones entre tuberías y pozos o sifones deben ser flexibles para hacer frente a los asentamientos irregulares de los residuos. Asimismo, las conexiones deben ser suficientemente fuertes; las conexiones tubería-tubería, será preferible soldarlas y las conexiones tubería-pozo y tubería-campana será preferible realizarlas mediante bridas.
- El sistema de tuberías debe componerse preferiblemente de diferentes secciones que puedan desconectarse del resto del sistema mediante válvulas. De este modo, en caso de producirse un accidente o una fuga, solo será necesario aislar una parte del sistema de captación. Si no van instalados en la campana, los elementos de control de la presión de cada pozo han de incorporarse en el sistema de tuberías.

3.5.2 Conexiones temporales

Tal y como se ha descrito anteriormente, la recuperación de gas de secciones en explotación resulta fundamental para obtener una alta eficiencia integral de recuperación. La conexión de pozos situados en secciones en explotación (tanto si son temporales como si son permanentes) requiere unas consideraciones especiales:

- A fin de maximizar la eficiencia de recuperación y minimizar los problemas medioambientales que conllevan los pozos no conectados (los pozos no conectados pueden ser fuentes puntuales de malos olores; véase más arriba), los pozos han de permanecer conectados al sistema de captación tanto como sea posible. A este fin, en muchos casos pueden utilizarse tuberías temporales, o incluso en ocasiones mangueras flexibles.
- En muchas ocasiones no resulta viable instalar tuberías temporales en los residuos o en el material de recubrimiento, y por ello han de disponerse sobre la superficie del vertido. Si este es el caso, deben adoptarse medidas destinadas a proteger las tuberías temporales de cualquier daño, por ejemplo, aquellos provocados por camiones de transporte de residuos, volquetes o maquinaria de compactación del vertedero. Las medidas de protección pueden incluir recursos físicos (conos o bloques de hormigón) o sistemas de señalización (cintas o señales de advertencia).
- Las tuberías tendidas en superficie son más susceptibles a sufrir daños provocados por las condiciones climáticas (fuertes vientos, retracciones y dilataciones a causa de cambios de temperatura o luz solar directa). Debido a lo anterior, es necesario realizar frecuentes inspecciones y ensayos de integridad.
- La continuidad de la recogida de gases de vertedero de otras partes del emplazamiento debe estar garantizada. Las válvulas principales pueden incorporarse en el sistema de captación. Esto permite aislar secciones del sistema de captación temporal de la parte principal del sistema de captación.

3.5.3 Colectores del condensado

Una correcta gestión del condensado resulta esencial para el buen funcionamiento de la recuperación de gases de vertedero. Los gases de vertedero se producen a temperaturas máximas de 40 °C y se saturan totalmente con vapor de agua al liberarse. En condiciones normales se generan alrededor de 30 g de condensado por m³ de gases. En un vertedero en el que se recuperan cada hora 200 m³, pueden generarse diariamente 144 litros de condensado. Ya en la campana de pozo y en los primeros metros de la tubería de captación, los gases se enfrían y el agua se condensa. El condensado se acumula en el sistema de captación. Las obstrucciones provocadas por el agua condensada provocan problemas en la recuperación de gases de vertedero. Además, el condensado puede formar espumas, que se suman a la caída de presión en el sistema de captación.

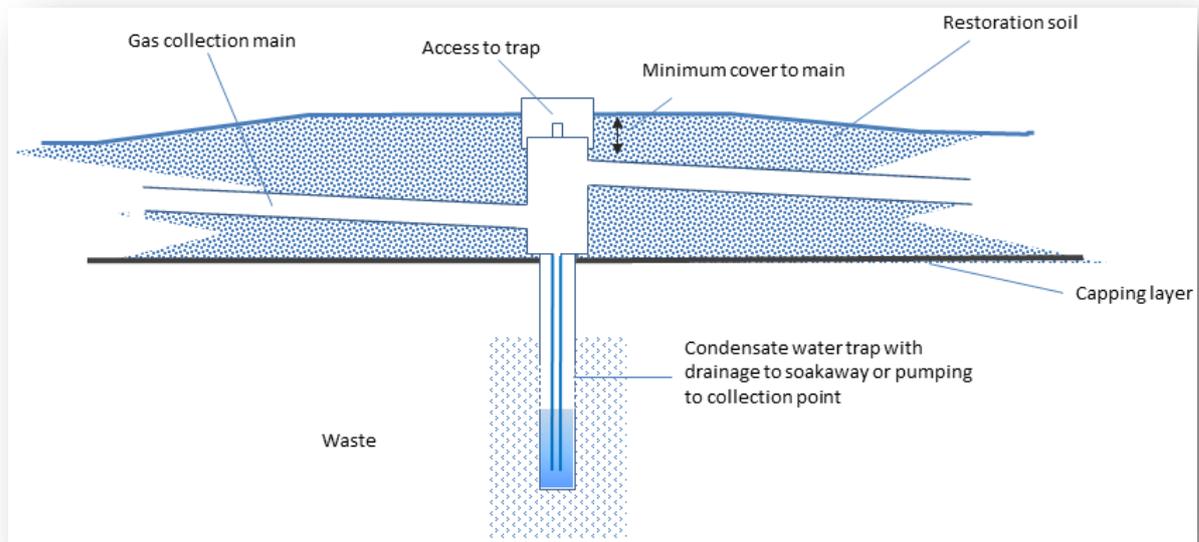
La correcta gestión del condensado comprende diversas actuaciones:

- Eliminación del agua de la campana o cabeza de pozo. El condensado que se forma en la propia campana o en los primeros metros del sistema de captación debe recircularse nuevamente al pozo y a los residuos. Esto es relativamente sencillo cuando el pozo no

incorpora una válvula (por ejemplo, cuando la válvula se ubica en el sistema de captación). De forma alternativa, los pozos pueden estar dotados de un sifón para gestionar el condensado de la campana.

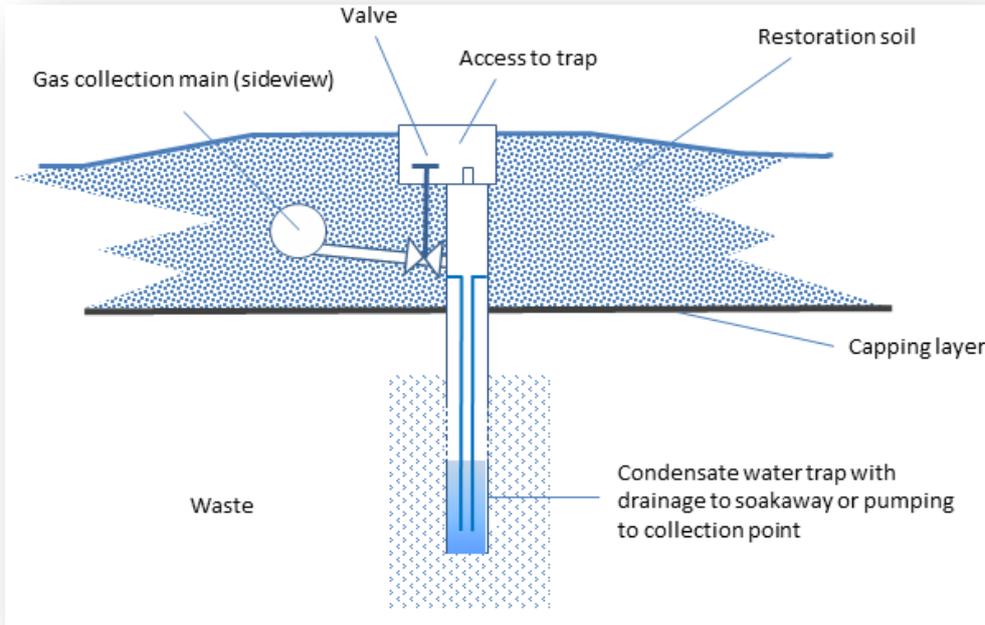
- Las tuberías deben tener una pendiente mínima del 2 % (o pendiente superior, de hasta un 5 %, en caso de contracorriente) cuando van instaladas en los residuos (2 a 5 cm por metro; véase también el apartado 3.5.1.).
- Los puntos bajos del sistema deben purgarse mediante sifones estancos al agua; véanse las figuras 3.23 y 3.24.

GRÁFICO 3-23. GESTIÓN DEL AGUA CONDENSADA DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN



La combinación del peso del sifón y un aumento potencial de la descomposición de los residuos supone un problema potencial debido al aumento del contenido de humedad en el sifón. Esto puede provocar un mayor asentamiento del sifón y posibles daños en el sistema de captación. Para resolver este problema pueden utilizarse sifones/colectores del condensado desconectados físicamente de las tuberías de captación, tal como se aprecia en la figura 3.24. También existe la posibilidad de instalar colectores en forma de J en los pozos de captación y retirar el condensado drenándolo a un pozo de drenaje o bombeándolo a un punto de captación.

GRÁFICO 3-24. SIFONES DESCONECTADOS DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN



El condensado recogido en los sifones y en el propio pozo se purga automáticamente enviándolo de vuelta al vertedero. Es posible recoger el condensado en otros sitios (por ejemplo, en un tambor separador situado antes del compresor o de la unidad de aprovechamiento). La infiltración de este condensado nuevamente en el vertedero puede requerir la autorización de las autoridades competentes.

3.6 Soplante y antorcha

3.6.1 Soplante (compresor o booster)

En la recuperación activa del gas de vertedero se utiliza una depresión para aspirar el gas de los residuos. Dependiendo, entre otras cosas, de la densidad de los residuos locales y de la profundidad del filtro del pozo de captación, la presión de aspiración podría oscilar entre 2 y 10 mbar. La soplante se utiliza para proporcionar presión de aspiración en los pozos, superar la caída de presión en la válvula de control y en el sistema de captación (de 10 a 30 mbar), transportar el gas a la antorcha o la unidad de aprovechamiento (30-50 mbar) y (en caso

necesario) aportar presión para el correcto funcionamiento de la antorcha y de la unidad de aprovechamiento (aproximadamente 40 mbar).

Los *boosters* centrífugos (ventiladores), *boosters* regenerativos y soplantes Roots se utilizan frecuentemente en proyectos de desgasificación. La elección de la soplante depende de:

- La capacidad requerida. La capacidad de la soplante debe basarse en la cantidad máxima de gases de vertedero recuperables, a fin de facilitar una recuperación eficiente también durante los picos de generación, inmediatamente después de finalizar el periodo de explotación.
- La elevación de presión requerida, esto es, la suma de la depresión antes de la soplante y la sobrepresión después de la soplante. La diferencia de presión requerida depende, entre otras cosas, de la caída de presión prevista en el sistema de captación y de transporte, así como de la presión requerida antes de la antorcha o de la unidad de aprovechamiento. En muchos casos será suficiente con un booster centrífugo (de una o dos etapas). No obstante, en ciertas ocasiones pueden requerirse presiones mayores antes de la unidad de aprovechamiento, por ejemplo para depurar los gases de vertedero mediante membranas y utilizarlos en sustitución del gas natural. En este caso, podrían ser preferibles las soplantes con mayor elevación de presión.
- Opciones de control de la capacidad de la soplante (hasta, como mínimo, el 20 % de la capacidad nominal). La generación de gases de vertedero se reduce de forma gradual con el paso del tiempo. A fin de controlar la presión de aspiración en los pozos de manera rentable y energéticamente eficiente, debe reducirse la capacidad de la soplante en lugar de ajustar las válvulas de control de todos los pozos. El control del régimen de revoluciones de una soplante cambiando los engranajes y correas parece ser la opción más sencilla. De manera alternativa, puede considerarse el uso de un controlador de frecuencia en el motor eléctrico.
- Con o sin lubricación por aceite. Los boosters centrífugos y las soplantes Roots no utilizan aceite lubricante. Hay otros tipos de soplantes que sí pueden utilizar aceite lubricante. Una parte del aceite termina en el gas y posteriormente se separa y vuelve a circular a la soplante. En tal caso hay que evitar que se mezcle el aceite con el condensado.
- A fin de mantener la seguridad de la instalación, deben vigilarse atentamente las concentraciones de O₂ en los gases de vertedero y mantenerlas por debajo de los límites establecidos (aproximadamente un 1 % en volumen). Deben instalarse placas cortafuegos en ambos lados de la soplante.
- La utilización de la energía y los costes generales dependen de la elevación de la presión de la soplante, de la eficiencia del compresor y de la manera en que se controle la capacidad de la soplante. Por tanto, conviene comparar diferentes soplantes en su capacidad nominal y, por ejemplo, al 50 % y el 25 % de la capacidad nominal. A fin de minimizar los costes existen otros aspectos que deben considerarse. Uno de ellos es la elección de tuberías de captación con mayores diámetros (sistema de captación más caro).

Esta opción permite reducir la caída de presión y los costes de la soplante. Otra posibilidad es la utilización de varias soplantes pequeñas en lugar de una grande. Esta opción permite desconectar una soplante para utilizarla en otro lugar cuando la generación de gas se haya reducido considerablemente.

- Se recomienda una doble protección de la aspiración y la presión de los compresores y soplantes.

TABLA 3-1. EJEMPLOS DE SOPLANTES, COMPRESORES Y BOOSTERS

Tipo	Caudal típico (Nm ³ /h)	Elevación de presión típica (mbar)	Comentarios
Booster centrífugo de una etapa	2000	130	Apropiado para la recuperación de gases de vertedero; utilizado frecuentemente para este fin. Bajos costes de mantenimiento y tolerancia a gases sucios (corrosivos).
Booster centrífugo de dos etapas	2000	200	Apropiado para recuperación de gases de vertedero y suministro al consumidor. Utilizado frecuentemente para suministro de gas para generación eléctrica.
Booster regenerativo	1000	200	Apropiado para gases de vertedero, aunque se utiliza menos.
Soplante Roots	1000	1500	Uso ocasional, por ejemplo, cuando se requiere alta presión para el transporte de largas distancias o producción de gas sustituto del gas natural. Intolerancia a agua líquida.
Compresor rotatorio de paletas deslizantes	1000	1000	Igual que la soplante Roots. Costes de explotación y mantenimiento relativamente altos.
Compresor alternativo	1000	> 50 000	Utilizado para producción de gas sustituto del gas natural. Altos costes de explotación y mantenimiento.

3.6.2 Antorcha para gases de vertedero

La antorcha se utiliza para destruir el metano y otros contaminantes presentes en los gases de vertedero sin un aprovechamiento de su potencial energético. Existen dos razones para quemar los gases en antorcha:

- Quema continua de gases de vertedero para los que no existe ninguna opción de aprovechamiento. Por ejemplo, cuando la cantidad de gases que puede recuperarse sobrepasa la capacidad de aprovechamiento; cuando, por la razón que fuere, no se dispone de capacidad de aprovechamiento; o cuando la calidad del gas es insuficiente para poder aprovecharlo.

- Quema puntual de gases de vertedero, por ejemplo, cuando se reduce temporalmente la capacidad de aprovechamiento debido a trabajos de mantenimiento o reparaciones.

Si merma la calidad de la antorcha, puede reducirse la eliminación de metano y de contaminantes presentes en los gases de vertedero, con el consiguiente riesgo de que se produzcan otros contaminantes (NO_x, CO, aunque también dioxinas y PAHs) como consecuencia de una combustión incontrolada o incompleta. La calidad de la antorcha viene determinada por la calidad de la mezcla de gases de vertedero y aire de combustión previa a la llama, la temperatura de la llama y el tiempo de residencia de los gases en la antorcha.

Se distinguen tres tipos de antorchas:

- En la antorcha de llama abierta, la llama se propaga más allá de los límites físicos del conjunto de la antorcha. El aire primario de combustión se mezcla con los gases de vertedero en la geometría de la antorcha, mientras que el aire secundario procede de la convección natural en la llama. En este tipo de antorcha, especialmente con índices de carga inferiores a su capacidad máxima, resulta imposible o muy complicado controlar las condiciones de la combustión. Es preferible no utilizar este tipo antorcha para la quema continua.
- En una antorcha de llama oculta, la combustión se produce totalmente dentro de su geometría. La temperatura de la llama se mide y controla normalmente añadiendo aire secundario a través de unas aberturas apersianadas en la antorcha que posibilitan una combustión eficiente. El «slip» o pérdida de metano (combustión parcial o nula de hidrocarburos) en antorchas de llama oculta controladas es normalmente inferior al 3 %. Las condiciones de combustión con índices de carga inferiores a la capacidad máxima de una antorcha de llama oculta sin aberturas apersianadas para aire secundario no pueden controlarse de igual manera que en el caso de una antorcha de llama oculta con aberturas apersianadas; por tanto, es preferible no utilizar la primera para quema continua.
- Antorchas con premezcla al 100 % con aire de combustión. Estas antorchas se denominan en el mundo anglosajón «knits». El «knit» es una tela metálica termorresistente que hace de lecho para la combustión. Gracias a la premezcla al 100 % con el aire de combustión se consiguen unas llamas muy bajas y una combustión extremadamente eficiente (superior al 99 %). Además, este tipo de antorcha es capaz de quemar gases con muy bajas concentraciones de metano (>15 % de CH₄).

La elección de la antorcha depende de las siguientes circunstancias:

- Legislación existente sobre emisiones de antorchas. En la UE las antorchas deben cumplir lo dispuesto en la normativa del IPCC. Esta normativa establece la calidad que debe tener la antorcha; en muchas ocasiones se requerirán antorchas de llama oculta para operaciones de quema continua. También son importantes otros aspectos como la ubicación y la altura de la antorcha (con vistas a una correcta dispersión de posibles

contaminantes). Además, debe prestarse especial atención al sistema de encendido de la antorcha (por ejemplo, con piloto o encendido eléctrico). El sistema empleado debe de ser avanzado y cumplir las disposiciones legislativas. En la práctica, las autoridades legislativas pueden aceptar antorchas abiertas solo para la quema puntual de gases.

- La capacidad de la antorcha debe basarse en la cantidad máxima de gases de vertedero recuperables a fin de facilitar una destrucción efectiva de los gases recuperados incluso durante el pico de generación, inmediatamente después de concluir la fase de explotación.
- Costes. La antorcha de llama oculta puede resultar dos o tres veces más cara que la de llama abierta.
- El entorno, por ejemplo, la operativa del vertedero y sus alrededores. La visibilidad de la antorcha y el ruido son posibles causas de molestias. Las antorchas de llama abierta son perfectamente visibles y generalmente más ruidosas que las de llama oculta. El diseño constructivo y la capacidad de la antorcha también inciden en el ruido.

3.6.3 Control de las emisiones de gases de vertedero en antorcha

Los tres principales factores que inciden en el control de la combustión y las emisiones son el tiempo, la temperatura y la turbulencia. Estos factores conexos contribuyen conjuntamente a mantener un rendimiento aceptable y evitar el deterioro de la calidad de las emisiones. Uno de estos factores de rendimiento se puede disminuir (por ejemplo, el tiempo) y, al mismo tiempo, aumentar alguno de los demás (por ejemplo, la turbulencia). En una antorcha de llama oculta típica ha de controlarse el suministro de aire de combustión a fin de alcanzar una temperatura mínima de 900 °C y un tiempo de residencia de 0,3 segundos a dicha temperatura, con independencia de la composición de los gases de vertedero y del rendimiento operativo. Este es un parámetro de rendimiento indicativo que permite demostrar que se respetan los niveles de emisiones. Son aceptables parámetros de rendimiento alternativos si puede demostrarse el cumplimiento de los niveles de emisiones (por ejemplo, mediante una temperatura inferior y un mayor tiempo de residencia o una mezcla más eficiente). Este último es el caso de las antorchas con una premezcla al 100 % con aire. El tiempo de residencia en estas antorchas no resulta importante debido a la optimización de la mezcla.

El control de la eficiencia de la combustión tiene menor importancia en el caso de antorchas de llama oculta con control del aire de combustión y de antorchas con premezcla al 100 % con aire de combustión. Estas antorchas han demostrado eficiencias de combustión muy elevadas. Cuando se utilice otro tipo de antorchas, o bien cuando existan otras razones (por ejemplo, pruebas de un mantenimiento deficiente o fallos parciales de funcionamiento) que

requieran verificar la eficiencia de combustión de la antorcha, hay dos parámetros que resultan de gran importancia para el control de dicha eficiencia: los COV o hidrocarburos (C_xH_y) y el monóxido de carbono (CO). En función de la normativa local en materia de calidad del aire, pueden requerirse con fines de control o verificación parámetros complementarios como los óxidos de nitrógeno (NO_x) o los óxidos de azufre (SO_x). La normativa sobre calidad del aire no está dentro del alcance del presente documento guía.

Cualquier estrategia de recogida de muestras debe poner el énfasis en evitar la exposición a condiciones que conlleven riesgos. Deben utilizarse equipos de protección individual como último recurso. Por ejemplo, el control no debe llevarse a cabo si la llama no está totalmente encapsulada o si hay llama visible sobre la cámara. Se recomienda que el área de trabajo esté situada, como mínimo, 3 metros por debajo de la salida de la antorcha para reducir el riesgo de corriente descendente.

No obstante, se recomienda que el equipo responsable de la toma de muestras utilice buzos y pasamontañas ignífugos, además de pantallas faciales, junto con el equipo de protección individual normal. Las antorchas pueden incorporar puertos de acceso en la cámara para garantizar que los operarios encargados de los procedimientos de control en antorchas operativas trabajen a nivel de suelo y en lugar seguro. Si el lateral de la antorcha dispone de tomas de muestreo, estas pueden utilizarse para colocar una sonda de muestreo. No obstante, y por motivos de seguridad, no resulta normalmente factible cambiar la sonda entre diferentes posiciones de muestreo mientras la antorcha permanece operativa. La variabilidad de la combustión en antorchas puede provocar en cualquier momento importantes fluctuaciones en las concentraciones en la antorcha. Han de seleccionarse varios puntos de muestreo para conseguir una muestra lo más representativa posible. Los puntos de muestreo deben estar dispuestos en dos planos perpendiculares y ha de determinarse su número mínimo. Asimismo, la antorcha debe operar de tal modo que se garantice la ausencia de llama visible en el lugar donde se ubican los puertos de muestreo dentro de la cámara. El muestreo debe realizarse más allá del frente de llama para evitar las incertidumbres provocadas por su naturaleza química y de ese modo garantizar que se recoge la muestra de emisiones más representativa.

Todas las condiciones anteriores convierten el control de la eficiencia de la combustión en un procedimiento complejo y caro. Un sistema más sencillo consiste en recoger muestras en un

plano de muestreo a una distancia mínima de 1 metro respecto de la salida de la antorcha. Ha de realizarse un estudio preliminar del plano de muestro considerando uno o dos parámetros específicos (p.ej., CO o NOx). El plano se considera aceptable si la variación en el mismo es inferior a $\pm 15\%$. A pesar de que la temperatura puede encontrarse todavía por encima de los $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la posición de muestreo, las mediciones de emisiones representarán las emisiones que abandonan la antorcha. Las principales reacciones químicas estarán a punto de finalizar y serán representativas de las emisiones liberadas al medio ambiente. Puede considerarse que la combustión es eficiente si las concentraciones de COV en este punto de muestreo son inferiores a $10\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ y las de monóxido de carbono inferiores a $100\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

TABLA 3-2. NIVELES DE EMISIONES ESTÁNDARES (EN $\text{MG}\cdot\text{M}^{-3}$ #) PROCEDENTES DE LA QUEMA EN ANTORCHA DE GASES DE VERTEDERO EN LOS PAÍSES EUROPEOS

	Alemania 1996 (propuesta)	Alemania 2001	Suiza	Bélgica	Inglaterra, Gales y Escocia (plantas ya existentes)	Inglaterra, Gales y Escocia (plantas nuevas)
Materia de partículas	10	–	10	5	–	–
Dióxido de azufre	–	–	50	35	–	–
Óxidos de nitrógeno	200	200	80	150	150	150
Monóxido de carbono	50	100	50	100	100	50
Cloruro de hidrógeno	10	–	20	–	–	–
Fluoruro de hidrógeno	1	–	2	–	–	–
Sulfuro de hidrógeno	–	–	–	–	–	–
Amoníaco	–	–	5	–	–	–
Cadmio	0,05	–	0,1	–	–	–
Mercurio	0,05	–	–	–	–	–
Metales totales	0,5	–	1	–	–	–
COV totales (como C)	10	–	20	–	10	10
COVNM	–	–	–	–	5	5
PCDDs/PCDFs (I-TEQ)*	$0.18\cdot 10^{-6}$	–	–	–	–	–

$\text{MG}\cdot\text{M}^{-3}$ A UNA CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO DEL 3 %, SECO Y 0°C , 101.3 KPA

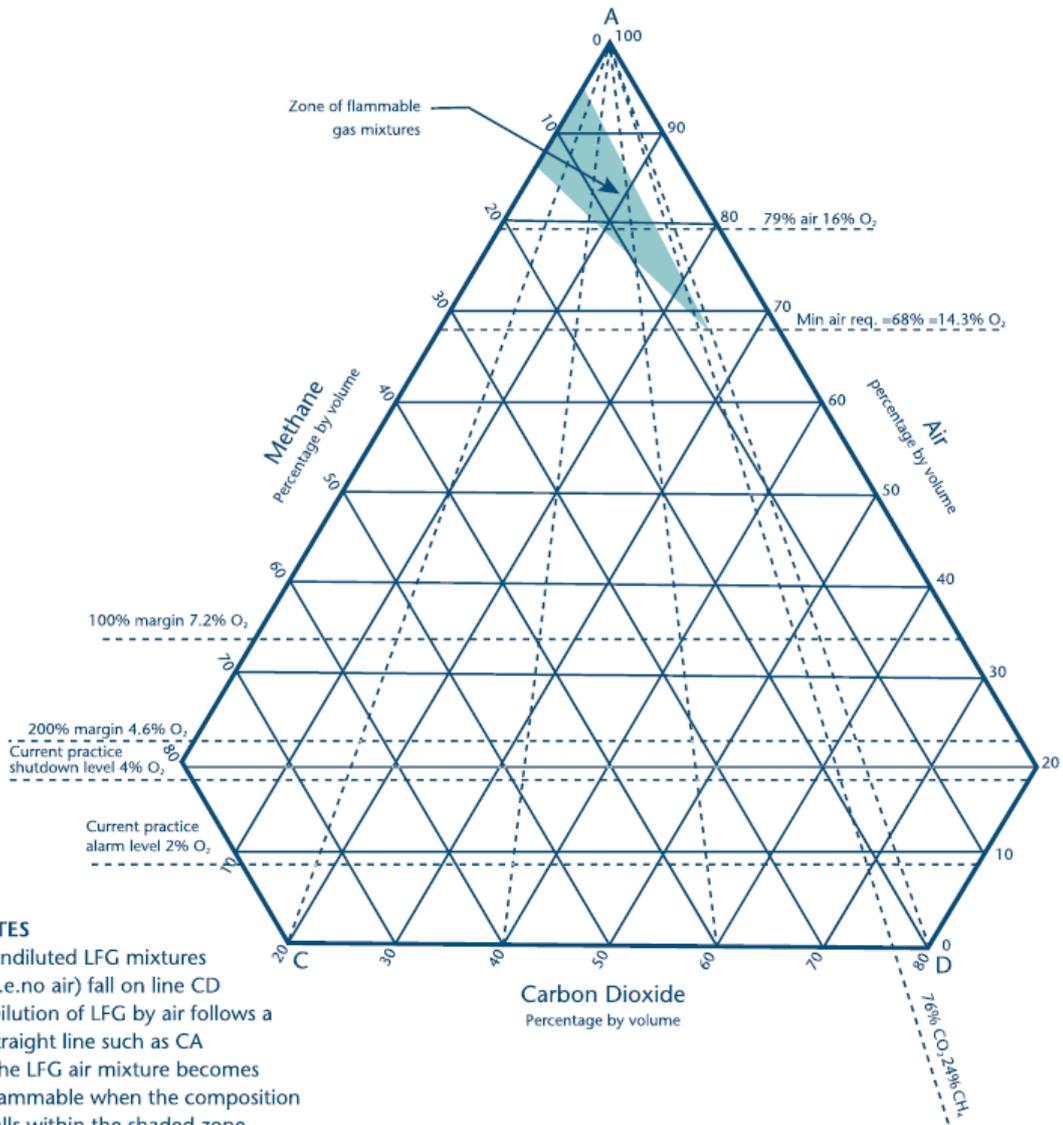
* EQUIVALENTES TÓXICOS INTERNACIONALES – UNA EXPRESIÓN NORMALIZADA DE CONCENTRACIONES DE PCDDs Y PCDF

Lectura recomendada: Agencia de Medio Ambiente del RU, Guidance for monitoring enclosed landfill gas flares, LFTGN 05, <http://www.environment-agency.gov.uk/business/sectors/108918.aspx>

3.6.4 Seguridad

Durante el proceso de recuperación de los gases de vertedero existe siempre la posibilidad de que se generen mezclas de metano y aire que pueden provocar un riesgo de explosión. Se requiere por ello controlar de manera constante la presencia de oxígeno en los gases recuperados. La mezcla explosiva puede formarse cuando la concentración de oxígeno es superior al 14 % en volumen (véase el gráfico 3.26). No obstante, si se produce una ruptura de tubería, la concentración de oxígeno aumentará rápidamente y, por lo tanto, será necesario detener los equipos inmediatamente. Por este motivo, es necesario disponer de un sistema de alarma que indique cuándo la concentración de oxígeno supera el 2 % en volumen. Cuando la concentración de oxígeno es del 4 % en volumen, es necesario detener la soplante y la antorcha. Algunos países europeos prefieren establecer la señal de alarma a una concentración del 1 % en volumen y detener el funcionamiento de la instalación cuando esta alcanza el 2 %. En la tabla 3.3 se muestra un conjunto exhaustivo de parámetros de control.

GRÁFICO 3-25. LÍMITES DE EXPLOSIVIDAD DE LAS MEZCLAS DE AIRE, METANO Y DIÓXIDO DE CARBONO.
 (FUENTE: AGENCIA DE MEDIO AMBIENTE DE INGLATERRA Y GALES, RU, (2004) TGN 03 GUIDANCE ON THE
 MANAGEMENT OF LANDFILL GAS)



NOTES

1. Undiluted LFG mixtures (i.e. no air) fall on line CD
2. Dilution of LFG by air follows a straight line such as CA
3. The LFG air mixture becomes flammable when the composition falls within the shaded zone

Source: Cooper *et. al.*, 1993

TABLA 3-3. PARÁMETROS DE ACTIVACIÓN DE LAS SEÑALES DE ALARMA Y DEL APAGADO DE LA SOPLANTE Y LA ANTORCHA

	Señal alarma	de Registro	Parada
Soplante			
En funcionamiento	Sí/no		X
Fallo térmico	X		
Depresión	valor	X	Demasiado baja
Sobrepresión	valor	X	Demasiado elevada ¹⁾
Zona de temperatura/presión	valor	X	Demasiado elevada ¹⁾
Fallo en el control de la velocidad	X		X ¹⁾
Fallo de seguimiento	X		X
Contenido de O ₂	> 1 % a 2 % en volumen		> 2 % a 4 % en volumen
Contenido de CH ₄	X	X	
Tiempo en operación		X	
Caudal de gas (actual)	X		
Caudal de gas (acumulado)		X	
Antorcha			
Sin ignición	X		
Presión previa demasiado baja	X		
Temperatura de combustión	X ³⁾		
Cantidad de gas		X	

¹⁾ NO APLICABLE A LOS COMPRESORES CENTRÍFUGOS

²⁾ SEÑAL DE ALARMA DE AVISO AL OPERADOR AL ALCANZAR ENTRE EL 1 % Y EL 2 % EN VOLUMEN; PARADA AL ALCANZAR ENTRE EL 2 % Y EL 4 % EN VOLUMEN

³⁾ SOLO EN ANTORCHAS DE LLAMA OCULTA

3.7 Aprovechamiento de los gases de vertedero

Los gases de vertedero contienen entre un 45 % y un 60 % de metano y pueden utilizarse como combustible. El aprovechamiento de los gases de vertedero ha impulsado de forma notoria el desarrollo de la tecnología. La energía debe generarse preferiblemente a partir de los gases de vertedero recogidos. Si la entidad explotadora considera que los gases de vertedero recogidos no pueden ser aprovechados para este fin, debe demostrar a el órgano ambiental los motivos específicos que no hacen factible su aprovechamiento en el vertedero en cuestión. Las entidades explotadoras deben recuperar la máxima cantidad posible de gas a lo largo de todo el ciclo de vida del vertedero. Asimismo, deben aplicarse las mejores técnicas

disponibles. A continuación se detallan algunas técnicas de aprovechamiento de los gases de vertedero que se han aplicado con éxito:

- Uso directo de los gases de vertedero como combustible.
- Generación de electricidad.
- Cogeneración de calor y electricidad.
- Depuración para obtener un gas de calidad semejante a la del gas natural e introducirlo a la red de distribución de gas.

3.7.1 Uso directo de los gases de vertedero como combustible

El aprovechamiento directo de los gases de vertedero como combustible parece ser, siempre que sea factible, la mejor opción. Este proceso de aprovechamiento de los gases implica sustituir a otro combustible (mayoritariamente el gas natural, pero también el carbón o el fuelóleo) en calderas, secadores u hornos. Algunos ejemplos de aplicaciones basadas en el aprovechamiento directo de los gases de vertedero son la cocción de cerámica, los hornos de soplado de vidrio, el suministro energético y la calefacción de invernaderos y de pistas de hielo, así como el calentamiento del agua para operaciones de acuicultura (piscicultura).

Entre las industrias que actualmente utilizan gases de vertedero, se encuentran, entre otras, la dedicada a la fabricación de automóviles, la química, la de transformación alimentaria, la farmacéutica, la de fabricación de cemento y ladrillos, la de tratamiento de aguas residuales, la de fabricación de productos de electrónica de consumo, la papelera y siderúrgica y la de cogeneración de calor y electricidad en prisiones y hospitales.

El uso directo de los gases tiene como ventaja el hecho de que, a menudo, con una pequeña inversión, se genera un gran valor por m³ de gases de vertedero (en función del tipo de energía que se sustituya). Tiene como principales desventajas la singularidad de cada proyecto, lo que exige su adaptación a los quemadores existentes, y la necesidad de someter a pretratamiento los gases de vertedero. Asimismo, la capacidad de aprovechamiento suele ser siempre la misma y esta debe ajustarse a las estimaciones relativas de los gases de vertedero que se recuperarán, también en períodos de tiempo prolongados, en los que la producción de gas disminuye de forma gradual. Si la recuperación de los gases supera la capacidad de aprovechamiento, es necesario buscar otras aplicaciones alternativas o bien quemar el exceso de gas recuperado. Si por lo contrario, la recuperación de los gases es

inferior a las necesidades energéticas de la caldera o el horno, el sistema tiene que estar preparado para suministrar un combustible dual o mixto.

Una limitación del aprovechamiento directo de los gases de vertedero es que requiere, no obstante, que los usuarios potenciales se encuentren a poca distancia del vertedero para que el transporte del gas de vertedero o del agua caliente resulte todavía viable económicamente. La distancia máxima hasta un usuario final de la cual se tiene constancia es de alrededor de unos 5 km. Sin embargo, en la mayoría de casos en los que se aprovecha directamente el gas como combustible, esta distancia es mucho menor.

TABLA 3-4. INVERSIÓN TÍPICA Y COSTES DE EXPLOTACIÓN Y GESTIÓN DEL USO DIRECTO DE LOS GASES DE VERTEDERO

Componente del sistema de distribución		Costes de inversión típicos	Costes anuales típicos relativos a la explotación y gestión (€/h)
Compresión y tratamiento de los gases de vertedero	€/m ³ .h ⁻¹	400	40
Tuberías/gestión del condensado	€/km	230 000	Insignificante

3.7.2 Generación de electricidad

En la mayoría de proyectos de aprovechamiento de los gases de vertedero de todo el mundo (aproximadamente el 70 % del total), estos se destinan a un motor de gas, que acciona un generador para producir electricidad. De este modo, el contenido energético de los gases de vertedero se convierte en electricidad con una eficiencia de entre el 25 % y el 38 %. Estos valores son relativamente altos en comparación, por ejemplo, con las turbinas de gas, cuya eficiencia es aproximadamente del 25 %. La producción total de electricidad es de aproximadamente de entre 1,3 a 1,8 kWh_e por m³ de gases de vertedero. El éxito de este método de aprovechamiento de los gases de vertedero se debe a diferentes motivos:

- El producto (la electricidad) es fácil de transportar y vender.
- Es relativamente fácil disponer el aprovechamiento de los gases de vertedero para este fin, ya que se requiere una tecnología y experiencia que se encuentra disponible a cualquier nivel regional.
- Es relativamente fácil reproducir los proyectos. La experiencia adquirida en un vertedero puede aplicarse a otros vertederos.
- Una vez se conoce bien la tecnología, las empresas de generación de energía tienden a crear grupos de trabajo especiales sobre los gases de vertedero y a invertir en nuevos

proyectos. El esfuerzo realizado por las empresas productoras de energía contribuye de forma significativa al desarrollo de proyectos relacionados con los gases de vertedero.

- La capacidad de aprovechamiento del gas de los motores de gas/generadores puede distribuirse en módulos. Así, si se genera más gas del previsto, puede añadirse un motor adicional. Por el contrario, cuando la producción de gas disminuye, es posible reubicar dicho motor en otra planta.
- La tecnología necesaria es relativamente sencilla y económica. Un motor de gas es básicamente un motor diésel modificado, de modo que las empresas que están familiarizadas con los motores diésel pueden llevar a cabo su mantenimiento. Ello contribuye en gran parte a la rentabilidad del proyecto.
- En ocasiones, es posible aprovechar también el calor desprendido por los residuos, lo que aporta un mayor atractivo a esta opción. El calor que desprenden los residuos puede aprovecharse en el mismo vertedero, por ejemplo para la evaporación de los lixiviados o como calefacción de las oficinas, o bien en instalaciones externas, como por ejemplo para la calefacción de piscinas o invernaderos.

En función de la composición de los gases de vertedero, el uso del gas en motores de gas requiere en ocasiones llevar a cabo algún tipo de tratamiento previo con el fin de eliminar los elementos corrosivos que contiene, tales como el H_2S y los siloxanos. Esta tecnología está ya consolidada, pero aumenta los costes del proceso.

De forma alternativa, es posible utilizar una turbina de gas. Las turbinas de gas pueden funcionar a concentraciones de metano más bajas (> 35 %) y son menos sensibles a las fluctuaciones en la concentración de este gas. Otras ventajas que presentan las turbinas de gas sobre los motores de gas son los bajos costes de explotación y una sensibilidad relativamente baja a las sustancias contaminantes del gas (por ejemplo, el H_2S). Por contra, las turbinas de gas presentan una baja eficiencia en la conversión de los gases de vertedero en electricidad y conllevan una inversión elevada. No obstante, en usos a pequeña escala o en la cogeneración de electricidad y calor con una elevada demanda de calor, las turbinas de gas pueden resultar una opción más aconsejable.

TABLA 3-5. INVERSIÓN TÍPICA Y COSTES DE EXPLOTACIÓN Y GESTIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD

Equipo de producción de electricidad	Costes de inversión típicos [€/kW]	Costes anuales típicos relativos a la explotación y gestión [€/MW]
Motor de combustión interna (< 800 kW)	1600	150
Motor de combustión interna (> 800 kW)	1200	130
Turbina de gas (> 3 MW)	1000	90
Microturbina (< 1 MW)	3800	260

Los ingresos derivados de la venta de electricidad dependen enormemente de las políticas nacionales para promover la producción de energía a partir de gases de vertedero. Los precios de venta de la electricidad pueden variar entre los 0,04 € y los 0,18 € por kWh. Los precios de venta del calor pueden oscilar entre los 2 € y los 4 € por GJ.

3.7.3 Cogeneración de calor y electricidad

En los proyectos de cogeneración se genera electricidad y calor, que se venden a los usuarios finales. De este modo se maximiza el contenido energético de los gases de vertedero. El proceso de generación de electricidad en los proyectos de cogeneración es análogo al que se describe en apartado 3.7.2. La comercialización del calor presenta las restricciones descritas asimismo en los párrafos 3.7.1 y 3.7.2.

3.7.4 Depuración de los gases de vertedero para obtener gas de la calidad del gas natural

La calidad de los gases de vertedero puede mejorarse y asimilarse a la calidad del gas natural (como sustituto del gas natural), del gas natural comprimido (GNC) o del gas natural licuado (GNL) mediante la eliminación del dióxido de carbono y de los contaminantes traza que contienen. El gas con calidad de gas natural puede venderse a las redes de distribución de gas natural y emplearse con fines industriales. El GNC y el GNL pueden emplearse como combustible para los vehículos del vertedero, los camiones de transporte de residuos y para abastecer el mercado general. Dependiendo del uso que se dé a este sustituto del gas natural, existen determinados requisitos de debido cumplimiento en relación con el valor calorífico y la concentración de sustancias que generan olor (componentes del gas con un olor característico, que advierten de fugas). Existen diferentes opciones para eliminar el dióxido de

carbono, entre las cuales se encuentran la absorción física, la separación por membrana o la adsorción por cambio de presión (PSA). Este sustituto del gas natural puede venderse directamente a los hogares o la industria y se puede inyectar a una red de distribución de gas natural. También puede emplearse como combustible en los equipos móviles y los vehículos.

Una ventaja del proceso de depuración de los gases de vertedero radica en que permite obtener un combustible de gran calidad. Las desventajas de este proceso son los elevados costes de inversión y explotación y la necesidad de disponer de clientes que puedan consumirlo en las inmediaciones del vertedero. Las inversiones por los equipos necesarios para procesar el gas de alta calidad oscilan entre los 1100 € y los 1900 € por m³ por hora de gases de vertedero. El coste anual de generar electricidad, de explotar y de mantener dichos sistemas varía entre los 600 000 € y los 2,4 millones de euros. Los costes dependerán de la pureza del gas de alta calidad requerida por el sistema al que se inyecte o el usuario final de la energía, así como de las dimensiones del proyecto. Es posible obtener algunas economías de escala si se producen elevadas cantidades de gas de alta calidad.

TABLA 3-6. COSTES TÍPICOS DE LA PRODUCCIÓN DE GAS NATURAL COMPRIMIDO

Gas natural Dimensiones de la planta vertedero [admitidos/h]	comprimido [m ³ Gases de de	Costes de producción [€/m ³ GNC]
400		0,27
800		0,22
2000		0,18
4000		0,16
8000		0,13

3.7.5 Criterios de elección entre las distintas opciones

Hay una serie de factores que determinan la elección final del método de aprovechamiento de los gases de vertedero. Los más importantes son:

- Existencia de posibles usuarios finales o la posibilidad de poder distribuir el gas (como gas de vertedero o como gas depurado) en las proximidades del vertedero (como máximo a una distancia de 5 km del vertedero).
- Preferencias de un posible socio involucrado en el proyecto. Este factor es importante, ya que las empresas de generación energética juegan a menudo un papel determinante en el desarrollo del método de aprovechamiento de los gases de vertedero y la mayoría de ellas disponen de una determinada experiencia y de preferencias respecto a un método u otro.

- Un elemento que también es importante y que influye en la recuperación de los gases de vertedero es la calidad mínima del gas necesaria para poder ser aprovechado. Algunos métodos (como por ejemplo, la depuración de los gases para obtener un gas con calidad de gas natural) requieren un contenido de metano más elevado que otros (véase el gráfico 3.26). Esto limita las posibilidades de optimizar la recuperación de los gases de vertedero mediante el aumento de la presión de aspiración en el pozo, por lo que se acepta, en consecuencia, una menor calidad del gas.

GRÁFICO 3-26. CONTENIDO DE METANO CONVENIENTE EN LAS DIFERENTES OPCIONES DE APROVECHAMIENTO

Methane content	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%
flare										
flare low calorific gas										
electricity production gas engine										
electricity production gas turbine										
direct use of LFG										
SNG production										

3.8 Oxidación de metano

3.8.1 Introducción

La oxidación microbiana de metano puede resultar útil de dos formas:

- Como complemento al sistema de recuperación de gases existente, cuando la eficiencia de captación no se considere lo suficientemente elevada.
- Como sustituto del sistema de recuperación de gases de vertedero. En algunos casos, la recuperación de los gases de vertedero puede no ser viable técnica o económicamente.

Los sistemas de oxidación microbiana de metano pueden resultar útiles en los vertederos que contienen residuos con un bajo potencial de generación de gases (por ejemplo; material de dragado, residuos no peligrosos de bajo contenido orgánico), en vertederos que almacenan residuos tratados previamente o en vertederos que se encuentran en la fase inicial de explotación. También es viable en los residuos de baja porosidad o con una ratio de permeabilidad horizontal y vertical reducida que limita la zona de influencia de los pozos de gas. La oxidación microbiana de metano puede servir también como método para tratar las emisiones de metano residual tras finalizar la recuperación de los gases o en vertederos antiguos que no disponen de sistemas de captación de gas.

La oxidación microbiana de metano en suelos se ve facilitada por un grupo de bacterias llamadas metanótrofos. El metano se consume y se convierte en dióxido de carbono según la siguiente ecuación:



Es decir, se necesitan dos moles de oxígeno para oxidar un mol de metano, lo que pone de relieve la importancia del suministro de oxígeno para garantizar la oxidación completa de los flujos de metano. Los metanótrofos son muy abundantes, especialmente cuando el metano entra en contacto con el oxígeno atmosférico, por ejemplo en las coberturas de los vertederos. Los flujos de metano en los vertederos superan a los medidos en los suelos naturales en varios niveles de magnitud. En consecuencia, las poblaciones abundantes de metanótrofos alcanzan tasas de oxidación de metano que se encuentran entre las tasas registradas más elevadas.

No obstante, las tasas de conversión varían mucho en relación con las condiciones ambientales y las propiedades del material de filtro o de recubrimiento. Por lo tanto, la elección de un material con propiedades físicas y químicas adecuadas, así como el diseño y dimensionamiento de los sistemas de oxidación de metano para adaptarse a los flujos esperados de metano y a las condiciones climáticas son de vital importancia para garantizar una elevada eficiencia del proceso de oxidación.

Los filtros de oxidación de metano, las ventanas de oxidación de metano y las capas de oxidación de metano son posibles maneras de utilizar y optimizar la oxidación microbiana de metano y reducir las emisiones de este gas en los vertederos. Aunque la investigación y el desarrollo todavía trabajan en la creación de sistemas mejorados y más rentables, los flujos elevados de metano pueden tratarse con sistemas optimizados y dimensionados adecuadamente. Una directriz austriaca sobre las capas de oxidación de metano (véase la lectura recomendada) considera que las capas de oxidación de metano bien diseñadas pueden oxidar flujos de hasta 25 kg de $\text{CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$.

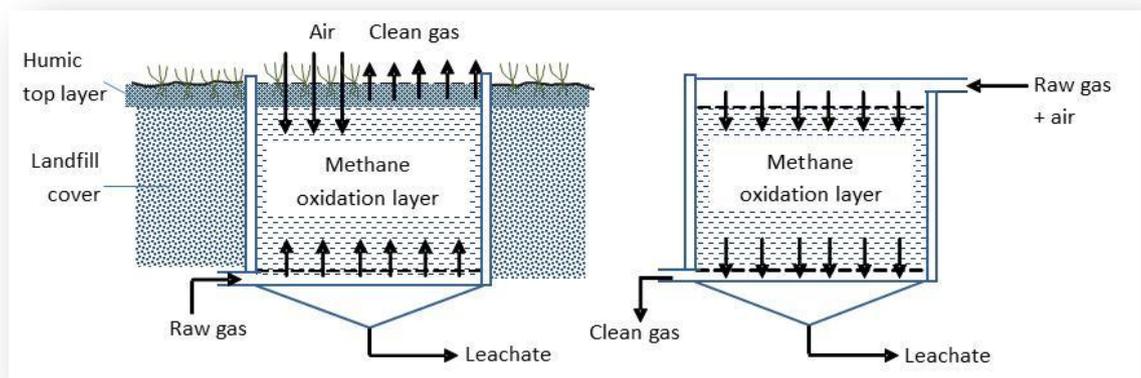
3.8.2 Tecnologías disponibles

Dependiendo del tipo de cobertura (final o temporal) y de la infraestructura técnica (revestimiento y sistema de extracción de gases) es posible aplicar diferentes sistemas para intensificar la oxidación microbiana de metano. En principio, se pueden emplear tres técnicas diferentes: los filtros de oxidación de metano, las ventanas de gas (también denominadas «ventanas de oxidación de metano») y las capas optimizadas (también denominadas capas de oxidación de metano).

Filtros de oxidación de metano

Los filtros de oxidación de metano son reactores de lecho fijo en los que los metanótrofos oxidan el metano colonizando el material del filtro. Los filtros de oxidación de metano pueden utilizarse juntamente con los sistemas de impermeabilización y sellado de la superficie habituales y precisan un suministro de gas, activo o pasivo, que desplace el gas hasta el filtro. El gráfico 3.27 muestra dos configuraciones posibles.

GRÁFICO 3-27. DIFERENTES CONFIGURACIONES ESQUEMÁTICAS DE LOS FILTROS DE OXIDACIÓN DE METANO (NO A ESCALA). IZQUIERDA: FILTRO DE OXIDACIÓN DE METANO ABIERTO, INTEGRADO EN LA COBERTURA DEL VERTEDERO, EN MODO DE FLUJO ASCENDENTE. DERECHA: FILTRO DE OXIDACIÓN DE METANO CERRADO EN MODO DE FLUJO DESCENDENTE. ADAPTADO A PARTIR DE HUBER-HUMER *ET AL.* (VÉASE LA LECTURA RECOMENDADA).



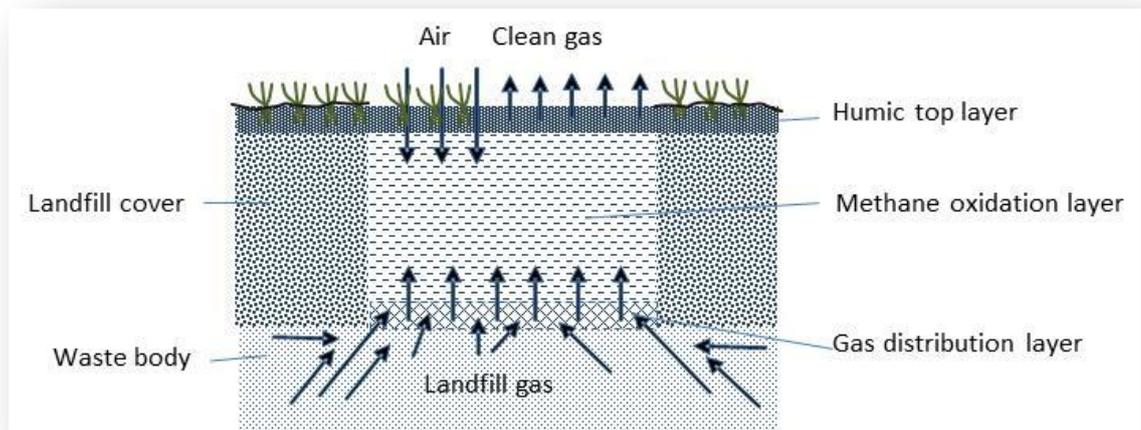
Los filtros de oxidación de metano pueden operar como un reactor abierto o cerrado. En el primer caso, la entrada de oxígeno atmosférico necesario para llevar a cabo el proceso de oxidación se produce a través de la difusión atmosférica. En el segundo, el aire debe ser incorporado antes de que la mezcla de gas entre en el filtro. Los sistemas de filtro abierto son

muy adecuados para una operativa pasiva, en la que el flujo de gas a través del filtro sigue el gradiente de presión existente entre el vaso de vertido y la atmósfera. Las condiciones operativas de los sistemas abiertos (por ejemplo, la temperatura o la humedad) obedecen al clima local y, por lo tanto, dependen de la variabilidad estacional. Por lo contrario, las condiciones de los sistemas cerrados pueden controlarse mejor. Los filtros cerrados que funcionan en condiciones controladas necesitan poseer diferentes dimensiones para tratar una carga determinada de metano y, en consecuencia, también conllevan diferentes costes operativos y de capital. En los filtros de oxidación de metano abiertos es conveniente integrar una capa de vegetación, ya que esta aumenta el grado de aireación mediante la formación, a través de sus raíces, de macroporos secundarios. Además, también proporciona protección contra la erosión y amortigua las temperaturas extremas. En caso necesario, puede añadirse una capa de distribución de gas para facilitar la homogeneización del flujo de gas. La presencia de un sistema de extracción de gases permite cuantificar la carga de metano esperada y, por lo tanto, dimensionar de forma correcta los sistemas de filtros.

Ventanas de oxidación de metano

Las ventanas de oxidación de metano son compartimientos abiertos integrados en la cobertura del vertedero que no necesitan estar conectados con el sistema de extracción de gases. El gas llega a estas gracias a su mayor permeabilidad en comparación con la capa de recubrimiento que las rodea (gráfico 3.28).

GRÁFICO 3-28. CONFIGURACIÓN ESQUEMÁTICA DE UNA VENTANA DE OXIDACIÓN DE METANO (NO A ESCALA). ADAPTADO A PARTIR DE HUBER-HUMER *ET AL.* (VÉASE LA LECTURA RECOMENDADA).



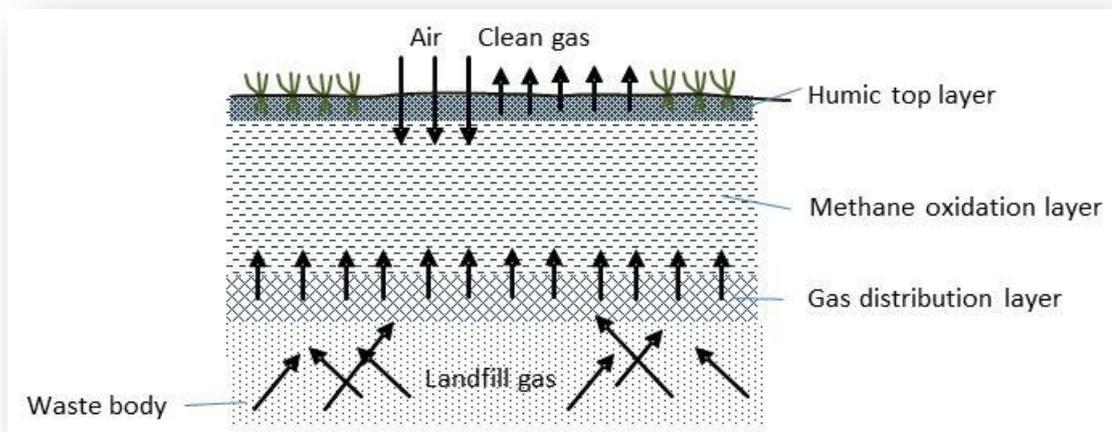
Al igual que sucede con los filtros de oxidación, las ventanas de oxidación reciben una mayor carga espacial de metano que las capas contiguas de oxidación de gas, en diseños en los que la mayor parte o la totalidad de la cobertura del vertedero está concebida como una capa de oxidación de metano. De forma análoga a los filtros de oxidación de metano de lecho abierto, el oxígeno atmosférico se suministra por difusión a través de la superficie de la ventana. Las ventanas de oxidación de metano resultan especialmente adecuadas para el tratamiento biológico de gases en vertederos antiguos que no disponen de un revestimiento de superficie y carecen de un sistema de extracción de gases. Además, pueden construirse para mitigar determinados aumentos en las emisiones de gases en zonas puntuales, los denominados focos de emisión.

Si bien los filtros de oxidación pueden utilizarse en base a las cargas de metano conocidas, normalmente no se dispone de variables para establecer el dimensionamiento de las ventanas de oxidación de metano, por lo que este debe basarse en los modelos de producción de gas y en un patrón supuesto de la distribución del gas en las ventanas de oxidación. Por este motivo, las ventanas de oxidación también son susceptibles de generar una mayor incertidumbre. Las ventanas de oxidación de metano pueden instalarse con una frecuencia arbitraria en función de las condiciones existentes en el vertedero, los requisitos que deben satisfacerse para un uso posterior del terreno y la minimización de los lixiviados.

Capas de oxidación de metano

Las capas de oxidación de metano están diseñadas para oxidar el metano presente en los vertederos utilizando una gran parte de la capa, o bien su totalidad, como una capa activa de oxidación. A diferencia de los filtros de oxidación de metano y de las ventanas de oxidación de metano, su gran ventaja radica en la gran área disponible para el tratamiento biológico del gas y, por lo tanto, en que se necesita una carga espacial mucho menor. Las capas de oxidación de metano pueden aplicarse en vertederos antiguos que no disponen de revestimiento o en vertederos con revestimiento en los que el gas puede dirigirse de forma uniforme a la cobertura situada sobre el sistema de impermeabilización superficial. Las coberturas de los vertederos se emplean frecuentemente como capas de recultivo o de equilibrio hídrico, o se disponen con fines de mantenimiento post-clausura al cierre. Las capas de oxidación de metano, por lo tanto, deben satisfacer las necesidades relativas al equilibrio hídrico, al balance de gases y a los posibles requisitos geotécnicos necesarios para poder sostener físicamente las construcciones. En estos casos, el material que constituye la capa de oxidación de metano debe caracterizarse por la capacidad de retener grandes cantidades de agua y, a la vez, poseer una elevada permeabilidad a los gases y una elevada capacidad de difusión de los mismos. La combinación de estas características limita notoriamente la gama de texturas del suelo aplicables.

GRÁFICO 3-29. CONFIGURACIÓN ESQUEMÁTICA DE UNA CAPA DE OXIDACIÓN (NO A ESCALA). ADAPTADO DE HUBER-HUMER *ET AL.* (VÉASE LA LECTURA RECOMENDADA).



La eficiencia del sistema de oxidación de metano está determinada, sobre todo, por la observancia de los requisitos físicos y químicos impuestos por la función que desempeñan las diferentes capas en el sistema de oxidación en relación con la carga prevista de metano para el sistema y las condiciones climáticas presentes en el vertedero. La función que desempeñan las diferentes capas en un sistema de oxidación de metano se describe en el apartado 3.8.3. Los requisitos relativos a las propiedades que deben poseer los materiales de las capas en un sistema de oxidación de metano se describen en los apartados 3.8.4, 3.8.5 y 3.8.6. La eficiencia de un sistema de oxidación de metano puede demostrarse mediante un cálculo basado en las propiedades conocidas de los materiales utilizados, tal y como se describe en el apartado 3.8.8 o por medio del control de las emisiones y de la oxidación, tal como se describe en el apartado 3.10.3.

3.8.3 Capas de los sistemas de oxidación de metano

La configuración y el principio por el que se rigen las diferentes capas dentro de un sistema de oxidación de metano y las condiciones operativas de las diferentes opciones se describen brevemente en esta sección. Los sistemas de oxidación microbiana de metano están formados, de abajo a arriba, por las siguientes capas:

- capa de nivelación o cobertura temporal;
- capa de distribución de gas;
- (capa intermedia);
- capa subterránea de oxidación de metano y
- capa superior de tierra de oxidación de metano y vegetación.

Capa de nivelación

La capa de nivelación contrarresta las irregularidades del terreno. Esta capa debe ser suficientemente permeable para no impedir el transporte de los gases a la capa de distribución de gas. Además, la naturaleza del material y la forma en que se construye debe permitir también una capacidad de carga suficiente y una estabilidad (del talud) que permita la construcción de las otras capas del sistema de oxidación de metano.

Capa de distribución de gas

La capa de distribución de gas facilita la distribución horizontal de los gases antes de pasar a la capa de oxidación de metano y, por lo tanto, armoniza la carga de metano espacial. El factor

clave que determina el correcto funcionamiento de la capa de distribución de gas radica en que la diferencia entre la permeabilidad de la capa de oxidación de metano y la de la capa de distribución de gas se maximiza sin poner en peligro la capacidad de captar el aire de la capa de oxidación de metano. El dimensionamiento exacto depende de la carga de gas esperada, de la pérdida de presión y de la zona a la que se debe distribuir esta carga. El objetivo del diseño es igualar la pérdida de presión en esta área. Como norma general, el coeficiente de permeabilidad de la capa de distribución de gas debe ser en dos niveles de magnitud superior a la de la capa de oxidación de metano. Se han propuesto y construido capas con espesores que oscilan entre los 20 cm y los 50 cm.

Capa intermedia

Una capa intermedia puede garantizar la estabilidad del filtro entre la capa de distribución de gas y la capa de oxidación de metano. Es necesario evitar los efectos capilares en la interfase entre la capa de distribución de gas, la capa intermedia y la capa de oxidación de metano (y lateralmente a la capa de recultivo que existe en el caso de las ventanas o filtros), ya que estos dificultan el drenaje libre del agua, limitan la permeabilidad a los gases y, por lo tanto, contribuyen a la formación de vías preferenciales. Los materiales utilizados en las capas de distribución de gas deben tener, en consecuencia, una conductividad hidráulica no saturada similar a la de la capa de oxidación de metano, la cual queda garantizada si se utiliza arena de una textura similar. En caso de que estos requerimientos no sean compatibles con los requisitos relativos a la diferencia en la permeabilidad de gas, debe considerarse el uso de capas intermedias.

Capa subterránea de oxidación de metano

La oxidación microbiana de metano a dióxido de carbono tiene lugar en la capa de oxidación de metano, más concretamente en el área donde los gases de vertedero se mezclan con el aire atmosférico. En los sistemas de oxidación de metano en los que se ha optimizado la difusión de los gases, el aire atmosférico puede penetrar eficazmente en el suelo. En estas condiciones, las capas más profundas del subsuelo también pueden contribuir a oxidar el metano, lo que resulta conveniente, ya que un mayor espesor de la capa de oxidación de metano aumenta la eficacia del proceso de oxidación. Cuando las propiedades del suelo permiten el transporte de oxígeno a capas más profundas del suelo, el proceso de oxidación

está más protegido contra las condiciones desfavorables que pueden darse cerca de la superficie, como el calor del verano, las heladas del invierno, el secado superficial, las precipitaciones que provocan la saturación hídrica superficial, etc.

Capa superior de tierra de oxidación de metano y vegetación

Una capa superior húmica mejora la disponibilidad de agua para la vegetación y los microorganismos, ya que aumenta la capacidad de campo disponible de las plantas. Además, también fomenta la agregación de las partículas del suelo y garantiza el suministro de nutrientes a la vegetación y a los microorganismos. Una capa superior húmica crea también un ambiente óptimo para los organismos presentes en el suelo. Una vegetación sana protege a su vez el suelo contra la erosión y permite la integración óptica del sistema de oxidación de metano en la capa recultivo de vegetación del vertedero.

En caso de que el suelo tenga una baja porosidad, un alto grado de humedad o un elevado flujo advectivo de metano procedente de la masa residuos, el flujo difusivo de oxígeno a la capa de oxidación de metano se ve obstaculizado. En estas condiciones el horizonte de oxidación se desplaza en dirección ascendente a la capa superior de tierra. Con el fin de garantizar la oxidación completa de la carga de metano, es necesario alcanzar una eficiencia de oxidación muy elevada.

En la interfase de dos capas diferentes, es necesario mantener la estabilidad del filtro y una continuidad suficiente de los poros a la capa inferior.

3.8.4 Requisitos relativos a las propiedades físicas de los materiales minerales

Los materiales empleados en los sistemas de tratamiento biológico de gases deben cumplir los siguientes requisitos relativos a sus propiedades físicas:

- Estabilidad a largo plazo: Con el fin de evitar la degradación biológica y, por lo tanto, mantener la permeabilidad a los gases y la funcionalidad de los sistemas de oxidación de metano, los materiales utilizados deben incorporar componentes minerales. Sin embargo, es también necesario disponer de componentes húmicos naturales, especialmente en las capas cercanas a la superficie, para aumentar así la disponibilidad de los nutrientes y contribuir a obtener una estructura del suelo óptima y una mayor retención del agua. Estos factores son relevantes tanto para la actividad de la comunidad microbiana como para sostener una capa de vegetación. El estándar de calidad alemán BQS 7-3 (LAGA, 2011)

recomienda un rango del < 1 % al 3 % de materia orgánica en el subsuelo y del 2 % al 8 % de materia orgánica en la capa de tierra superficial.

- Elevada alimentación de aire: la difusividad del gas y, en consecuencia, el aporte de oxígeno necesario para llevar a cabo el proceso de oxidación del metano está estrechamente relacionada con la cantidad de poros disponibles para transportar el gas (por ejemplo, la disponibilidad de poros grandes, con un diámetro equivalente a $> 50 \mu\text{m}$). El porcentaje de poros disponibles debe mantenerse a unos niveles adecuados que permitan garantizar el aporte de oxígeno necesario para llevar a cabo la oxidación de metano, incluso tras precipitaciones abundantes, es decir, en condiciones de capacidad de campo. Se estima que para tratar $2,6 \text{ kg de CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ a una temperatura media anual de 10°C , se precisa una porosidad de aireación de $\sim 14 \%$ en volumen en la capacidad de campo (contenido de agua) para garantizar un aporte adecuado de O_2 , véase también la tabla 3.6.
- Capacidad de campo disponible: Si el sistema de oxidación de metano forma parte de una capa de recultivo o una capa de equilibrio hídrico, deben respetarse los requisitos relativos al equilibrio hídrico necesario en estos casos. Así, por ejemplo, en Alemania, se requiere que la capa de recultivo tenga, como mínimo, un espesor de 1 m y una capacidad de campo disponible de 140 mm. Por el contrario, la capa de equilibrio hídrico debe tener un espesor mínimo de 1,5 m y una capacidad de campo disponible de 200 mm. Si un filtro de oxidación de metano abierto o una ventana de oxidación de metano debe sostener una capa de vegetación, el material que se elija debe mantener siempre una capacidad de campo disponible adecuada según las condiciones climatológicas.
- Susceptibilidad a la compactación: la compactación originada por el uso de maquinaria pesada supone a menudo problemas en la construcción de la cobertura del vertedero. En particular, la compactación afecta a la capacidad de aporte de aire y a la continuidad del sistema de poros. La susceptibilidad a la compactación debe eliminarse mediante la elección de materiales insensibles o técnicas de construcción adecuadas, con vehículos que ejerzan una baja presión sobre el suelo.
- Susceptibilidad a la formación de grietas: la formación de macroporos secundarios, tales como grietas o fracturas como resultado de la agregación o asentamiento del suelo dan lugar a la generación de vías preferenciales y son una causa frecuente de elevadas emisiones de gases en el vertedero. Los suelos de textura franca y granos finos, propensos a la agregación debido a la arcilla que contienen, no son adecuados para ser empleados en las capas de oxidación de metano.

En la tabla 3.7 se resumen las texturas que ofrecen una porosidad de aireación de entre el 13 % y el 14 % en volumen en función de la densidad aparente del suelo, tal como se determina para los suelos de crecimiento natural. Los datos muestran que, a medida que aumenta el grado de compactación, se reducen significativamente los materiales de textura óptimas que se pueden utilizar. Cabe señalar que estos valores pueden diferir para los suelos fabricados.

TABLA 3-7. TEXTURAS DEL SUELO CON UNA POROSIDAD DE AIREACIÓN DE ENTRE EL 13 % Y EL 14 % EN VOLUMEN, EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE.

DATOS APLICABLES A LOS SUELOS DE CRECIMIENTO NATURAL

Densidad aparente	Valor (g cm^{-3})	Textura del suelo, combinación de sedimentos y arcilla
De muy baja a baja	< 1,4	< 65 % sedimentos y < 17 % arcilla < 50 % sedimentos y < 25 % arcilla < 15 % sedimentos y < 35 % arcilla
Media	entre 1,4 y < 1,6	< 40 % sedimentos y < 12 % arcilla < 15 % sedimentos y < 25 % arcilla
De alta a muy alta	1,6 a > 1,8	< 25 % sedimentos y < 8 % arcilla < 10 % sedimentos y < 17 % arcilla

3.8.5 Requisitos relativos a las propiedades químicas de los materiales minerales

Capa de oxidación de metano (capa subterránea y capa superior de tierra)

Con el fin de proporcionar un ambiente geoquímico que favorezca la actividad metanotrófica, los materiales que se utilizan en los sistemas de oxidación de metano deben cumplir los siguientes requisitos:

- Valor de pH: 5,5 a 8,5 conforme al pH óptimo para los metanótrofos.
- Contenido de materia orgánica: < 1 % al 3 % de materia orgánica en el subsuelo y entre el 2 % y el 8 % de materia orgánica en la capa superior de tierra, para garantizar así el suministro de nutrientes a los microorganismos y a la vegetación, fomentar la agregación del suelo y mejorar la capacidad de campo disponible.
- Conductividad eléctrica (contenido de sales): < 4 mS cm^{-1} . Si el contenido de sales es superior, se reduce la actividad metanotrófica como consecuencia del estrés osmótico. Los valores elevados de sales a menudo se dan en los materiales tratados térmicamente o en los residuos de construcción y demolición.
- Amonio: el amonio compite con el metano por el sistema de enzimas central de los metanótrofos y, por lo tanto, puede inhibir la oxidación de metano. Es por ello que deben evitarse los sustratos que contengan amonio.

Capa de distribución de gas

Los materiales que se emplean en la capa de distribución de gas no deben contener carbono inorgánico, ya que el aumento en la presión parcial del dióxido de carbono puede provocar la precipitación de los carbonatos y, en consecuencia, una reducción del volumen de los poros disponibles para transportar el gas.

3.8.6 Materiales orgánicos

Los materiales orgánicos como el compost a menudo se emplean como enmiendas para las capas minerales o como lechos de filtrado en los filtros y ventanas de oxidación de metano. Normalmente, el compost aporta un elevado contenido de nutrientes y tiene un gran potencial de retención del agua. Debido a su elevado porcentaje de poros grandes, el compost tiene una baja capacidad calorífica y es, por ello, un buen aislante. El compost ha demostrado presentar unas tasas elevadas de oxidación de metano. La principal desventaja de los materiales orgánicos es su degradabilidad microbiana, que provoca el asentamiento del suelo y la consecuente reducción de la permeabilidad a los gases. Además, la degradación aeróbica de la materia orgánica rivaliza con la elevada demanda de oxígeno del metano en el proceso de oxidación. Las pautas austriacas relativas a las capas de oxidación de metano (ÖVA, 2008) estipulan, por lo tanto, una actividad respiratoria máxima de $< 8 \text{ mg O}_2$ por g de sustancia seca durante 7 días. En presencia de humedad, el elevado contenido de materia orgánica incrementa la formación de nichos anaeróbicos y puede provocar la formación de metano. En general, el uso de materiales orgánicos requiere un mayor control y puede hacer necesario llevar a cabo un tratamiento (descompactación) o bien la excavación y el reemplazo del material. Los materiales minerales acostumbran a presentar unas tasas inferiores de oxidación de metano. Sin embargo, ofrecen una estabilidad estructural a largo plazo, pueden soportar vegetación y sirven como capa de equilibrio hídrico o como un área que puede ser utilizada posteriormente.

3.8.7 Aplicabilidad en climas húmedos y áridos

La mayoría experiencias recogidas sobre la oxidación de metano se han obtenido en vertederos de climas templados y húmedos. Es de esperar que, en condiciones más áridas, la actividad potencial de oxidación de metano sea algo inferior en comparación con la oxidación en climas templados y húmedos, debido, principalmente, a la falta de humedad en la capa superior. Sin embargo, los pocos casos conocidos hasta ahora, indican que, por lo general, allí donde crezcan plantas, también será posible desarrollar una actividad microbiana. Cuando los suelos se secan, el área de oxidación de metano parece que se desplaza hacia el interior, de manera similar a lo que sucede en los países europeos durante el invierno, cuando las bajas temperaturas inhiben la actividad de las capas superiores.

En climas muy húmedos es posible que los poros de las capas del sistema de oxidación de metano se llenen de agua durante un periodo de tiempo prolongado. En estas condiciones, no es posible difundir suficiente oxígeno a la capa de oxidación de metano, por lo que los gases de vertedero no pueden migrar de manera uniforme a través de la capa de oxidación de metano. Si aumenta la presión, los gases de vertedero pueden forzar una salida a través de una vía preferencial, en la que no es posible que se produzca una oxidación suficiente. A la hora de diseñar los sistemas de oxidación de metano en climas húmedos, es importante determinar cuántos litros de precipitación por m^2 se generan durante una fuerte lluvia. No es necesario tener en cuenta las precipitaciones con un periodo de retorno de 100 años. Es suficiente considerar que, durante una precipitación de este tipo, no se oxida metano. La media de precipitaciones fuertes determina los requisitos de drenaje del suelo. La conductividad hidráulica necesaria, decantará la elección de materiales hacia materiales arenosos. Los suelos adecuados para los sistemas de oxidación de metano también son, en su mayoría, suelos arenosos. No obstante, en climas muy húmedos, es probable que la gama de suelos adecuados esté limitada a suelos con una mayor conductividad hidráulica y una mayor porosidad de aireación. En estos casos, aparte de ser necesario disponer de una mayor conductividad hidráulica también hay que garantizar que el agua de lluvia infiltrada se drenará correctamente. Con este fin, es preferible que el sistema de drenaje del agua se ubique debajo de la capa de distribución de gas para evitar que se inhiba la distribución del gas. Para poder obtener una buena infiltración, la capa superior no debe estar endurecida, debe contar con una vegetación densa, que debe mantenerse con cuidado para garantizar así una infiltración óptima en todo momento.

3.8.8 Diseño de los sistemas de oxidación de metano

En base a las observaciones de campo sobre la profundidad del horizonte metanotrófico y como conclusión a las secciones

2 a 4, se propone utilizar la siguiente configuración para los filtros de oxidación de metano abiertos, las ventanas de oxidación de metano y las capas oxidación de metano, desde abajo hacia arriba:

- en caso que sea necesario, aplicar una capa de nivelación > 5 cm;
- una capa de distribución de gas de 20 cm a 50 cm de espesor;
- una capa intermedia de 0 cm a 20 cm de espesor;

- una capa de oxidación de metano de 40 cm a 60 cm de espesor y
- una capa superior húmica de 20 cm de espesor, que soporte la vegetación

En total, se obtiene un espesor que oscila entre los 80 cm y los 150 cm. Así, pues, el espesor mínimo debería ser de 80 cm. Es posible, e incluso recomendable, utilizar capas de mayor espesor en aquellos casos en los que los requisitos establecidos en las autorizaciones indiquen que, por otros motivos, el espesor total de la cobertura debe ser, por ejemplo, de 100 cm o superior. La capa superior de tierra debe tener una textura similar a la de la capa de oxidación de metano. La configuración de los filtros de oxidación de metano cerrados con una mezcla de gas aireado en la entrada y sin vegetación que soportar puede variar. Las dimensiones espaciales deben elegirse en función de la carga esperada y la tasa de oxidación de metano considerada.

Tal como se menciona en el apartado 3.8.3, el factor clave que determina el correcto funcionamiento de la capa de distribución de gas radica en que la diferencia entre la permeabilidad de la capa de oxidación de metano y la de la capa de distribución de gas se maximiza sin poner en peligro la capacidad de captar el aire de la capa de oxidación de metano. Si se dispone del diseño y se conocen las propiedades de los materiales, es posible calcular la tasa de oxidación y las emisiones restantes con herramientas como CALMIM (<http://calmim.lmem.us/>) o la Herramienta de Oxidación de Metano (<http://www.afvalzorg.nl/EN/Landfill-sites/Emissions-management/Methane-oxidation.aspx>). La Herramienta de Oxidación de Metano sigue un enfoque conservador. Tal como se menciona en el apartado 3.8.4, se estima que para tratar 2,6 kg de CH₄ m⁻² año⁻¹ a una temperatura media anual de 10°C se precisa una porosidad de aireación de ~14 % en volumen en la capacidad de campo para garantizar un aporte adecuado de O₂. En pruebas de campo llevadas a cabo en los Países Bajos, se ha demostrado (Geck *et al.*, 2015) que tras una larga exposición al metano en condiciones invernales (con una temperatura del suelo de 6°C y una humedad del suelo del 26 % en volumen), el suelo (densidad de entre 1,3 a 1,4 g.cm⁻³ y una porosidad del 8 %) podía oxidar el 60 % de una carga de metano de 4,7 litros de CH₄ m⁻² h⁻¹. La oxidación de 2,82 litros de CH₄ m⁻² h⁻¹ equivaldría a 17,6 kg de CH₄ m⁻² año⁻¹. Los sistemas de oxidación de metano bien diseñados y construidos pueden oxidar cargas mayores de metano que las consideradas por lo general como estándar. Debido a la poca experiencia documentada hasta ahora, es necesario demostrar estas tasas superiores de oxidación de metano en cada proyecto individual.

LECTURAS RECOMENDADAS

Se puede ampliar información (en alemán) en los siguientes documentos:

Gebert, J., Streese-Kleeberg, J., Melchior, S. (2011): Methanoxidation zur passiven Restgasbehandlung. Müllhandbuch Kennzahl 4383, Lieferung 1/11, Erich Schmidt-Verlag Berlin, ISSN 0176-4969.

Huber-Humer et al. (2008), ÖVA-Leitfäden: Methanoxidationsschichten (en alemán), puede descargarse en:

http://cms.altlastenmanagement.at/documents/ak_tl/Leitfaden_Methanox%20.docx.pdf

3.9 Operación y mantenimiento

3.9.1 Comprobación de fugas antes de la puesta en marcha

Antes de poner en marcha cualquier tipo de instalación, es necesario comprobar que el sistema de captación y las conexiones hacia los pozos de captación son estancos. Para ello, se introduce aire comprimido al sistema y se comprueba la posible presencia de fugas:

- el aire se introduce en el sistema a una presión de hasta 300 mbar. Una vez estabilizada la temperatura, se mide la presión en el sistema, como mínimo, durante una hora. Los cambios en la presión que no pueden explicarse como consecuencia de cambios en la temperatura o presión ambiental indican la presencia de fugas.
- Durante la comprobación, la temperatura del aire no debe sobrepasar los 40oC.
- Las conexiones a los pozos y sifones deben estar cerradas con una brida ciega;
- El sistema de captación debe estar cubierto con arena para minimizar los efectos de la temperatura (a no ser que esté instalado por encima del nivel del suelo).

3.9.2 Puesta en marcha segura

Las mezclas de gases de vertedero y aire pueden ser explosivas. Si entran en contacto con posibles fuentes de ignición (por ejemplo, chispas) en la soplante y la antorcha, pueden provocar daños graves en el sistema de captación y de aprovechamiento. Durante la puesta en marcha del sistema, a menudo no resulta posible evitar la formación de mezclas explosivas de aire y gases de vertedero durante un breve intervalo de tiempo. Ello no debería suponer ningún tipo de problema si se elimina de forma estricta cualquier tipo de fuente de ignición.

Transcurridos unos días, se mide el contenido de metano y oxígeno presente en el gas en cada uno de los pozos. Para llevar a cabo esta tarea se pueden utilizar equipos portátiles

disponibles en el mercado. Cuando la concentración de metano es elevada (superior al 55 % en volumen) y la concentración de oxígeno es baja (inferior al 0,3 % en volumen) se puede abrir la válvula de control del pozo un poco más. Cuando la concentración de metano es baja (inferior al 45 % en volumen) y la concentración de oxígeno es elevada (superior al 1 % en volumen) es necesario cerrar un poco más la válvula de control. En aquellos casos en que los gases de vertedero son depurados a calidad de gas natural, puede ser válido establecer requisitos adicionales previos en relación con las concentraciones de N₂, las cuales también deberán controlarse.

Si el gas recuperado solo se quema, puede aceptarse una concentración inferior de metano. Por lo general, si las antorchas están bien diseñadas, pueden funcionar de forma estable con concentraciones bajas de metano. Algunas antorchas incluso pueden quemar gases de vertedero que contengan tan solo un 15 % de metano. En estos casos, la concentración de oxígeno en el gas (máx. entre 1 % y 2 % en volumen) determina la presión de aspiración máxima.

Este procedimiento debe repetirse diversas veces a intervalos semanales (aproximadamente), hasta que ya no se produzcan cambios notorios en la válvula.

3.9.3 Ajuste de la válvula de control

Con el paso del tiempo se producirán cambios en la generación de gas y en el caudal de gas de los residuos que se encuentran cerca de un pozo. La permeabilidad de los residuos puede variar como consecuencia de asentamientos o cambios en el contenido de agua. La generación de los gases evoluciona a lo largo del tiempo. El ritmo al que esto ocurre puede variar de un lugar a otro. Las condiciones climáticas atmosféricas (la presión ambiental pero también las precipitaciones) influyen en la permeabilidad del material de cobertura y también es posible que produzcan una bajada de la presión en el sistema de captación. Estos cambios afectan a la zona de influencia de un determinado pozo y a su eficiencia en la captación de metano. Para mantener una recuperación efectiva de los gases de vertedero de calidad aceptable, es necesario reajustar la configuración de la válvula de control o la presión de aspiración de cada pozo de vez en cuando.

La frecuencia a la que debe realizarse esta operación depende de los cambios observados y puede variar desde una frecuencia semanal en el caso de un pozo en residuos recientes a una

frecuencia mensual en el caso de los residuos antiguos y asentados con una cobertura relativamente impermeable.

El proceso que hay que seguir para ajustar la válvula es comparable al procedimiento inicial, descrito en el apartado 3.9.2 y consiste en medir la presión, el contenido de metano y oxígeno del gas en cada pozo y reajustar los parámetros de la válvula en consecuencia. La diferencia principal radica en que es necesario intentar reducir la concentración de metano al valor mínimo al que su aprovechamiento siga siendo práctico. En los motores de gas, esta concentración es del > 45 % en volumen y la concentración de metano en cada pozo debe oscilar, preferiblemente, entre, por ejemplo, el 48 % y el 52 % en volumen. Tanto el resultado de las mediciones como la configuración de la válvula en cada pozo deben anotarse en un libro de registro, que simplificará el proceso de determinación de la frecuencia con la que es necesario llevar a cabo los ajustes. Este libro de registro también puede servir como prueba de una ejecución correcta, por ejemplo, cuando las autoridades competentes inspeccionen el sistema.

3.9.4 Gestión del condensado

La generación de condensado y los aspectos de diseño relacionados con su captación y eliminación del sistema de recuperación de gases (en especial, de las canalizaciones) se describen en el apartado 3.5.3. Mientras el sistema de recuperación está en funcionamiento, es necesario eliminar de forma continua el condensado para no obstaculizar el proceso de recuperación de gases de vertedero. El condensado puede drenarse hacia la masa de residuos o bien bombearse a una tubería de descarga. En ambos casos es importante controlar de forma regular los niveles de condensado en los pozos de gas, sifones, separadores y fosos para bombas. Tras la puesta en marcha del sistema de recuperación de gases, el control de dicho sistema puede realizarse con una periodicidad mensual. Si no hay señales de un mal drenaje del agua, puede considerarse la opción de llevar a cabo el control con una frecuencia trimestral o semestral.

En los vertederos que se encuentran en la fase de explotación, como consecuencia del asentamiento de los residuos, no se puede garantizar nunca que las tuberías de captación del gas dispongan de la pendiente correcta para drenar el condensado. Además de controlar el nivel del condensado, también puede considerarse oportuno comprobar de forma periódica el

caudal en las tuberías de captación de gases. Esta comprobación puede realizarse, por ejemplo, insertando un anemómetro en la tubería de captación de gases a través de una válvula de bola conectada a la tubería, o bien midiendo las diferencias de presión entre las diferentes secciones de las tuberías de captación de gas.

3.9.5 Inspección y mantenimiento

Aparte de ajustar de forma regular la configuración de la válvula de control en todos los pozos y de controlar los niveles del condensado, también es necesario comprobar cada cierto tiempo que la instalación funciona de forma correcta. La inspección y mantenimiento deben planificarse y ejecutarse conforme a un programa y siempre que se considere necesario, por ejemplo, ante una disminución sin explicación de la calidad o cantidad de gas. Las tareas que se llevan a cabo deben anotarse en un libro de registro. Algunos aspectos que hay que tener en cuenta en el control y mantenimiento de la instalación son:

- El primer indicador de un correcto funcionamiento de la instalación es el caudal existente en el compresor. Este caudal, o la suma total del caudal durante un determinado periodo, debe registrarse de forma regular. El promedio de gases recuperados semanalmente debe proporcionar un patrón relativamente constante, con ligeras modificaciones al alza o a la baja explicables considerando la evolución del propio vertedero (como por ejemplo, una reducción lenta de la generación de gases en los residuos más antiguos o un aumento debido a la conexión de los pozos).
- Un segundo indicador del correcto funcionamiento de la instalación es el número de horas que la estación del compresor está en funcionamiento durante un determinado periodo de tiempo. Las horas de operación acumuladas deben registrarse de forma regular.
- Es necesario comprobar la presencia de daños en los pozos, sifones y tuberías como consecuencia, por ejemplo, del asentamiento de los residuos, de posibles incidentes derivados de las operaciones llevadas a cabo en el vertedero o como causa de la corrosión. Debe prestarse una atención especial a las conexiones entre diferentes partes del sistema.
- La medición de la caída de la presión en las tuberías de captación puede ser indicativa de un aumento en la caída de la presión provocada por la condensación del agua que no ha sido eliminada del sistema.
- Es necesario comprobar también los dispositivos de seguridad de la soplante y la antorcha, según las especificaciones del proveedor.
- Deben inspeccionarse visualmente los quemadores, las bases de los quemadores y el aislante interno de las chimeneas para comprobar la presencia de corrosión o daños que podrían obstaculizar el correcto funcionamiento de la instalación.
- Asimismo, es necesario también llevar a cabo un mantenimiento regular del equipo, especialmente de las partes móviles, conforme a las especificaciones del proveedor.

- Debe comprobarse que los dispositivos de medición funcionan correctamente. Es necesario calibrar los equipos siguiendo las instrucciones del proveedor.

3.9.6 Mantenimiento de los sistemas de oxidación de metano

El mantenimiento de los sistemas de oxidación de metano está relacionado principalmente con el asentamiento de los residuos y la consecuente disminución de la permeabilidad a los gases, así como de las consecuencias derivadas de la presencia de obstrucciones en las interfases de las capas. Los efectos de estos factores sobre el proceso de oxidación pueden identificarse con facilidad analizando la fase gaseosa del suelo. Si se cumplen los requisitos relativos a las propiedades químicas y físicas, no es necesario llevar a cabo ningún tipo de mantenimiento en los sistemas basados en materiales minerales correctamente dimensionados.

Si por el contrario, se emplean materiales industriales, como por ejemplo arcilla porosa, el mantenimiento puede incluir el ajuste de los valores de pH y el aporte de nutrientes. Los sistemas basados en materiales orgánicos, tales como el compost, tienden a obstruirse y asentarse. En este caso, las tareas de mantenimiento pueden implicar tener que aflojar o sustituir el filtro, la ventana o el material de recubrimiento.

3.10 Vigilancia y obligación de informar

3.10.1 Eficiencia de recuperación

Los procedimientos para demostrar la eficiencia de las medidas de control de los gases de vertedero se describen en el Anexo III de la Directiva europea relativa al vertido de residuos y pueden incluir el control de los gases presentes en el suelo fuera de los residuos depositados, de las emisiones fugitivas y de las condiciones presentes en el vertedero (véanse los requisitos estipulados en el Anexo III de la Directiva). Con respecto a los gases de vertedero, la Sección 3 del Anexo III de la Directiva europea relativa al vertido de residuos indica que deben medirse las emisiones potenciales de gases y la presión atmosférica y que el control de gases debe ser representativo de cada sección del vertedero. Las notas al pie de la tabla aclaran que la frecuencia de las mediciones puede adaptarse en la autorización de forma específica para cada vertedero y que estas medidas están principalmente relacionadas con el contenido de materia orgánica presente en los residuos. Es decir, si la masa de residuos contiene material orgánico biodegradable, es necesario comprobar de forma regular las concentraciones de

metano, dióxido de carbono y oxígeno así como de otros gases. Entre estos otros gases, se encuentran, por ejemplo, el sulfuro de hidrógeno, el monóxido de carbono y los compuestos clorados y fluorados. La Sección 3 del Anexo III de la Directiva europea relativa al vertido de residuos estipula además que durante la fase de mantenimiento post-clausura también es necesario «comprobar regularmente la eficiencia del sistema de extracción de gases». Tal como se explica en el apartado 3.2 de este documento guía, llevar a cabo un control de la eficiencia del sistema de recuperación de gases es todavía más importante durante la fase de explotación. La primera comprobación que hay que realizar para evaluar la eficiencia del sistema de recuperación de gases consiste en comparar el total de horas acumuladas que el sistema de recuperación de gases ha estado en funcionamiento con el total de horas semanales, mensuales o anuales. La segunda comprobación que hay que realizar para evaluar la eficiencia del sistema de recuperación consiste en comparar la cantidad de gas recuperado con la estimación de gases generados llevada a cabo.

La mejor tecnología disponible para cuantificar la generación de metano es la modelización, y para cuantificar la recuperación del metano, son las mediciones. La mejor tecnología disponible para cuantificar la oxidación de metano consiste en aplicar los valores por defecto del IPCC relativos a la oxidación al cálculo de la generación de metano y restar el metano recuperado. La mejor tecnología disponible para cuantificar las emisiones de metano se basa en un cálculo en el que se resta el metano recuperado y el metano oxidado del metano generado. Dado que el efecto sobre el calentamiento de la tierra se expresa en kg de CO₂ equivalentes, es necesario expresar la generación, recuperación, oxidación y las emisiones en kg de CH₄ por año. No es, pues, suficiente, medir el caudal de los gases de vertedero en m³ (por hora o por año) y solo lo es para una concentración de metano medida en % en volumen. La masa de un m³ de gas depende enormemente de la presión y la temperatura del gas. Para realizar las mediciones pueden emplearse caudalímetros máxicos. Si se prefiere, puede optarse por convertir los porcentajes en volumen del gas y el metano en kg de metano a partir de los datos de temperatura y presión. En este caso, es importante recoger los datos necesarios con asiduidad con el fin de determinar la tasa de recuperación de metano durante intervalos cortos (por lo menos a intervalos semanales, pero preferiblemente a intervalos más cortos) y calcular la tasa de recuperación anual mediante la suma de la tasa de recuperación de los períodos más cortos.

TABLA 3-8. ASPECTOS QUE DEBEN CONTROLARSE Y UTILIZARSE PARA AJUSTAR Y OPERAR EL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE GASES DE VERTEDERO.

	Método	Unidad	Frecuencia de control	de	Frecuencia de notificación de la información
A: Pozos de gas					
Concentraciones de CH₄, CO₂ y de O₂	Medición	% en volumen	Mensual/bimestral		Ninguna
Presión del gas (en el lugar de medición del caudal)	Medición	mbar	Mensual/bimestral		Ninguna
Nivel de condensado/lixiados	Medición	cm	Semestral		Ninguna
B: Colectores del condensado					
Nivel de condensado	Medición	cm	Semestral		Ninguna
C: Estación de compresores					
Horas de funcionamiento del compresor	Medición	hora	Semanal		Anual
Caudal de gas	Medición	m ³ .h ⁻¹	Semanal		Anual
Concentraciones de CH₄, CO₂ y de O₂	Medición	% en volumen	Continuamente		Anual
Presión del gas (en el lugar de medición del caudal)	Medición	mbar	Semanal		Anual
Temperatura del gas (en el lugar de medición del caudal)	Medición	°C	Semanal		Anual

- Aquellos aspectos no mencionados en la tabla 3.7, no deberían ser necesariamente notificarlos a el órgano ambiental.
- Los aspectos que deben controlarse en relación con la seguridad operativa de los compresores y las antorchas se indican en la tabla 3.2. No es necesario notificarlos a el órgano ambiental.

Aparte de controlar los aspectos que sirven para ajustar el sistema de recuperación de gases de vertedero, se considera una buena práctica vigilar con carácter anual la presencia de otros componentes presentes en los gases de vertedero en la estación de compresores. Algunos compuestos, como el sulfuro de hidrógeno y el monóxido de carbono, son importantes en lo que refiere a la salud y la seguridad. Se ha notificado concentraciones de sulfuro de hidrógeno superiores a las indicadas en el Anexo 1, especialmente en los vertederos en los que se vierten cantidades significativas de residuos que contienen sulfatos. El sulfuro de hidrógeno puede provocar la corrosión de los sistemas de tratamiento o dar lugar a emisiones elevadas de óxidos sulfúricos. No obstante, no es necesario medir dichas emisiones de óxidos sulfúricos, ya que pueden calcularse a partir de la concentración de sulfuro de hidrógeno y de otros componentes sulfúricos presentes en el gas, considerando que se oxidan por completo

en la fracción de gas que se ha recogido y tratado (por ejemplo, oxidado). En algunos casos puede ser necesario eliminar el sulfuro de hidrógeno.

Algunos compuestos pueden ser relevantes para fines de control conforme al Reglamento CE 166/2006 relativo al establecimiento del Registro Europeo de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC, o E-PRTR según sus siglas en inglés). De acuerdo con el RETC, (http://europa.eu/legislation_summaries/environment/general_provisions/l28149_en.htm), los vertederos de los Estados miembros de la Unión Europea que admitan más de 10 toneladas de residuos al día o que dispongan de una capacidad total superior a las 25 000 toneladas están obligados a notificar a el órgano ambiental las emisiones que superen los valores establecidos. El RETC admite la estimación, el cálculo y las mediciones de los gases como métodos de cuantificación. En lo que a la generación, oxidación y emisiones de metano se refiere, considera que la mejor tecnología disponible son los cálculos basados en la modelización. Para la recuperación del metano, considera que la mejor tecnología disponible se basa en las mediciones. No debe promoverse, por lo tanto, la estimación como base para los informes sobre el metano. Si se sigue el enfoque indicado en la tabla 3.8 para notificar la eficiencia de recuperación a el órgano ambiental, estos mismos datos pueden emplearse también para notificar dicha información al RETC. No obstante, el reglamento del RETC exige la notificación de otros parámetros aparte de los relacionados con el metano. El documento guía del RETC indica el conjunto de parámetros que puede ser necesario notificar. La necesidad de aportar o no información sobre un determinado parámetro depende de si se sobrepasan los valores límites, cosa que solo puede determinarse en base a cada vertedero. En lo que a emisiones a la atmósfera se refiere, el metano, los CFC y los HCFC sobrepasan, por lo general, los valores límite establecidos. Es probable que las concentraciones de monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos sulfúricos y polvo superen también los valores límite estipulados por el RETC. Por el contrario, es poco probable que otros parámetros superen los valores límites de emisiones a la atmósfera. Sin embargo, la entidad explotadora es responsable de evaluar qué compuestos pueden superar los valores del RETC en sus vertederos.

TABLA 3-9. ASPECTOS RELATIVOS AL RENDIMIENTO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE GASES QUE DEBEN CONTROLARSE Y NOTIFICARSE

	Método	Unidad	Frecuencia de control	Frecuencia de notificación de la información
A: Generación de metano				
Actualización de la estimación basada en los residuos vertidos el año anterior	Modelización	kg CH ₄ .año ⁻¹		Anual
B: Recuperación de metano				
Horas de funcionamiento del compresor	Medición	hora	Semanal	Anual
Caudal de gas (acumulado en la estación de soplantes)	Medición	m ³ .h ⁻¹	Semanal	Anual
Presión del gas (en el lugar de medición del caudal)	Medición	mbar	Semanal	Anual
Temperatura del gas (en el lugar de medición del caudal)	Medición	°C	Semanal	Anual
Concentración de metano	Medición	% en volumen de CH ₄	Semanal	Anual
Determinación de la tasa de recuperación de metano semanal	Cálculo	kg CH ₄ .semana ⁻¹		Anual
Determinación de la tasa de recuperación de metano anual	Cálculo	kg CH ₄ .año ⁻¹		Anual
C: Oxidación de metano				
Aplicar el valor por defecto del IPCC	Cálculo	kg CH ₄ .año ⁻¹		Anual
Alternativamente: modelización de la oxidación (apartados. 2.3, 2.4, 3.8)	Modelización	kg CH ₄ .año ⁻¹		Anual
Alternativamente: modelización de la oxidación (apartados. 3.10, 3, 4)	Medición	kg CH ₄ .año ⁻¹	Bianual	Anual
D: Emisiones de metano				
Cálculo: A-B-C=D	Cálculo	kg CH ₄ .año ⁻¹		Anual
Alternativamente: control de las emisiones (apartado. 3.10.3)	Medición	kg CH ₄ .año ⁻¹	Bianual	Anual
E: Otros gases (según sea necesario)				
CO, H₂S, mercaptanos, CS₂, COS, (CH₃)₂S, CFC, HCFC, cloruro de vinilo, clorometanos	Medición	mg.m ⁻³	Anual (según sea necesario)	Anual (según sea necesario)
F: Migración subterránea (en caso necesario)				
Concentración de metano en las sondas de gas	Medición	% en volumen de metano CH ₄	Trimestral	Anual

Muchos de estos parámetros deben controlarse también en base a la operativa interna y la seguridad, por lo que su vigilancia no implica tener que llevar a cabo ningún esfuerzo adicional de control (véase los apartados 3.6.3 y la tabla 3.2).

3.10.2 Control de la migración subterránea

En los vertederos que cumplen las normas técnicas mínimas exigidas por la Directiva europea relativa al vertido de residuos, no debe, en principio, producirse una migración subterránea de metano. En estos casos, los vertederos dispondrán de una barrera geológica y un revestimiento de sellado artificial en el fondo y en los laterales (si los laterales se encuentran por debajo del nivel de la superficie). Los vertederos construidos antes de la entrada en vigor de la Directiva europea relativa al vertido de residuos, deberían haber notificado un plan de acondicionamiento que incluya las medidas que garanticen un nivel de protección análogo. Si el órgano ambiental ha dado su aprobación a este plan de acondicionamiento, deberían haberse implantado las medidas de protección pertinentes. Si el órgano ambiental no ha podido dar su aprobación a este plan de acondicionamiento, debería haberse clausurado el vertedero. En caso de no disponer de una impermeabilización en el fondo y en los laterales, algunas opciones para evitar la migración subterránea de metano son la construcción de pantallas de impermeabilización verticales o zanjas verticales de drenaje del gas. El rendimiento de las pantallas de impermeabilización y de las zanjas puede controlarse en el exterior empleando sondas o filtros que recogen muestras y analizan el metano presente.

En cualquier caso, y para aquellos vertederos que no están equipados con sistemas de impermeabilización de base, sean vertederos activos o clausurados, es preciso proponer un plan de investigación de potencial migración subterránea de gas, a no ser que la entidad explotadora pueda demostrar la inexistencia de migración de gas, cuyas consecuencias podrán ser la toma de medidas de control o la toma de medidas de recuperación y eliminación de gas. Tanto la investigación de la existencia de gas en migración subterránea como las propuestas para control y recuperación de gas en migración, deberán ser aprobadas y supervisadas por el Órgano ambiental.

3.10.3 Control de las emisiones y de la oxidación

El principal objetivo de la recuperación de los gases de vertedero es el de controlar las emisiones de metano a la atmósfera. Así, pues, el control de las emisiones conforma un paso lógico del proceso. Existen diferentes métodos para controlar las emisiones. Todos ellos tienen determinadas limitaciones y desventajas. Hay que destacar que el grupo de trabajo del Comité de Adaptación Técnica, que redactó el documento guía sobre el control de los gases

de vertedero para la Comisión Europea, concluyó en el año 2012 que no existe ningún método de medición suficientemente preciso y fiable como para sostenerse ante un tribunal en caso de que se produzca un debate jurídico sobre la admisibilidad de determinadas emisiones. Además, hay también un debate en curso sobre la asequibilidad y la precisión de los métodos de medición de las emisiones para cuantificar las emisiones de metano procedentes de vertederos.

Pueden distinguirse tres niveles de control de las emisiones:

- Inspección visual de la superficie del vertedero, tratando de identificar los posibles puntos en los que se generan emisiones de metano, por ejemplo, zonas en las que se observan daños en la vegetación, presencia de grietas en la superficie, aparición de malos olores, burbujas de gas en charcos de agua en la superficie o penachos visibles de condensación de gases de vertedero en los taludes, que se forman, por ejemplo, en una mañana fría.
- En las mediciones cualitativas de las emisiones se registran las concentraciones de metano en la superficie del vertedero en cuadrículas de terreno predefinidas con un detector portátil de ionización de llama (FID), un diodo láser sintonizable (TDL) u otros analizadores portátiles de gas. El mapa de las concentraciones de metano que se obtiene indica donde se generan focos de emisión y, en algunos casos, es posible eliminarlos, por ejemplo, reparando las grietas de la capa superficial o las fugas presentes en el sistema de captación del gas. Se han propuesto también otros métodos para identificar los focos de emisión de metano. Uno de ellos consiste en el análisis mediante termografía de infrarrojos y la inspección visual del terreno. Los análisis mediante termografía de infrarrojos es preferible llevarlos a cabo a primera hora de la mañana en otoño, invierno o primavera y sirven para detectar puntos del vertedero con una temperatura más elevada de lo normal. Estos puntos pueden estar provocados por gases de vertedero calientes que proceden de las partes más profundas del vertedero. Tanto la termografía de infrarrojos como la inspección visual (todavía) no son técnicas tan fiables como el detector de ionización de llama o el diodo láser sintonizable. Las zonas de mayor temperatura también pueden estar ocasionadas por otros fenómenos, como por ejemplo, la degradación aeróbica de los residuos de superficie. Los resultados obtenidos con la termografía de infrarrojos pueden ser confusos. Así, por ejemplo, las capas superiores del suelo que tienen vegetación dan una señal diferente a las superficies sin vegetación, aunque tengan la misma temperatura. Además, se ha observado que los focos de emisión que no se detectan con cámaras térmicas infrarrojas sí se detectan con un detector de ionización de llama. También se ha observado que las grietas o agujeros identificados visualmente en la capa puede que emitan metano, pero también puede ser que no sea así.
- Actualmente, no existe ningún método de medición cuantitativo que goce de un amplio reconocimiento como método preferido para medir el promedio de emisiones globales de metano de todo un vertedero. La principal dificultad para medir las emisiones de metano procedentes de vertederos radica en la variabilidad espacial y temporal de las emisiones,

así como en las dimensiones de los vertederos actuales. Para llevar a cabo estas mediciones se han propuesto diferentes métodos. Los métodos que se aplican con más frecuencia son los basados en cámaras de flujo cerradas. Las cámaras de flujo cerradas son el método preferido para llevar a cabo mediciones en áreas pequeñas de un vertedero. Sin embargo, existe un consenso creciente sobre el hecho de que, a pesar de que las cámaras de flujo cerradas son capaces de captar la variabilidad espacial de las emisiones, estas no obtienen casi nunca resultados representativos para todo el vertedero y tienden a subestimar las emisiones. Esta circunstancia ocurre aunque se respeten los procedimientos establecidos para mediciones en cuadrículas y se utilicen métodos geoestadísticos de interpolación. La tendencia a subestimar las emisiones puede minimizarse mediante una identificación y cuantificación rigurosa de las emisiones en los focos de emisión. Otros métodos aplicados son los métodos basados en mediciones micro-meteorológicas, los métodos de equilibrio de masas y las mediciones de penachos. Todos ellos presentan ventajas y desventajas, así como unas restricciones específicas en lo que se refiere a las dimensiones del vertedero, la topografía, la accesibilidad y, por ejemplo, las fuentes de metano adyacentes al vertedero. En muchos casos, el coste de llevar a cabo las mediciones será un factor importante y, a menudo, determinante. En aquellos casos en los que se dispone poca información sobre la composición de los residuos, podría resultar útil realizar mediciones de las emisiones. Hay que remarcar que en estas circunstancias, las tasas de generación derivadas de los modelos pueden no ser precisas o fiables. Al comparar las tasas obtenidas a partir de los modelos con las tasas de oxidación y emisión obtenidas mediante las mediciones (incluso cuando las mediciones únicamente puedan emplearse como valores indicativos) se puede comprender mejor la generación, oxidación y emisión de los gases.

El enfoque más utilizado en las mediciones con cámaras son las mediciones con cámaras de flujo estáticas. La medición con cámaras de flujo estáticas permite calcular la emisión de metano partiendo de la regresión lineal de un incremento de la concentración de metano en una secuencia temporal de análisis; la tasa de emisión se obtiene mediante la relación que existe entre la superficie de emisión y el volumen constante de la cámara de flujo. En relación con las mediciones con cámaras de flujo estáticas, es importante tener en cuenta los siguientes aspectos.

- Dado que la oxidación depende de la humedad y la temperatura, es importante realizar este tipo de mediciones con cámaras en períodos estacionales que sean representativos. En las regiones europeas con climas moderados, la temperatura media del suelo se registra de abril a mayo y de septiembre a octubre. Normalmente, en el mes de abril es cuando el suelo tiene una probabilidad mayor de cifrar el contenido de agua en el suelo en la capacidad de campo, es decir, la capacidad máxima de retención de agua. El mes de septiembre puede ser seco. En octubre es posible alcanzar de nuevo la capacidad de campo. Durante el invierno, las bajas temperaturas pueden provocar que se subestime la

tasa anual promedio de oxidación y que se sobrestime la tasa promedio anual de emisión de gas. Durante el periodo estival, las elevadas temperaturas pueden generar el efecto contrario. En determinadas regiones, la diferencia entre las estaciones secas y las lluviosas puede tener un efecto más importante que las diferencias entre temperaturas. En las regiones áridas, la falta de humedad puede reducir la oxidación de forma significativa durante el verano.

- Dada la existencia de vías preferenciales en la masa de residuos o como consecuencia de la heterogeneidad de la cobertura del suelo, es posible que una fracción significativa del metano generado se emita directamente a través de los denominados focos de emisión. En estos focos de emisión, el flujo de metano es demasiado elevado para obtener una oxidación significativa. A fin de mejorar la precisión y evitar omitir los focos de emisión, es importante evaluar primero, o bien de forma simultánea, la superficie para identificar los focos de emisión (o vías preferenciales). Los focos de emisión son normalmente los responsables de la mayoría de las emisiones atmosféricas de metano.
- Es posible mejorar aún más la precisión mediante la realización de un gran número de mediciones con cámaras lo más grandes posibles. No obstante, hay también limitaciones de índole económica y práctica. Es por ello que es necesario encontrar una solución de compromiso razonable. Esta situación puede depender de cada vertedero.
- Todos los dispositivos y métodos tienen límites de detección. El límite de detección de las mediciones en cámaras de flujo cerradas depende de la superficie y el volumen de la cámara y de la sensibilidad de los dispositivos de medición del metano y el dióxido de carbono. Es importante verificar que el límite de detección se corresponde con las emisiones de metano y dióxido de carbono previstas.
- A la práctica, se utilizan tanto cámaras transparentes como opacas. Las cámaras opacas bloquean la luz solar y detienen la fotosíntesis y la absorción del dióxido de carbono. Este efecto es conveniente, ya que la absorción fotosintética del dióxido de carbono puede encubrir las emisiones de este gas.
- Con el fin de minimizar las alteraciones derivadas de la bomba de aspiración (a menudo, 1-2 l min⁻¹), los dispositivos de medición se conectan a la cámara durante tan solo 15-20 segundos por minuto, durante, por ejemplo, un intervalo de seis minutos. Así se contribuye a evitar que se produzca una depresión en la cámara. Normalmente no es posible ajustar los caudales de la bomba de los analizadores. En las cámaras pequeñas en especial, las mediciones pueden estar influenciadas por la aspiración, ya sea del aire atmosférico o de los gases de vertedero procedentes de la masa de residuos, a unas tasas más elevadas que las emisiones reales.
- Puede producirse un aumento de presión si la cámara está situada en un foco de emisiones con fuerte flujo advectivo. La conexión a la cámara de un tubo largo y delgado abierto a la atmósfera (por ejemplo, 40-45 segundos cada minuto) permite evitar el aumento de presión. El tubo debe tener la longitud suficiente para evitar el equilibrio difusivo de la concentración entre el volumen de la cámara y el aire atmosférico. Puede utilizarse una válvula de tres vías para desconectar la cámara de la atmósfera y conectarla

al analizador durante las mediciones (por ejemplo, 15-20 segundos cada minuto). Debe observarse el tiempo de respuesta del analizador (la combinación del caudal de la bomba y los volúmenes de los tubos y la celda de medición) para determinar el tiempo de muestreo correcto.

- Se recomiendan tiempos de medición breves, preferiblemente inferiores a diez minutos. Esto garantiza la mínima acumulación posible de gases debajo de la cámara. En tal caso, el aumento de presión es mínimo y el gradiente de concentración de los gases se mantiene próximo al gradiente de concentración entre el suelo y la atmósfera. Esto es importante porque el flujo difusivo depende del gradiente de concentración. Solamente se puede trabajar con tiempos de medición breves si el límite de detección de la medición de la cámara es suficientemente bajo. Esto puede hacer necesario adaptar la superficie y el volumen de la cámara a la tasa de emisiones específica del emplazamiento o bien optar por un aparato de medida con mayor sensibilidad.
- Las cámaras pueden estar equipadas con placas estancas a gases lastradas al suelo o con un perfil en U en el fondo con relleno de espuma saturada de agua para sellar la cámara de la superficie.
- Es importante medir las emisiones de metano a presión barométrica estable. El descenso de la presión barométrica provoca un mayor flujo de metano desde el «volumen de almacenamiento» en el interior de la masa de residuos, lo que provoca una sobrestimación de las emisiones de metano. El aumento de la presión barométrica inhibe las emisiones de metano y conlleva un incremento del metano en el «volumen de almacenamiento» en el interior de la masa de residuos. En consecuencia, el aumento de la presión barométrica provoca una subestimación de las emisiones de metano.

Las emisiones de metano y dióxido de carbono se obtienen mediante la relación que existe entre la tasa de incremento de la concentración en el interior de la cámara, el volumen de la cámara y la superficie de medición. Las emisiones pueden calcularse a partir de:

$$E = (m * V) / A$$

donde:

E = emisión [$m^3 h^{-1} m^{-2}$]

m = pendiente de la regresión lineal del aumento en la concentración [$m^3 m^{-3} h^{-1}$]

V = volumen de la cámara [m^3],

A = superficie de medición de la cámara [m^2].

Las cuestiones referidas anteriormente son aplicables en gran medida a las mediciones con cámaras de flujo dinámicas o túneles de viento (que pueden considerarse mediciones en grandes cámaras dinámicas pasivas). Las mediciones con cámara de flujo dinámica calculan las emisiones de metano atendiendo a la regresión lineal de la diferencia entre una concentración de entrada y salida constante de metano en una secuencia temporal de análisis con flujo constante a través de la cámara y una superficie de emisión constante de la cámara. El manejo de las cámaras de flujo dinámicas se considera más complicado porque requiere un flujo constante de entrada y salida de gas por los puertos de entrada y salida de la cámara. Además, no debe existir diferencia de presión entre la entrada y la salida. Esto requiere un diseño riguroso del tamaño de las aberturas de entrada y salida. En situaciones con emisiones diferentes puede ser necesario modificar el caudal y tamaño de las aberturas de entrada y salida. Asimismo, pueden requerirse caudalímetros o reguladores de caudal en la entrada y la salida. Por otra parte, es necesario analizar el doble de muestras (entrada y salida) que en el caso de las cámaras estáticas. La ventaja de las cámaras de flujo dinámicas frente a las estáticas es que en las primeras no se produce un incremento de la concentración (que dificulta el flujo difusivo) ni un aumento de la presión (que dificulta el flujo advectivo). Estas desventajas pueden evitarse fácilmente mediante diversas actuaciones en las mediciones con cámara de flujo estática cuando se plantean los aspectos citados anteriormente.

En el caso de filtros de oxidación de metano cerrados, puede realizarse una verificación del rendimiento mediante el equilibrio de masas de las cargas de metano entrantes y salientes. En lo que respecta a los filtros abiertos, las ventanas o las coberturas empleadas en la oxidación de metano, se recomienda emplear un FID (detector de ionización de llama) portátil, un láser de diodo sintonizable (TDL) o cualquier otro analizador de gas portátil a fin de detectar focos de emisiones, a lo que puede seguir una cuantificación de flujos mediante mediciones con cámara. Para evaluar las tasas de oxidación es necesario medir no solo el metano, sino también el dióxido de carbono. Puede colocarse un analizador de dióxido de carbono en el interior de la cámara o bien en el flujo de gas en dirección al analizador de metano.

Para comprobar el resultado de las mediciones en la cámara de flujo, puede compararse la tasa de oxidación calculada con una tasa de oxidación obtenida a partir de un cambio en las ratios de $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ medidos debajo del suelo de recubrimiento (por ejemplo, a 1 m de

profundidad) y en la superficie del mismo (por ejemplo, los datos de la cámara de flujo). El criterio de la ratio $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ asume una respiración del suelo insignificante, una migración de gases vertical y un estado estacionario del sistema. El resultado del cálculo es un porcentaje de metano que se oxida en dióxido de carbono. Si se multiplica el porcentaje por la generación de gases modelizada, puede calcularse una tasa de oxidación en $\text{kg CH}_4\cdot\text{año}^{-1}$.

3.10.4 Disminución de la generación de los gases

Durante la ejecución de un proyecto de gases de vertedero, la cantidad y calidad del gas recuperado no es constante. Tal como se indica en el gráfico 2.2, la cantidad de gas recuperado disminuye de forma gradual con el transcurso del tiempo. La concentración de metano en el gas oscila entre el 50 % y el 60 % y no varía de forma notoria durante la vida útil del vertedero. No obstante, cuando disminuye la producción de gases de vertedero y resulta cada vez más difícil captar suficiente gas para proceder a su aprovechamiento, es también cada vez más difícil recuperar suficientes gases de vertedero de una calidad aceptable. Un aumento en la presión de aspiración en los pozos provoca una disminución en la concentración de metano por debajo del 50 % en volumen.

Con el paso del tiempo, esta disminución en la cantidad y calidad del gas recuperado lleva a la entidad explotadora a tomar determinadas decisiones:

- Durante la fase de explotación y justo después de finalizarla, a menudo se genera un excedente de gas, superior a la capacidad de aprovechamiento. Es por ello que, con el fin de reducir las emisiones, debe optimizarse la recuperación de los gases. Esto significa que se obtienen mayores cantidades de gases de vertedero de una calidad suficiente para ser aprovechado. El excedente de gas de vertedero recuperado que no puede ser aprovechado, debe quemarse. Si la cantidad de gas quemado es elevada y hay indicios para suponer que la producción permanecerá elevada durante un largo periodo de tiempo, puede optarse por aumentar la capacidad de aprovechamiento del sistema. Esto es posible gracias a que los motores de gas pueden funcionar en módulos, a bajas capacidades (incluso a 100 m³ de gases vertedero por hora) y a que, tras años de funcionamiento en un determinado vertedero, es posible trasladarlos a una nueva ubicación si la cantidad de gases recuperados disminuye.
- Tras un determinado periodo de tiempo, la recuperación de los gases y su calidad disminuirán. En la mayoría de casos es posible mantener la calidad del gas a niveles aceptables reduciendo la presión de aspiración en los pozos, en detrimento de la cantidad de gas recuperado. En consecuencia, la cantidad de gas recuperado puede que no sea suficiente para operar los equipos de aprovechamiento del gas al 100 % de su capacidad. Si

los equipos están contruidos de forma modular (por ejemplo, utilizando varios motores de gas), es posible detenerlos y reubicarlos en otro vertedero.

Es inevitable que llegue el momento en que el vertedero no genere suficiente gas para seguir llevando a cabo un proyecto de aprovechamiento, aunque sea a una capacidad reducida. En este caso, las emisiones se mitigan quemando el gas en antorchas o bien empleando técnicas de oxidación de metano.

- Actualmente existen antorchas que pueden procesar gases de bajo poder calorífico con una concentración de metano de hasta el 15 % en volumen y una capacidad mínima de 1 m³ CH₄ h⁻¹. En el caso de que se disponga de un sistema de recuperación de gases y se prevea su utilización durante un periodo de tiempo suficiente, resultará más rentable instalar una antorcha pequeña que un sistema de oxidación microbiano de metano.
- Como alternativa a las antorchas, pueden emplearse técnicas de oxidación de metano, tales como las capas, ventanas o filtros de oxidación de metano. Estas técnicas se describen de forma más detallada en el capítulo 3.8 y preferentemente deberían estar ya implantadas cuando todavía se recupera gas de forma activa (para oxidar el metano que no puede ser recogido por el sistema de recuperación). Llevar a cabo la conexión entre el sistema de captación de gases y las diferentes ventanas de oxidación de metano es un proceso relativamente sencillo. A pesar de que algunos Estados miembros de la UE recomiendan utilizar únicamente un tratamiento pasivo del metano con cargas de metano que cubran el suelo inferiores a los 5 m³ de CH₄.ha⁻¹.h⁻¹ (véase el apartado 2.5, tabla 2.4), desde un punto de vista técnico, la oxidación microbiana de metano permite tratar hasta 40 m³CH₄.ha⁻¹.h⁻¹. No obstante, en este caso, el sistema de oxidación de metano requiere una superficie muy grande de vertedero y, por lo tanto, puede resultar una técnica más cara que la quema continua de gas.

La decisión de utilizar una antorcha o un sistema de oxidación de metano debe basarse en la evaluación de la rentabilidad del proceso de mitigación de las emisiones de este gas (véase el capítulo 6).

3.10.5 Evaluación y obligación de informar

La entidad explotadora recoge todos los datos relativos al control en un informe. De acuerdo con lo establecido en la autorización o en la normativa del RETC, los informes se presentan al Órgano ambiental con carácter anual. Antes de presentar dichos informes, la entidad explotadora evalúa la coherencia de los datos comparándolos con los datos notificados en años anteriores. Si se observa cualquier desviación en relación con los años anteriores, será necesario incluir en el informe una explicación que justifique dicha desviación. En caso de observar desviaciones en los avances previstos, la entidad explotadora debería evaluar, por su

propio interés si las medidas de control de los gases de vertedero son todavía adecuadas y rentables. Cada cinco años, como mínimo, será necesario presentar al Órgano ambiental una evaluación sobre la rentabilidad de las medidas de control de los gases de vertedero, aunque no sea necesario introducir ninguna modificación. El órgano ambiental evalúa tanto los informes anuales como las evaluaciones presentadas cada cinco años. Como resultado de esta evaluación puede estimarse que no es necesario llevar a cabo ningún tipo de acción. En tal caso, el órgano ambiental aprueba la evaluación y la entidad explotadora continúa aplicando las medidas de control de los gases de vertedero. No obstante, la evaluación llevada a cabo por el órgano ambiental puede estimar también que las medidas de control aplicadas se encuentran fuera del rango normal de operación (véase el apartado 3.10.6). En este caso, será necesario (o conveniente) modificar las medidas de control de gases aplicadas. El órgano ambiental puede decidir a continuación que la entidad explotadora presente un plan de control de gases de vertedero actualizado, aunque la propia entidad explotadora también puede presentar dicho plan por iniciativa propia. Una reducción de los gases generados u otras consideraciones descritas en el apartado 3.10.4 pueden llevar a la entidad explotadora a decantarse por esta última opción.

Como aplicación práctica del marco teórico anteriormente citado, las entidades explotadoras deberían informar de manera regular anualmente y en sus planes de vigilancia ambiental, remitidos según las fechas y condiciones impuestas en las autorizaciones ambientales integradas, de todos los parámetros de control y explotación de gas que permitan al Órgano ambiental evaluar la incidencia del gas en cada vertedero.

Las incidencias tales como funcionamiento anómalo, detección de niveles anómalos o elevados de gas, olores intensos y reiterados, etc, deberían ser informados al Órgano ambiental, de manera urgente, sin que medie requerimiento a la entidad explotadora.

Para aquellos vertederos clausurados o con regímenes administrativos previos a la entrada en vigor de la Directiva europea, el Órgano ambiental debería establecer un marco propio de control y comunicación de resultados con la administración.

3.10.6 Evaluación, aprobación y toma de decisiones

En todos los casos, es responsabilidad de la entidad explotadora garantizar el diseño, mantenimiento y operación correctos de las medidas de control de los gases de vertedero. Un buen diseño, mantenimiento y operación de las medidas de control se reflejará en los parámetros controlados y la información notificada. Al evaluar los informes, el órgano ambiental verificará que el diseño, mantenimiento y operación de dichas medidas sean correctos.

En lo que la vigilancia del rendimiento de recuperación, de la oxidación y de las emisiones se refiere, los aspectos indicados en la tabla 3.9 pueden evaluarse conforme a la tabla 3.10. En la tabla 3.10 se incluyen los aspectos de evaluación tanto cualitativos como cuantitativos.

TABLA 3-10. EVALUACIÓN DE LOS DATOS DE VIGILANCIA DE LOS GASES DE VERTEDERO

	Unidad	Aspecto de evaluación
A: Generación de metano		
Actualización de la estimación basada en los residuos vertidos el año anterior	kg CH ₄ .año ⁻¹	Desarrollo coherente en comparación con los datos de años anteriores
B: Recuperación de metano		
Horas de funcionamiento del compresor	hora	Más del 95 % o 8300 horas/año
Caudal de gas (acumulado en la estación de soplantes)	m ³ .h ⁻¹	Caudal de gas constante con interrupciones mínimas
Presión del gas (en el lugar de medición del caudal)	mbar	Presión de gas constante
Temperatura del gas (en el lugar de medición del caudal)	°C	Fluctuaciones de temperatura (estacionales) coherentes
Concentración de CH₄	% en volumen de metano CH ₄	Concentraciones constantes de metano
Determinación de la tasa de recuperación de metano semanal	kg CH ₄ .semana ⁻¹	Tasa de recuperación constante
Determinación de la tasa de recuperación de metano anual	kg CH ₄ .año ⁻¹	Tasa de recuperación constante entre el 40 % y el 70 % de la tasa de generación anual (vertederos sin sellado de superficie)
C: Oxidación de metano		
Aplicar el valor por defecto del IPCC	kg CH ₄ .año ⁻¹	Desarrollo coherente en comparación con los datos de años anteriores
Alternativamente: modelización de la oxidación (apartados. 2.3, 2.4, 3.8)	kg CH ₄ .año ⁻¹	Desarrollo coherente en comparación con los datos de los años anteriores, correcta aplicación de los modelos
Alternativamente: modelización de la oxidación (apartados. 3.11, 3, 4)	kg CH ₄ .año ⁻¹	Desarrollo coherente en comparación con los datos de los años anteriores, correcta aplicación de los modelos
D: Emisiones de metano		
Cálculo: A-B-C=D	kg CH ₄ .año ⁻¹	Desarrollo coherente en comparación con los datos de años anteriores

	Unidad	Aspecto de evaluación
Alternativamente: control de las emisiones (apartado. 3.11.3) E: Otros gases (según sea necesario)	kg CH ₄ .año ⁻¹	Desarrollo coherente en comparación con los datos de años anteriores
CO, H₂S, mercaptanos, CS₂, COS, (CH₃)₂S, CFC, HCFC, cloruro de vinilo, clorometanos	mg.m ⁻³	Concentraciones comparables con la composición típica de los gases de vertedero (Anexo 1). Si se sobrepasa el rango típico de composición, es aconsejable considerar la necesidad y rentabilidad de aplicar medidas de reducción de los gases.
F: Migración subterránea (en caso necesario) Concentración de metano en las sondas de gas	% en volumen de metano CH ₄	Concentraciones de metano inferiores al 1 % (Nota: en los suelos con un elevado grado de humedad y un alto contenido de materia orgánica se pueden generar condiciones anaeróbicas que den lugar a la generación de metano)

Si la vigilancia muestra que las medidas de control de los gases se encuentran fuera del límite normal de operación (tal como se indica en la tabla 3.9) y no se incluye una explicación satisfactoria al respecto en el informe, el órgano ambiental puede solicitar a la entidad explotadora una aclaración sobre los datos notificados. Si la explicación es satisfactoria, puede procederse a aprobar el informe y la evaluación que se presenta cada 5 años. La entidad explotadora instaure las medidas de control de los gases de vertedero. No obstante, pueden producirse cambios o una evolución imprevista en la generación, recuperación u oxidación de los gases que hagan necesario que la entidad explotadora lleve a cabo determinadas acciones. En tal caso, el órgano ambiental decidirá que la entidad explotadora debe presentar un plan actualizado de las medidas de control de los gases de vertedero en el que se considere esta situación.

4

FASE DE MANTENIMIENTO POST-CLAUSURA

4.1 Acciones

- La entidad explotadora solicita iniciar la fase de mantenimiento post-clausura. Esta solicitud incluye un plan de control actualizado de los gases de vertedero.
- Puesta en práctica, mantenimiento y vigilancia de las medidas de control de los gases de vertedero (de forma continua).
- La entidad explotadora lleva a cabo una evaluación y presentación anual de informes sobre los gases de vertedero generados (modelo), su recuperación (medición) y una estimación de las emisiones (cálculo).
- Cada cinco años, es necesario evaluar/reconsiderar el plan de control de los gases de vertedero. Durante la fase de explotación del vertedero, los cambios (im)previstos en la cantidad y composición de los residuos, las tasas de generación de gases de vertedero y la calidad del gas, pueden estimar oportuno modificar las medidas de control adoptadas. En los vertederos que contienen cantidades significativas de residuos biodegradables es más probable que la evaluación llevada a cabo considere viable finalizar el control de los gases de vertedero generados en la fase de mantenimiento post-clausura en lugar de en la fase de explotación.
- Aprobación de la evaluación/reconsideración del plan de control de gases de vertedero por parte de el órgano ambiental, incluyendo la decisión de reducir o dar por finalizadas las medidas control de los gases de vertedero.
- Reinstauración (cuando sea necesario) o desmantelamiento de las medidas de control de los gases de vertedero.
- Finalización del control activo de los gases de vertedero.

En el gráfico 4.1 se muestra un diagrama de flujo sobre las acciones y responsabilidades en lo que refiere al control de los gases de vertedero en la fase de mantenimiento post-clausura.

4.2 Solicitud de inicio de la fase de mantenimiento post-clausura

El inicio de la fase de mantenimiento post-clausura implica llevar a cabo un procedimiento formal mediante el cual, la entidad explotadora notifica a el órgano ambiental que ha finalizado la admisión de residuos y solicita que las obligaciones relativas a la admisión, muestreo, análisis y eliminación de residuos se retiren de la autorización. El Gobierno vasco incluye en todas las autorizaciones medioambientales, una lista de medidas e instalaciones que deben aplicarse y construirse una vez concluye la fase de explotación y se inicia la fase de

mantenimiento post-clausura. Una vez aplicadas estas medidas y presentado el informe al Gobierno vasco, se inspecciona el vertedero para garantizar que se cumplen todas las normativas pertinentes. Una vez comprobadas todas las medidas aplicadas y el cumplimiento de la normativa, el Gobierno vasco firma la resolución en la que se informa sobre el inicio de la fase de mantenimiento post-clausura.

La entidad explotadora es la que mejor conoce las características del vertedero. Las decisiones que la entidad explotadora toma durante la fase de explotación influyen, o pueden influir, en los pasos a seguir en la fase de mantenimiento post-clausura. Por ello, se considera una buena práctica, que las entidades explotadoras sean conscientes de las consecuencias que tendrán las decisiones que tomen en la fase de explotación durante la fase de mantenimiento post-clausura. En consecuencia, se considera una buena práctica que la entidad explotadora presente un plan sobre el mantenimiento post-clausura a el órgano ambiental, a más tardar, cinco años después de iniciar las operaciones de eliminación de residuos. El plan de mantenimiento post-clausura se actualiza cada cinco años para permitir así incluir cambios en los procedimientos o en las medidas ambientales aprobadas inicialmente que se desvían del plan y diseño original. En el plan de mantenimiento post-clausura se describen las actividades que se llevan a cabo en la fase de mantenimiento post-clausura basándose en el diseño y la construcción prevista, así como en la experiencia adquirida durante los años previos. Antes de iniciar la fase de mantenimiento post-clausura, la entidad explotadora elabora plan actualizado y lo presenta ante el órgano ambiental. Una vez el órgano ambiental haya aprobado el plan, esta modifica la autorización para que incluya únicamente los requisitos relevantes en relación con el mantenimiento, recogida y tratamiento de lixiviados, control del gas, vigilancia y la obligación de presentar informes.

El plan de mantenimiento post-clausura incluye, asimismo, un plan de control de gases. En aquellos casos en los que no sea necesario modificar las medidas de control de los gases al iniciar la fase de tratamiento posterior, puede utilizarse una copia del último plan de control de gases efectivo aplicado en la fase de explotación. Si fuera necesario adaptar las medidas de control de los gases a una nueva situación, sería necesario actualizar el plan de control ya existente. A fin de obtener la autorización del plan actualizado sobre el control de los gases, la entidad explotadora el vertedero debe seguir los pasos descritos en el capítulo 3:

Apartado 3.2 sobre la consideración de los últimos avances y la mejor tecnología disponible para el control de los gases de vertedero;

Apartado 3.3 sobre la elección de la mejor opción para llevar a cabo el control de los gases de vertedero;

Apartado 3.4 sobre el (re)diseño los pozos de captación de gas, en caso necesario;

Apartado 3.5 sobre el (re)diseño del sistema de tuberías, en caso necesario;

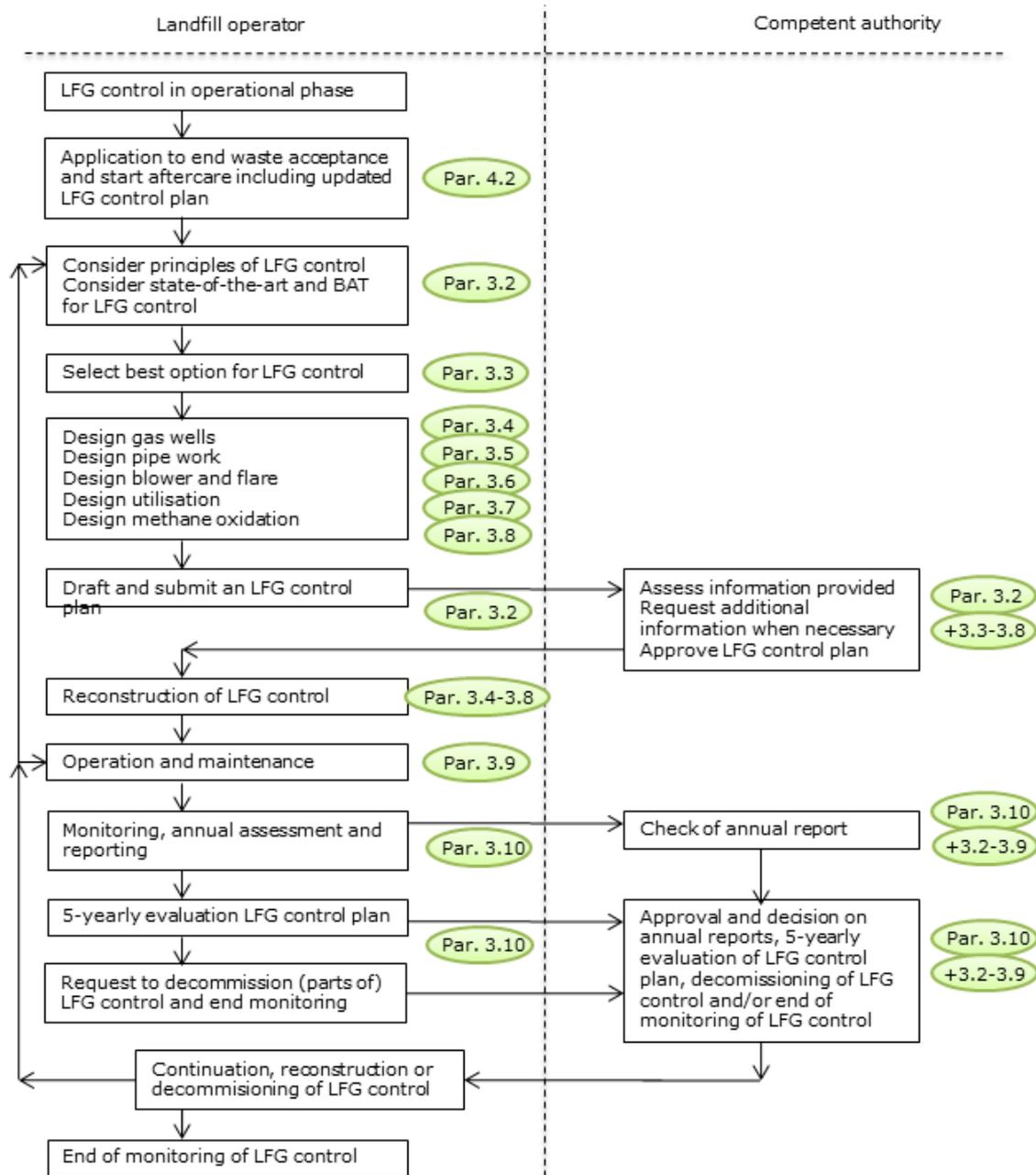
Apartado 3.6 sobre el (re)diseño de las soplantes y las antorchas, en caso necesario;

Apartado 3.7 sobre el (re)diseño del sistema de aprovechamiento de los gases, en caso necesario, y

Apartado 3.8 sobre el (re)diseño del sistema de oxidación de metano, en caso necesario.

Los resultados del estudio se incluirán en el plan actualizado de control de los gases de vertedero. La entidad explotadora presenta el plan de control de gases de vertedero a el órgano ambiental. Tras la evaluación y aprobación por parte de el órgano ambiental, la entidad explotadora inicia la instauración y aplicación de las medidas de control de los gases de vertedero pertinentes.

GRÁFICO 4-1. DIAGRAMA DE FLUJO SOBRE LAS ACCIONES Y RESPONSABILIDADES EN EL CONTROL DE LOS GASES DE VERTEDERO EN LA FASE DE TRATAMIENTO POSTERIOR



4.3 Operación y mantenimiento

La operación y el mantenimiento se mantienen sin cambios con respecto a la fase de explotación o bien se modifican cuando, conforme a un plan de control de gases actualizado,

las medidas han sido sustituidas por otras. En ambos casos, no obstante, la operación y el mantenimiento se realizarán con arreglo a los principios descritos en el apartado 3.9.

4.4 Vigilancia y obligación de informar

Para el control se aplican los mismos principios que para la explotación y el mantenimiento. Las actividades de control se mantienen sin cambios con respecto a la fase de explotación o bien se modifican cuando, conforme a un plan de control de gases actualizado, las medidas han sido sustituidas por otras y requieren un control diferente. En ambos casos, no obstante, el control se ha de realizar de conformidad con los principios descritos en los apartados 3.10.1 a 3.10.3. El Anexo III de la Directiva europea relativa al vertido de residuos establece unos mayores intervalos de control durante la fase de mantenimiento post-clausura que durante la fase de explotación. Las frecuencias de control recogidas en la tabla 3.8 son intervalos mínimos recomendados para una evaluación correcta del rendimiento. Solo si la entidad explotadora demuestra a el órgano ambiental que los parámetros de control específicos se han mantenido estables y no ha sido necesario ajustar las medidas de control, el órgano ambiental podrá valorar y aprobar frecuencias de control más largas. Además, durante la fase de mantenimiento post-clausura, la menor generación de gases puede requerir cambios en las medidas de control de gases. La entidad explotadora ha de sustanciar la elección de otra medida de control de gases en base a una evaluación de la rentabilidad de la reducción de las emisiones de metano. La evaluación y la presentación de informes se realizarán de conformidad con los principios descritos en los apartados 3.10.4 a 3.10.6.

4.5 Fin de la vigilancia del control de los gases de vertedero

Hay que tener en cuenta que los sistemas biológicos de oxidación de metano que emplean una cantidad significativa de materia orgánica deben sopesarse cuidadosamente con vistas al final de la vigilancia del control de gases de vertedero. Tal como se ha mencionado en el apartado 3.9.6, los sistemas de oxidación de metano basados en materia orgánica como el compost tienden a las obstrucciones y asentamientos. Se requiere, por tanto, realizar labores de mantenimiento regularmente. El fin de la vigilancia solo puede concederse en sistemas de control pasivo que resulten estables a largo plazo.

La entidad explotadora podrá solicitar el fin de la vigilancia del control de gases de vertedero únicamente cuando el control activo de gases haya sido sustituido por otro pasivo y en la

medida en que los datos de vigilancia del control pasivo de gases revelen durante varios años consecutivos el cumplimiento de los criterios especificados. La entidad explotadora ha de incluir en su solicitud un informe y una evaluación de los datos de vigilancia. El órgano ambiental evalúa la solicitud y concede su autorización cuando esta cumple los criterios especificados. Únicamente tres Estados miembros de la UE han propuesto criterios para el fin de la vigilancia del control pasivo de gases. Estos criterios se recogen en la Tabla 4.1.

Por poner un ejemplo, el criterio austriaco requiere (costosas) mediciones de emisiones con fines de verificación, pero se considera que no debe imponerse a las entidades explotadoras un procedimiento de vigilancia tan oneroso. En cuanto al criterio británico para las concentraciones de gas en pozos requiere una aireación constante y completa de la masa de residuos, algo que parece imposible. El criterio «sin evidencias visuales de daños en la vegetación» resulta un criterio sencillo y apropiado para identificar focos de emisiones y debería, por tanto, incluirse.

La propuesta alemana requiere el cumplimiento durante diez años de los criterios de control pasivo de gases. Dicho plazo no resulta excesivo considerando el hecho de que los criterios deben cumplirse incluso antes de comenzar el control pasivo de gases. Normalmente significa (salvo que se produzcan incidencias) que la vigilancia puede finalizar diez años después de iniciarse el control pasivo de gases. Se propone añadir que durante estos diez años no hayan sido necesarias labores de mantenimiento.

Tal como se explica en el apartado 2.5, existe un solapamiento considerable en las posibilidades técnicas de las antorchas y los sistemas de oxidación de metano. En consecuencia, parece inapropiado aplicar unos valores límite estrictos para la transición de un sistema de control de gases activo a otro pasivo. Es recomendable adoptar una decisión basada en un análisis coste/beneficio. En tal caso, los criterios de generación y carga no son aplicables a la hora de determinar el fin de la vigilancia. Por tanto, únicamente se mantiene como criterio de vigilancia la concentración en superficie. Una concentración en superficie de 25 ppm resulta, no obstante, injustificablemente baja y puede verse influida por fuentes ubicadas fuera del vertedero. En la mayoría de ocasiones la composición de los gases de vertedero es tal que, con una tasa de dilución de 1000, todos los compuestos del gas están por debajo de los niveles de toxicidad. Téngase presente que es recomendable realizar una evaluación para verificar que los gases de vertedero tienen una composición dentro del

«rango habitual». El anexo 1 recoge las concentraciones típicas de compuestos presentes en gases de vertedero. El metano por si solo no es tóxico. Con valores inferiores a 500 ppm, el metano se encuentra lejos de alcanzar concentraciones explosivas. Para mayor seguridad y con el fin de reflejar anomalías esporádicas, es suficiente utilizar un valor límite de 500 ppm como percentil 90.

TABLA 4-1. CRITERIOS PARA EL FIN DE LA VIGILANCIA DEL CONTROL DE GASES EN TRES ESTADOS MIEMBROS DE LA UE

País	Austria	Alemania	Reino unido
Fin de la vigilancia del control de gases en el caso de:	Cumplimiento durante 10 años de unas emisiones en superficie $< 0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ($< 0,86 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$).	Cumplimiento durante 10 años de los criterios pasivos de recuperación y tratamiento: Generación de metano $< 25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ Carga de metano en cobertura $< 5 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ($< 8,6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) Concentración en superficie $< 25 \text{ ppm}$ hidrocarburos Método: Evaluación de superficie con detector de ionización de llama dos veces/año, tras 5 detecciones conformes: una vez/año, malla espaciada cada 25 m, percentil 80.	Los gases de vertedero no deben generarse a tasas inaceptables. $< 1,5 \%$ de CH_4 y $< 5 \%$ de CO_2 en toda la masa de residuos durante al menos 2 años. Caudales de gas en perforaciones $< 0,015 \text{ m}^3 \text{CH}_4 \cdot \text{h}^{-1}$ y $< 0,022 \text{ m}^3 \text{CO}_2 \cdot \text{h}^{-1}$ durante un mínimo de 2 años. Sin evidencias visuales de daños en la vegetación ni datos de concentración de gases en el suelo.
Fuente	Fellner, J. & Prantl, R. (eds) (2008) ÖWAV-Positionspapier Konzeptionelle Überlegungen zur Entlassung aus der Deponienachsorge	Stegmann, R., Heyer, K-U., Hupe, K., Willand, A. (2006) Deponienachsorge – Handlungsoptionen, Dauer, Kosten und quantitative Kriterien für die Entlassung aus der Nachsorge	Agencia de Medio Ambiente de Reino Unido y Gales (2010) The surrender of permits for the permanent deposit of waste
Estado legal	Propuesta de los expertos	Mención en la normativa vigente	Normativa vigente

Los criterios del Gobierno vasco para determinar el fin del control de los gases de vertedero son:

- El control de los gases de vertedero ha de realizarse mediante medidas pasivas que no necesiten mantenimiento.
- La solicitud para el fin de la vigilancia del control pasivo de gases puede presentarse transcurridos diez años sin mantenimiento.
- Durante este periodo de tiempo sin mantenimiento, el control pasivo de los gases de vertedero debe cumplir los siguientes criterios:
- No se observan daños visuales en la vegetación.
- El percentil 90 de la concentración de hidrocarburos es inferior a 500 ppm CxHaño.
- El método empleado en la determinación de las concentraciones en superficie se realiza empleando un analizador apropiado, con el área de estudio dividida mediante una malla espaciada cada 25 metros (para coberturas de oxidación de metano) o cada 5 metros (para filtros y ventanas de oxidación de metano), con una frecuencia inicial de dos veces al año y, posteriormente, tras cinco evaluaciones conformes, con una frecuencia de una vez al año.
- (Si se desea disponer de información indicativa sobre los resultados de la oxidación, puede recurrirse a una evaluación adicional del dióxido de carbono).

5

OTRAS OPCIONES PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE METANO

Aparte de la recuperación de los gases de vertedero, existen diferentes opciones con el potencial de reducir las emisiones de metano. Estas medidas se describen a continuación. Sin embargo, se dispone de poca información documentada y, por este motivo, este capítulo no se considera una pauta de estas opciones de reducción de emisiones de metano.

5.1 Recirculación de lixiviados

Tal como se describe en la introducción, la humedad es uno de los factores más importantes en el proceso de biodegradación. Todos los procesos biológicos que dan lugar a la generación de gases de vertedero se producen en fase acuosa. Asimismo, el desplazamiento de la humedad da lugar a la generación puntual de condiciones favorables para la biodegradación. Los componentes inhibidores, tales como los subproductos ácidos de la biodegradación se eliminan y se aportan nutrientes. El incremento en el contenido y movilidad de la humedad, intensifica, pues, el proceso de biodegradación. La infiltración de agua o la recirculación de los lixiviados son técnicas ampliamente reconocidas para acentuar la biodegradación.

Ventajas

Las ventajas potenciales de la recirculación de los lixiviados son:

- Mejora de la calidad y reducción de la cantidad de lixiviados. Gracias a la mejora en la estabilización, se reducen las concentraciones de DBO, DQO y Nkj. Los metales pesados se inmovilizan en los residuos y, en consecuencia, se reducen también las concentraciones de estos metales en los lixiviados.
- Reducción de los riesgos ambientales a largo plazo: disminuye el riesgo de que, en el futuro, aumenten de nuevo las emisiones de gases procedentes del suelo y de las aguas subterráneas (por ejemplo, como consecuencia de variaciones en el patrón de precipitaciones). Esto permite simplificar el tratamiento posterior del vertedero (tras llevar a cabo una rigurosa evaluación de los riesgos y obtener la autorización por parte de el órgano ambiental).
- Aumento de la generación de gas. El aumento de la generación de gas mejora su recuperación y aprovechamiento.
- Estabilización de los residuos más rápida y completa, gracias a la cual se obtiene un mayor espacio para el vertido de residuos dentro de los límites fijados por la autorización.

- Reducción general de los costes del vertedero, gracias a la disminución en los costes de tratamiento de los lixiviados, al aumento en la producción de gases, al mayor espacio para los residuos y a un mantenimiento post-clausura del vertedero menos complejo.

Riesgos

No obstante, la infiltración de agua o la recirculación de lixiviados también comporta algunos riesgos:

- Las emisiones de metano pueden aumentar al estimular la generación de gases de vertedero si no se garantiza la aplicación de las medidas de control de las emisiones de gases necesarias (mejorar la recuperación de gases de vertedero, o instalar una capa impermeable o una capa de oxidación de metano).
- El aumento de las emisiones de metano también puede conllevar un incremento de los malos olores.
- Una infiltración desigual de agua da lugar a asentamientos irregulares que pueden provocar otros problemas, como por ejemplo, rupturas en las coberturas o daños en el sistema de captación del equipo de recuperación de gases de vertedero.
- La posible acumulación de determinados contaminantes no biodegradables en los lixiviados reciclados, como por ejemplo, Nkj y Cl^- . Cuando estas concentraciones son demasiado elevadas, las opciones disponibles para tratar los lixiviados pueden ser limitadas.
- Si no se dispone de un sistema de revestimiento inferior (Impermeabilización de base), o si la carga hidráulica en el sistema de revestimiento inferior aumenta de forma significativa, también aumenta el riesgo de que se produzcan emisiones al suelo y a las aguas subterráneas.
- Si el vertedero está sobresaturado de agua y se continúa añadiendo agua de forma continuada, puede producirse una liberación incontrolada de agua (en los laterales o en la superficie del vertedero), lo que provoca una contaminación de las aguas de escorrentía.
- La sobresaturación de los residuos con lixiviados también disminuye la disponibilidad de los poros para transportar el gas. Este hecho puede conllevar una reducción en la eficiencia de recuperación de los gases.
- Asimismo, la sobresaturación de los residuos también puede provocar problemas de estabilidad mecánica.
- Aumento de los costes, derivado de la imposibilidad de recuperar los gases de vertedero adicionales y de no poder beneficiarse de otras de las ventajas descritas que comportan la generación de beneficios económicos.

Se estima que en todo el mundo se han desarrollado más de 100 proyectos en relación con la infiltración de lixiviados. Sin embargo, los objetivos de estos proyectos difieren entre sí y a menudo solo se centran en una de las ventajas descritas anteriormente, lo que afecta al diseño y operativa del proceso de infiltración de lixiviados. Los primeros proyectos de

infiltración, realizados en los años 70 y 80, estaban principalmente orientados al tratamiento de los lixiviados. En consecuencia, solo se infiltraba una fracción de la cantidad de agua necesaria para facilitar la biodegradación. Un enfoque basado en solo una o dos de las ventajas descritas anteriormente implica también que el control del efecto que tiene la infiltración de lixiviados en la mayoría de los proyectos es a menudo limitado y, en consecuencia, se dispone de poca información sobre sus efectos.

Sistemas de infiltración

Se han descrito diferentes métodos en relación con la infiltración de agua o la recirculación de lixiviados. Los métodos más interesantes son los siguientes:

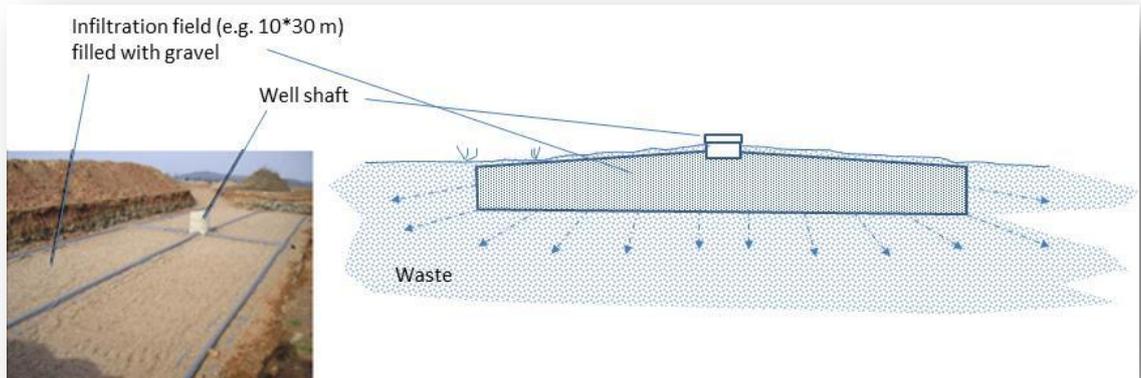
Sistemas horizontales, que a menudo se excavan en la capa superior de residuos. Los drenajes perforados horizontales forman el núcleo del sistema de infiltración y pueden estar rodeados, por ejemplo, de virutas de madera, grava u otro material grueso con el fin de mejorar la infiltración. Tras instalar un sistema horizontal, es posible depositar nuevos residuos en la parte superior del sistema, generando, así, sistemas de infiltración a diferentes profundidades. Los sistemas horizontales son una manera relativamente rentable de infiltrar lixiviados y permiten obtener una distribución relativamente uniforme de los mismos. Los sistemas horizontales son sensibles a los asentamientos irregulares de residuos. Un sistema de estas características debe contener partes flexibles o elementos de expansión telescópica para hacer frente, por ejemplo, a los asentamientos diferenciales que pueden esperarse entre los residuos irrigados y no irrigados o los laterales del vertedero, hechos, por ejemplo, de arena.

GRÁFICO 5-1. ZANJAS HORIZONTALES



Los campos de infiltración en los residuos son anchos y poco profundos (normalmente tienen una profundidad de 1 m y una superficie de 20 m x 20 m) y se rellenan de grava con lixiviados a través de un pozo ubicado en la parte superior. Un campo de infiltración de estas características puede operar de forma discontinua. Los campos de infiltración se rellenan en un periodo de tiempo relativamente corto, tras el cual los lixiviados se filtran hacia los residuos. Los campos de infiltración normalmente se excavan justo debajo de la capa superior del vertedero, aunque también pueden ubicarse de forma parcial en la parte superior de los residuos. Por norma general, los campos de infiltración solo se utilizan en vertederos que todavía no se han impermeabilizado. A fin de evitar posibles emisiones no controladas de gas derivadas del sistema, el área del campo de infiltración puede estar equipada con una cobertura/sellado estancos a los gases.

GRÁFICO 5-2. CAMPOS DE INFILTRACIÓN (IMAGEN DE IFAS HAMBURG)



Las *lanzas verticales poco profundas* situadas a poca distancia unas de otras pueden ser una opción preferente cuando ya se aplicado el sellado de la superficie. Estas lanzas pueden estar formadas por tuberías de acero de entre 2 m y 3 m de longitud, perforadas en la sección inferior, e introducidas a presión o mediante perforación en el vaso de vertido. Si se sitúan a una distancia relativamente corta entre ellas (de 5 a 15 m), se obtiene una distribución uniforme en toda el área y volumen del vertedero. También es posible instalar diversas lanzas a través de una tubería o manguera con dispositivos de distribución. Una vez finalizado el proceso de infiltración, se pueden retirar del vertedero.

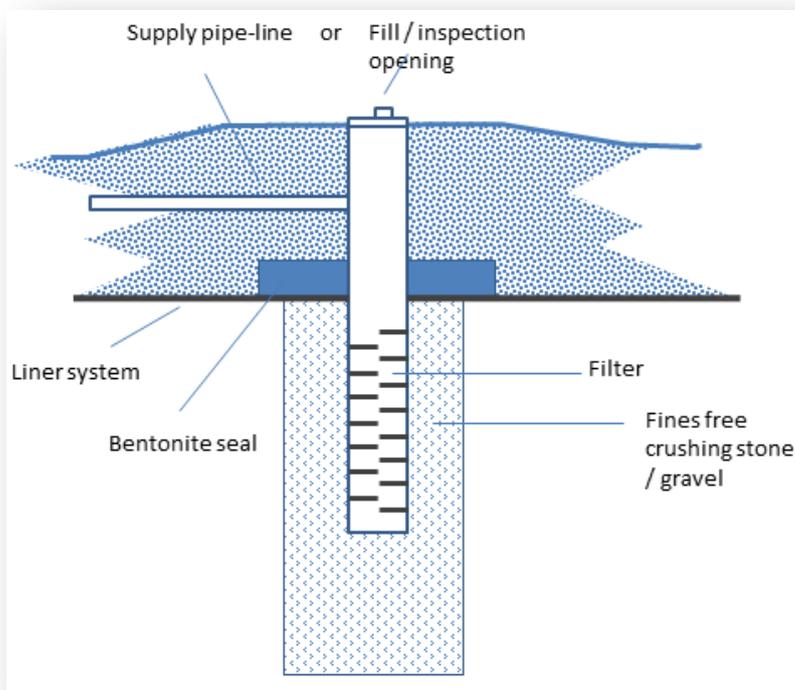
GRÁFICO 5-3. LANZAS VERTICALES POCO PROFUNDAS (ESTRUCTURAS A MODO DE «PICAS», INTRODUCIDAS EN LOS RESIDUOS)



Es posible utilizar *pozos verticales* para llevar a cabo la infiltración. Puede tratarse de pozos de captación de gas ya existentes, adaptados en este caso para la infiltración. Para obtener una infiltración de lixiviados homogénea, se requiere, no obstante, una densidad de pozos más elevada que en el caso de la extracción del gas. Para llevar a cabo la infiltración de lixiviados es necesario que los pozos estén situados a una distancia entre sí de entre 15 y 35 metros, mientras que los pozos de captación de gas normalmente se encuentran a una distancia de entre 50 y 70 metros. Así pues, para el proceso de infiltración se necesitan también pozos adicionales, diseñados de forma específica. Los pozos de infiltración tienen una altura que oscila entre los 5 m y los 15 m y un diámetro de entre 1 m y 2 m. Pueden estar rellenos con grava gruesa o con materiales procesados procedentes de la construcción y de demoliciones (gráfico 5.4). El agua puede suministrarse a los pozos a través de tuberías instaladas en la cobertura de superficie o en la capa de residuos superior. En comparación con las lanzas verticales, estos pozos pueden alimentarse con volúmenes más elevados por ciclo de

infiltración, ya que disponen de un mayor volumen de poros en la columna. Un punto débil de los pozos verticales es su peso, cuando se llenan, por ejemplo, con grava. Cuando se añaden los lixiviados y se intensifica la biodegradación debajo del pozo, el pozo podría hundirse en los residuos como consecuencia de su peso.

GRÁFICO 5-4. UN POZO DE INFILTRACIÓN VERTICAL



No hay ninguna pauta clara sobre qué sistema es mejor en cada situación. Solo en aquellos casos en los que la superficie ya está impermeabilizada, puede ser preferible utilizar pozos verticales, ya que los daños que se producen a la cobertura de impermeabilización son mucho menores en comparación con los drenajes horizontales de los campos de infiltración.

Recomendaciones operativas

La información cuantitativa sobre la *cantidad de lixiviados* que es necesario infiltrar es escasa o poco significativa. Parece lógico pensar que la infiltración adicional debe ser significativa en comparación con la infiltración natural que se produce durante el periodo de tiempo en el

que el vertedero no está impermeabilizado. Así, pues, la cantidad de lixiviados que deben infiltrarse debe ser de entre 300 mm y 1500 mm por año ($0,3 \text{ m}$ a $1,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$).

La infiltración puede llevarse a cabo de forma *continua o discontinua* (por ejemplo, pueden añadirse pequeñas cantidades de agua, 24 horas al día, o bien cantidades superiores durante, por ejemplo, una hora al día). Cuando el sistema de infiltración tiene una cierta capacidad para soportar el agua (por ejemplo, en el caso de los campos de infiltración), una infiltración discontinua se traducirá en una filtración semi-continua de agua en los residuos. El modo operativo discontinuo podría ser, pues, una mejor opción para obtener una infiltración homogénea. Por ejemplo, si se alimenta un sistema horizontal con pequeñas cantidades de agua, 24 horas al día, puede que gran parte del agua se infiltre en los primeros metros del sistema. Si, por el contrario, se añade agua a un ritmo superior, se llenará todo el sistema y el agua podrá escurrirse en todo el sistema de infiltración.

En la infiltración, puede utilizarse tanto *agua superficial limpia (dulce, no salobre o salada) como lixiviados*. La infiltración de lixiviados presenta determinadas ventajas respecto a la infiltración de agua limpia:

- Costes menores. Incluso si es posible utilizar el agua superficial sin coste alguno, el uso de los lixiviados conlleva una reducción en los costes de su tratamiento. Si se añade más agua al vertedero, en la mayoría de casos aumentará la producción de lixiviados y, en consecuencia, también se incrementarán los costes derivados de su tratamiento. Como excepción, hay que destacar que en los climas áridos es posible aportar cantidades considerables de agua hasta alcanzar la generación adicional de lixiviados. Por contra, los costes del agua en las regiones áridas pueden ser también mucho más elevados. Debe prestarse una atención especial a la concentración de sustancias inhibidoras, tales como el amonio o las sales. En caso de que estas tiendan a acumularse, será necesario tratar previamente los lixiviados antes de proceder a su recirculación.
- Composición. Los lixiviados procedentes de partes del vertedero en las que la biodegradación está consolidada poseen una mayor capacidad de regulación y pueden mejorar el pH en aquellas zonas en las que se ha producido una acidificación de los residuos y, en consecuencia, una disminución de la biodegradación. Los lixiviados también contienen nutrientes esenciales para el proceso de biodegradación.

Por otro lado, si los lixiviados tienen un pH ácido (inferior a 6) o están contaminados (por ejemplo, $\text{Nkj} > 3000 \text{ mg.l}^{-1}$; Ca y $\text{Mg} > 1000\text{-}2000 \text{ mg.l}^{-1}$) se frena la infiltración, como consecuencia de la posible inhibición de la biodegradación o de la posible precipitación de los carbonatos y la posterior acumulación del sistema de infiltración.

Los efectos de la infiltración sobre el medio ambiente deben supervisarse de forma estricta. Es necesario inspeccionar y controlar con frecuencia el vertedero, especialmente en lo que se respecta a:

- Los indicadores de un aumento en la generación de gases (presencia de grietas y fisuras en la cobertura del vertedero, malos olores, daños en la vegetación).
- Carga hidráulica en el revestimiento inferior. Si se observa un aumento en la carga hidráulica, es necesario emprender acciones para minimizarla (reducir la infiltración, aumentar el drenaje).
- Drenar el agua de infiltración a la superficie o a los laterales del vertedero puede provocar la contaminación de las aguas de escorrentía del vertedero.

5.2 Vertederos biorreactores

Un vertedero biorreactor (también denominado como celda húmeda) es un vertedero en el que los procesos físicos y biológicos están controlados en gran parte. Los residuos se vierten en una celda, que permanece abierta durante un periodo de tiempo limitado (normalmente de 6 a 12 meses). Tras su cierre, se intensifica el proceso de biodegradación a través de la recirculación intensiva de lixiviados. Mediante este proceso, se espera obtener la conversión completa del material biogénico a biogás en un periodo de 3 a 8 años. El biogás generado puede recuperarse utilizando, por ejemplo, un sistema de recuperación de gas situado justo debajo de la capa de impermeabilización superficial del vertedero. Una vez se ha producido la biodegradación completa de los residuos, estos pueden lavarse con agua limpia para eliminar los contaminantes residuales.

Las ventajas de un vertedero biorreactor en contraste con los tradicionales son:

- Emisiones de metano bajas o insignificantes.
- Óptima recuperación de los gases de vertedero, elevada conversión de los residuos en energía.
- Disminución drástica del potencial de contaminación de las aguas subterráneas y del suelo. En algunos casos, incluso puede plantearse la opción de reutilizar los residuos (tras un tratamiento mecánico, si es necesario, para, por ejemplo, eliminar impurezas visuales, como en el caso de los plásticos). Esto podría considerarse, por ejemplo, para la reconstrucción paisajística de las minas abiertas.
- En caso de que la reutilización de los residuos no sea viable, estos pueden permanecer depositados. Gracias a su bajo potencial contaminante, es posible simplificar de forma significativa las características del revestimiento y el tratamiento posterior.

El tratamiento de residuos en reactores biológicos es más caro que su vertido. Los costes adicionales derivados de este proceso no quedan justificados en base a la reducción en las emisiones de metano obtenida. No obstante, los beneficios derivados de su bajo potencial de contaminación del suelo y de las aguas subterráneas, las diferentes posibilidades de reutilización de los materiales tratados y un mantenimiento post-clausura menos complejo son factores más importantes en el caso de los vertederos biorreactores. Las recomendaciones operativas se describen en el documento «State-of-the-art practices and implementation recommendations for non-hazardous waste management in bioreactor landfills» (FNADE/ADEME, 2007)

<http://www.sustainablelandfillfoundation.eu/documenten/Working%20group%20bioreactor/FNADE%20Bioreactor%20landfill%20guideline.pdf>.

5.3 Vertederos aeróbicos

Los gases de vertedero se generan cuando el material biogénico presente en los residuos se degrada en condiciones anaeróbicas (en ausencia de oxígeno). En presencia de oxígeno (condiciones aeróbicas), los residuos se degradan mediante un proceso de compostaje, sin generar gases de vertedero y emitiendo solo dióxido de carbono. En los últimos años se está prestando una especial atención a la inyección de aire y la consecuente estabilización aeróbica.

Ventajas

- Algunas de las ventajas de la inyección de aire, son:
- Estabilización más rápida y completa de los residuos. El proceso de degradación en los vertederos aeróbicos es más rápido que el observado en la infiltración de lixiviados, por lo que también se obtiene de forma más rápida un mayor espacio y se pueden admitir nuevos residuos en el marco de la autorizaciones existentes.
- Mitigación de las emisiones de metano, ya que en este proceso se elimina la posibilidad de generar metano.
- Reducción de otros problemas ambientales asociados a la generación de gases de vertedero. Disminuyen también los malos olores y se mejora la seguridad.
- Mejora de la calidad de los lixiviados. Gracias a la mejora en la estabilización, se reducen las concentraciones de DBO, DQO y Nkj en los lixiviados. Los metales pesados se inmovilizan en los residuos.
- Reducción de los riesgos ambientales a largo plazo. Existe un menor riesgo de que, en el futuro, una vez finalizada la aireación, aumenten las emisiones al suelo y a las aguas

subterráneas. Es por ello que puede simplificarse el tratamiento posterior (tras realizar una rigurosa evaluación de los riesgos y siempre de acuerdo con el órgano ambiental).

- Reducción general de los costes del vertedero, gracias a la disminución en los costes de tratamiento de los lixiviados, a un mayor espacio para los residuos y a un mantenimiento post-clausura del vertedero menos complejo.

Desventajas y riesgos

El vertido aeróbico de residuos también presenta algunas desventajas:

- Elevado consumo neto de energía. La transformación aeróbica requiere una gran cantidad de aire. La inyección de este aire consume una cantidad elevada de energía. Además, si bien la conversión anaeróbica produce gases de vertedero que pueden recuperarse y aprovecharse, la conversión aeróbica destruye el contenido energético de los residuos. La conversión aeróbica consume cantidades muy elevadas de energía, en especial cuando el vertedero mantiene unas condiciones aeróbicas desde el inicio (véase a continuación). La demanda energética puede disminuirse mediante la aireación a baja presión o una sobreextracción.
- Durante el proceso de conversión aeróbica se produce una cantidad significativa de calor, la cual puede dar lugar incidentes de diversa gravedad, desde quemaduras al tocar las partes calientes de los equipos hasta accidentes derivados de la combustión espontánea de los residuos. Es recomendable, pues, controlar la temperatura con el objetivo de evitar la generación de incendios en el vertedero.
- Los vertederos aeróbicos liberan una gran cantidad de aire caliente que provoca que se eliminen grandes cantidades de humedad de los residuos, de modo que existe el riesgo de que se inhiba la biodegradación. Para evitar este problema, la gran mayoría de vertederos aeróbicos también disponen de un sistema de humidificación.
- La aireación desigual genera asentamientos irregulares o diferenciales que pueden dar lugar a otros problemas, tales como la ruptura de los sistemas de sellado de cubierta o daños a otras instalaciones del vertedero (por ejemplo, en el sistema de recogida de lixiviados).
- Costes más elevados, cuando las ventajas no son suficientes frente a los costes.

Actualmente, la mayoría de proyectos de aireación se desarrollan en los Estados Unidos y en Alemania. Los proyectos en Estados Unidos a menudo están orientados a biodegradar rápidamente los residuos tras su vertido, dejando así espacio para la admisión de nuevos residuos. En Europa (principalmente en Alemania), los proyectos de aireación tienen como objetivo estabilizar de forma completa vertederos antiguos (principalmente). Para estabilizar de forma completa un vertedero se requiere una gran cantidad de oxígeno, por lo que el proceso de aireación precisa una elevada demanda energética. En este proceso también se destruye el potencial energético de los residuos. En Europa, la aireación solo se utiliza en

aque aquellos casos en los que degradación anaeróbica ya ha eliminado entre el 75 % y el 90 % del potencial de generación de metano inicial. En ocasiones, la aireación se considera parte de un enfoque basado en 2 etapas que tiene como objetivo mejorar la estabilización de los vertederos. En la primera etapa, se inyectan lixiviados para optimizar la conversión anaeróbica y la recuperación y aprovechamiento de los gases de vertedero. En la segunda etapa, se completa la biodegradación mediante la aireación de los residuos.

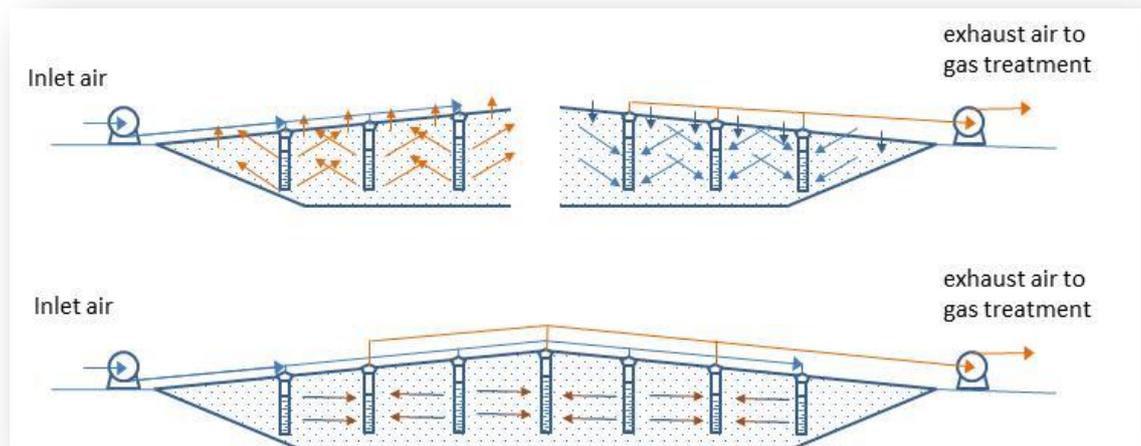
En la mayoría de proyectos, los efectos de la aireación no se controlan de forma rigurosa o bien los resultados obtenidos no se publican. Esta falta de información hace difícil cuantificar en qué grado se cumplen las ventajas y desventajas indicadas anteriormente así como relacionar los resultados con el diseño y funcionamiento de los sistemas de aireación.

La orientación de esta tecnología debe estar enfocada a proyectos muy específicos; por ejemplo: La estabilización acelerada de un vertedero antiguo para, por un lado eliminar riesgos de emisión incontrolada de metano y por otro lado facilitar el desarrollo de proyectos de nuevo uso del emplazamiento como la urbanización de áreas industriales o recreativas.

Sistemas de aireación

Los sistemas de aireación consisten a menudo en pozos verticales mediante los cuales se inyecta aire. Las diferencias principales entre los diferentes sistemas radican en que hay sistemas que se basan únicamente en la inyección de aire, otros en la sobreaspiración (aspiración de aire atmosférico al vaso de vertido) o bien una combinación de inyección y extracción de aire. En este último caso, la dirección del aire infiltrado se modifica a intervalos variables.

GRÁFICO 5-5. TRES SISTEMAS DE AIREACIÓN: IMAGEN SUPERIOR DERECHA, SOBREALPIRACIÓN; IMAGEN SUPERIOR IZQUIERDA, INYECCIÓN DE AIRE; IMAGEN INFERIOR, COMBINACIÓN DE INYECCIÓN Y EXTRACCIÓN DE AIRE. AIRE INYECTADO EN COLOR AZUL; AIRE DE ESCAPE, EN MARRÓN.



En los sistemas de *sobreaspiración*, los residuos se airean con la extracción de grandes cantidades de gas de los pozos de gas convencionales mediante un incremento de la depresión. En esta técnica, el aire atmosférico es aspirado hacia los residuos, ya sea a través de la superficie del vertedero o bien mediante la entrada pasiva a los pozos. No obstante, la implantación de este método puede verse limitada a emplazamientos con un espesor de 10 m o inferior, ya que, a una menor profundidad, puede que no sea posible garantizar una rápida aireación de los residuos. La sobreaspiración presenta una ventaja sobre la inyección activa de aire. Esta ventaja radica en que es posible tratar los gases procedentes de los residuos, por ejemplo en un filtro de oxidación de metano, para eliminar el olor y parte del metano sin que sea necesario un sistema de extracción.

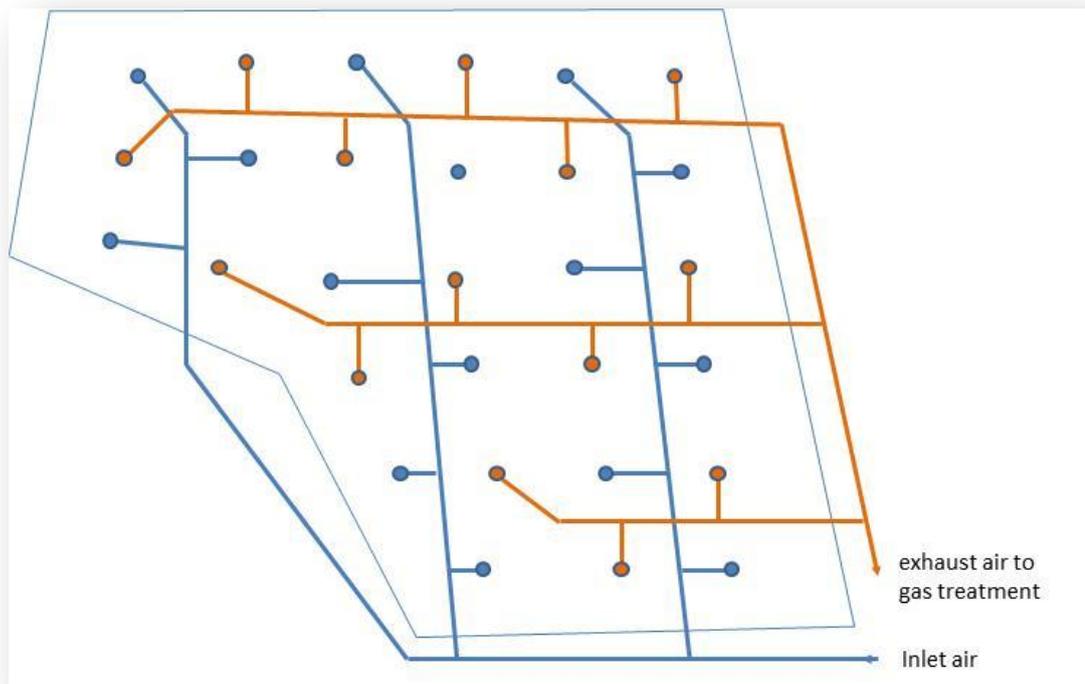
Un sistema de sobreaspiración puede basarse en el sistema de recuperación de gases ya existente y en el uso de los pozos de captación, el sistema de captación y la soplante ya disponibles. No obstante, en muchos casos la aireación de los residuos puede precisar una mayor densidad de pozos, una mayor presión de aspiración en los pozos y una cantidad considerablemente mayor de gas aspirado, de peor calidad, que en el caso del sistema de recuperación de gases de vertedero. Por lo tanto, puede ser necesario introducir modificaciones significativas para poder dar cabida a un sistema de aireación por sobreaspiración.

Inyección activa de aire sin extracción activa: El método más sencillo para la estabilización aeróbica in situ consiste en la utilización de pozos de aireación sin captación controlada de gases de escape. Una variante de este sistema es el proceso BioPuster, que combina aire enriquecido con oxígeno e impulsos de presión de hasta 6 bar para llegar al material biogénico residual presente en los poros. El aire inyectado reacciona con el material biogénico de los residuos y se emite aire de escape a la atmósfera a través de la superficie del vertedero y, en muchas ocasiones, parcialmente también a través de sus grietas y fisuras. Tiene como inconveniente la posible liberación incontrolada a la atmósfera de cantidades residuales de metano y de olores. Esta circunstancia puede resolverse mejorando la capacidad de oxidación de la capa superior del vertedero (véase el apartado 3.8, Oxidación de metano).

Un sistema de inyección activa de aire puede basarse también en un sistema ya existente de recuperación de gases de vertedero.

Inyección y extracción: Sistema que combina el sistema de pozos de captación, a través del cual se aporta aire al vertedero, con la extracción simultánea de los gases residuales contaminados mediante un segundo sistema adyacente a los pozos de captación. Si la concentración de aire extraído permanece superior a la del aire inyectado, se mantiene una depresión constante en el vertedero y se mitigan las emisiones difusas. De vez en cuando, el funcionamiento de los pozos puede modificarse: los pozos de inyección se convierten en pozos de aspiración y viceversa. En la práctica, la frecuencia en la que se produce este cambio puede variar de horas a semanas. Los gases procedentes de residuos, pueden tratarse, por ejemplo, en un filtro de oxidación de metano para reducir así el olor que desprenden y su contenido en metano. El inconveniente de este sistema en comparación con otros sistemas de aireación, es el coste más elevado, ya que hace necesario utilizar sistemas de dos tuberías y dos soplantes.

GRÁFICO 5-6. VISTA EN PLANTA DE UN SISTEMA COMBINADO DE INYECCIÓN DE AIRE-EXTRACCIÓN. AIRE INYECTADO EN COLOR AZUL; AIRE DE ESCAPE, EN MARRÓN. EL FUNCIONAMIENTO DE LOS POZOS CAMBIA PERIÓDICAMENTE: LOS POZOS DE INYECCIÓN HACEN LAS VECES DE POZOS DE EXTRACCIÓN Y VICEVERSA.



Recomendaciones operativas

Han de seguirse de cerca los efectos adversos en el medio ambiente. Se requiere realizar un control e inspección frecuentes del vertedero, con especial atención a los indicios de un aumento de las emisiones (grietas y fisuras en la cobertura, olores, daños en la vegetación).

6

ANÁLISIS COSTE/BENEFICIO

6.1 Eficiencia de la reducción de emisiones de metano

Para poder comparar la rentabilidad de las diferentes opciones destinadas a reducir las emisiones de metano, primeramente ha de determinarse la eficiencia de las mismas. Este es un proceso que debe realizarse teniendo muy presentes las limitaciones de cada opción.

El dióxido de carbono emitido en vertederos tiene su origen en la biomasa. Se conoce como dióxido de carbono de ciclo corto y se considera que no contribuye al calentamiento global. Este principio es, por tanto, aplicable automáticamente al dióxido de carbono formado por la oxidación de metano. Por tanto, y bajo el prisma del calentamiento global, los vertederos únicamente deben tener en cuenta el metano. En casos específicos, y dado su elevado PCM (potencial de calentamiento mundial; en inglés GWP, *global warming potential*), los clorofluorocarburos contribuyen al impacto del vertedero en el calentamiento global. Dado que el metano puede utilizarse para producir energía, resulta especialmente relevante a la hora de evaluar la diferencia en impacto medioambiental entre la combustión en antorcha y el aprovechamiento para fines energéticos. Por este motivo los ejemplos recogidos a continuación se centran en el metano.

Los casos simplificados siguientes no tienen en cuenta que, en la realidad, la capacidad de los motores de gas no está diseñada para alcanzar tasas de recuperación máximas y que esta se maximiza frecuentemente en función de las necesidades de los motores. En otras palabras, en la práctica se recupera menos gas del que se podría. Por otra parte, lo que resulta posible y realista en cuanto a la quema en antorcha no es algo que necesariamente lleven a la práctica las entidades explotadoras de vertederos. Hay que tener presente que maximizar la recuperación y la combustión en antorcha no cuenta con incentivos económicos. Los ejemplos facilitados no tienen por objeto demostrar que la quema en antorcha tenga un menor impacto en el calentamiento global que el aprovechamiento con fines energéticos. Se pretende mostrar que el aprovechamiento con fines energéticos no tiene necesariamente siempre un menor impacto en el calentamiento global. Los ejemplos aportados a continuación permiten aclarar igualmente que la optimización de la recuperación de gases y la destrucción

de metano tienen un mayor efecto en el impacto de calentamiento global que el aprovechamiento con fines energéticos.

Caso 1. Un vertedero determinado genera 100 kg de metano por hora. Dados los requisitos en cuanto a calidad del gas del motor de gas, la recuperación no puede ser superior al 50 %, esto es, 50 kg de metano por hora. La geometría del vertedero y las propiedades de la cobertura del suelo (sistema de sellado) permiten la oxidación de 15 kg de metano por hora. En este caso, las emisiones resultantes de metano en el vertedero son de 35 kg por hora u 875 kg de dióxido de carbono equivalente por hora. Si bien un 90 % sería un porcentaje más realista, se considera que el 100 % de los gases recuperados puede aprovecharse eficazmente para producir energía. Además, se contempla igualmente que el motor de gas tiene un «slip» o pérdida de metano del 0 %, es decir, 0 kg de metano por hora o 0 kg de dióxido de carbono equivalente. Los 50 kg de metano por hora recuperados tienen un contenido de energía de 50 MJ por kg, lo que representa 2500 MJ por hora. Se asume que el 40 % del contenido de energía o 1000 MJ pueden convertirse en electricidad que sustituya a la energía de la red de suministro eléctrico con un impacto de 0,075 kg de dióxido de carbono equivalente por Mega-julio. Supóngase que el 40 % del contenido de energía o 1000 MJ puede convertirse en calor y sustituir a la energía térmica con un impacto de 0,060 kg de dióxido de carbono equivalente por Mega-julio. El proyecto de aprovechamiento de los gases de vertedero para producir energía permite ahorrar $75 + 60 = 135$ kg de dióxido de carbono equivalente. El impacto en el calentamiento global neto de este emplazamiento concreto es de $875 - 135 = 740$ kg de dióxido de carbono equivalente.

Caso 2. El mismo vertedero abandona el proyecto de aprovechamiento con fines energéticos y opta por quemar los gases en antorcha. Los requisitos en cuanto a calidad de gas de las antorchas son menores en comparación con los de los motores de gas, lo que permite recuperar más gases de menor calidad. Se considera que, en lugar de un 50 %, es posible recuperar un 60 % o 60 kg de metano por hora de una calidad apta para una antorcha de alta temperatura convencional. La geometría del vertedero y las propiedades de la cobertura del suelo son las mismas, esto es, permiten la oxidación de 15 kg de metano por hora. Las emisiones resultantes de metano en el vertedero son en este caso de 25 kg de metano por hora o de 625 kg de dióxido de carbono equivalente por hora. Asumiendo que la antorcha tiene un «slip» o pérdida de metano del 3 %, esto supone un 1,8 kg de metano por hora o

45 kg de dióxido de carbono equivalente. El impacto en el calentamiento global de este vertedero en concreto es de $625 + 45 = 670$ kg de dióxido de carbono equivalente.

Caso 3. En el mismo vertedero, se sustituye la antorcha de alta temperatura convencional por otra de base plana para la combustión de gases de bajo poder calorífico. Se asume que, en lugar de un 60 %, la nueva antorcha permite recuperar un 70 % o 70 kg de metano por hora de una calidad apta para una antorcha de combustión de gases de bajo poder calorífico. La geometría del vertedero y las propiedades de la cobertura del suelo son las mismas, esto es, permiten la oxidación de 15 kg de metano por hora. Las emisiones resultantes de metano en el vertedero son en este caso de 15 kg por hora o 375 kg de dióxido de carbono equivalente por hora. Asumiendo que la antorcha tiene un «slip» o pérdida de metano del 1 %, esto supone 0,6 kg de metano por hora o 15 kg de dióxido de carbono equivalente. El impacto de calentamiento global de este vertedero en concreto es de $375 + 15 = 390$ kg de dióxido de carbono equivalente.

Si se incorpora la rentabilidad (análisis coste/beneficio no solo en el plano económico, sino en el ambiental) a un plan de control de gases de vertedero, ha de profundizarse con mayor detalle de lo aquí indicado en las diferentes opciones de reducción de las emisiones de metano. Deben describirse y explicarse todas las hipótesis de trabajo empleadas para calcular la reducción prevista de las emisiones de metano. El cálculo deberá incluir, entre otros, valores locales de la combinación energética sustituida, valores plausibles en cuanto a las horas anuales de operación de las unidades de recuperación y aprovechamiento y valores igualmente plausibles relativos al «slip» o pérdida de metano.

6.2 Costes o rentabilidad

La rentabilidad en cuanto a reducción de las emisiones de metano puede servir como criterio para determinar si los costes de una medida pueden considerarse «aceptables» o «excesivos». Aunque este concepto puede dar lugar a debate sobre qué costes se consideran aceptables y para quién (véase el siguiente apartado), la evaluación de la rentabilidad resulta generalmente una herramienta útil en las conversaciones entre la entidad explotadora y las autoridades legislativas para implantar una determinada medida en un emplazamiento concreto.

TABLA 6-1. COSTES TÍPICOS DE INVERSIÓN, EXPLOTACIÓN Y GESTIÓN DE LA RECUPERACIÓN Y QUEMA EN ANTORCHA DE GASES

Vertedero típico	20	ha
Recogida y quema en antorcha de gases de vertedero	800	m ³ LFG.h ⁻¹
Costes de inversión típicos	900 000 €	
	45 000 €	por ha
Costes anuales típicos de explotación y gestión	80 000 €	
Consumo anual de electricidad	20 000 €	

Para el medio ambiente, normalmente resulta más positivo maximizar la recuperación de gases y su quema en antorcha; para la entidad explotadora, en ocasiones resulta más provechoso económicamente optar por una menor cantidad de gas pero de mayor calidad con fines de aprovechamiento. Por tanto, el coste-beneficio para la entidad explotadora puede diferir completamente de la rentabilidad en general. En aquellas situaciones en las que las entidades explotadoras no pretendan implantar medidas rentables dada la relación coste-beneficio a nivel local, corresponderá a las autoridades gubernamentales decidir si desean estimular (económicamente) o incluso imponer dichas medidas. En consecuencia, es importante poder calcular la relación coste-eficacia de una medida desde diferentes perspectivas.

6.3 ¿Qué costes son aceptables?

Corresponde al titular del vertedero y a las autoridades competentes definir debidamente qué costes se consideran aceptables en una situación concreta, pues dicha definición depende también de condiciones y consideraciones locales, por ejemplo, la existencia de otros problemas medioambientales en un vertedero concreto. Se indican a continuación algunos criterios posibles:

- **Óptimo económicamente.** El titular del vertedero y, por ejemplo, una empresa productora de energía, analizan las posibilidades que ofrece la recuperación de gases de vertedero. Ambos deciden implantar un sistema que consta, entre otras cosas, de 2 pozos verticales por hectárea (en este caso la cantidad de gas adicional que se prevé captar de un tercer pozo por hectárea no compensa los costes adicionales) y que abre la posibilidad de un proyecto de desgasificación rentable.
- **Costes cero.** La misma situación, pero en este caso las autoridades participan en el proyecto. Estas analizan la reducción adicional de emisiones de metano y solicitan un tercer pozo por hectárea. El resultado es un proyecto de desgasificación menos rentable. Con todo, los beneficios obtenidos del aprovechamiento de los gases superan los costes de recuperación. Por su parte, la reducción de las emisiones de metano es mayor que en el caso anterior.

- Valoración de la reducción de las emisiones de metano: Mismo ejemplo, pero se reconoce la disminución adicional de las emisiones de metano como una de las opciones más económicas para una mayor reducción de las emisiones de GEI en un país. Por tanto, pueden entrar en consideración medidas complementarias destinadas a reducir las emisiones de metano. Un porcentaje de los costes puede ser asumido por terceros distintos del titular del vertedero, por ejemplo mediante la concesión de subvenciones gubernamentales a la inversión o a través de la venta de una parte de la disminución de las emisiones de metano como «créditos de carbono».
- Otras razones. El mismo ejemplo, pero el vertedero presenta graves problemas de olores en los alrededores. Un examen más profundo revela que gran parte de los olores provienen del talud de una zona del vertedero recientemente clausurada. Para corregir el problema de olores, se considera instalar pozos de captación adicionales, que no resultan eficientes en términos de costes desde el prisma del potencial de producción de energía o del valor de la reducción de las emisiones de metano.

6.4 Cuantificación de costes y rentabilidad

La evaluación de la rentabilidad puede realizarse sobre la base del primer diseño de una medida y de una evaluación de costes (costes de inversión y explotación, posibles ingresos por año) y de los efectos (reducción de emisiones anuales en kg). La relación entre costes y efectos es la rentabilidad en € por kg de CH₄ mitigado o € por tonelada de CO₂ equivalente evitado.

En lo que respecta a las emisiones de un vertedero, los efectos y los posibles ingresos obtenidos con una medida no son constantes a lo largo del tiempo; en la mayoría de ocasiones, disminuyen con el transcurso del mismo. En tal caso, ha de evaluarse el promedio de costes y efectos a largo plazo (por ejemplo, la vida útil técnica prevista de una medida). Por esta razón, la evaluación de los costes debe realizarse calculando el valor presente neto de la totalidad de costes e ingresos durante el periodo operativo de un proyecto, incluyendo la amortización de los equipos. Por motivos de simplicidad, los ejemplos descritos a continuación no siguen este criterio. Así, los ejemplos facilitados deben considerarse meramente indicativos.

A fin de responder a la pregunta de qué costes de la reducción de emisiones pueden considerarse «aceptables», la reducción de las emisiones de metano se expresa como la reducción de las emisiones de CO₂ equivalente, asumiendo que 1 kg de metano es igual a 21

kg de CO₂ equivalente ⁷). La información sobre los costes aceptables de la reducción de emisiones de dióxido de carbono o CO₂ equivalente es fácil de conseguir; por ejemplo:

- En Europa, las emisiones de dióxido de carbono de la industria se han comercializado en los últimos años a unos precios que han descendido de entre 10 € y 13 € por tonelada de CO₂ equivalente en 2010 a entre 3 € y 4 € por tonelada de CO₂ equivalente en 2014. Puede consultarse la información más reciente en las siguientes fuentes:
- http://www.wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/2014/05/27/000456286_20140527095323/Rendered/PDF/882840AR0Carbo040Box385232B00OU0090.pdf
- <http://www.carbonbrief.org/blog/2014/05/the-state-of-carbon-pricing-around-the-world-in-46-carbon-markets/>
- <http://financial.thomsonreuters.com/en/resources/articles/point-carbon.html>.
- Las empresas y particulares tienen la posibilidad de compensar las emisiones de dióxido de carbono (por ejemplo originadas en sus viajes) adquiriendo Reducciones Certificadas de Emisiones o RCE (una compensación de emisiones de carbono). Si bien el principio de compensación ha sido puesto en tela de juicio, sus precios permiten interpretar lo que las empresas y particulares están dispuestos a pagar por la reducción de las emisiones de CO₂. En su momento (2010), las RCE de patrón oro se vendían a aproximadamente 10 € por tonelada de CO₂ equivalente.

La Comisión Europea ha optado por abordar la reducción de los GEI mediante instrumentos de mercado. Con esta finalidad se ha instaurado el régimen europeo de comercio de derechos de emisión. La industria de gestión de residuos no está incluida en este régimen de comercio europeo. Por tanto, carece de un «techo de emisión» o de objetivos de reducción cuantificados. A diferencia del sector de fabricación de productos básicos, la industria de gestión de residuos no puede elegir sus insumos basándose en la producción de gases de efecto invernadero. Está obligada a tratar los residuos que genera la sociedad. Sin embargo, la industria europea de gestión de residuos sí está incluida en el denominado «esfuerzo compartido». En virtud del mismo, debe contribuir (con un coste) a la reducción de las emisiones de GEI. Ante esta situación, es lógico que la industria de la gestión de residuos se mantenga al tanto de lo que sucede en el mercado de comercialización de las unidades de

⁷ Este factor de conversión se basa en el potencial de calentamiento mundial (PCM) del metano; los efectos indirectos están incluidos e integrados en un periodo de 100 años. El PCM de 25 lo facilita el IPCC en su Cuarto Informe de Evaluación de 2007 y es un índice generalmente aceptado como factor de conversión de las emisiones de metano. No obstante, el antiguo índice PCM de 21 se sigue aplicando para el comercio de emisiones de carbono. Es por ello que se hace uso de este índice en los ejemplos.

reducción de emisiones de GEI para adoptar decisiones sobre la rentabilidad de las medidas de reducción de emisiones de metano en vertederos.

En base a la información actual (marzo de 2015) sobre comercialización de unidades de reducción de emisiones de GEI, las entidades explotadoras y las autoridades competentes pueden optar por considerar «aceptables» las medidas con una relación coste-beneficio inferior, por ejemplo, a 5 € por tonelada de CO₂ equivalente y estimar «excesivas» aquellas en las que esta relación supere los 15 € por tonelada de CO₂ equivalente. Esto reduce el abanico de medidas objeto de debate a aquellas cuyos costes se sitúan entre 5 € y 15 € por tonelada de CO₂ equivalente. No obstante, esta cuestión está sujeta a los cambios de mercado. No es improbable que dentro de algunos años lleguen a considerarse aceptables costes mayores.

Procede señalar que la Directiva relativa al vertido de residuos requiere la recuperación de gases de vertedero. Uno de los requisitos para el comercio de emisiones de carbono es el denominado «criterio de adicionalidad». El «criterio de adicionalidad» significa que la medida de reducción debe ser adicional y no venir ya impuesta por las disposiciones reglamentarias en vigor. Tras la plena aplicación de la Directiva relativa al vertido de residuos, los proyectos europeos de recuperación de gases de vertedero han dejado de cumplir el «criterio de adicionalidad», y ya no es posible el comercio de emisiones de carbono en los proyectos de recuperación de gases de vertedero.

En la decisión final sobre la puesta en práctica de determinada medida entran en juego otra serie de factores, por ejemplo, los malos olores, la posible migración de los gases y la situación económica de la propia entidad explotadora.

TABLA 6-2. EFECTOS Y VALOR DE LA RECUPERACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE GASES DE VERTEDERO

Generación de gases de vertedero	120	m ³ por tonelada de residuos	
Recuperación de gases de vertedero	48	m ³ por tonelada de residuos	Considerando una eficiencia de recuperación del 40 % [1]
Aprovechamiento de los gases de vertedero	32	m ³ por tonelada de residuos	Considerando un aprovechamiento del 67 % de los gases de vertedero recuperados
Mitigación de metano	17	kg por tonelada de residuos	Considerando un contenido de metano del 50 % en los gases de vertedero
Generación de electricidad	58	kWh por tonelada de residuos	Considerando 1,8 kWh por m ³ de gases de vertedero aprovechados
Reducción del dióxido de carbono			
- por recuperación de metano	360	kg de CO ₂ equivalente por tonelada de residuos	Considerando un PCM del metano de 21
- por aprovechamiento de gases de vertedero	32	m ₂ por tonelada de residuos	Considerando 1 kg de CO ₂ por m ³ de gases de vertedero aprovechados
Valor			
- de recuperación de metano	3,6-5,4	€ por tonelada de residuos	Considerando 10-15 € por tonelada de CO ₂ equivalente
- de aprovechamiento de gases de vertedero	0,36-3,6	€ por tonelada de residuos	Considerando 0,01-0,10 € por m ³ aprovechado

[1] En general, un 40 % parece un porcentaje bajo; no obstante, se considera que cuando se depositan materiales fácilmente degradables, una parte significativa de estos se descompone antes de que se inicie la recuperación, lo que reduce la eficiencia durante el ciclo de vida total. Véanse los apartados 2.1 y 2.3 donde se mencionan eficiencias incluso menores y superiores.

6.5 Algunos ejemplos de costes y rentabilidad

Ejemplo 1: monetización del beneficio ambiental de la recuperación

Nota: Un cálculo integral de la rentabilidad considera tanto los beneficios como los costes (de inversión y explotación). Este primer ejemplo ilustra la parte que corresponde a los beneficios. También aclara de qué manera pueden cuantificarse los beneficios en términos de emisiones de dióxido de carbono y muestra las tensiones entre estos beneficios y la relación económica coste-beneficio a nivel local.

La tabla 6.2 recoge un cálculo de ejemplo de la reducción de las emisiones de GEI y del valor de la recuperación y el aprovechamiento de los gases de vertedero. Los cálculos parten de la estimación de un potencial de generación de gases de vertedero de 120 m³ por tonelada de residuos. Partiendo de algunos supuestos, se calculan las emisiones de metano evitadas y la

electricidad producida. La reducción de las emisiones de metano y la producción de electricidad pueden compararse en referencia a su impacto medioambiental y valor (para el titular del vertedero o para la sociedad).

Una conclusión importante que puede extraerse de esta tabla es que, desde una perspectiva de reducción de GEI, es mucho más importante evitar las emisiones de metano que aprovechar el potencial energético de los gases de vertedero. Así, puede resultar mejor recuperar una mayor cantidad de gases de baja calidad (bajo contenido de metano) y proceder a su combustión en antorcha que recuperar una menor cantidad de gases de calidad suficiente con fines de aprovechamiento. Es esos casos, se extraen más gases con menor contenido de metano y se aprovechan menos, aunque ello puede traducirse al final en mayores reducciones de las emisiones de dióxido de carbono y también en un mayor «valor» (véase la tabla 6.3). Dado que el aprovechamiento conlleva normalmente una ventaja económica para la entidad explotadora, es frecuente que existan tensiones entre estos dos criterios (producción de energía y reducción de emisiones).

TABLA 6-3. EFECTOS Y VALOR DE LA RECUPERACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE GASES DE VERTEDERO - RECUPERACIÓN MÁXIMA

Generación de gases de vertedero	120	m ³ por tonelada de residuos			
Recuperación de gases de vertedero	78	m ³ por tonelada de residuos			Considerando una eficiencia de recuperación del 65 %
Aprovechamiento de los gases de vertedero	26	m ³ por tonelada de residuos			Considerando un aprovechamiento del 33 % de los gases de vertedero recuperados
Mitigación de metano	22	kg por tonelada de residuos			Considerando un contenido de metano del 40 % en los gases de vertedero [1]
Generación de electricidad	46	kWh por tonelada de residuos			Considerando 1,8 kWh por m ³ de gases de vertedero aprovechados
Reducción del dióxido de carbono					
- por recuperación de metano	468	kg CO ₂ equivalente por tonelada de residuos			Considerando un PCM del metano de 21
- por aprovechamiento de gases de vertedero	26	m ₂ por tonelada de residuos			Considerando 1 kg de CO ₂ por m ³ de gases de vertedero aprovechados
Valor					
- de recuperación del metano	4,7-7,0	€ por tonelada de residuos			Considerando entre 10 € y 15 € por tonelada de CO ₂ equivalente
- de aprovechamiento de gases de vertedero	0,26-2,6	€ por tonelada de residuos			Considerando entre 0,01 € y 0,10 € por m ³ aprovechado

[1] Este 40 % es un promedio estimado entre altos valores durante el periodo en que la producción de gas es elevada y bajos valores en el periodo en que se produce menos gas y la explotación tiene por

objeto la máxima recuperación (con bajas concentraciones de metano) en lugar de una menor recuperación combinada con aprovechamiento.

Ejemplo 2: coste-beneficio de la mejora del sistema de recuperación

Nota: Este ejemplo se limita a los costes y beneficios económicos a nivel local. Un análisis integral de la rentabilidad tiene en cuenta también los beneficios en otros ámbitos.

Los gases recuperados en el vertedero están por debajo de lo previsto. Estudios más pormenorizados revelan una limitación de la depresión en los pozos del talud suroeste del vertedero a causa de la intrusión de aire. Por otra parte, las mediciones cualitativas de las emisiones indican altas concentraciones de metano cerca de esta parte. Se prevé que tres pozos de gas poco profundos adicionales en las proximidades de este talud produzcan 50 m³ extra de gases de vertedero por hora, que irán descendiendo gradualmente hasta 25 m³ en un periodo de 5 años. Existe una capacidad de aprovechamiento adicional, por tanto pueden aprovecharse los gases adicionales recuperados, lo que supone 0,05 € por kWh o 0,09 € por m³ de gases recuperados. La inversión en tres pozos, incluyendo la acometida a la red de captación, se estima en 20.000 €.

Los costes anuales pueden calcularse como la diferencia entre los costes de inversión y los beneficios por la venta adicional de electricidad. Los costes de inversión alcanzan, según estimaciones aproximadas, los 4.000 € anuales (inversión total de 20.000 € dividida entre 5 años). Los beneficios superan los 25 000 € anuales (una media de 37,5 m³ por hora x 7.500 horas al año x 0,09 € por m³). Véanse los ejemplos 3 y 4 para obtener una visión más precisa que toma en consideración también los intereses.

La situación mostrada es claramente rentable y no requiere mayor debate.

Ejemplo 3: coste-beneficio de la mejora del sistema de recuperación, teniendo en cuenta que se prevé un descenso en la generación de gases

Nota: Al igual que el anterior, el presente ejemplo se limita a los costes y beneficios económicos a nivel local. No obstante, la situación es más compleja debido a una menor generación de gases que, además, se prevé que descienda.

Como en el ejemplo 2, se ha estimado que la generación adicional de gases es de solo 20 m³ por hora y se reducirá a 5 m³ por hora en un periodo de 5 años. Existe una capacidad de aprovechamiento adicional, por tanto pueden aprovecharse los gases adicionales

recuperados, lo que supone 0,05 € por kWh o 0,09 € por m³ de gases recuperados. La inversión en tres pozos, incluyendo la acometida a la red de captación, se estima en 20 000 €. En este caso, el resultado de la evaluación es menos positiva; los costes anuales pueden calcularse con mayor precisión para llegar a una conclusión definitiva. Por ejemplo, pueden incluirse los costes de financiación en los costes anuales considerando unos intereses del 10 %.

También se puede asumir una amortización a 5 años y una anualidad del 26 %. Los costes anuales alcanzan por tanto los 5.200 € (26 % de 20.000 €). Con todo, los beneficios siguen superando los costes. Considerando un aprovechamiento medio adicional de 12,5 m³ por hora durante 7.500 horas al año que reportan 0,09 € por m³, los beneficios ascienden a 8.400 € anuales.

Ejemplo 4: coste-beneficio de la mejora del sistema de recuperación, teniendo en cuenta los beneficios para el medio ambiente

Nota: Se parte de un caso comparable al de los ejemplos 2 y 3; además de la relación coste-beneficio a nivel local, se tienen en cuenta los beneficios para el medio ambiente. Para ello se combinan varios de los ejemplos anteriores.

La situación es la misma que en el ejemplo 2. Sin embargo, no se dispone de mayor capacidad de aprovechamiento, por lo que el gas adicional recuperado ha de quemarse en antorcha. Los costes anuales deben calcularse con mayor precisión, teniendo en cuenta los costes de financiación (por ejemplo, intereses del 10 %). Los costes anuales se cifran en 5.200 € y no se compensan con los beneficios dado que el metano adicional recuperado va a quemarse en antorcha.

La reducción anual total de las emisiones de metano (presuponiendo 8.400 horas de operación, una media de 37,5 m³ por hora, un contenido de metano en volumen del 50 % y una densidad de 0,72 kg.m⁻³) es de 110 toneladas. Considerando un PCM del metano del 21, esto supone 2.300 toneladas de CO₂ equivalente. La rentabilidad se sitúa en 2,30 € por tonelada de CO₂ equivalente (coste anuales de 5.200 € divididos entre la reducción de emisiones anual de 2.300 toneladas de CO₂ equivalente); puede considerarse baja si se compara con los costes de reducción de emisiones de CO₂ aceptados en otros casos. Por tanto, es evidente que se trata de una medida para estudiar detenidamente.

En esta situación, y atendiendo a la relación coste-beneficio a nivel local, una entidad explotadora podría dudar en realizar la inversión. No obstante, cuando se tiene en cuenta el beneficio para el medio ambiente, la rentabilidad de la inversión no ofrece ninguna duda.

Ejemplo 5: coste-beneficio de la mejora del sistema de recuperación, teniendo en cuenta los beneficios para el medio ambiente y el descenso previsto de la generación de gases

Nota: La combinación de los ejemplos 3 y 4 genera una situación en la que la rentabilidad de una medida es cuestionable.

Este ejemplo es similar a la situación 4, pero considera las cantidades de gas de vertedero a recuperar del ejemplo 3. De igual manera, en este ejemplo no se contempla un aprovechamiento adicional. Los costes anuales ascienden a 5.200 €. Como en el ejemplo precedente, estos costes no se compensan con los beneficios a nivel local dado que el metano adicional recuperado va a quemarse en antorcha.

La reducción anual de las emisiones de metano (presuponiendo 8.400 horas de operación, una media de 12,5 m³ por hora, un contenido de metano en volumen del 50 % y una densidad de 0.72 kg.m⁻³) es de 37 toneladas. Considerando un PCM del metano del 21, esto supone 750 toneladas de CO₂ equivalente. La rentabilidad se sitúa en 6,90 € por tonelada de CO₂ equivalente (costes anuales de 5.200 € divididos entre la reducción anual de emisiones de 750 toneladas de CO₂ equivalente), en la «zona gris» entre los 5 € y los 15 € por tonelada de CO₂ equivalente.

Además del hecho de que los beneficios no compensan los costes a nivel local, la rentabilidad general queda también en entredicho. La opinión local sobre el nivel de costes considerado aceptable resulta relevante. Además, las condiciones locales (por ejemplo, los malos olores u otras medidas medioambientales a llevar a cabo con mayor prioridad en el emplazamiento) pueden determinar la conveniencia de poner en práctica esta medida.

Ejemplo 6

Una nueva sección de un vertedero se va a llenar con residuos mayormente inorgánicos. El potencial de metano es tan bajo que, de media, la generación de gases será inferior a 10 m³/h. Se prevé poder recuperar una media de 5 m³/h. La calidad del gas es tan baja que no puede aprovecharse y debe quemarse en antorcha. Se estima una inversión de 20.000 € por hectárea. La financiación está incluida en el cálculo de los costes anuales y se calcula que

alcanza los 5.200 € anuales (amortización a 5 años, anualidad del 26 %). La reducción total anual de las emisiones de metano se calcula en 220 toneladas de CO₂ equivalente (5 m³ por hora de gases de vertedero, 8.400 horas de operación al año, contenido de metano del 35 % en volumen con una densidad de 0,72 kg.m⁻³ y un PCM de 21). La rentabilidad se sitúa en 23,60 € por tonelada de CO₂ equivalente, superior al umbral de 15 € por tonelada de CO₂ equivalente. Las condiciones locales (por ejemplo, los malos olores, otras medidas a llevar a cabo con mayor prioridad en el emplazamiento) determinan la conveniencia de poner en práctica esta medida.

7

Anexos

ANEXO 1: DOCUMENTOS DE ORIENTACIÓN E INFORMACIÓN GRATUITA DISPONIBLES EN LÍNEA (A PARTIR DEL AÑO 2015)

Enlaces disponibles a partir de abril de 2015. Estos enlaces pueden no estar disponibles tras un cierto periodo de tiempo. De ser así, utilice un motor de búsqueda para localizar los documentos o modelos.

- Afvalzorg (2010) Modelo de etapas múltiples de Afvalzorg para estimar la generación y las emisiones de gases de vertedero, <http://afvalzorg.nl/EN/Landfill-sites/Emissions-management/Methane-emissions.aspx>
- Afvalzorg (2011) Modelo simple de Afvalzorg para estimar la generación y las emisiones de gases de vertedero, <http://afvalzorg.nl/EN/Landfill-sites/Emissions-management/Methane-emissions.aspx>
- CALMIM (2011) California Landfill Methane Inventory Model, <http://calmim.lmem.us/> y <http://www.ars.usda.gov/services/software/download.htm?softwareid=300>
- Agencia del Medio Ambiente de Inglaterra y Gales, RU (2004) TGN 03 Guidance on the management of landfill gas, <https://www.gov.uk/government/collections/environmental-permitting-landfill-sector-technical-guidance#landfill-gas>
- Agencia del Medio Ambiente de Inglaterra y Gales, RU, (2011) TGN 04 Guidance on monitoring trace components in landfill gas (versión 2, actualizada en marzo de 2011), <https://www.gov.uk/government/collections/environmental-permitting-landfill-sector-technical-guidance#landfill-gas>
- Agencia del Medio Ambiente de Inglaterra y Gales, RU, (2011) TGN 05 Guidance on monitoring trace components in landfill gas (versión 2, actualizada en marzo de 2011), <https://www.gov.uk/government/collections/environmental-permitting-landfill-sector-technical-guidance#landfill-gas>
- Agencia del Medio Ambiente de Inglaterra y Gales, RU, (2011) TGN 06 Guidance on monitoring trace components in landfill gas (versión 2, actualizada en marzo de 2011), <https://www.gov.uk/government/collections/environmental-permitting-landfill-sector-technical-guidance#landfill-gas>
- Agencia del Medio Ambiente de Inglaterra y Gales, RU, (2011) TGN 07 Guidance on monitoring trace components in landfill gas (versión 2, actualizada en marzo de 2011), <https://www.gov.uk/government/collections/environmental-permitting-landfill-sector-technical-guidance#landfill-gas>
- Agencia del Medio Ambiente de Inglaterra y Gales, RU, (2011) TGN 08 Guidance on monitoring trace components in landfill gas (versión 2, actualizada en marzo de 2011),

<https://www.gov.uk/government/collections/environmental-permitting-landfill-sector-technical-guidance#landfill-gas>

- Agencia del Medio Ambiente de Inglaterra y Gales, RU, (2002) Guidance on landfill gas flaring, <https://www.gov.uk/government/collections/environmental-permitting-landfill-sector-technical-guidance#landfill-gas>
- Comisión Europea (2006) Guía para la implantación del Registro Europeo de Emisiones y Transferencias de Contaminantes, <http://prtr.ec.europa.eu/pgDownloadGuidance.aspx>
- Reglamento (CE) núm. 166/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo, del 18 de enero de 2006, relativo al establecimiento de un Registro Europeo de Emisiones y Transferencias de Contaminantes y por el que se modifican las Directivas 91/689/CEE y 96/61/CE del Consejo [1]
<http://ec.europa.eu/environment/industry/stationary/eper/implementation.htm>
- FNADE/ADEME (2007) State-of-the-art practices and implementation recommendations for non-hazardous waste management in bioreactor landfills, http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/51261_bioreactor.pdf
- GasSim Lite (2010) GasSim 1.5, <http://www.gassim.co.uk/Download.html>
- Gebert, J., Huber-Humer, M., Oonk, H., Scharff, H. (2011) Methane Oxidation Tool explanatory note, <http://afvalzorg.nl/EN/Landfill-sites/Emissions-management/Methane-oxidation.aspx>
- Huber-Humer *et al.* (2008), ÖVA-Leitfäden: Methanoxidationsschichten (en alemán), http://www.altlastenmanagement.at/home/documents/ak_tl/Leitfaden_Methanox%20.docx.pdf
- IFAS-Hamburg & Royal Haskoning (2009) Feasibility study sustainable emission reduction, http://www.sustainablelandfilling.com/webfiles/DuurzaamStortenNL/files/R00001_Final_generic_report.pdf
- IPCC (Pipatti & Svoldal eds.) (2006) Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, Capítulo 3. Eliminación de residuos sólidos, <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>
- IPCC (2006) Modelo de generación de gas, http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/IPCC_Waste_Model.xls
- LAGA (2011) Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 7-3 Methanoxidationsschichten in Oberflächenabdichtungs-systemen, <http://www.laga-online.de/servlet/is/26509/?highlight=bqs>.
- Methane Oxidation Tool calculation model (2011), <http://afvalzorg.nl/EN/Landfill-sites/Emissions-management/Methane-oxidation.aspx>
- Oonk, H. (2010) Revisión bibliográfica: Metano procedente de vertederos: Métodos de cuantificación de la generación, oxidación y emisiones de gases, <http://afvalzorg.nl/EN/Landfill-sites/Emissions-management/Methane-emissions.aspx>
- SenterNovem (2007) Handreiking methaanreductie stortplaatsen (en neerlandés) <http://www.rwsleefomgeving.nl/onderwerpen/broeikasgassen/stortplaatsen/downloads/handreiking/>

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (2005) LandGEM versión 3.02, <http://www.epa.gov/ttn/catc/products.html#software>, ir a Software (Ejecutables y Manuales)
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (2010) LFG Energy Project Development Handbook, <http://www.epa.gov/lmop/publications-tools/handbook.html>
- Banco Mundial (2004) Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean, Energy Management and Assistance Programme, Ref.No. 019399(6), <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/18081>

ANEXO 2: COMPOSICIÓN DE LOS GASES DE VERTEDERO

Pautas del Reino Unido

Gases de vertedero brutos	Valor típico	Máximo observado
	% v/v	% v/v
Metano	63,8	88,0
Dióxido de carbono	33,6	89,3
Oxígeno	0,2	20,9 #
Nitrógeno	2,4	87,0 #
Hidrógeno	0,1	21,1
Vapor de agua (% en peso típico, 25°C)	1,8	4,0

procedente completamente de la atmósfera

Pautas holandesas

Gases de vertedero brutos	Concent media	Desvia estándar
	% v/v	% v/v
Metano	56,9	5,9
Dióxido de carbono	43,1	9,9

Componente traza	Concen mediana	Concen media
Denominación	mg.m ⁻³	mg.m ⁻³
1,1 dicloroetano	13,3	476,2
Clorobenceno	11,9	246,6
1,1,1-tricloroetano	12,9	189,8
Clorodifluorometano	11,6	167,4
Sulfuro de hidrógeno	2,8	134,2

Componente traza	Concentra media	Desvia estándar
Denominación	mg.m ⁻³	mg.m ⁻³
Decano	56,0	44,2
Heptano	13,7	15,0
Hexano	11,1	12,1
Nonano	40,8	17,1
Octano	12,9	9,7

Tetracloroetano	16,6	112,7	Pentano	32,1	45,4
Tolueno	12,0	86,2	Diciclopentadieno	8,9	9,8
Cloroetano	5,2	77,9	Benceno	7,0	7,1
n-butano	13,6	67,4	Butilbenceno	35,2	33,3
Cloroetano	5,6	64,7	Etilbenceno	70,4	40,2
Monóxido de carbono	5,8	63,0	Tolueno	118,0	98,1
Etilbenceno	6,5	37,8	Trimetilbenceno	82,7	77,0
1,2-Diclorotetrafluoroetano	3,2	34,0	Xileno	146,0	120,0
α -pineno	9,3	33,2	Triclorofluorometano (CFC 11)	5,3	6,1
cis-1,2-Dicloroetano	7,7	33,1	Triclorofluorometano (CFC 113)	1,1	0,7
Xileno	4,7	23,9	Triclorofluorometano (CFC 114)	2,2	1,2
Diclorofluorometano	3,5	20,1	Triclorofluorometano (CFC 115)	1,0	1,0
n-hexano	5,0	19,9	Triclorofluorometano (CFC 12)	21,9	16,0
Diclorometano	1,2	19,1	Triclorofluorometano (CFC 21)	6,3	7,2
n-nonano	8,1	19,0	Triclorofluorometano (CFC 22)	12,1	14,9
2-Butanol	5,4	18,7	Cloroetileno	18,0	21,4

1,2 Dicloroetano	1,6	16,5
3-Metil-2-butanona	2,0	13,6

1,2 Dicloroetileno	12,6	8,6
Diclorometano	17,2	25,7
Tetracloroetano	9,8	10,4
Tetraclorometano	0,0003	0,0004
1,1,1-tricloroetano	1,9	3,5
Tricloroetano	8,6	11,1
Triclorometano	0,9	1,9
Cloroetano (cloruro de vinilo)	9,6	7,4
Disulfuro de carbono	3,8	3
Metilmercaptano	13	13
Sulfuro de hidrógeno	97,7	69,2

ANEXO 3: GLOSARIO

<i>Aeróbico</i>	En presencia de oxígeno.
<i>Anaeróbico</i>	En ausencia incluso de trazas de oxígeno.
<i>Antorcha de llama abierta</i>	Antorcha en la que la combustión se produce en una atmósfera abierta, fuera de la geometría física de la antorcha. A menudo se utiliza como antorcha de emergencia.
<i>Antorcha de llama oculta</i>	Antorcha en la que la combustión se produce en un compartimento cerrado, dentro de la geometría física de la antorcha. Este sistema permite controlar, en cierta medida, las condiciones de la llama. También se la denomina antorcha de alta temperatura o antorcha de suelo.
<i>Autoridades competentes</i>	Interlocutores del Gobierno con quienes las entidades explotadoras tratan con regularidad, por ejemplo, para obtener y ejecutar las autorizaciones, notificar la información relativa a las emisiones, etc.
<i>Biodegradación</i>	Conversión microbiana del material biogénico presente en los residuos.
<i>Carbono orgánico</i>	Contenido de carbono en el material biogénico de los residuos.
<i>Carbono orgánico degradable (COD)</i>	Fracción de carbono orgánico (véase carbono orgánico) que es biodegradable en las condiciones del vertedero. Los valores de COD se emplean para estimar la cantidad de gases de vertedero que se generan.
<i>Cobertura diaria</i>	capa de reducido espesor de tierra o de un material alternativo que se utiliza para cubrir los residuos recién vertidos al finalizar las

Cobertura o cubierta temporal

operaciones diarias de vertido. La cobertura diaria se utiliza para reducir la presencia molesta de aves y plagas, la dispersión de los residuos, y las emisiones de malos olores.

Cobertura permanente

Cobertura de residuos que se aplica al vertedero cuando no se depositan residuos durante un largo período de tiempo. También hace referencia a la cobertura semipermanente que se aplica tras la fase de explotación, antes de depositar la cobertura final.

Dióxido de carbono (CO₂)

Cobertura final del vertedero, que normalmente se lleva a cabo años después de finalizar la fase de explotación. En función de los requisitos establecidos en la autorización, la cobertura permanente puede estar formada por una combinación de materiales, incluyendo un revestimiento impermeable, una capa mineral de drenaje y una capa de tierra en la parte superior. No obstante, cuando los requisitos estipulados en la autorización son menos estrictos, también es posible utilizar soluciones más permeables.

Principal componente de los gases de vertedero, tras el metano. Cuando el dióxido de carbono proviene de materiales naturales, sus emisiones se consideran parte del ciclo natural de liberación y fijación de CO₂ debidas al crecimiento y descomposición de la flora y la fauna y se consideran nulas por definición (en contraste con las emisiones de dióxido de

<i>Eficiencia de recuperación</i>	<p>carbono procedentes de la incineración de combustibles fósiles).</p> <p>Ratio entre los gases recuperados y los gases generados. Dependiendo de su uso, puede referirse a la ratio entre los gases recuperados y los gases generados en una hora, día o año determinados o a la eficiencia de recuperación global.</p>
<i>Eficiencia de recuperación integral</i>	<p>Ratio entre la recuperación y la generación de gases de vertedero durante el periodo completo en que se generan emisiones en un vertedero.</p>
<i>Estabilización</i>	<p>Proceso de biodegradación. Los residuos estabilizados son aquellos que generan cantidades insignificantes de gas. Los residuos se consideran totalmente estabilizados cuando dejan de generar gases de vertedero.</p>
<i>Gases de vertedero</i>	<p>Gases producidos a partir de la biodegradación de los residuos biogénicos. Están formados principalmente por una mezcla de metano y dióxido de carbono con trazas de componentes volátiles y malolientes.</p>
<i>Lixiviados</i>	<p>Residuo líquido generado en un vertedero, liberado a menudo en la parte inferior de los residuos. En función del tipo y antigüedad de los residuos, los lixiviados contienen un mayor o menor índice de contaminación. Procede de la infiltración de agua de lluvia, humedad contenida en los residuos,</p>

	descomposición de los mismos y procesos de disolución que se dan en la masa de residuos.
Metano (CH₄)	Componente principal del gas de vertedero. Los gases de vertedero pueden utilizarse para producir energía gracias a su contenido en metano. No obstante, también conllevan un riesgo de explosión. El metano es un potente gas de efecto invernadero y sus emisiones generan un gran problema medioambiental.
Metanótrofos	Bacterias que en condiciones aeróbicas pueden convertir el metano en dióxido de carbono y en agua en la capa superior del vertedero.
Pozo de captación	Normalmente se trata de una tubería de polietileno con un extremo perforado, rodeado de grava, que se instala en los residuos para extraer los gases de vertedero.
Recuperación activa de los gases	Proceso de recuperación de los gases en el que se emplea un sistema de aspiración en el pozo de captación mediante un soplante (compresor, <i>booster</i>).
Recuperación pasiva de los gases	Recuperación de los gases que depende de la presión natural generada como consecuencia de la acumulación de residuos. Los gases recuperados pueden tratarse en un sistema de oxidación de metano o en una antorcha especial.
Residuos biogénicos	Residuos de naturaleza biológica, formados por cualquier elemento susceptible de desarrollarse. Pueden encontrarse en residuos en forma de residuos alimentarios o

	de jardín, papel, madera o en textiles como el algodón o la lana.
<i>Sifón</i>	Dispositivo para eliminar el agua del sistema de lixiviados, también denominado con frecuencia «colector del condensado».
<i>Sistema de captación de gases</i>	Combinación de los pozos de captación, el sistema de captación, la soplante y la antorcha.
<i>Sistema de recuperación</i>	Sistema de captación de los gases de vertedero.
<i>Sistema de sellado</i>	Sistema impermeable que se dispone en la parte inferior, en los laterales o en la parte superior de un vertedero para evitar una mayor generación de lixiviados, contaminación del suelo y de las aguas subterráneas y emisiones de gases a la atmósfera. Los sistemas de sellado a menudo están formados por materiales flexibles (por ejemplo, láminas de HDPE) o minerales (arena-bentonita). Con frecuencia se emplea una combinación de ambos.
<i>Soplante</i>	Ventilador, compresor o <i>booster</i> empleado para generar una presión negativa en los pozos y, a continuación, transportar los gases de vertedero a través del sistema de captación a las antorchas en las que serán quemados o bien al sistema de aprovechamiento.
<i>Tipo de residuos</i>	origen de los residuos, por ejemplo, residuos domésticos, de oficina, procedentes de la industria, de la agricultura, del tratamiento

<i>Zona de influencia</i>	de aguas fecales, etc.
	Volumen de residuos que da lugar a los gases de vertedero captados en un pozo.