

Evaluación general de alternativas para la mitigación de emisiones de metano de rellenos sanitarios

En el marco del cumplimiento del presupuesto de emisiones de gases de efecto invernadero asignado al sector salud.

Informe final

Diciembre, 2024

Con la colaboración de:



Tabla de acrónimos

BID	Banco Interamericano de Desarrollo
CAPEX	Inversiones (o Capital Expenditures, en inglés)
CDN	Contribución Determinada a Nivel Nacional
CIF	Corporación Internacional Financiera
CO ₂	Dióxido de carbono (o carbon dioxide, en inglés)
DS	Decreto Supremo
ECLP	Estrategia Climática de Largo Plazo
GEF	Global Environment Facility
GCF	Green Climate Fund
GS	Gold Standard
INGEI	Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero
LMCC	Ley Marco de Cambio Climático
MACC	Curva de Costo Marginal de Abatimiento (Marginal Abatement Cost of Carbon curve, en inglés)
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
Minsal	Ministerio de Salud
MMA	Ministerio del Medio Ambiente
MRV	Monitoreo Reporte y Verificación
NE	Norma de emisión
OPEX	Costos operacionales (o Operating Expenses, en inglés)
PNRS	Programa Nacional de Residuos Sólidos
PSM	Plan Sectorial de Mitigación
RCA	Resolución de Calificación Ambiental
RSD	Residuos sólidos domiciliarios

SCE	Sistema de Compensación de Emisiones
SEM	Monitoreo de las emisiones de superficie (o surface emission modeling, en inglés)
SMA	Superintendencia del Medio Ambiente
SNP	Sistema Nacional de Prospectiva del Ministerio del Medio Ambiente
SUBDERE	Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo
US\$	Dólar de EE. UU. (United States dollar, en inglés)
VAN	Valor Actual Neto
VCS	Verified Carbon Standard

Tabla de Contenidos

Tabla de acrónimos	2
1. Introducción	9
2. Levantamiento y consolidación de información	13
2.1. Generación, captura, valorización y quema de metano de los rellenos sanitarios del país	13
2.1.1. Estimación de emisiones a nivel nacional.....	13
2.1.2. Estimación de emisiones a nivel de sitio de disposición	16
2.2. Tasa estimada de cumplimiento del Art. 16 del DS 189/2005	20
2.3. Costos y eficiencias de medidas de captura, quema y valorización	20
2.3.1. Descripción general de las principales tecnologías de manejo de gas	20
2.3.2. Costos de inversión y operacionales de sistemas de captura, quema y valorización	21
2.3.3. Eficiencias y costos de coberturas	23
2.3.4. Costos del monitoreo, reporte y verificación	24
2.3.5. Tecnologías de monitoreo de biogás in situ y sus costos	25
2.4. Financiamiento de medidas y pago por resultados	29
2.5. Revisión de normas y protocolos internacionales para el manejo de gas de relleno sanitario	32
3. Resultados modelación	37
3.1. Antecedentes de la modelación	37
3.1.1. Objetivos del modelo	37
3.1.2. Horizonte temporal del modelo.....	37
3.1.3. Clasificación de rellenos modelados	37
3.1.4. Meta del Anteproyecto del PSM del Minsal.....	38
3.2. Descripción de la modelación	39
3.2.1. Parámetros del modelo	39
3.2.2. Etapas del proceso de modelación	40
3.3. Resultados	42
3.3.1. Enfoque regulatorio.....	42
3.3.2. Enfoque de mercado	43
3.3.3. Análisis de rellenos según estado actual de participación en los mercados voluntarios de carbono. 45	
4. Recomendaciones	49
4.1. Recomendación de medidas	49
4.2. Próximos pasos	55
5. Referencias	60
6. Anexos.....	62

Anexo I: Metodología, principales supuestos y parámetros	62
1. Metodologías	62
2. Principales supuestos y parámetros	67
Anexo II: Resultados - Levantamiento y consolidación de la información	70
1. Generación de emisiones de metano a nivel país y por sitio de disposición identificado	70
2. Costos y eficiencias de medidas de captura, quema y/o valorización	73
3. Normas de emisión internacionales	74
Anexo III: Diagrama de modelación.....	78
Anexo IV: Curva MAC	80
Anexo V: Formularios de Información WasteMap	82

Índice de Tablas

Tabla 2-1: Costos promedios de los ítems de inversión y operación de sistemas de captura activa.....	21
Tabla 2-2: Referencias internacionales de precios de captura, quema y generación	22
Tabla 2-3: Eficiencia de captura de biogás y costos según tipo de cobertura	24
Tabla 2-4: Tecnologías de monitoreo de biogás.....	27
Tabla 2-5: Instrumentos de financiamiento identificados.....	29
Tabla 2-6: Normas de emisión y protocolos internacionales identificados.....	33
Tabla 3-1: Resultados enfoque regulatorio periodo 2026-2030	42
Tabla 3-2: Resultados enfoque de mercado periodo 2026-2030	45
Tabla 3-3: Rellenos registrados y habilitados en estándares internacionales	45
Tabla 3-4: Rellenos registrados y con periodo crediticios expirados.....	46
Tabla 3-5: Rellenos sin registro en estándares internacionales	47
Tabla 4-1: Características de normas de emisión con benchmarks internacionales	54
Tabla 6-1: Análisis de la revisión de rellenos sanitarios revisados para el cumplimiento normativo.....	65
Tabla 6-2: Clima por región	68
Tabla 6-3: Cuadro comparativo entre tipos de sistemas de manejo de biogás de relleno. ...	73
Tabla 6-4: Normas de emisión y protocolos internacionales - extendida.....	74
Tabla 6-5: Parámetros modelación	79
Tabla 6-6: Recopilación de datos de ciudades.....	82
Tabla 6-7: Distribución de disposición final	84
Tabla 6-8: Recopilación de datos de sitios	84

Índice de Figuras

Figura 2-1: Comparación entre la cantidad de RSD dispuestos en rellenos sanitarios considerados en el Escenario A y el Escenario B.	13
Figura 2-2: Generación de metano en rellenos sanitarios por disposición de RSD por clima - Escenario A.....	14
Figura 2-3: Comparación del metano generado y emitido en rellenos sanitarios por disposición de RSD por clima - Escenario A.	14
Figura 2-4: Generación de metano en rellenos sanitarios por disposición de RSD por clima - Escenario B.....	15
Figura 2-5: Comparación de la generación de metano en rellenos sanitarios por disposición de RSD entre escenarios.	16
Figura 2-6: Comparación de la cantidad de RSD total dispuesta en rellenos sanitarios entre la proyección del SNP y este ejercicio.....	17
Figura 2-8: Generación de metano estimada del Relleno Sanitario Loma Los Colorados.	18
Figura 2-9: Generación de metano estimada para el Relleno Sanitario Santa Marta.	18
Figura 2-10: Generación de metano estimada para el Relleno Sanitario Santiago Poniente. .	19
Figura 2-11: Generación de metano estimada para el Relleno Sanitario El Molle.....	19
Figura 2-12: Ejemplo de analizador portátil de gases.....	25
Figura 2-13: Dron en un relleno sanitario	26
Figura 2-14: Cámaras de flujo en un relleno sanitario	26
Figura 3-1: Meta global PSM: Meta PSM más la Operación rellenos sanitarios	39
Figura 3-2: Potencial de captura por tipo de relleno 2026-2030	41
Figura 3-3: Extracto de Curva MACC para rellenos más costo eficientes en periodo 2020-2030	44
Figura 4-1: Resumen de recomendaciones	49
Figura 4-2: Benchmarks de especificaciones de tecnología	52
Figura 4-3: Benchmarks de verificación y fiscalización.	53
Figura 6-1: Cantidad de rellenos sanitarios y manuales distribuidos en las regiones del país.	63
Figura 6-2: Cantidad de residuos en los rellenos sanitarios y manuales distribuidos en las regiones del país.	64
Figura 6-3: Cantidad de RSD dispuesto por tipo en rellenos sanitarios - Escenario A.....	70
Figura 6-4: Cantidad de RSD dispuesto por tipo en rellenos sanitarios - Escenario B.....	70
Figura 6-5: Generación de metano estimada de rellenos sanitario – Parte 1.	71
Figura 6-6: Generación de metano estimada de rellenos sanitario – Parte 2.	71
Figura 6-7: Generación de metano estimada de rellenos sanitario – Parte 3.	72
Figura 6-8: Generación de metano estimada de rellenos sanitario – Parte 4.	72
Figura 6-9: Diagrama de modelación.	78
Figura 6-10: Curva MACC para 42 rellenos sanitarios	81

01.

Introducción

Alcance de la consultoría

1. Introducción

El Ministerio del Medio Ambiente (MMA) es el encargado del diseño y aplicación de políticas, planes y programas en materia ambiental, así como de la protección y conservación de la diversidad biológica y de los recursos naturales renovables e hídricos, promoviendo el desarrollo sustentable, la integridad de la política ambiental y su regulación normativa (Ley N° 19.300). Adicionalmente, el Ministerio de Salud (Minsal), es el encargado de regular las condiciones de saneamiento y seguridad relativas a la acumulación, selección, industrialización, comercio o disposición final de basuras y desperdicios, conforme a las atribuciones que le entrega el código sanitario (DFL 725/1998, Minsal).

A su vez, la Ley Marco de Cambio Climático (Ley 21.455/2022, MMA) define en su artículo 8°, a los Planes Sectoriales de Mitigación como los instrumentos de gestión del cambio climático a nivel nacional que establecerán el conjunto de acciones y medidas para reducir o absorber gases de efecto invernadero, de manera de no sobrepasar el presupuesto sectorial de emisiones asignado a cada autoridad sectorial en la Estrategia Climática de Largo Plazo (ECLP). A este respecto, la Resolución Exenta 1.683/2023 del Minsal da inicio al procedimiento de elaboración del anteproyecto del Plan Sectorial de Mitigación (PSM) del Cambio Climático del Minsal, el que busca la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero, generados en el tratamiento y disposición final de residuos, con énfasis en la disminución de metano desde sitios de disposición final de residuos sólidos, a través de mecanismos tales como la disminución de ingreso de materia orgánica en estos sitios, impulsando entre otros el reciclaje, el compostaje de la materia orgánica, la captura y valorización o quema del metano de rellenos sanitarios y la creación de una norma de emisión (NE) de metano en rellenos sanitarios. Dicho Anteproyecto fue aprobado mediante la resolución exenta N° 620 del 26 de abril del 2024 de Minsal.

Conforme al inventario de emisiones de gases de efecto invernadero periodo 1990-2020 el sector residuos contribuye con un 7,2% de las emisiones totales de los gases de efecto invernadero. De las principales categorías del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) vinculadas al sector residuos, el 76,3% de las emisiones provienen de los sitios de disposición final de residuos sólidos. De los gases de efecto invernadero generados en el sector residuos, más del 90% de emisiones de CO₂e, corresponden a metano, el cual principalmente se genera en sitios de disposición final de residuos sólidos. En consecuencia, el control y disminución del gas metano del sector residuos a través de las medidas de mitigación contempladas en el PSM del Cambio Climático del Minsal resulta central.

En cuanto a regulaciones existentes que abordan la mitigación de emisiones de metano de rellenos sanitarios, cabe destacar el Decreto Supremo (DS) 189/2005 del Minsal, cuyo artículo 16° establece que:

“Todo proyecto de relleno sanitario deberá contemplar un sistema de manejo de biogás diseñado en base a una proyección de la cantidad de biogás que se generará en éste y que garantice condiciones de seguridad adecuadas tanto al interior de la instalación como en sus alrededores. El diseño del sistema de manejo de biogás deberá considerar la mayor extracción posible del biogás generado durante las etapas de operación y cierre de la instalación, debiéndose contemplar la utilización del biogás extraído y en caso de que total o parcialmente ésta no sea posible, el biogás no utilizado deberá ser sometido a un proceso que garantice el control del riesgo de formación de mezclas explosivas tanto en el interior como en el exterior de la instalación”.

A su vez, la Ley Marco de Cambio Climático (Ley 21.455/2022, MMA), establece en su artículo 14 que “el Ministerio del Medio Ambiente elaborará normas que establecerán la cantidad máxima de un gas de efecto invernadero y/o un forzante climático de vida corta que podrá emitir un establecimiento, fuente emisora o agrupación de éstas, en función de un estándar de emisiones de referencia por tecnología, sector y/o actividad, con el objeto de cumplir los objetivos de la Estrategia Climática de Largo Plazo y la Contribución Determinada a Nivel Nacional”. Más aún, la misma ley en su artículo 15 señala que, para el cumplimiento de las normas de emisión emanadas del artículo 14, podrán utilizarse certificados que acrediten la reducción o absorción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Considerando lo anterior, el PSM del Minsal, considera dentro de sus medidas: 1) impedir que el gas capturado en rellenos sanitarios sea emitido directamente a la atmosfera y 2) elaborar una norma de emisión de metano en sitios de disposición final de residuos.

La consultoría tiene como **objetivo evaluar a nivel general alternativas para la mitigación de las emisiones de metano de rellenos sanitarios** en el marco del cumplimiento del presupuesto de emisiones de gases de efecto invernadero asignado al sector salud. Esta evaluación considera el análisis de diferentes instrumentos tales como las modificaciones al DS 189/2005, la elaboración e implementación de una NE, y la participación en el Sistema de Compensación de Emisiones (SCE).

De esta forma, para el cumplimiento del objetivo se ejecutaron las **siguientes actividades**:

1. Consolidación de información para la evaluación a nivel general de alternativas para el control de emisiones de metano provenientes de rellenos sanitarios.
2. Modelación de alternativas para el control de emisiones de metano provenientes de rellenos sanitarios y potencial cumplimiento con las metas del PSM del Minsal.
3. Modelación de soluciones de captura económicas y técnicas.
4. Recomendaciones de alternativas de políticas públicas para la mitigación de las emisiones de metano provenientes de rellenos sanitarios, en el marco del cumplimiento con las metas del PSM del Minsal.
5. Recomendaciones de estudios y trabajos futuros para lograr el cumplimiento de las metas climáticas en el corto plazo.

A continuación, se presentan los principales resultados de las actividades de la consultoría, mientras que en el Anexo I se detallan las metodologías utilizadas para cada una de ellas.

02.

Levantamiento y consolidación
de información

2. Levantamiento y consolidación de información

2.1.1. Generación, captura, valorización y quema de metano de los rellenos sanitarios del país

La estimación de emisiones a nivel nacional y por sitio de disposición se realizó a partir de la información del Sistema Nacional de Prospectiva (SNP) del MMA y del (2) “Informe: diagnóstico y catastro nacional de residuos sólidos domiciliarios” de la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE) del 2024, siguiendo la metodología descrita en el Anexo I, sección 1.1.

2.1.2. Estimación de emisiones a nivel nacional

En este caso, primero se identificó la cantidad de residuos sólidos domiciliarios (RSD) dispuestos y por disponer (o proyectado) en rellenos sanitarios, y se incluyó una comparación de la proyección de RSD en dos escenarios. El Escenario A consideró la proyección actual de residuos y su composición, mientras que el Escenario B consideró la futura implementación del Anteproyecto del PSM del Minsal¹.

La Figura 2-1 muestra que la diferencia de la proyección de RSD comienza en el 2025. A su vez, se observa que en el Escenario A la cantidad de RSD va en aumento hasta el último año observado (2050), mientras que, en el Escenario B, si bien la proyección disminuye, esta comienza a aumentar desde el 2040, producto del término de la vida útil de algunos proyectos de valorización, de manera que alcanza cerca de un 70% de la cantidad de RSD proyectados del Escenario A.

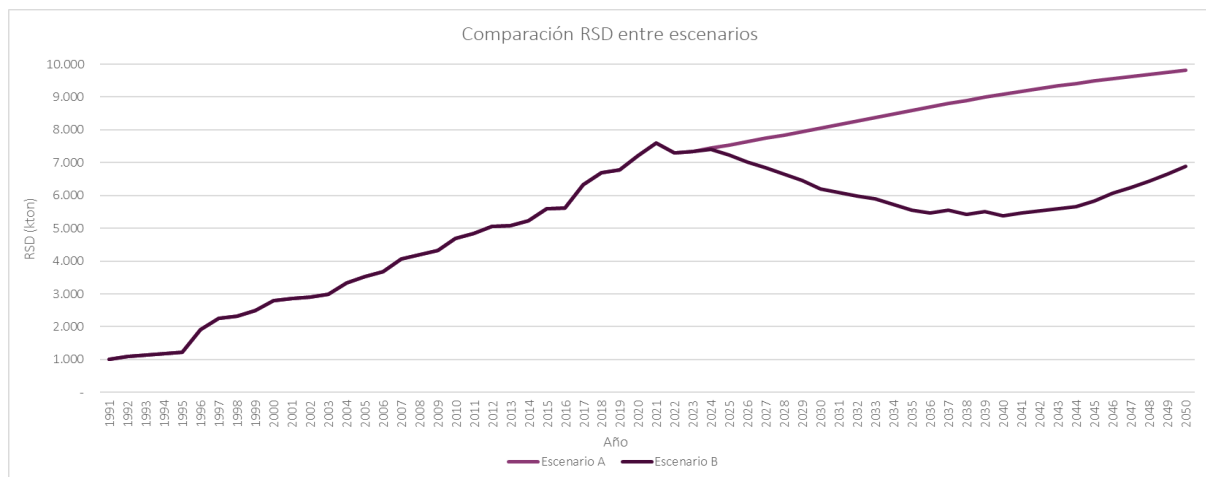


Figura 2-1: Comparación entre la cantidad de RSD dispuestos en rellenos sanitarios considerados en el Escenario A y el Escenario B.

Elaborado por: Equipo consultor.

La proyección de RSD de cada escenario y la composición por tipo de residuos por cada uno se muestra en el Anexo II, sección 1.1.

¹ Se consideró la “Medida 1: Valorización de Residuos Orgánicos”, la “Medida 3: Reciclaje de Papel y Cartón”, y la “Medida 4: Reducción del desperdicio de alimentos”.

Presentado lo anterior, a continuación, se muestra la proyección de emisiones de metano tanto a nivel nacional como a nivel de sitio de disposición.

Escenario A: proyección de residuos actual

La siguiente figura muestra la generación de metano proveniente de RSD por clima en el país entre los años 1991 y 2050. Como se puede observar, la generación de metano en el clima seco es mayor que la generada en el clima húmedo, siendo al 2050 más de dos veces mayor, esto se debe principalmente al mayor volumen de residuos dispuestos en este tipo de zona climática en el tiempo.

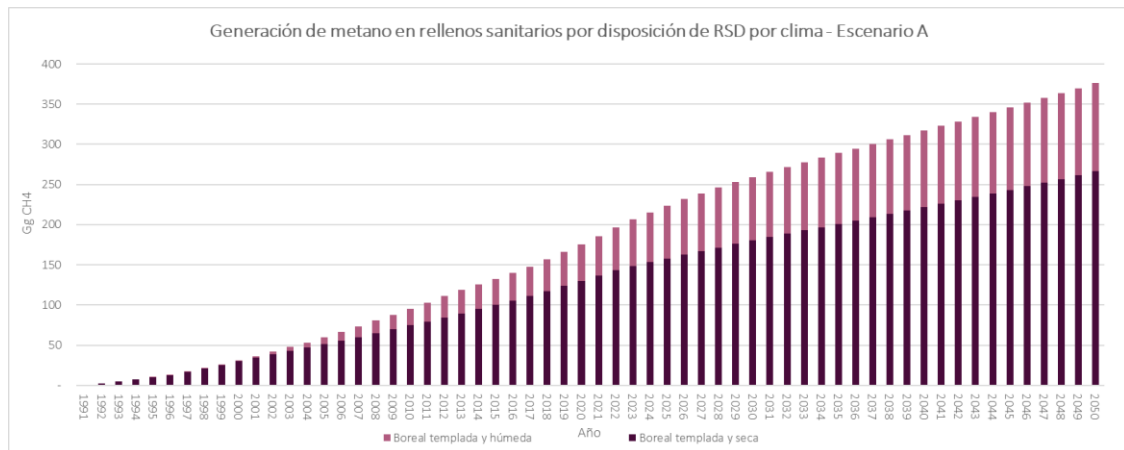


Figura 2-2: Generación de metano en rellenos sanitarios por disposición de RSD por clima - Escenario A

Elaborado por: Equipo consultor.

A su vez, la siguiente figura muestra una comparación entre la cantidad de metano generado y la cantidad de metano emitido en el Escenario A. La diferencia que se observa entre ambas estimaciones se debe a la quema o aprovechamiento de metano desde algunos rellenos sanitarios del país, la cual comienza en el 2006 con el Protocolo de Kioto y el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).

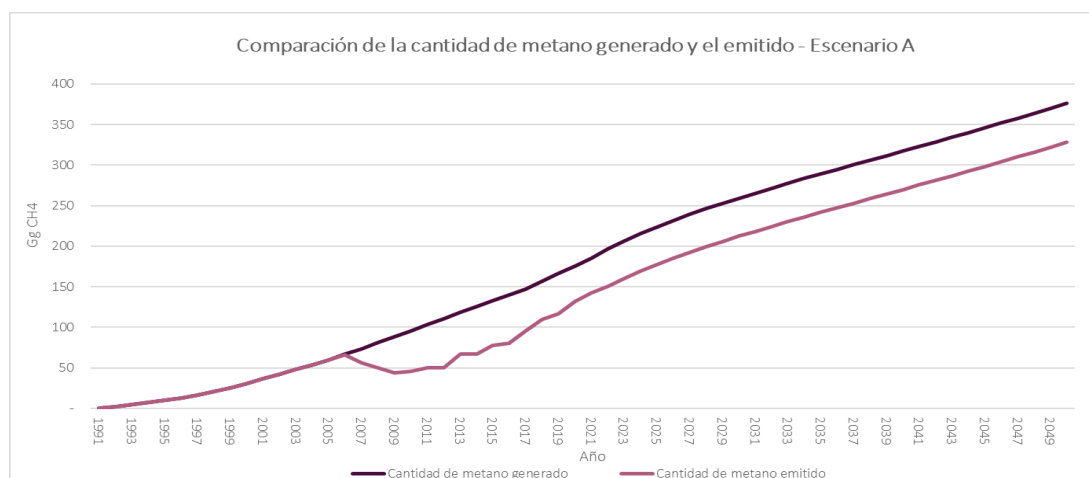


Figura 2-3: Comparación del metano generado y emitido en rellenos sanitarios por disposición de RSD por clima - Escenario A.

Elaborado por: Equipo consultor.

Escenario B: cumplimiento del PSM de Ministerio de Salud

Al igual que la subsección anterior, la siguiente figura presenta la generación de metano total de rellenos sanitarios por la disposición de RSD por clima, donde se puede ver que la máxima generación de metano se alcanza en el 2032, mientras que el punto más bajo posterior a ese año se logra en el 2046.

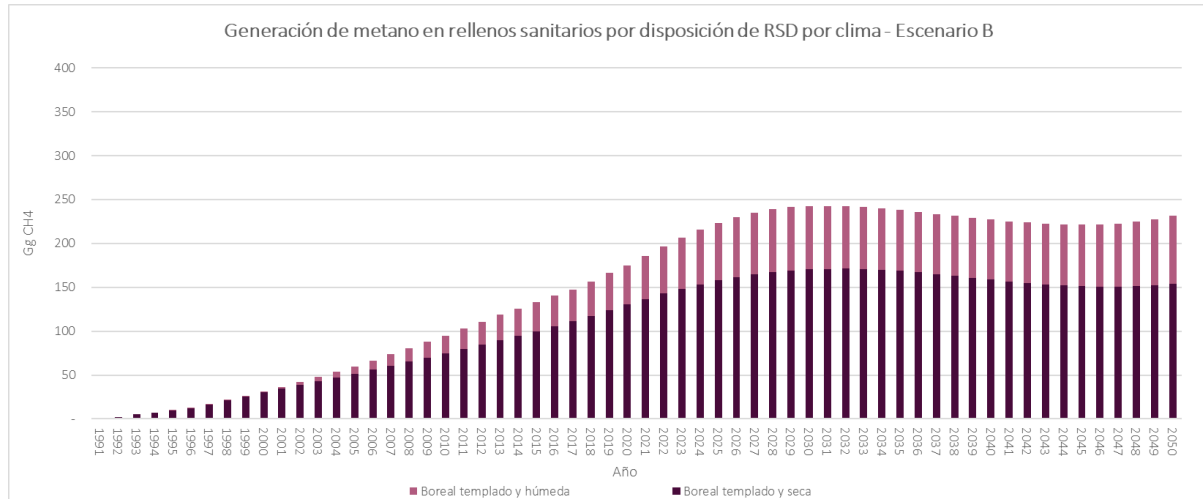


Figura 2-4: Generación de metano en rellenos sanitarios por disposición de RSD por clima - Escenario B

Elaborado por: Equipo consultor.

Para este escenario, debido a la falta de información para realizar supuestos y estimar la cantidad de metano efectivo que sería emitido al ambiente considerando la implementación de las medidas de desvío de residuos a disposición final, no se presenta una figura con la comparación entre el metano generado y el emitido.

En la Figura 2-5 se puede observar la generación de metano en el Escenario A y en el Escenario B². La diferencia entre ambas estimaciones de emisiones está dada por el desvío de los residuos orgánicos desde los rellenos sanitarios y, por ende, la no descomposición anaeróbica de estos en los sitios.

² La cantidad de metano generado solo incluye la aplicación del factor de oxidación, pero no el descuento de la cantidad de metano que es capturado, por lo que no corresponde a la cantidad de metano emitido al ambiente.

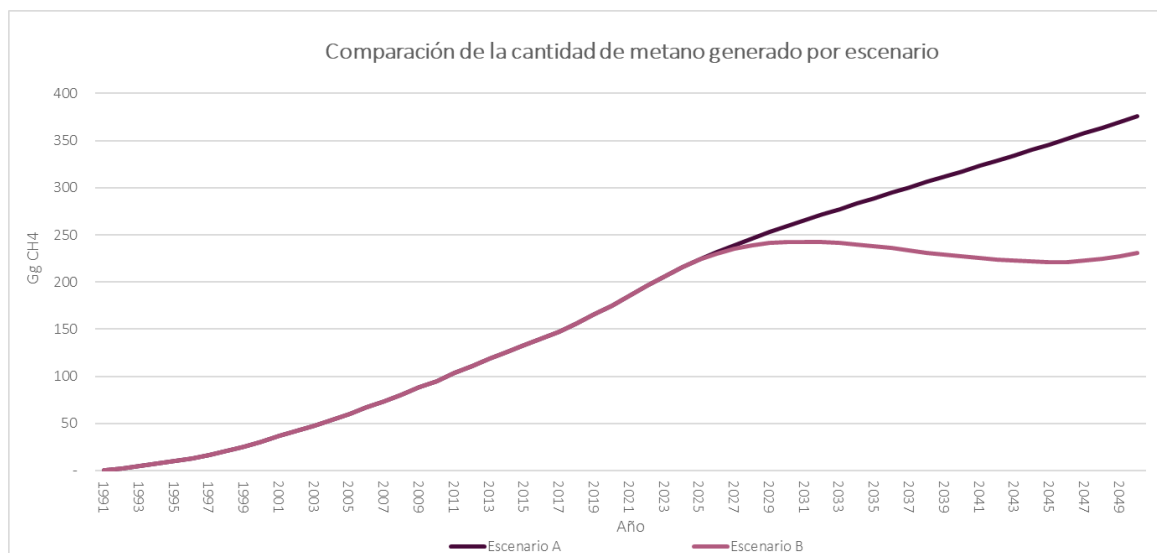


Figura 2-5: Comparación de la generación de metano en rellenos sanitarios por disposición de RSD entre escenarios.

Elaborado por: Equipo consultor.

Es importante considerar que, si bien en el Escenario B estos residuos no son dispuestos en rellenos sanitarios, si pasan por un proceso de valorización como el compostaje y/o la digestión anaeróbica, sí tendrían emisiones de metano y óxido nitroso asociadas, pero que caerían en otra categoría del INGEI.

2.1.3. Estimación de emisiones a nivel de sitio de disposición

A modo general, se presenta un análisis agregado para la estimación de emisiones del país en base a la información individual de los rellenos sanitarios identificados³. Para ello, se presentan dos figuras. La primera muestra la comparación entre la cantidad total de RSD proyectados según el SNP del MMA y la cantidad de residuos proyectados para cada relleno seleccionado según el “Informe: diagnóstico y catastro nacional de residuos sólidos domiciliarios” de la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE)⁴. Por otro lado, la segunda figura hace el mismo análisis, pero a nivel de generación de metano⁴.

En la primera figura, se tiene que la suma total de la cantidad de RSD dispuestos por relleno sanitario corresponde a un 59,7% de la cantidad total de RSD proyectada por el SNP. Esto se debe principalmente a la consideración de la vida útil de los sitios de disposición, dado que luego del año 2045 la cantidad de residuos dispuestos disminuye a casi cero debido al cierre de los sitios considerados.

³ La base de datos utilizada para la definición de los rellenos sanitarios considerados corresponde al “Informe: diagnóstico y catastro nacional de residuos sólidos domiciliarios” de la SUBDERE (2024). La metodología, supuestos y parámetros asumidos para este análisis se describen en el Anexo I, sección 1.1 y sección 2.2.

⁴ Al igual que la figura del ejercicio anterior, el metano generado no incluye ni el factor de oxidación ni la cantidad de metano que es capturado.

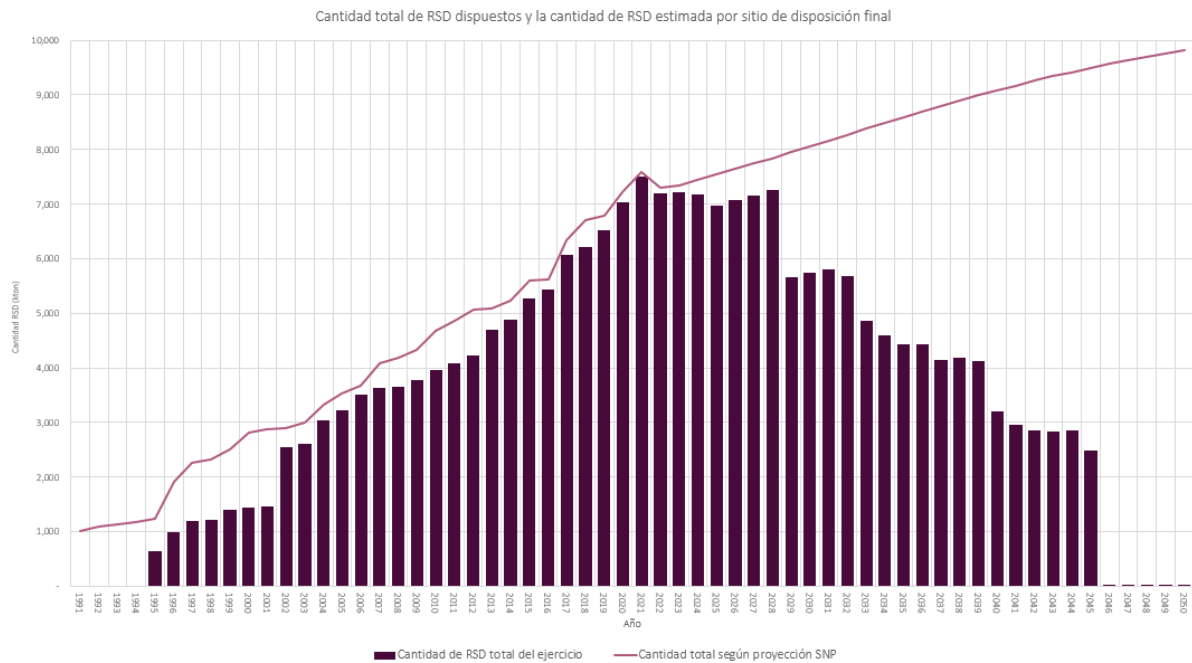


Figura 2-6: Comparación de la cantidad de RSD total dispuesta en rellenos sanitarios entre la proyección del SNP y este ejercicio.

Elaborado por: Equipo consultor.

Este ejercicio corresponde a una estimación gruesa de la participación de los rellenos sanitario respecto a la cantidad de RSD dispuestos y emisiones de metano generadas por estos.

A continuación, se muestran los resultados de la estimación de la generación de metano total para los cuatro rellenos sanitarios más grandes de Chile considerando su capacidad de tratamiento anual. Las estimaciones de la generación de metano para los rellenos sanitarios restantes se presentan en el Anexo II, sección 1.2.

- **Relleno Sanitario Loma Los Colorados**

La Figura 2-8 presenta la estimación de la generación de metano del Relleno Sanitario Loma Los Colorados para su periodo de operación entre 1995 y 2045. Se estima que este sitio en 50 años acumula una emisión de metano mayor a 3.000 Gg CH₄, dando una emisión de metano anual aproximada de 60 Gg CH₄.

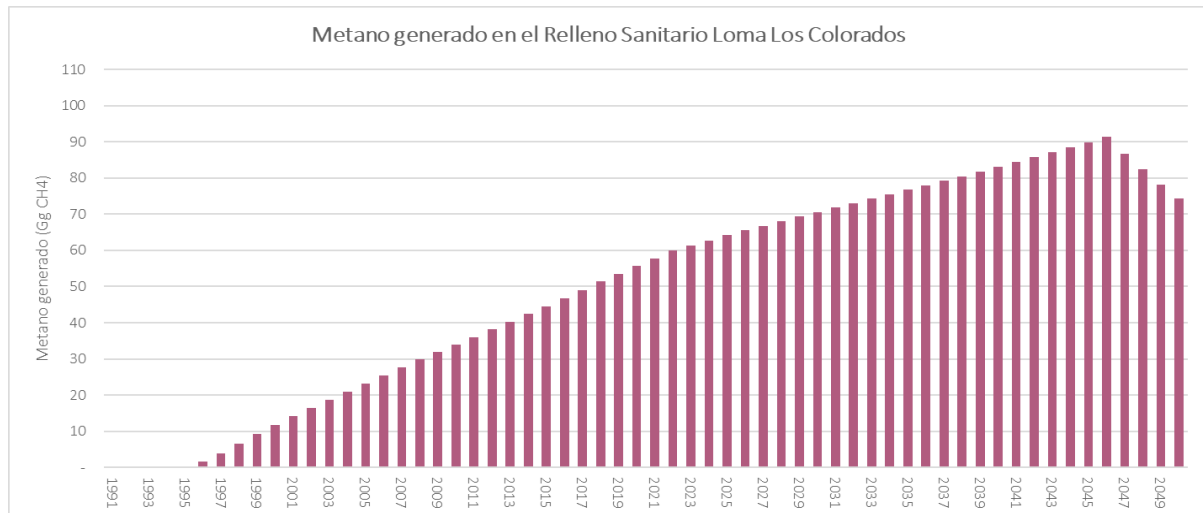


Figura 2-7: Generación de metano estimada del Relleno Sanitario Loma Los Colorados.
Elaborado por: Equipo consultor.

- **Relleno Sanitario Santa Marta**

La Figura 2-9 presenta la estimación de la generación de metano del Relleno Sanitario Santa Marta para su periodo de operación entre 2002 y 2028. Se estima que este sitio en 26 años acumula una emisión de metano cercano a 749 Gg CH₄, dando una emisión de metano anual aproximada de 29 Gg CH₄.

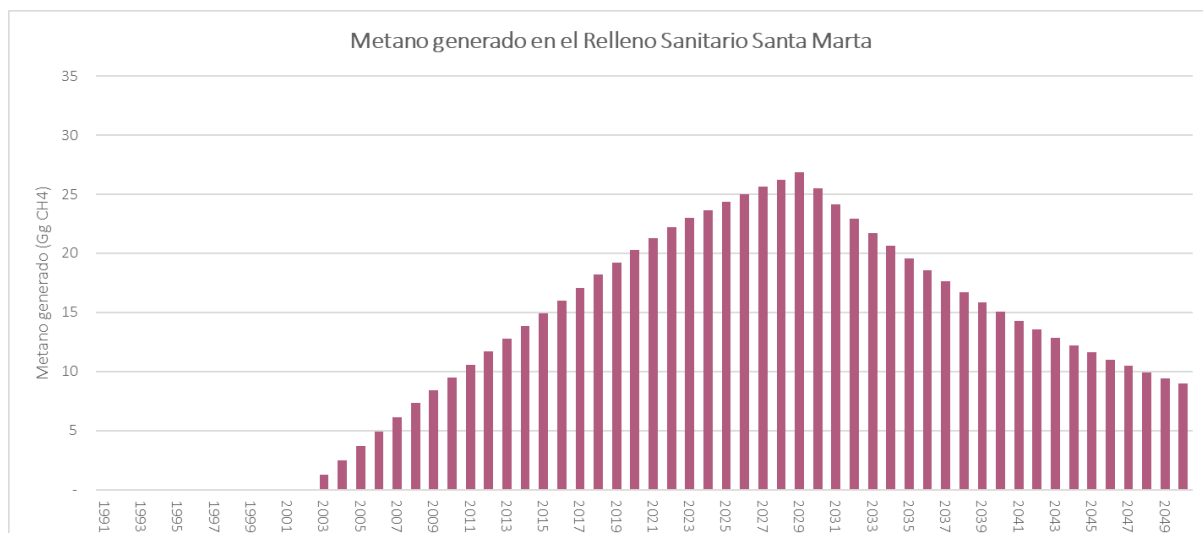


Figura 2-8: Generación de metano estimada para el Relleno Sanitario Santa Marta.
Elaborado por: Equipo consultor.

- **Relleno Sanitario Santiago Poniente**

La Figura 2-10 presenta la estimación de la generación de metano del Relleno Sanitario Santiago Poniente para su periodo de operación entre 2002 y 2032. Se estima que este sitio en 30 años acumula una emisión de metano cercano a 646 Gg CH₄, dando una emisión de metano anual aproximada de 22 Gg CH₄.

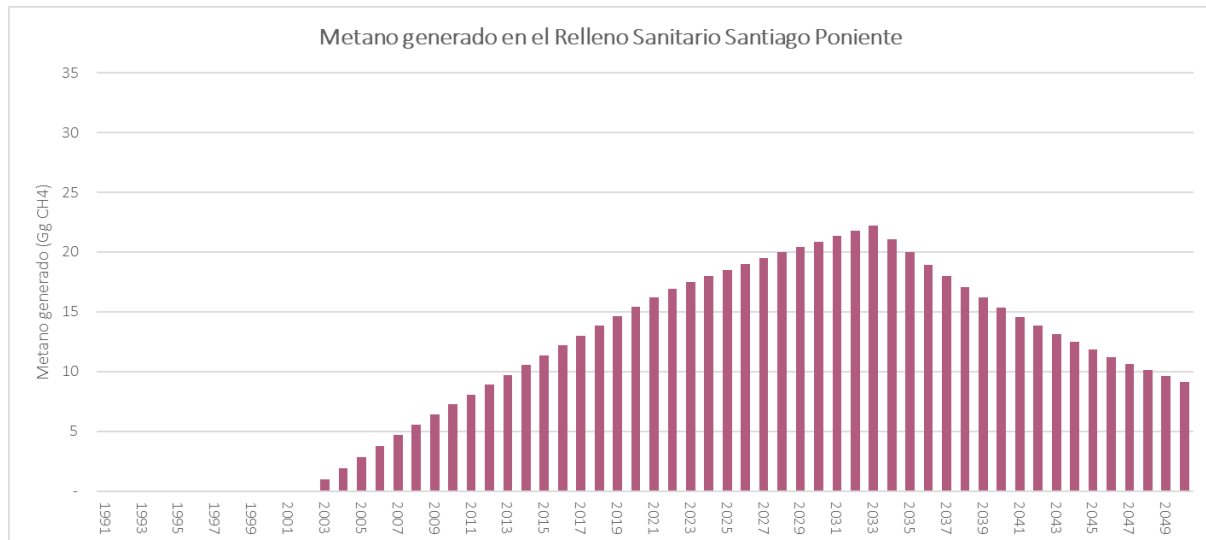


Figura 2-9: Generación de metano estimada para el Relleno Sanitario Santiago Poniente.

Elaborado por: Equipo consultor.

- **Relleno Sanitario El Molle**

La Figura 2-11 presenta la estimación de la generación de metano del Relleno Sanitario El Molle para su periodo de operación entre 2013 y 2028. Se estima que este sitio en 30 años acumula una emisión de metano superior a 229 Gg CH₄, dando una emisión de metano anual aproximada de 15 Gg CH₄.

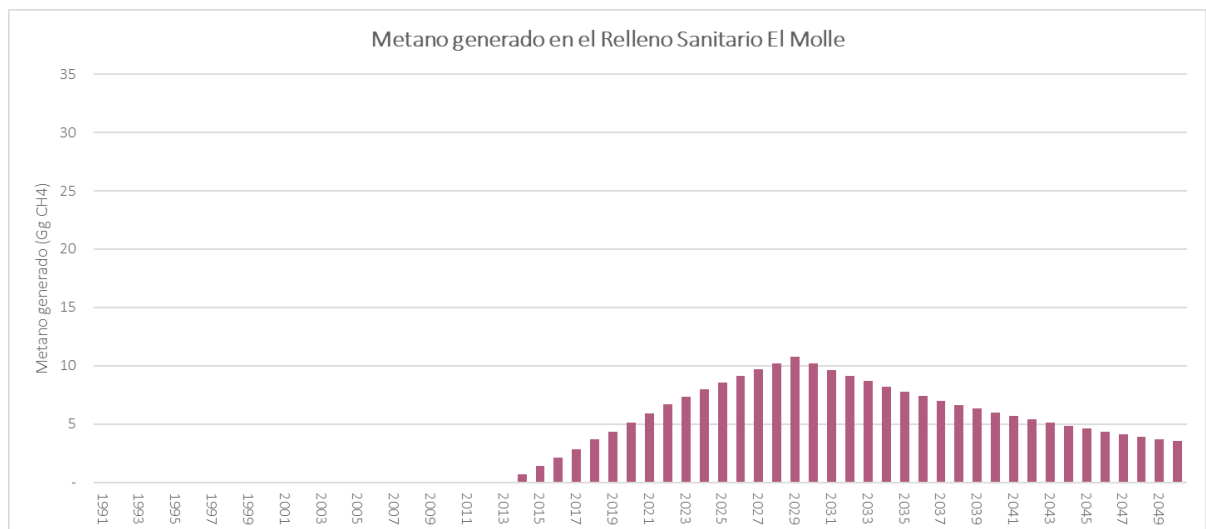


Figura 2-10: Generación de metano estimada para el Relleno Sanitario El Molle.

Elaborado por: Equipo consultor.

A modo de recordatorio, es necesario tener claro que la estimación obtenida en este ejercicio corresponde a un cálculo grueso y en ningún caso debiera tomarse como base para otro análisis fuera de esta consultoría.

2.2. Tasa estimada de cumplimiento del Art. 16 del DS 189/2005

El artículo 16 del DS 189/2005 considera tres incisos relacionados a los sistemas de manejo de biogás en los rellenos sanitarios.

El primer inciso establece que el relleno sanitario **deberá contemplar un sistema de manejo de biogás**. De los antecedentes de los 17 rellenos sanitarios revisados⁵, 15 consideraban la implementación de un sistema de manejo de biogás en su Resolución de Calificación Ambiental (RCA) o, por lo menos, no identificaban la ausencia de un sistema de manejo en su operación, sin perjuicio de que algunos tuvieran una operación deficiente o estuviera en proceso de implementación. Con esta información, se estima que un 88% de los 17 rellenos sanitarios considerados cumplen con el primer inciso del artículo 16 del DS 189/2005 por tener un sistema de manejo de biogás implementado o planeado.

El segundo inciso establece que **el sistema de manejo de biogás deberá considerar la mayor extracción posible del biogás generado** y la utilización o el procesamiento de ese biogás para controlar el riesgo de formación de mezclas explosivas. De los 15 rellenos sanitarios revisados que consideraban la implementación de un sistema de manejo de biogás en los antecedentes, se destacan 4 que no cumplían con este inciso, por contar con un sistema de ventilación pasiva, es decir, el gas no se quema y solo se libera a la atmósfera.

El tercer inciso establece que se **deberá justificar técnicamente el diseño de los componentes del sistema de manejo de biogás, incluyendo los radios de influencia y ubicación de las chimeneas de captación y drenaje de gases**. Se destaca que solo 2 de los 11 rellenos sanitarios revisados que cumplían con el primer y segundo inciso no cumplían con este último inciso porque no incluyeron justificación del diseño de los componentes.

De esta forma, se estima que el 53% para los rellenos sanitarios revisados cumplen con los tres incisos del artículo 16 del DS 189/2005, sin la certeza de que los sistemas operen de manera óptima o a su máximo potencial de captura de metano.

2.3. Costos y eficiencias de medidas de captura, quema y valorización

La metodología utilizada para el desarrollo de esta sección se presenta en el Anexo I, sección 1.3.

2.3.1. Descripción general de las principales tecnologías de manejo de gas

El sistema de captura de gas se encarga de capturar el gas que se produce en el relleno sanitario naturalmente como resultado de la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas. Este gas es recolectado por un sistema cuyo diseño se adapta a su ubicación, los objetivos operativos y las prácticas de disposición de residuos. Se identifican distintos tipos de sistemas de captura para el manejo de gas generado en rellenos sanitarios, entre ellos:

⁵ Se revisaron aquellos en los que se dispone mayor cantidad de RSD según el estudio de SUBDERE, correspondiente al 94,9% de RSD dispuestos en todos los rellenos sanitarios identificados. El Anexo 1 incluye más detalles de la metodología atrás de esta revisión.

- **Sistema de captura pasiva:** Este método se basa en la instalación de una serie de pozos de extracción de gas distribuidos estratégicamente en el relleno sanitario. Estos pozos están diseñados para permitir la liberación controlada del biogás generado durante la descomposición de los residuos. El gas se recoge pasivamente a medida que asciende a través de los residuos y se canaliza hacia un sistema de recolección. Aunque es menos eficiente que otros métodos, es relativamente más económico de implementar⁶.
- **Sistema de captura activa:** Este enfoque es más eficiente y se basa en la aplicación de un vacío o presión negativa en los pozos de extracción de gas. Esto acelera la extracción del biogás y permite su recolección más efectiva. Un sistema de extracción activa puede incluir bombas de vacío que succionan el gas hacia una red de tuberías interconectadas, desde donde se dirige a un punto central de recolección. El gas puede ser recolectado mediante tuberías situadas de manera vertical u horizontal o mediante colectores superficiales⁷.

Después de la captura en los rellenos sanitarios, se utiliza un sistema de manejo de biogás, los cuales pueden ser: sistema de captura pasiva con ventilación (no se quema y se libera a la atmósfera), sistema de captura activa con ventilación, sistema de captura activa con quema controlada (se quema el biogás para transformar el metano al dióxido de carbono) o sistema de captura activa con valorización. En el sistema de valorización, el gas capturado se puede utilizar para generación de energía, generación de calor, tratamientos terciarios para ser utilizado como gas natural, entre otros. En el Anexo II, sección 2, se presenta una ficha comparativa de estos sistemas de manejo de biogás con las ventajas y desventajas y los componentes requeridos.

2.3.2. Costos de inversión y operacionales de sistemas de captura, quema y valorización

Se realizó un levantamiento de información de los costos de inversión (CAPEX, por sus siglas en inglés), y operación y mantención (OPEX) de los sistemas de captura, quema y/o valorización mencionados en la sección anterior. La Tabla 2-1 presenta el resultado del análisis de la información por ítem, los cuales fueron utilizados en la modelación de esta consultoría.

Tabla 2-1: Costos promedios de los ítems de inversión y operación de sistemas de captura activa.

Tipo de costo	Ítem	Detalle de los costos	Valor promedio	Unidad
CAPEX	Sistema de succión y antorcha	- Equipo de succión - Equipo de combustión en antorcha abierta y cerrada (valor mínimo y máximo, respectivamente).	200.000 - 300.000	US\$ por cada 750 m3 de biogás hora

⁶ Durante la vida útil de los rellenos sanitarios, normalmente no se recomienda esta técnica, dado que no contribuye al control del metano generado. Se considera su uso en la etapa de cierre de los rellenos sanitarios, cuando ya no es posible la destrucción térmica de este gas y en donde se utiliza la biooxidación (International Solid Waste Association, 2023).

⁷ Para más información sobre "Early/Surface Collection Systems": https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-03/documents/pdh_chapter7.pdf

Tipo de costo	Ítem	Detalle de los costos	Valor promedio	Unidad
CAPEX	Sistema de deshidratación y limpieza del biogás	- Sistema de compresión y limpieza - Instalación eléctrica y filtros	300.000	US\$ por cada 750 m3 de biogás hora
CAPEX	Sistema de generación eléctrica	- Motogenerador - Obras civiles y electromecánicas	1.900.000	US\$/ MW instalada
CAPEX	Sistema transformador y conexión a red	- Transformador - Subestación de control - Interconexión eléctrica - Prueba de fuente	300.000	US\$/ MW instalada
CAPEX	Implementación de pozos	- Perforación - Conformación de pozo - Bombas extracción lixiviados - Trampa de Condensado - Redes de captación - Operación y mantención	5.000	US\$/pozo
OPEX	Costos de succión y antorcha	Considera el proceso de operación y mantención del sistema.	75.000	US\$

Elaborado por: Equipo consultor.

Fuente: A partir de un análisis de diferentes fuentes como estudios de prefactibilidad internacionales⁸, experiencias nacionales confidenciales y el criterio y experiencia de un experto en el tema.

Para el caso de captura pasiva con ventilación, se considera que los costos de inversión están asociados solamente a la conformación de pozos. Para los casos de captura activa con quema controlada o sistemas de captura activa con generación de energía, los costos de la implementación de un pozo y del sistema de succión por pozo se mantienen independiente de si el biogás se quema o se aprovecha, lo que cambia son los costos asociados a los ítems de aprovechamiento.

Dado que los costos destacados en la Tabla 2-1 reflejan la experiencia nacional, se revisaron otras referencias internacionales para hacer una comparación de costos promedio. Esta comparación se presenta en la Tabla 2-2 destaca dos de estas referencias y se puede observar que los valores promedio presentados coinciden en orden de magnitud con los valores de la tabla anterior.

Tabla 2-2: Referencias internacionales de precios de captura, quema y generación

Ítem	Costos promedio utilizados en la consultoría	Referencia 1, EE. UU. ⁹	Referencia 2 - Australia ¹⁰
Sistema de succión y antorcha	US\$ 200.000 - 300.000 por 750 m3 de biogás por hora	US\$ 101.000 a 210.000 por 750 m3 de biogás por hora	US\$ 126.225/750m3/h (más costos de succión a \$403,80 US\$/m.)

⁸ Una de las referencias consideradas es el Caso de Inversión Trujillo, Perú, de PwC (<https://cdkn.org/sites/default/files/Caso-de-Inversi%C3%B3n-Trujillo.pdf>)

⁹ (Terraza & Willumsen, 2009)

¹⁰ (Department of the Environment and Energy, 2017)

Ítem	Costos promedio utilizados en la consultoría	Referencia 1, EE. UU. ⁹	Referencia 2 - Australia ¹⁰
Sistema de deshidratación y limpieza del biogás	US\$ 300.000 por MW instalado	No se considera	No se considera
Sistema de generación eléctrica	US\$ 1.900.000 por MW instalado	US\$ 1.000.000 a 5.000.000 por MW instalado	US\$ 1.211.400 por MW instalado
Sistema transformador y conexión a red	US\$ 300.000 por MW instalado	Se considera entre \$100 a \$125 US\$/m	No se considera
Implementación y operación y mantenimiento de pozos	US\$ 5.000 por pozo	US\$ 5.000 a 12.500 por pozo	US\$ 1.683 por pozo
Costos operacionales y de mantenimiento de succión y antorcha	US\$ 75.000	10% por el sistema	Planta con antorcha (4-8%), planta con producción de electricidad (10-12%)

Elaborado por: Equipo consultor.

Fuente: las referencias se indican como nota al pie.

Como se puede ver, se observan diferencias en los costos de succión y antorcha donde las referencias internacionales presentan valores menores a lo observado a nivel nacional, pero los costos de pozos y generación eléctrica están dentro de los mismos rangos observados.

Sin embargo, la diferencia más relevante de la comparación está en la estimación del OPEX. Si bien las referencias identificadas corresponden a porcentajes respecto a la inversión, se observó que, dado el tamaño de los proyectos del estudio, este supuesto subestimaba los costos operacionales de estos, por lo que se tomó el valor más alto con el objetivo de tener un enfoque conservador en el análisis de costos.

2.3.3. Eficiencias y costos de coberturas

En cuanto a las eficiencias de las tecnologías de captura de biogás, la bibliografía presenta distintos valores según la cobertura que se utiliza en la operación de los rellenos sanitarios.

Actualmente en Chile, según el Experto, los rellenos sanitarios que ocupan una cobertura diaria usan arcilla o tierra dependiendo de lo que está disponible en el sitio para minimizar los costos. También menciona, que en periodo de invierno y en el proceso de cierre, algunos tapan con geomembrana, cuyo costo depende del material y el grosor.

La siguiente tabla presenta un resumen de las eficiencias de captura de biogás según tipo de cobertura y sus costos respectivos.

Tabla 2-3: Eficiencia de captura de biogás y costos según tipo de cobertura

Tipo de cobertura	Eficiencia de captura de gas	Costos (US\$)
Celda en operación (sin cobertura)	35%	Sin costo de cobertura
Cobertura temporal	65%	Costo promedio de arcilla de 15 cm = \$3,00 a \$5,00/m ²
Cobertura final de arcilla	85%	
Cobertura final de geomembrana	90%	\$1,50 a \$2,00/m ²

Elaborado por: Equipo consultor.

Fuente: A partir de datos de eficiencia basados en (EPA, 2011) y los costos basados en la experiencia del Experto.

Si bien los valores de eficiencia identificados en la bibliografía son altos, es importante realizar la comparación con las eficiencias observadas en Chile que tienen directa relación con la operación de los sitios de disposición y las condiciones climáticas que lo afecta.

Para el caso de Chile, el Experto mencionó que, dada las condiciones de manejo actual de los sitios, la eficiencia máxima de captura es de 50%. Potenciales razones de la diferencia de este valor con la bibliografía pueden ser: ausencia de cobertura diaria, baja calidad del material de cobertura, demora en la conexión de nuevos pozos, entre otros.

Por otro lado, al analizar la información de algunos sitios de disposición final¹¹ en el país y hacer la comparación entre la estimación de la generación de biogás de manera teórica y la que es capturada por estos, se estimó que las eficiencias de captura de biogás se mueven en un rango de 38% a 43% dependiendo de las condiciones específicas del sitio. Incluso se observó que esta eficiencia de captura no es constante ni estable en el tiempo, lo que puede deberse a factores principalmente operacionales.

Por último, es importante destacar que las eficiencias que se mencionan a nivel país son solo una estimación, ya que, en conversaciones con operadores, comentaron que existen desafíos y dificultades en la medición del biogás total generado por la falta de herramientas, tecnologías y/o metodologías precisas para su correcta estimación, y que en la práctica solo se tenía certeza del biogás que era capturado.

2.3.4. Costos del monitoreo, reporte y verificación

Otro costo relevante para considerar es el costo relacionado al monitoreo, reporte y verificación (MRV) de las emisiones del sitio de disposición. El MRV es el proceso en el cual el relleno sanitario recolecta información de los parámetros relevantes para la estimación de la reducción de emisiones, que luego se consolida en un reporte y es verificado por terceros. El MRV es un proceso clave para estimar la reducción de emisiones efectiva que está realizando el relleno sanitario, además de facilitar el seguimiento del cumplimiento de normativas u objetivos por parte de entidades externas.

Se levantó que los costos de MRV para rellenos sanitarios, los cuales consideran la verificación y la elaboración del reporte de monitoreo, oscilan entre US\$ 20.000 y US\$ 25.000

¹¹ La información que se menciona fue levantada en el marco de otras asesorías del Equipo consultor, cuyos datos y resultados son confidenciales. Por lo que el objetivo de mencionar esta información es solo referencial.

anual. Por otro lado, el plan de monitoreo (mantención, calibraciones y sistema de registro) puede alcanzar costos de US\$ 16.000 anual.

Para este estudio, se consideraron costos anuales para MRV de US\$ 50.000.

2.3.5. Tecnologías de monitoreo de biogás in situ y sus costos

A pesar del desarrollo de nuevas tecnologías y el mejoramiento de metodologías para medir las emisiones de rellenos sanitarios, sigue siendo un desafío obtener datos precisos que evalúen bien el estado actual de emisiones del sitio (Sullivan & Huff, 2022). Considerando esto, actualmente existen principalmente tres tipos de mecanismos de medición de producción de biogás en el lugar:

1. Monitoreo de las emisiones de superficie (SEM o surface emission modeling en inglés),
2. Imágenes desde la tierra o a baja altitud
3. Imágenes desde satélites o el aire
4. Monitoreo del flujo de metano con sistemas fijos

- **Monitoreo de las emisiones de superficie**

La técnica más común por ser la más accesible y económica es el monitoreo de las emisiones de superficie que se realiza caminando con un analizador portátil en mano para medir las concentraciones de metano (Siegel, Humann-Guillemot, & Biniotoglou, 2024).

Este método es más efectivo con el uso de monitoreo integrado, lo cual calcula un promedio por el área, versus el uso de monitoreo instantáneo, la cual solo mide en puntos específicos. La calidad de datos con este método dependerá de la distancia entre los caminos y la cantidad de información recogida. Esta técnica ofrece la posibilidad de monitorear todos los puntos más vulnerables del sitio, como pozos u otras salidas de gases.

Hay una gran variedad de precios para los analizadores portátiles, y estos pueden rondar los CLP 150.000 y 2.500.000. Los costos totales de un evento de monitoreo con este método podrían llegar a encontrarse entre CLP 5.000.000 y 20.000.000, dependiendo del tamaño del sitio y la distancia de los caminos (Sullivan & Huff, 2022).



Figura 2-11: Ejemplo de analizador portátil de gases

- **Imágenes desde la tierra o una baja altitud**

Otra opción que se está volviendo cada vez más común es usar un dron con una cámara infrarroja y/o analizador de gases para captar imágenes desde la tierra o a baja altitud. Este método es más eficiente que monitorear a pie porque identifica mejor los focos de altas emisiones, pero se requiere monitoreo directo para verificar las fuentes de esas altas emisiones.

En cuanto a los costos totales de un evento de monitoreo, estos alcanzan valores entre CLP 5.000.000 y 50.000.000, dependiendo del precio de la tecnología utilizada (Sullivan & Huff, 2022).

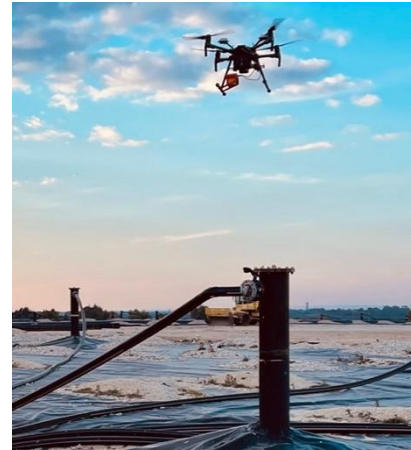


Figura 2-12: Dron en un relleno sanitario

Fuente: SPH Engineering

- **Imágenes desde satélites o el aire**

Por otro lado, el método de imágenes desde satélites o el aire es más efectivo para identificar y medir fugas grandes de gases, evitando realizar un monitoreo regular de las emisiones de un sitio, especialmente considerando que el costo de la tecnología alcanza los CLP 90.000.000 a 500.000.000 por evento de monitoreo (Sullivan & Henkelman, 2019).

- **Monitoreo del flujo de metano con sistemas fijos**

Por otro lado, para el monitoreo con sistemas fijos, se destaca la tecnología de sensores fijos montados en torres, trípodes o cabezas de pozos. Este tipo de sensores permite el monitoreo continuo de la concentración de metano para poder responder rápidamente a un aumento de la concentración, pero la utilidad de la información dependerá de la cantidad y el posicionamiento de los sensores.

El costo de cada sensor varía entre CLP 1.000.000 y 8.000.000, y el costo total dependerá de la cantidad de sensores y el sistema de monitoreo (Garland, Ayandele, & Frankiewicz, 2024).



Figura 2-13: Cámaras de flujo en un relleno sanitario

Fuente: Waste 360

Otra tecnología parecida son las cámaras de flujo, las cuales usan cajas para medir el flujo de metano en puntos específicos de la superficie.

La calidad de la información levantada dependerá de la cantidad de cámaras, por lo que, para obtener resultados más precisos, se requiere gran cantidad de cámaras. En 1986, un estudio de la Agencia de Protección del Medio Ambiente de EE. UU.¹², concluyó que el uso de las cámaras sería inviable para la mayoría de los sitios dado los altos montos de inversión.

¹² Si bien la referencia utilizada es antigua, en documentos actuales (por ejemplo, el documento del Reino Unido de *Guidance on monitoring landfill gas surface emissions* de 2010 y las otras referencias en esta sección del informe) todavía se referencia este estudio como el método estándar para estimar el número de cámaras.

En concreto, los costos totales por evento de monitoreo alcanzan los CLP 50.000.000 a 90.000.000, dependiendo del tamaño del sitio y la cantidad de cámaras, e incluyendo el costo del equipamiento, movilización, verificación con monitoreo de la superficie y el reportaje (Sullivan & Huff, 2022).

Además, existen los sensores ópticos para medir el flujo de metano en puntos fijos de la superficie, pero en general resultan en datos inexacto y no replicable y los costos totales por evento de monitoreo son altos, alcanzando los CLP 80.000.000 a 450.000.000 (Sullivan & Huff, 2022).

Tabla 2-4: Tecnologías de monitoreo de biogás

Tipo de Tecnología	Costos	Recomendaciones	Experiencias de éxito
Monitoreo de emisiones de superficie con analizadores portátiles	Analizadores entre 150.000 y 2.500.000 CLP Evento de monitoreo entre 5.000.000 y 20.000.000 CLP (incluyendo equipamiento, movilización y reportaje)	Usar este método para invertir menos en tecnología física y tener los costos totales más bajos.	EPA¹³ Requiere el uso de esta técnica para monitorear metano en los rellenos sanitarios. Su metodología requiere que el monitoreo cubra toda la superficie en caminos serpentinados con 30 m entre medio y revise todas las penetraciones de la cobertura y áreas abiertas.
Imágenes desde la tierra o una baja altitud	Evento de monitoreo entre 5.000.000 y 50.000.000 CLP (incluyendo equipamiento, movilización y el reportaje)	Usar este método para ocupar menos mano de obra y monitorear el sitio de una forma más eficiente.	SPH Engineering¹⁴ Utilización de un dron con un detector de metano integrado en el computador. En este caso, pudieron revisar 60 hectáreas en un día, un tercio del tiempo necesario para monitorear a pie con un analizador.
Imágenes desde satélites o el aire	Evento de monitoreo entre 90.000.000 y 500.000.000 CLP	No usar este método para monitorear emisiones de sitios específicos por el alto costo por monitoreo.	Carbon Mapper¹⁵ Empresa que utiliza imágenes satelitales para apoyar la disponibilidad de datos de emisiones de metano.
Monitoreo con sensores fijos	Entre 1.000.000 y 8.000.000 CLP por sensor	Usar este método para ocupar menos mano de obra y monitorear el sitio de una forma más eficiente.	LoCI Controls¹⁶ Empresa que desarrolló un sistema de información y control que toma medidas continuas y alerta a operadores sobre oportunidades de mitigación. El

¹³ https://www.scsengineers.com/wp-content/uploads/2018/07/Tier_4_SEM_Process_and_Issues-June-2018.pdf

¹⁴ <https://www.sphengineering.com/news/drone-technology-enables-three-times-faster-methane-emissions-monitoring-in-landfills>

¹⁵ <https://carbonmapper.org/about>

¹⁶ <https://locicontrols.com/>

Tipo de Tecnología	Costos	Recomendaciones	Experiencias de éxito
			sistema está implementado en más de 65 rellenos sanitarios.
Monitoreo de flujo de metano con cámaras de flujo	Evento de monitoreo entre 50.000.000 y 90.000.000 CLP (incluyendo equipamiento, movilización, verificación con monitoreo de la superficie y el reportaje)	Usar este método si existen los recursos financieros para invertir en un sistema más permanente.	Relleno Sanitario en Mérida, Yucatán, México¹⁷. En un sitio de 19 hectáreas pudieron sacar mediciones en 30 puntos para identificar la distribución de emisiones de metano por el sitio e identificar los puntos con altas emisiones.
Monitoreo de flujo de metano con sensores ópticos	Evento de monitoreo entre 80.000.000 y 450.000.000 CLP	No usar este método para monitorear emisiones por el alto costo por monitoreo y los datos inexactos y no replicables.	No se destaca una experiencia de éxito por el bajo uso de esta técnica.

Fuente: a partir de diferentes fuentes de información incluidas como nota al pie.

Elaborado por: Equipo consultor.

¹⁷ <https://www.elsevier.es/en-revista-ingenieria-investigacion-tecnologia-104-articulo-superficial-methane-emissions-from-landfill-S1405774313722443>

2.4. Financiamiento de medidas y pago por resultados

La evidencia muestra que existe una gran brecha para la gestión de rellenos sanitarios para poder aumentar su ambición en torno a la captura de biogás. En ese sentido, es importante fijar de manera correcta los incentivos que hoy existen para que los operadores de rellenos sanitarios gestionen el biogás de manera correcta.

En esta sección, se destacan los tipos de financiamiento que se podría considerar para la implementación de sistemas de captura y/o aprovechamiento de biogás generado en rellenos sanitarios en Chile. Entre ellos, se consideran instrumentos de financiamiento, mecanismos de financiamiento mixto y modelos de pagos por resultados que permitan generar incentivos para la quema activa del biogás.

Tabla 2-5: Instrumentos de financiamiento identificados

Nacional o Internacional	Entidad ¹⁸	Programa	Objetivo	Público objetivo	Año de vigencia / Período de postulación	Financiamiento
Nacional	SUBDERE	Programa Nacional de Residuos Sólidos (PNRS) ¹⁹	"Elaboración e implementación de planes de financiamiento de proyectos de mitigación de huella carbono a través del uso y/o captura de los gases de efecto invernadero emitidos en los procesos de recolección y transporte de residuos sólidos domiciliarios y en los sitios de disposición final."	Asociaciones municipales	Activo desde 2018 sin un período específico de postulación	Subsidios ²⁰

¹⁸ No se consideran la Corporación Internacional Financiera (CIF), *Global Environment Facility* (GEF) o *Green Climate Fund* (GCF) porque sus *tickets* mínimos de inversión son demasiado altos para este tamaño de proyectos.

¹⁹ <https://www.subdere.gov.cl/programas/divisi%C3%B3n-desarrollo-regional/programa-nacional-de-residuos-s%C3%B3lidos-pnrs>

²⁰ No se encuentra información del monto de financiamiento.

Nacional o Internacional	Entidad ¹⁸	Programa	Objetivo	Público objetivo	Año de vigencia / Período de postulación	Financiamiento
Internacional	Banco Interamericano de Desarrollo (BID)	Préstamos al sector privado ²¹	Ofrecer soluciones financieras innovadoras para promover el desarrollo sostenible.	Sector privado	Activo sin un período específico de postulación	Préstamos ²²
	OPEC Fund	Subsidios ²³	Fomentar el crecimiento económico y progreso social en países en desarrollo (con prioridad a los de bajos y medianos ingresos). Apoyar el desarrollo de asesorías técnicas y creación de capacidades, además de iniciativas especiales de desarrollo, en un rango amplio de sectores que responden a necesidades básicas (tales como energía e infraestructura).	Sector privado, público y civil	Activo	Subsidios ²⁴ hasta 50% del presupuesto del proyecto.
		Préstamos al sector público ²⁵		Sector público	Activo	Préstamos ²⁶

Fuente: a partir de diferentes fuentes de información incluidas como nota al pie.

Elaborado por: Equipo consultor.

²¹ <https://idbinvest.org/en/solutions/loans>

²² Sin información del rango de montos de los préstamos.

²³ <https://opecfund.org/what-we-offer/grants/grant-application>

²⁴ Sin información del rango de montos de los subsidios.

²⁵ <https://opecfund.org/what-we-offer/public-sector-lending>

²⁶ Sin información del rango de monto de los préstamos.

Además, de los instrumentos destacados, existen modelos de pagos por resultados los cuales pueden ayudar a generar los incentivos correctos para mejorar la operación de rellenos sanitarios. Entre ellos, los mercados de carbono, tales como el SCE del MMA, los mercados voluntarios del carbono, o instrumentos internacionales como el Artículo 6 del Acuerdo de París, resultan ser excelentes alternativas para viabilizar este tipo de medidas. No olvidar que los instrumentos regulatorios también generan incentivos para una mejor gestión de rellenos sanitarios, pero sus incentivos estarán más enfocados en la fiscalización y, por lo tanto, el costo de una mejor operación del relleno sería posiblemente transferido al usuario final a través de tarifas de disposición.

Los mercados de carbono son sistemas comerciales en los que se venden y compran créditos de carbono. Un crédito de carbono equivale a una tonelada de dióxido de carbono reducida. Empresas, países o individuos pueden usar créditos de carbono para compensar sus emisiones de gases de efecto invernadero comprando créditos a entidades que han removido o reducido sus emisiones (UNDP, 2022). El mercado de carbono busca viabilizar proyectos que sin el ingreso adicional proveniente de la comercialización de reducción de emisiones no se podrían implementar, lo que también es conocido como el principio de la adicionalidad. A continuación, se detallan los tipos de mercados de carbono existentes:

- **Mercado voluntario:** corresponde a empresas, organizaciones sin fines de lucro o particulares compran y venden créditos de carbono voluntariamente para el cumplimiento de sus metas e inventarios corporativos. Los créditos se pueden vender de forma directa o a través de un intermediario como un *broker* o *trader*.
- **Mercado regulado internacional:** se refieren a aquellas organizaciones internacionales que establecen políticas de reducción de emisiones, las cuales consideran las transacciones de créditos de carbono como un mecanismo de flexibilidad para los actores regulados. Entre ellos se incluyen los instrumentos de mercado creados por el Artículo 6 (artículos 6.2 y 6.4) del Acuerdo de París, y el Sistema de Compensación y Reducción de Emisiones de Carbono para la Aviación Internacional (CORSIA).
- **Mercado regulado doméstico:** en Chile, el mercado regulado nacional implica la fijación de un gravamen o impuesto al carbono, junto a la habilitación del SCE como mecanismo de flexibilidad, el cual tiene su origen en el impuesto nacional al carbono (impuesto verde).

El SCE del MMA²⁷ promueve la inversión en proyectos de reducción de emisiones que permiten a las empresas rebajar impuestos por concepto de contaminantes ambientales (emisiones de carbono). Gracias al SCE, “los contribuyentes tienen la opción de compensar total o parcialmente las emisiones provenientes de aquellas fuentes fijas sujetas al impuesto verde a través de la implementación de proyectos de reducción de emisiones”.

Para que el proyecto califique para las compensaciones, se debe aplicar una metodología seleccionada o, en ausencia de una aplicable, crear una nueva y presentar el proyecto al MMA para recibir aprobación. Después del montaje o construcción del proyecto, el titular lleva a

²⁷ <https://portalcompensaciones.mma.gob.cl/>

cabo actividades de verificación mediante un auditor externo para demostrar las reducciones de emisiones y así, poder recibir los certificados de reducción para su posterior transacción.

2.5. Revisión de normas y protocolos internacionales para el manejo de gas de relleno sanitario

En el capítulo anterior se detallaron algunos instrumentos de financiamiento y mecanismos de pagos por resultados que permiten generar los incentivos para que operadores de rellenos sanitarios mejoren su gestión del biogás. En esta sección se revisarán instrumentos regulatorios que generen los incentivos correctos para que operadores de rellenos mejoren sus prácticas en torno a la quema de metano.

Los instrumentos regulatorios y los de pagos por resultados deben entenderse como instrumentos que pueden complementarse para generar los resultados deseados. Los pagos por resultados permitirán generar los incentivos económicos para que se ejecute una acción (en este caso, que se gestione de mejor manera el metano). Mientras que los instrumentos normativos y regulatorios sentarán la base de lo mínimo con lo que deben cumplir los rellenos sanitarios para operar en Chile, y su incentivo se materializará a través de la fiscalización y eventuales multas.

A modo de comparación y ejemplificación, se revisaron distintas normas y regulaciones en torno a la gestión del metano para distintos países del mundo. Principalmente se tomaron como referencia a Estados Unidos, la Unión Europea y Canadá dado que son países que se encuentran más avanzados en la discusión de cómo gestionar su metano proveniente de residuos.

En este análisis se destaca la experiencia de la Unión Europea la cual aprobó una directiva en 1999 que aplica a todos los rellenos sanitarios con el requisito de recoger, tratar y utilizar los gases para producir energía o, si eso no es posible, quemarlos, sin embargo, no establece límites de emisiones. A su vez, dentro de Europa, se identifica el caso de Reino Unido y España quienes aprobaron sus propios reglamentos en 2002/2003 y 2020, respectivamente.

En América, se destaca la experiencia de Estados Unidos, país donde cuatro estados han aprobado NEs, siguiendo el ejemplo de California en 2010, con requisitos, límites de emisión y procedimientos de monitoreo más detallados y estrictos. Por ejemplo, California requiere que las antorchas cerradas o los dispositivos de recuperación de energía tengan una eficiencia de destrucción de al menos 99% del metano. Por otro lado, Canadá se encuentra actualmente desarrollando una NE de metano para los rellenos sanitarios que busca tener un nivel de detalle similar al de las normas estadounidenses. Además, cabe destacar que Canadá está explorando opciones para permitir que los rellenos que tienen proyectos bajo Sistemas de Compensación de gases de efecto invernadero federales, provinciales o territoriales generen créditos durante el mayor tiempo posible y que la regulación entre en vigencia para ellos más adelante que para los proyectos que no participen en los Sistemas.

En la Tabla 2-6 se encuentra una comparación de las normas internacionales destacadas en este informe con información sobre a cuáles rellenos sanitarios se aplica la norma, los requisitos generales, los límites de emisión y los requisitos del monitoreo y reportes,

ordenados de lo más antiguo a lo más actual. Una versión más detallada de esta tabla se encuentra en Anexo II, sección 3.

Tabla 2-6: Normas de emisión y protocolos internacionales identificados

País	Norma	Año de vigencia	Requisitos
Unión Europea	Directiva 1999/31/CE del Consejo ²⁸	1999	- Aplica a: Todos los rellenos sanitarios. - Requisito general: Recoger, tratar y utilizar para producir energía o quemar los gases. - Límites de emisión: No establece límites. - Fiscalización: Realizada por el operador. - Monitoreo: Plan de monitoreo y acción y, en el caso de efectos negativos, notificación a autoridades con acciones correctivas. - Reporte: Anual.
Reino Unido	Inglaterra y Gales - Regulaciones de Rellenos Sanitarios ²⁹	2002	- Aplica a: Todos los rellenos sanitarios. - Requisito general: Monitorear las emisiones de metano y contar con un sistema de captura y quema o uso de biogás. - Límites de emisión: Zonas cubiertas permanentemente (0,001 mg/m2/segundo) y zonas cubiertas temporalmente (0,1 mg/m2/segundo)³¹. - Fiscalización: Realizada por el operador. - Monitoreo: A nivel anual o trimestral a través del método de cámaras de flujo y, en el caso de excederse, se exigen planes de remediación. - Reporte: No se especifica.
	Escocia - Regulaciones de Rellenos Sanitarios ³⁰	2003	- Aplica a: Todos los rellenos sanitarios. - Requisito general: Sistema de recolección que no exceda a los límites y que use una antorcha o utilice el gas como combustible o para generar electricidad - Límites de emisión: 5.000 ppm (no se especifica dónde o cómo se mide) - Fiscalización: No se especifica. - Monitoreo: No se especifica. - Reporte: No se especifica.
Nueva Zelanda	Resource Management Regulations ³²	2004	- Aplica a: Todos los rellenos sanitarios - Requisito general: Sistema de recolección que no exceda a los límites y que use una antorcha o utilice el gas como combustible o para generar electricidad - Límites de emisión: 5.000 ppm (no se especifica dónde o cómo se mide) - Fiscalización: No se especifica. - Monitoreo: No se especifica. - Reporte: No se especifica.
Corea del Sur	Wastes Control Act ³³	2007	- Aplica a: Todos los rellenos sanitarios. - Requisito general: Medir los contaminantes vertidos de la instalación. - Límites de emisión: No establece límites. - Fiscalización: No se especifica. - Monitoreo: No se especifica. - Reporte: Reporte de contaminantes al Ministerio del Medio Ambiente.
EE. UU. – California	Sub article 6. Methane Emissions	2010	- Aplica a: Rellenos sanitarios con más de 450.000 toneladas acumuladas de residuos y en que la capacidad calorífica del relleno debido al biogás

²⁸ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex%3A31999L0031>

²⁹ <https://www.legislation.gov.uk/ukdsi/2002/0110395905/contents>

³⁰ <https://www.legislation.gov.uk/ssi/2003/235/contents>

³¹ Las normas no incluyen obligaciones de cobertura relacionadas a la prevención de emisiones de metano.

³² https://www.legislation.govt.nz/regulation/public/2004/0309/latest/whole.html?search=ta_regulation_R_rc%40rnf%40rnif_an%40bn%40rn_25_a&p=3#DLM1850305

³³ <https://www.greentrade.org.tw/sites/default/files/criterion/13.Wastes%20Control%20Act.pdf>

País	Norma	Año de vigencia	Requisitos
	from Municipal Solid Waste Landfills ³⁴		acumulado es mayor a 3.000.000 British thermal units recuperadas por hora. - Requisito general: Si excede a 200 ppm metano por volumen, requiere recolección y control de gas: antorchas cerradas (eficiencia de destrucción de al menos 99% del metano), antorchas abiertas (con aprobación del gobierno), transporte del gas a un dispositivo de recuperación de energía (eficiencia de destrucción de al menos 99%) o un sistema de tratamiento que lo procesa para venta o uso. - Límites de emisión: 500 ppm de metano por volumen con monitoreo instantáneo de emisiones superficiales; o una concentración promedio de 25 ppm por volumen con monitoreo integrado de emisiones superficiales. - Fiscalización: Realizada por el operador. - Monitoreo: Trimestral y, en el caso de excesos, acciones correctivas y medición después de 10 días. - Reporte: Anual.
Colombia	Decreto 1077 ³⁵	2015	- Aplica a: Todos los rellenos sanitarios. - Requisito general: Los diseños de nuevos rellenos sanitarios o ampliación de existentes deberán incorporar un tren de evacuación de gases para la captura y quema. - Límites de emisión: No establece límites. - Fiscalización: Realizada por el operador. - Monitoreo: Trimestral o semestral. - Reporte: No se especifica.
España	Real Decreto 646 ³⁶	2020	- Aplica a: Todos los rellenos sanitarios. - Requisito general: Recoger, tratar, y utilizar (inyectado en la red de gases u oxidado mediante antorchas u otros sistemas de oxidación pasiva). - Límites de emisión: No establece límites. - Fiscalización: Realizada por las autoridades nacionales. - Monitoreo: Plan de monitoreo y acción y, en el caso de efectos negativos, notificación a autoridades con acciones correctivas. - Reporte: Anual.
EE. UU. – Oregon	Chapter 340-Division 239 ³⁷	2021	- Igual a California, excepto que aplica a los rellenos sanitarios con más de 200.000 toneladas acumuladas de residuos y los requisitos específicos dependen de la cantidad de metano generada.
EE. UU. – Maryland	COMAR 26.11.42 ³⁸	2023	- Igual a California, excepto que aplica a los rellenos sanitarios con más de 200.000 toneladas acumuladas de residuos y los requisitos específicos dependen de la cantidad de metano generada.

³⁴ <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-06/landfillfinalfro.pdf>

³⁵

<https://recursos.ccb.org.co/ccb/pot/PC/files/decreto1077.html#:~:text=El%20decreto%201077%20de%202015,r econocimiento%20de%20edificaciones%3B%20a%20la>

³⁶ <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2020-7438>

³⁷ <https://secure.sos.state.or.us/oard/displayDivisionRules.action?selectedDivision=6533>

³⁸ <https://www.law.cornell.edu/regulations/maryland/title-26/part-2/subtitle-11/chapter-26.11.42>

País	Norma	Año de vigencia	Requisitos
EE. UU. – Washington	Chapter 70A.450 RCW ³⁹	2024	- Igual a California, excepto que aplica a los rellenos sanitarios operacionales con más de 450.000 toneladas acumuladas de residuos y a los cerrados con más de 750.000 toneladas, y requiere que el uso de un dispositivo de recuperación de energía destruya 97% del metano por peso en vez de 99%.
Canadá	Norma de emisión de metano para rellenos sanitarios ⁴⁰	En proceso	- Aplica a: Rellenos sanitarios cerrados con más de 450.000 toneladas acumuladas y a rellenos operacionales con más de 100.000 toneladas o que acepten más de 10.000 toneladas anuales. - Requisito general: Requiere sistemas de control de emisiones: antorchas para quema, sistemas de biocubierta o biofiltros (eficiencia de destrucción de al menos 90% del metano) u otros dispositivos para la reutilización del biogás como fuente energética. - Límites de emisión: Si se genera más de 664 toneladas de metano anualmente deberá cumplir con menos de 25 ppm-m⁴¹, medido en 3 estaciones del año (primavera, verano y otoño) a través de un detector tipo dron. - Fiscalización: Realizada por el operador. - Monitoreo: Plan de monitoreo y acción. - Reporte: Anual.

Fuente: a partir de diferentes fuentes de información incluidas como nota al pie.

Elaborado por: Equipo consultor.

³⁹ <https://app.leg.wa.gov/RCW/default.aspx?cite=70A.540&full=true&pdf=true>

⁴⁰ <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/canadian-environmental-protection-act-registry/publications/reducing-landfill-methane-emissions.html>

⁴¹ Partes por millón - metro

03.

Resultados
modelación

3. Resultados modelación

La segunda etapa de esta consultoría consistió en la modelación económica de la implementación de alternativas para mejorar los niveles de captura y quema de metano en los rellenos sanitarios al año 2030, con el fin de evaluar los niveles de cumplimiento del PSM del Minsal.

3.1. Antecedentes de la modelación

3.1.1. Objetivos del modelo

Los objetivos de la modelación realizada fueron:

- Estimar la capacidad de reducción de emisiones de metano de los rellenos al 2030, mediante la continuación de la operación de los sistemas de captura activa y quema (o aprovechamiento) en aquellos que ya contaran con estos, o bien, la implementación de estos sistemas en los que no existiera.
- Establecer los parámetros relevantes que permitieran caracterizar la implementación de medidas de reducción de metano de los rellenos sanitarios de Chile.
- Identificar costos de implementación de las medidas de reducción de emisiones de metano en los rellenos sanitarios del país.

3.1.2. Horizonte temporal del modelo

El modelo proyecta las emisiones de los rellenos sanitarios comprendidos en este estudio para el período entre los años 2026 y 2030, de acuerdo con el periodo correspondiente a la primera meta establecida por el PSM.

3.1.3. Clasificación de rellenos modelados

Para efectos de este análisis, se utilizó como fuente de información la base de datos de SUBDERE (2024). En particular, se consideraron aquellos sitios de disposición clasificados como “rellenos sanitarios” y “rellenos manuales”. En total, se identificaron 42 sitios de este tipo, de los cuales 34 corresponden a rellenos sanitarios y los 8 restantes a rellenos manuales.

Estos cuarenta y dos rellenos se clasificaron en cuatro categorías para la modelación, en base a la información disponible en la base de datos de la SUBDERE y en sus RCA, considerando el periodo de operación, fecha estimada de cierre y si cuentan o no con sistema de captura y quema activo:

- Operativos: rellenos con sistema de captura y quema activos y operativos, algunos de los cuales cuentan con sistema de generación eléctrica a partir de biogás.
- Recuperados: rellenos sin sistemas de captura y quema activos, que requieren ser rehabilitados para que cuenten con estos sistemas.
- Cerrados: rellenos cuyo cierre está planificado para antes del 2026, por lo que no recibirán más RSD en el periodo modelado, pero de todas formas seguirán generando metano debido a procesos de descomposición de la materia orgánica que ya se encuentra depositada en ellos.

- Nuevos: rellenos sanitarios que deberán habilitarse para recibir residuos que no puedan ser procesados por rellenos existentes. Cabe mencionar que, para efectos de la modelación, se considera un “gran” relleno sanitario nuevo (teórico) que se encargue del tratamiento de los RSD de aquellos que cerrarán o de lugares que no cuentan con la capacidad para manejar todo el tratamiento. Este relleno sería el número 43 de la modelación.

3.1.4. Meta del Anteproyecto del PSM del Minsal

El Minsal, con el apoyo del MMA, ha desarrollado el anteproyecto del PSM para cumplir con el presupuesto de emisiones de gases de efecto invernadero para el período 2020-2030, asignado a través de la ECLP.

El Anteproyecto destaca la importancia del sector de residuos para el cumplimiento del presupuesto, motivo por el cual, durante el año 2023, el equipo de ImplementaSur desarrolló el estudio “Propuestas de instrumentos y medidas de mitigación para el sector residuos”, con el fin de apoyar al Minsal en el proceso de elaboración del PSM.

En base a ese estudio y al análisis de los equipos de los ministerios involucrados, se establece que el potencial de mitigación para las medidas proyectadas relacionadas con la captura y quema de biogás de relleno sanitario es de 5,65 millones de toneladas (Mt) de CO₂e para el período 2020-2030.

Este valor solo considera los rellenos nuevos y recuperados, debido a que las medidas adoptadas por los rellenos activos se encuentran incluidas en la línea base del cálculo, asumiendo que estas medidas de captura y quema ya implementadas de manera independiente permanecerán operativas sin la intervención del PSM.

Dado lo anterior, y como consecuencia de que el modelo desarrollado por el Equipo consultor integra todos los tipos de rellenos descritos, incluyendo los activos, se debe sumar los resultados de este grupo al potencial de mitigación de los 5,65 MtCO₂e establecidos en el Anteproyecto. Esta decisión se basa en el hecho de que, actualmente, no se puede asegurar que los rellenos activos mantendrán las tasas actuales de captura y quema, ya que, como se mencionó, no existen incentivos ni un sistema de fiscalización que los obliguen a mantener estos sistemas en operación.

De este modo, antes de realizar la modelación, se calcula el potencial de captura de estos rellenos para el mismo período comprendido entre los años 2026 y 2030, utilizando los supuestos de la consultoría anterior (“Propuestas de instrumentos y medidas de mitigación para el sector residuos”), y se obtiene un valor de potencial de mitigación adicional de 4,33 MtCO₂e.

Así, se denomina Meta Global del PSM a la suma de la Meta de Cumplimiento PSM y la línea base de rellenos con sistemas de captura y quema, la cual se traduce en un valor total de 9,98 MtCO₂e.

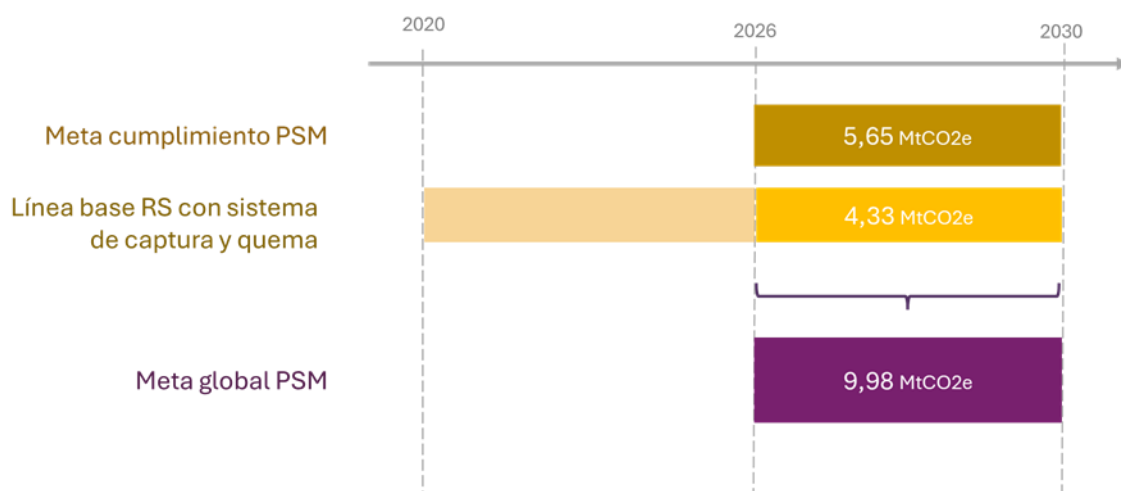


Figura 3-1: Meta global PSM: Meta PSM más la Operación rellenos sanitarios

Elaborado por: Equipo consultor.

3.2. Descripción de la modelación

3.2.1. Parámetros del modelo

- A. Costos de inversión y operación (CAPEX y OPEX), todos en dólares americanos.
 - a. Rellenos sanitarios operativos: Estos rellenos cuentan con sistemas de captura y quema activos, por lo que no requieren de inversión de CAPEX adicional para antorcha y sistema de succión. Por su lado requieren realizar gastos de mantención y de perforación e instalación de nuevos pozos para extracción de biogás cada año considerando que siguen recibiendo RSD en el periodo analizado. Costos considerados:
 - i. OPEX asociado a la campaña anual de pozos, con un costo de US\$ 5.000 por pozo con perforación.
 - ii. OPEX en mantenimiento, equivalente al 1% del CAPEX inicial.
 - iii. OPEX de sistemas de succión y antorcha, equivalente a US\$ 75.000.
 - iv. Costos de MRV de mercados de carbono de US\$ 50.000 anuales.
 - b. Rellenos sanitarios recuperados y nuevos: Estos rellenos requieren de inversiones iniciales significativas para implementar un sistema de succión y quema activa, así como la construcción de pozos para capturar el biogás. Los costos se desglosan en:
 - i. CAPEX para la implementación del sistema de succión y quema activa de US\$ 300.000.
 - ii. Construcción de pozos para residuos acumulados, con un costo de US\$ 500 por pozo desde la base.
 - iii. OPEX en mantenimiento, equivalente al 1% del CAPEX inicial.
 - iv. OPEX asociado a la campaña anual de nuevos pozos, con un costo de US\$ 5.000 por pozo con perforación.

- v. OPEX de sistemas de succión y antorcha, equivalente a US\$ 75.000.
 - vi. Costos de MRV de mercados de carbono de US\$ 50.000 anuales.
- c. Rellenos sanitarios cerrados: Estos rellenos han dejado de recibir residuos y no requieren inversiones adicionales en cuanto a CAPEX. El sistema de succión y quema activa sigue operando sin necesidad de expansión debido a la disminución del flujo de biogás. Los costos principales modelados incluyen:
 - i. CAPEX para la implementación del sistema de succión y quema activa de US\$ 300.000, en caso de que no cuente con un sistema.
 - ii. OPEX de mantenimiento, equivalente al 1% del CAPEX inicial.
 - iii. Costos de MRV para participación en mercados de carbono, con un valor fijo de US\$ 50.000.
- B. Tarifa de emisión de créditos de carbono: estimada en US\$ 0,2 por tCO₂e, aplicable a todos los rellenos que emitan créditos en algún mercado de carbono.
- C. Eficiencia de captura: capacidad del sistema de captura de biogás para recolectar el metano producido en los rellenos sanitarios.
 - a. Rellenos nuevos, cerrados y recuperados: se asume una eficiencia del 50% según recomendación del Experto, considerando tecnologías actuales.
 - b. Rellenos operativos: se utiliza la eficiencia estimada según información levantada en consultorías previas, la cual de estar disponible solo es para un periodo de tiempo específico y limitado. En caso de no contar con una estimación específica para algunos años o rellenos, se asume el 50% indicado por el Experto.
- D. Eficiencia de quema con antorcha cerrada: porcentaje de efectividad en la quema del biogás capturado, transformándolo en CO₂ y agua. Se establece en un 90%, reflejando tanto la eficiencia técnica como la disponibilidad de equipamiento, producto de posibles fallas y mantenimientos que impiden el funcionamiento continuo.
- E. Tasa de descuento para cálculo del Valor Actual Neto (VAN): Se considera un valor de 8% para descontar los flujos de los proyectos.

Otros valores utilizados, como densidades del biogás, fracción de metano en el biogás, cantidad capturada por pozo, factor de oxidación, potencial de calentamiento global del metano e indicadores financieros pueden ser revisados en el Anexo III.

3.2.2. Etapas del proceso de modelación

Etapa 1: Cálculo de potencial de captura

El primer paso consiste en realizar la estimación del potencial de captura de metano de cada relleno, es decir, el máximo de emisiones de metano que se puede capturar en cada uno de estos para el periodo 2026-2030. Este es el aporte que puede realizar cada instalación para cumplir la meta del PSM en tCO₂e/tCH₄ (IPCC, 2014).

A modo de ejemplo, si el Relleno 1 no cuenta actualmente con sistema de captura y quema activa, es categorizado como relleno recuperado, por lo que se asume que el sistema que implemente tendrá una eficiencia de captura de 50%, como se describe en la sección de supuestos. En base a esta eficiencia y otros parámetros, como la cantidad de residuos recibidos, se estima el total que debiera capturar para cada año en el periodo entre 2026 y

2030. Así, por ejemplo, para ese periodo se estima que el Relleno 1 debiera capturar 300.000 tCO₂e, a este valor se le denomina potencial de captura.

Al sumar el conjunto de los 43 rellenos modelados se alcanza un potencial de captura de 11.74 MtCO₂e para el período comprendido entre 2026 y 2030 para todos los rellenos.

Los rellenos operativos representan el mayor aporte a este potencial, ya que son los más grandes del país y procesan una gran cantidad de residuos. Los rellenos recuperados, al aplicar medidas de captura y quema, también podrían contribuir significativamente al cumplimiento de la meta. En el período analizado, los rellenos cerrados y nuevos presentan un impacto menor, aunque en el largo plazo los rellenos nuevos serán cada vez más significativos.

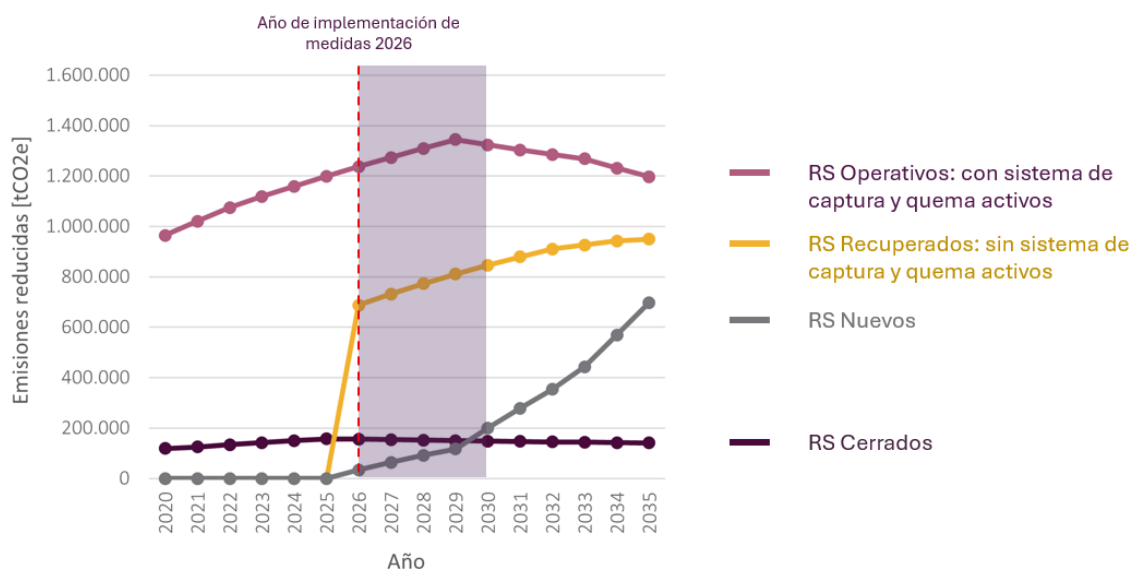


Figura 3-2: Potencial de captura por tipo de relleno 2026-2030

Elaborado por: Equipo consultor.

Etapa 2: Asignación de costos e ingresos

El modelo financiero desarrollado se basa en el análisis del flujo de costos y potenciales ingresos proyectados para cada relleno, con el objetivo de determinar el aumento de tarifa de gestión de residuos o el precio de venta de las reducciones de CO₂e necesario para que el VAN⁴² de cada una de estas operaciones sea igual a cero. En el Anexo III se incluye un diagrama del modelo realizado.

⁴² El VAN representa la diferencia entre el valor presente de los ingresos y costos proyectados, ajustado según su valor en el tiempo. Un VAN igual a cero indica que el proyecto, en teoría, recuperará la inversión inicial y los costos asociados, pero sin generar una ganancia adicional a la rentabilidad esperada de la iniciativa. Esto permite conocer el precio mínimo necesario para cubrir los costos del proyecto, evaluando así la factibilidad financiera y los costos totales de implementar el sistema de captura y quema.

De esta forma, se obtienen los ingresos necesarios para cubrir los costos de inversión y operación de los sistemas de captura y quema de metano para cada relleno sanitario: sea por la vía de aumento de tarifa o por la venta de créditos de carbono.

Etapa 3: Consolidación de resultados y sensibilizaciones

Una vez obtenidos los precios objetivos de las fuentes de ingresos posibles (para obtener un VAN de cero) para cada uno de los rellenos, se analizó el sistema en su conjunto para evaluar el enfoque regulatorio y de mercado, estableciendo costos promedio y totales para implementar las diversas medidas. La modelación permitió identificar los rellenos más costo-eficientes en la implementación de sistemas de captura y quema, lo que ayuda a evaluar los costos totales de la política pública, priorizar medidas y así reducir los costos totales.

3.3. Resultados

A nivel general, se estima que los 43 rellenos analizados tienen un potencial de captura de 11,74 MtCO₂e, mientras que la meta global asociada al PSM es de 9,98 MtCO₂e. Esto quiere decir que, si todos los rellenos capturaran y quemaran el 85% del potencial de metano que sus sistemas les permiten⁴³, se alcanzaría la meta del PSM al 2030.

3.3.1. Enfoque regulatorio

Es posible analizar los resultados en base a un enfoque regulatorio, es decir, al establecer una norma o regulación que obligue a los rellenos a capturar y quemar el 85% del potencial de captura, con el fin de asegurar el cumplimiento de la meta global asociada al PSM.

Para este análisis, se asume que todos los rellenos, independientemente de su antigüedad o tamaño, deben cumplir con el mismo nivel de exigencia. Lo que implica que todos los rellenos sanitarios, incluso los más pequeños y menos eficientes, deben contar con un sistema de captura y quema de biogás, obteniéndose un costo total de la política pública del orden de US\$ 61,1 millones, con un costo medio de 620 US\$/tCO₂e o 0,89 US\$/tonelada de residuos dispuesto.

Tabla 3-1: Resultados enfoque regulatorio periodo 2026-2030

% Mínimo sobre el potencial de cada RS	85%
Costos promedio	6,20 US\$/tCO ₂ e
	0,89 US\$/t Residuos
Costo total al 2030	US\$ 61,1 MM

Fuente: Modelación del Equipo consultor.

Elaborado por: Equipo consultor.

⁴³ Para efectos de este cálculo se asumió que el potencial de captura de un relleno es del 50% del metano generado en base a *benchmarks* del sector.

3.3.2. Enfoque de mercado

Por otro lado, se puede analizar las posibles medidas a implementar en base a incentivos ofrecidos por el mercado, solo considerando los 42 rellenos modelados y existentes, de forma que aquellos más costos eficientes sean los que aporten al cumplimiento del PSM. Con base en la modelación desarrollada por el Equipo consultor, se obtiene el potencial de captura de cada relleno y el valor al cual deberían venderse los bonos de carbono generados para cubrir los costos de inversión y operación del sistema de captura y quema. Estos datos se representan en la Curva de Costo Marginal de Abatimiento (MACC, por sus siglas en inglés).⁴⁴

En la siguiente figura se muestra la MACC obtenida del modelo para los diecinueve rellenos más costo-eficientes (en el Anexo IV se incluye el gráfico completo con los 42 rellenos); mientras que las barras en color violeta representan los catorce rellenos que permitirían cumplir con la meta PSM global si es que éstos capturan y quema el 100% de su potencial de captura para el año 2030. Las barras amarillas corresponden a rellenos menos costo eficientes, ya que necesitan precios superiores de carbono a los anteriores para rentabilizar la inversión, y si se aplicaran medidas solamente de mercado, estos no aportarían al cumplimiento de la meta.

⁴⁴ La MACC es una herramienta gráfica que permite analizar y visualizar las opciones disponibles para reducir emisiones de gases de efecto invernadero y sus costos asociados. En el eje X se representa la cantidad acumulada de reducción de emisiones, mientras que el eje Y muestra el precio del carbono en dólares por tonelada de CO₂e. Cada barra representa un relleno, ordenadas de menor a mayor costo, para visualizar de forma clara el comportamiento de cada uno.

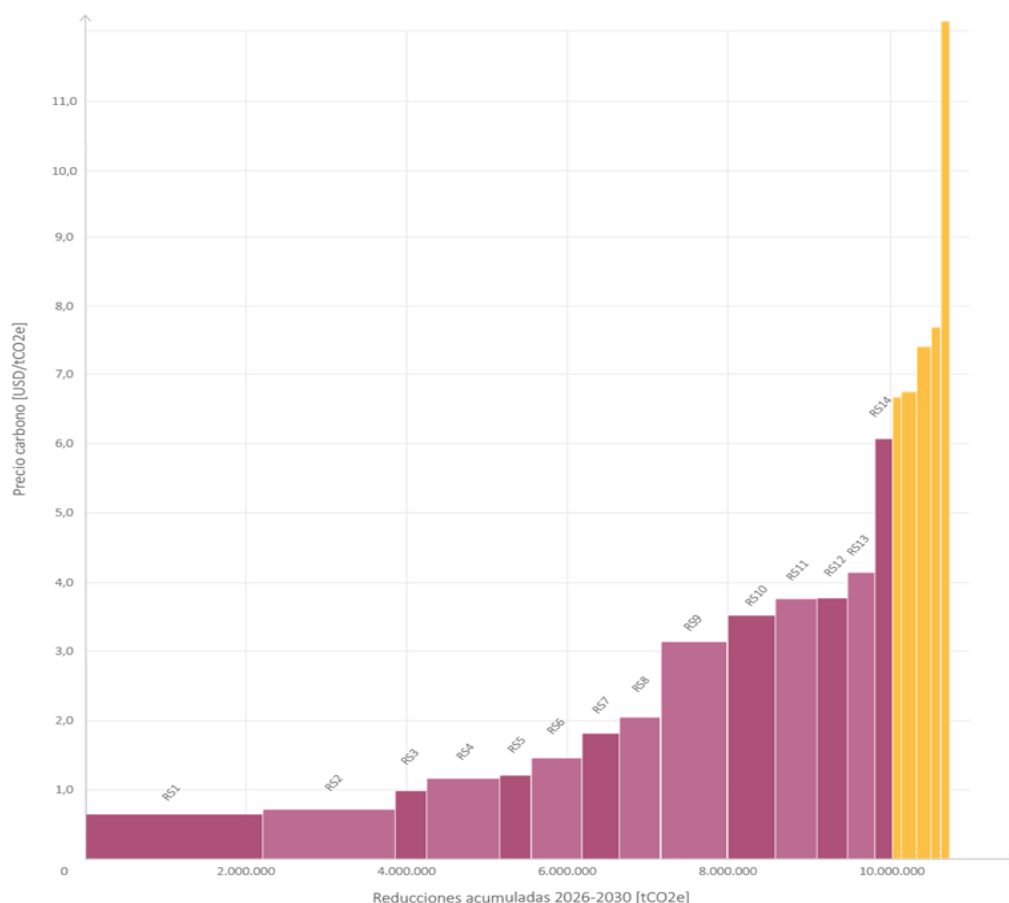


Figura 3-3: Extracto de Curva MACC para rellenos más costo eficientes en periodo 2020-2030

Elaborado por: Equipo consultor.

En el gráfico se observa que el costo medio de los 14 rellenos más costo eficientes necesarios para cumplir con el PSM es de 1,82 US\$/tCO₂e, y 13 de estos presentan valores menores a 5 US\$/tCO₂e. Este valor se utiliza como referencia porque corresponde al monto que actualmente se paga en Chile por concepto de impuesto al CO₂ o impuesto verde, por lo que para este grupo de rellenos sería económicamente atractivo participar en mecanismos de compensación de emisiones nacionales o internacionales.

El relleno número catorceavo necesario para cumplir con la meta global del PSM presenta un costo por tCO₂ superior a 6 US\$/tCO₂e, lo que indica que los incentivos actuales de mercado serían insuficientes para justificar la inversión en captura y quema de metano para este caso en particular.

De manera similar, los 28 rellenos restantes presentan costos por tCO₂e para cubrir las inversiones que promedian más de 31 US\$/tCO₂e, lo que no permitiría su participación en el marco del SCE a los impuestos verdes vigente hoy en día.

Considerando únicamente los primeros 14 rellenos, con los cuales se cumpliría la meta del PSM al 2030, se estima que el costo total a nivel de sistema sería de US\$ 18,1 millones, con un promedio de 1,82 US\$/tCO₂e o US\$ 0,67 por tonelada de residuos dispuesta. Por lo tanto,

para este grupo de rellenos sanitarios, participar en el SCE a los impuestos verdes sí sería viable.

Tabla 3-2: Resultados enfoque de mercado periodo 2026-2030

N° RS necesarios para cumplimiento meta PSM	14
Costos promedio	1,82 US\$/tCO ₂ e
	0,67 US\$/t Residuos
Costo total al 2030	US\$ 18,1 MM

Fuente: Modelación del Equipo consultor.

Elaborado por: Equipo consultor.

3.3.3. Análisis de rellenos según estado actual de participación en los mercados voluntarios de carbono.

Para evaluar la prefactibilidad de las medidas consideradas en el enfoque de mercado, resulta útil revisar el estado actual y elegibilidad de los rellenos sanitarios los mercados voluntarios de carbono. De este modo, los rellenos se dividen en los siguientes grupos:

1. Rellenos registrados y habilitados en estándares internacionales

De acuerdo con el levantamiento realizado por el Equipo consultor, a la fecha existen dos rellenos registrados en el mercado voluntario de carbono (a través de Verified Carbon Standard (VCS) y Gold Standard (GS)) con un período crediticio vigente, lo cual les permite emitir créditos de carbono. Estos aportarían con un 9,6% de la meta global del PSM al año 2030.

Además, se da cuenta de seis rellenos registrados en el MDL, aunque actualmente no pueden emitir créditos debido a la falta de reglamentos para la implementación del nuevo mecanismo bajo el Artículo 6.4 del Acuerdo de París. Estos rellenos podrían optar por transferir sus programas a estándares internacionales como VCS, GS, BioCarbon o Cercabono, entre otros. Estos programas permiten la transición de proyectos ya validados en el MDL, por lo que no existirían barreras importantes para una transferencia. En conjunto, estos representan el 40,5% de la meta global del PSM.

Cabe destacar que todos estos rellenos requerirían precios del carbono menores a 5 US\$/tCO₂e para que las inversiones sean rentables, por lo que estarían presente los incentivos para continuar con la captura y quema de metano.

Tabla 3-3: Rellenos registrados y habilitados en estándares internacionales

Clasificación	N° Proyectos	Potencial de captura 2026-2030 (tCO ₂ e)	% de meta PSM 2030	Precio carbono para rentabilizar inversión (US\$/tCO ₂ e)
---------------	--------------	---	--------------------	--

A. Rellenos registrados en VCS (con periodo crediticio vigente hasta 2030)	2	1.132.021	9,6%	1,46 – 2,05
B. Rellenos registrados en MDL (transferibles a otros estándares)	4	4.043.155	40,5%	0,65 - 3,77
Total	6	5.175.176	50,2%	

Fuente: Levantamiento de información del Equipo consultor.

Elaborado por: Equipo consultor.

2. Rellenos registrados en estándares con periodos crediticios expirados.

Este grupo incluye rellenos que, aunque están registrados en estándares como MDL, VCS o GS, presentan periodos crediticios vencidos o carecen de actividad reciente. Situación que les impediría emitir créditos, pues las reglas de estos estándares establecen plazos específicos para la generación de créditos.

La captura y quema de metano en estos rellenos sigue siendo adicional, ya que, sin incentivos económicos o regulatorios, el metano no se capturaría ni quemaría. Este grupo incluye tres proyectos en MDL, uno en GS y uno en VCS, que representan un 34% de la meta global del PSM para el año 2030. Para los rellenos registrados en MDL y GS el precio del carbono requerido sería inferior a los 5 US\$/tCO₂e, mientras que para el relleno en VCS el precio necesario sería de 6,67 US\$/tCO₂e. Lo cual sugiere la necesidad de un precio del carbono más alto para justificar la inversión, y por lo que se recomienda realizar un análisis de costos más específico, considerando las características particulares de este caso.

Tabla 3-4: Rellenos registrados y con periodo crediticios expirados

Clasificación	N° Proyectos	Potencial de captura 2026-2030 (tCO ₂ e)	% de meta PSM 2030	Precio carbono para rentabilizar inversión (US\$/tCO ₂ e)
C. Rellenos registrados en MDL con periodo crediticio expirado	3	1.661.578	16,7%	0,99 – 3,14
D. Rellenos registrados en GS con periodo crediticio expirado	1	1.650.544	16,5%	0,72
E. Rellenos registrados en VCS sin actividad reciente	1	121.395	1,2%	6,67
Total	5	3.652.735	34,4%	

Fuente: Levantamiento de información del Equipo consultor.

Elaborado por: Equipo consultor.

3. Rellenos sin registro en estándares.

Este grupo incluye rellenos que no han participado en ningún estándar internacional de carbono, lo cual les impide emitir créditos elegibles para mercados voluntarios internacionales.

En esta categoría se encuentran 3 proyectos cuyo precio del carbono necesario para rentabilizar la inversión sería menor a 5 US\$/tCO₂e, lo cual sugiere que un mecanismo nacional de emisión de créditos justificaría económicamente la implementación de sistemas de captura y quema en estos casos. En cambio, 26 rellenos de menor tamaño y baja eficiencia presentan precios superiores al valor del impuesto verde, por lo que, desde el punto de vista del mercado, no existirían los incentivos económicos para la implementación de estos sistemas.

Tabla 3-5: Rellenos sin registro en estándares internacionales

Clasificación	N° Proyectos	Potencial de captura 2026-2030 (tCO ₂ e)	% de meta PSM 2030	Precio carbono para rentabilizar inversión (US\$/tCO ₂ e)
F. Rellenos no registrados en ningún programa con precio de carbono estimados medio a 5 US\$	3	1.318.452	13,2%	1,21 – 4,14
G. Rellenos no registrados en ningún programa	26	1.308.629	13,1%	Mayores a 6,67 (Costo medio 22,92)
Total	29	2.627.081	26,3%	

Fuente: Levantamiento de información del Equipo consultor.

Elaborado por: Equipo consultor.

04.

Recomendaciones

Recomendaciones y próximos pasos

4. Recomendaciones

4.1. Recomendación de medidas

A partir del diagnóstico levantado, se concluye que para alcanzar las metas del PSM al 2030 existen grandes desafíos, dado que los esfuerzos que se hacen a la fecha por gestionar el metano en rellenos sanitarios no son suficientes para alcanzar las metas fijadas.

Las medidas propuestas por el Equipo consultor tienen como objetivo alcanzar el cumplimiento del PSM para el año 2030, además de preparar el camino para la implementación de acciones enfocadas en el largo plazo, considerando los compromisos de Chile en el PSM y la Ley Marco de Cambio Climático (LMCC) al 2050.

A continuación, se describen seis medidas que abarcan tanto la habilitación de mercados de carbono (en amarillo) como la implementación de regulaciones (en morado), las cuales pueden ser desarrolladas en paralelo y ajustadas conforme avancen los procesos:

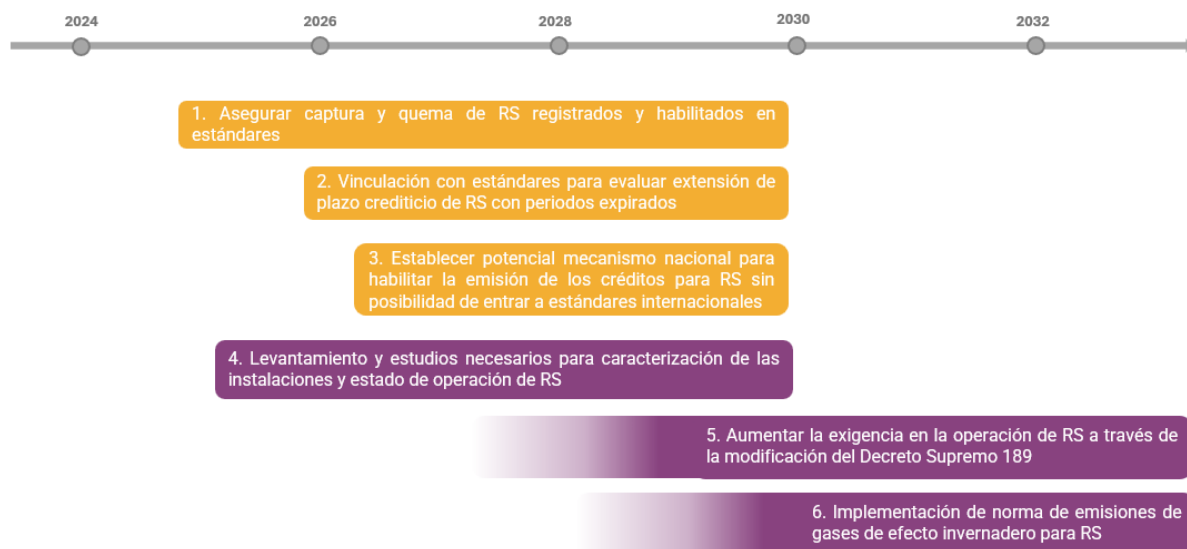


Figura 4-1: Resumen de recomendaciones

Elaborado por: Equipo consultor.

1. Asegurar captura y quema de gas en rellenos sanitarios registrados y habilitados en estándares.

Como se observó en la sección de resultados, existen rellenos actualmente registrados en el MDL y habilitados para emitir créditos. Sin embargo, debido a que este mecanismo se encuentra detenido a la espera de acuerdos sobre reglamentos y regulaciones, no es posible emitir y comercializar estos créditos en la actualidad.

Estos rellenos presentan potencial de contribuir con el 40% de la meta global del PSM para el año 2030, por lo que es crucial facilitar su participación mediante otros mecanismos. Actualmente, estándares internacionales como VCS y GS permiten la migración de programas de actividades con periodos vigentes desde el MDL.

Se recomienda que los ministerios realicen campañas de sensibilización con los operadores de estos rellenos para promover una rápida migración y emisión de los créditos de carbono. Esto puede lograrse mediante la vinculación con estándares internacionales, gestionando reuniones en las que estos presenten los procesos a los equipos técnicos de los ministerios y operadores de rellenos sanitarios. Si bien los estándares no ofrecen capacitaciones específicas, pueden facilitar la transición al eliminar barreras de entrada.

El Equipo consultor estima que esta medida podría implementarse durante el año 2025, permitiendo que los rellenos comiencen a emitir créditos entre 2025 y 2026. Lo que aseguraría que los rellenos que actualmente capturan y queman metano continúen realizándolo, mientras que aquellos que no lo hacen implementen las medidas requeridas. Adicionalmente, se incentivaría mejoras en las eficiencias de captura y quema, aumentando el aporte a la meta global del PSM más allá de lo estimado inicialmente.

2. Vinculación con estándares para evaluar extensión de plazo crediticio de rellenos sanitarios con periodos expirados.

Cinco rellenos sanitarios registrados en MDL, GS y VCS tienen periodos crediticios expirados, lo que significa que no pueden emitir créditos bajo las metodologías vigentes. Estos representan más del 34% de la meta del PSM al 2030 según el modelo desarrollado, por lo que resulta prioritario buscar alternativas para su acreditación.

Se sugiere vincularse con estándares internacionales para evaluar la posibilidad de habilitar esquemas que extiendan los periodos crediticios hasta 2030 o más adelante. Esto debe considerar los criterios de adicionalidad que evalúan los estándares, asegurando que los proyectos generen reducciones que no ocurrirían en ausencia del proyecto.

En el caso de los rellenos sanitarios, si bien la regulación existente exige contar con sistemas de captura y quema, esta no define eficiencias mínimas ni tampoco tecnologías específicas, por lo que mantener la operación de estos sistemas sigue siendo adicional. Además, los costos asociados a la mantención de estos sistemas representan una carga financiera relevante para los operadores, lo que podría llevarlos a abandonar estos procesos sin los incentivos adecuados.

Se debe también considerar que los ministerios planean trabajar en regulaciones para exigir porcentajes mínimos de captura y quema. Esto limitaría el principio de adicionalidad hasta la fecha en que dichas normativas entren en vigor, lo cual podría ser utilizado como argumento para solicitar la extensión de los periodos crediticios.

En el caso de que algún estándar permita habilitar este mecanismo para permitir la emisión de créditos, se estima que la implementación también podría realizarse durante 2025, lo que permitiría comenzar a emitir créditos durante el 2026, ajustándose a los plazos para el cumplimiento del PSM al 2030.

3. Establecer potencial mecanismo nacional para habilitar la emisión de los créditos para rellenos sanitarios sin posibilidad de entrar a estándares internacionales.

En caso de no ser posible la implementación de la medida anterior, se plantea la opción de desarrollar un mecanismo nacional que permita emitir créditos de carbono. Esto no solo beneficiaría a los rellenos cuyos periodos crediticios han expirado, sino que también permitiría

la participación de aquellos que no pueden participar en los mercados internacionales debido a que no se registraron en el MDL ni otros estándares al momento de la entrada en operación.

Según la modelación, tres rellenos sanitarios que actualmente no participan del mercado de carbono, que representan un 13% de las emisiones totales del PSM al 2030, mostrarían costos de captura y quema que pueden cubrirse con la venta de créditos de carbono a precios inferiores a 5 US\$/tCO₂e, justificando económicamente esta medida bajo los valores actuales del impuesto verde.

Dado que los precios del carbono en mercados internacionales han aumentado, y que el precio social del carbono en Chile ha llegado a 64,3 US\$/tCO₂e, es razonable esperar un incremento en el impuesto verde local, lo cual habilitaría a más rellenos para participar en estos esquemas. En el caso de que el precio al que se comercialicen los créditos de carbono subiera a 10 US\$/tCO₂e, se podrían observar la incorporación de otros cinco rellenos sanitarios al mercado, otorgando más holgura al cumplimiento de la meta global del PSM.

La implementación de un mecanismo nacional requiere analizar aspectos regulatorios, técnicos e institucionales, asegurando que este sistema sea compatible con iniciativas ya existentes como Huella Chile y el impuesto verde. Este mecanismo también debería alinearse con la LMCC y facilitar la transición hacia metas de largo plazo.

En la sección siguiente se detallan recomendaciones específicas para recopilar la información necesaria que permita el diseño e implementación de este mecanismo. Los plazos de implementación dependerán de las características del instrumento y la capacidad del Estado de habilitar con celeridad las definiciones y principales componentes de éste.

Las tres recomendaciones anteriores relacionadas con facilitar el acceso a mecanismos de mercados dependen de que las condiciones de mercado sean favorables para los rellenos sanitarios y que estos sean capaces de sortear las barreras de entrada y percibir el valor económico. Es posible que no todos los actores vean estos beneficios o que la implementación sea más lenta de lo esperado, por lo que es necesario que el Estado también cuente con herramientas regulatorias que ayuden a alcanzar la meta del PSM en el mediano y largo plazo, como pueden ser el fortalecimiento del DS 189 o una NE, como se verá en las siguientes subsecciones.

4. Levantar información y desarrollar estudios necesarios para la caracterización de las instalaciones y estado de operación de los rellenos sanitarios.

El presente estudio logró levantar información de forma directa de las operaciones de solo 3 instalaciones del universo de los 42 rellenos sanitarios incluidos en esta consultoría. De la revisión en el capítulo 2.2 del cumplimiento con el artículo 16 del DS 189/2005, se pudo estimar que el 53% de los rellenos sanitarios revisados cumplen con los tres incisos de ese artículo, sin la certeza de que los sistemas operen de manera óptima o a su máximo potencial de captura de metano. De esta forma, el porcentaje de captura de los rellenos es incierto debido a la escasa información verificada disponible.

El contar con información de mayor calidad permitiría entender el tamaño y características del desafío por alcanzar las metas climáticas del sector y facilitaría la medición real del impacto de estas medidas.

Por lo anterior se recomienda realizar un levantamiento de información detallado del estado y operación de los rellenos sanitarios para establecer una línea de base certera que refleje de mejor manera el cómo operan los rellenos sanitarios en Chile. El detalle de esta recomendación se desarrolla en la sección de próximos pasos.

5. Aumentar la exigencia en la operación de rellenos sanitarios a través de la modificación del Decreto Supremo 189.

Con el fin de reducir las emisiones de metano de los rellenos sanitarios, el DS 189/2005 se presenta como un vehículo regulatorio adecuado para aumentar la exigencia en la operación de los rellenos sanitarios y mejorar la tasa de captura y quema. En la modificación del decreto se identifica la oportunidad para explicitar requisitos más exigentes en la gestión de biogás y mitigación de las emisiones de metano. En específico, se recomendaría modificar los siguientes artículos:

En el Artículo 49 sobre Planes de Monitoreo de biogás:

- Fortalecer las exigencias de los Planes de Monitoreo de biogás para incluir consideraciones del manejo de biogás, tal como la reportabilidad de biogás a generar (con residuos y caracterización de estos), actualización de esta proyección y declarar tecnologías de captura y gestión del biogás y/o metas en torno a una exigencia de captura y quema del gas. Los siguientes *benchmarks* podrían guiar el diseño de estas especificaciones⁴⁵:

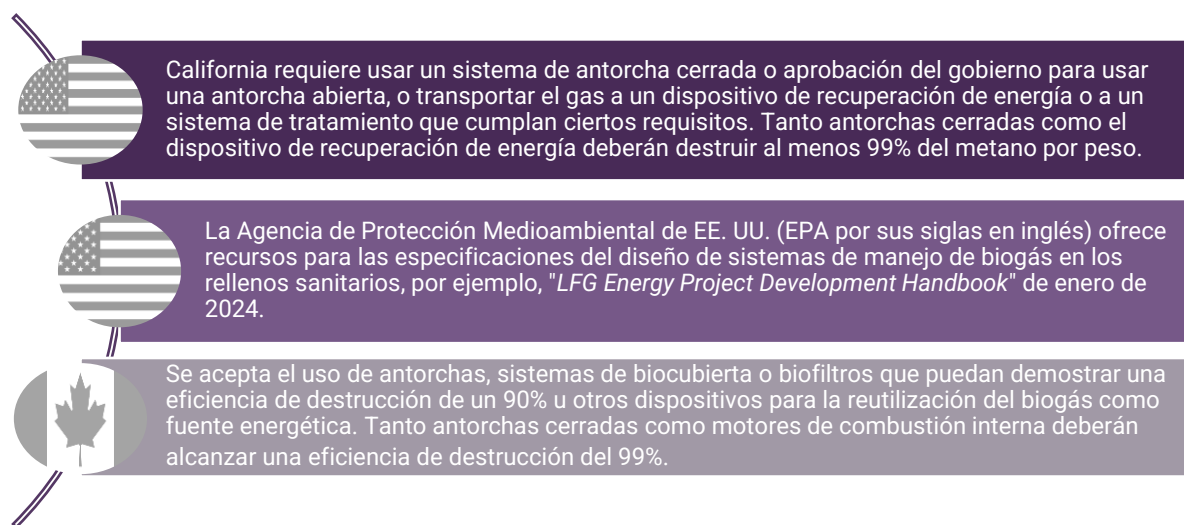


Figura 4-2: *Benchmarks* de especificaciones de tecnología

Elaborado por: Equipo consultor.

⁴⁵ Además de los *benchmarks* incluidos en esta sección, se destaca el informe de Industrious Labs publicado en octubre de 2024, "Turning down the heat: How the U.S. EPA can fight climate change by cutting landfill emissions". El reporte incluye recomendaciones para posibles cambios a estándares nacionales en 2025, basadas en una modelación del potencial de mitigación y relacionadas a las características que obligan la instalación de un sistema de recolección y control de biogás, el diseño del sistema y mejoras al sistema de cobertura.

En el Artículo 52 sobre el monitoreo y reporte:

- Levantar una mejor y mayor cantidad de datos sobre el manejo de biogás e incluir que se haga monitoreo y reporte del biogás teórico a generar, biogás capturado (de acuerdo con el medidor), y biogás quemado y/o aprovechado con una periodicidad específica.
- Un insumo importante para aspectos relacionados a los procesos de monitoreo y reporte de los rellenos sanitarios del país es el protocolo de MRV para la captura y destrucción de metano que se desarrolló en el marco del Programa Reciclo Orgánicos Chile (*"Protocol for Quantification of GHG Emission Reductions from Landfill Gas Capture and Destruction in Chile"*).
- Establecer un procedimiento para monitoreo con tal que se reporte información útil y necesaria para la cuantificación de emisiones del país. Así como incluir requisitos y métodos de análisis para la verificación y fiscalización, además de las sanciones en caso de no cumplir con los requisitos. Los siguientes *benchmarks* podrían guiar el diseño de estas especificaciones:

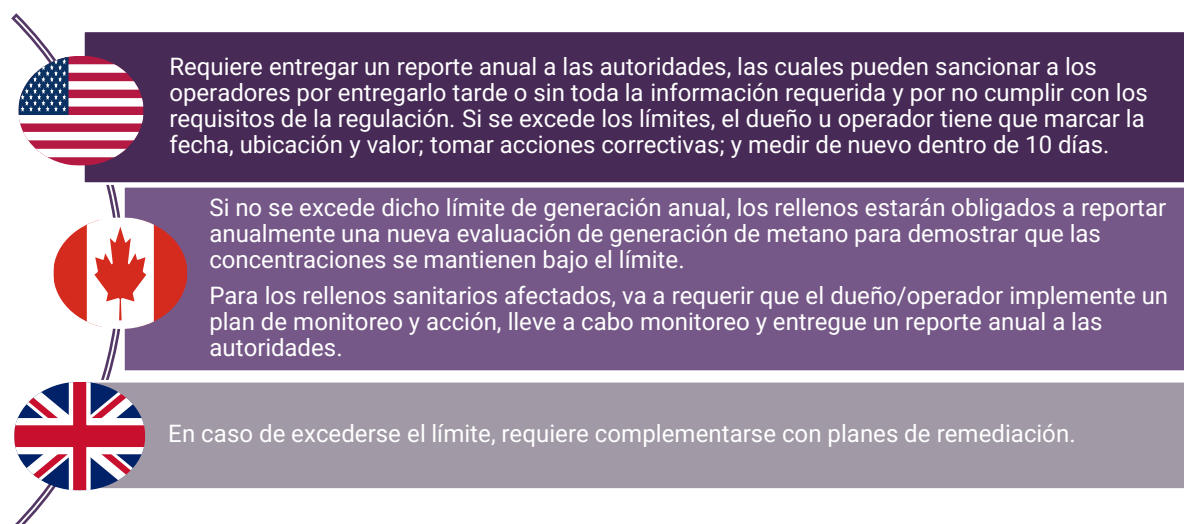


Figura 4-3: *Benchmarks* de verificación y fiscalización.

Elaborado por: Equipo consultor.

En el Título VI sobre el cierre y abandono:

- Fortalecer y explicitar las exigencias del manejo de biogás para los rellenos sanitarios cerrados.
- De manera específica, **en el Artículo 53** incluir de manera explícita que los Planes de Cierre detallen cómo la operación y mantención del sistema de biogás considerará la continuación de la captura y quema del biogás después del cierre.
- A su vez, **en el Artículo 55** explicitar que la actividad de operación y mantención del sistema de manejo de biogás debe considerar la captura y quema/aprovechamiento del biogás generado con similar o igual intensidad que la mantenida durante el periodo de operación, para evitar menores esfuerzos en el manejo del biogás generado.
- Por último, también en el **Artículo 55**, incluir de manera explícita la exigencia del monitoreo y el reporte de biogás después del cierre.

6. Implementar una NE de gases de efecto invernadero para los rellenos sanitarios.

Con el establecimiento de una NE para los rellenos sanitarios se limita la cantidad máxima de emisiones de metano permitida para distintas configuraciones de rellenos. Para guiar el desarrollo de la NE, en la Tabla 4-1 se presenta un *benchmark* con otros países destacando las tres consideraciones principales de una NE: el límite máximo de metano, la aplicabilidad de la norma a los rellenos sanitarios según ciertas características, y los requisitos del monitoreo para asegurar que las reducciones sean medibles y verificables para la trazabilidad.

Tabla 4-1: Características de normas de emisión con *benchmarks* internacionales

Característica	California, EE. UU.	Canadá	Reino Unido
Fijar límites máximos de metano por cierta cantidad de residuos/áreas, superficie, tipos de cobertura, entre otros	Si se excede a la concentración de 200 ppm de metano por volumen, usando monitoreo instantáneo de la superficie, se requiere instalar un sistema de recolección y control de gas y que ningún punto en la superficie exceda a: (a) 500 ppm de metano por volumen con monitoreo instantáneo de emisiones superficiales; o (b) una concentración promedio de 25 ppm por volumen con monitoreo integrado de emisiones superficiales.	Si se genera más de 664 toneladas de metano anualmente, se hace obligatoria la implementación de sistemas de control de emisiones para que en todas sus áreas que cuenten con cobertura intermedia o final se genere una concentración de menos de 25 ppm-m.	El valor promedio de flujo de metano en la superficie de cada zona muestreada no deberá superar a: zonas cubiertas permanentemente (0,0 01 mg/m2/segundo) y zonas cubiertas temporalmente (0,1 mg/m2/segundo).
Definir la aplicabilidad de la norma a los rellenos sanitarios según tamaño, geografía, tipologías y tecnologías	Aplica a los rellenos sanitarios con más de 450.000 toneladas acumuladas de residuos y en que la capacidad calorífica del relleno debido al biogás acumulado es mayor a 3.000.000 British thermal units recuperadas por hora.	Va a aplicar a rellenos ya cerrados que cuenten con más de 450.000 toneladas de residuos municipales acumulados (que recibieron residuos después del 1 de enero de 2009), y a rellenos abiertos que ya tengan más de 100.000 toneladas de residuos municipales o que han aceptado más de 10.000 toneladas anuales en cualquier año operacional.	Aplica a todas las clases de rellenos sanitarios.
Definir los protocolos, procedimientos, requisitos y métodos de análisis para el monitoreo para	Requiere seguimiento trimestral por el dueño/operador con monitoreo instantáneo de emisiones superficiales o monitoreo integrado	Los rellenos deberán asegurar que en todas sus áreas que cuenten con cobertura intermedia o final se genere una concentración de menos de 25 ppm-m,	Requiere que el operador se realice monitoreo a nivel anual o trimestral a través del método de flux boxes.

Característica	California, EE. UU.	Canadá	Reino Unido
mostrar que las reducciones sean medibles y verificables	de emisiones superficiales y seguimiento trimestral del sistema de recolección y control del gas.	medido en 3 estaciones del año (primavera, verano y otoño) a través de un detector tipo dron.	

Elaborado por: Equipo consultor a partir de diferentes referencias indicadas en la sección 5.

Dado que las NE no contemplan los procesos de verificación y fiscalización debido a su enfoque en la trazabilidad de las emisiones y no en la regulación, se recomienda incorporar estos procesos dentro de las actualizaciones del DS 189, tal como está detallado en la recomendación anterior.

Se recomienda que la implementación de la NE se haga efectiva desde el año 2030, dado que las medidas de mercado presentadas en esta sección podrían implementarse de manera más rápida y serían suficientes para alcanzar la meta del PSM en ese horizonte temporal. A partir del 2030, la norma podría entrar en vigor para garantizar el cumplimiento y mejor operación de los rellenos a largo plazo, lo que además fomentaría la incorporación de los rellenos menos costo-eficientes que actualmente carecen de incentivos para participar en los mercados de carbono.

Sin embargo, si alguna de las medidas de mercado no llegara a implementarse o si los rellenos no actúan dentro de los plazos establecidos, se debería anticipar la aplicación de la norma para garantizar el logro de las metas del PSM al 2030.

4.2. Próximos pasos

A continuación, se recomienda realizar los próximos estudios y trabajos con tal de crear las condiciones habilitantes para lograr el cumplimiento de las metas climáticas en el corto plazo.

Levantar información específica sobre la operación de los rellenos sanitarios para establecer una línea de base en cuanto a residuos orgánicos dispuestos y gestión de metano.

Con el objetivo de perfeccionar el análisis técnico y económico del modelo desarrollado en esta consultoría y afinar las futuras exigencias del manejo de biogás en los rellenos sanitarios, se recomienda efectuar un levantamiento de información para establecer una línea de base robusta. Este levantamiento de información podría considerar las características de coberturas e impermeabilización, pozos, sistemas de succión, quema y captura de los principales rellenos sanitarios. El levantamiento de esta información permitiría establecer niveles de captura según norma en base a la realidad de cada relleno sanitario.

Esta acción requerirá desarrollar una herramienta de recolección de datos que considere toda la información relevante a levantar y un proceso para solicitar esta información de los rellenos sanitarios. El proceso debe considerar plazos y sanciones en caso de no cumplir para asegurar el establecimiento de una línea base comprensiva.

Además, el levantamiento de información permitirá participar en los esfuerzos de distintas entidades que buscan mejor información de emisiones de metano para dar transparencia al desafío global. Una sinergia con una iniciativa actual es el WasteMAP (o Waste Methane

Assessment Platform en inglés)⁴⁶, liderado por Rocky Mountain Institute y Clean Air Task Force con financiamiento del Global Methane Hub. A modo de ejemplo, y como insumo para potenciales sinergias se agrega al Anexo V el formulario de información que requiere WasteMap para recopilar información de Gobiernos y Municipios. Este catastro se debe complementar con mediciones en el lugar utilizando tecnologías de medición como las especificadas en el capítulo 2.3.5, las cuales podrían ser financiadas con fondos nacionales o internacionales tales como el NDC Partnership, el Global Methane Hub u otra iniciativa.

WasteMAP:

La plataforma de WasteMAP consolida información de residuos y emisiones de metano de distintas fuentes, incluyendo Carbon Mapper, Climate TRACE, EDGAR, RMI, SRON, UNFCCC, UN-Habitat, y el Banco Mundial, y levanta información directamente de gobiernos y municipalidades para complementar. La iniciativa busca transparentar emisiones de metano y destacar oportunidades de mitigación y mejores prácticas para reducir emisiones. WasteMap posee información de ciudades y sitios de disposición final y ayuda a generar análisis a través de sus modelos con la información reportada.



Es importante destacar que iniciativas de medición satelital podrían ayudar a levantar fugas de metano de grandes rellenos, pero pierde capacidad de medir rellenos más pequeños o con menos fugas (es decir que gestionan de mejor manera su metano). Es por lo anterior que se recomiendan también iniciativas de levantamiento de fugas de metano como la realizada por el Ministerio de Medioambiente de Canadá recientemente, donde se utilizó medición en terreno mediante vehículos equipados con instrumentos de medición de metano y modelos de aproximación de emisiones para medir más de 25 instalaciones en la Gran Área de Toronto de manera precisa y costo-eficiente⁴⁷ (Gillespie et al., 2024).

Calibrar modelo económico desarrollado en esta consultoría para la proyección de quema y captura y sus respectivos costos para estimaciones particulares más precisas de cada relleno sanitario e incluirlas en las proyecciones a largo plazo, junto con validar la aplicabilidad de estos sistemas u otras tecnologías en cada relleno sanitario.

En base a los datos mejorados obtenidos a partir de la recomendación anterior, sería recomendable realizar una recalibración del modelo que asegure una mayor representatividad y precisión en la estimación de costos, porcentajes de captura y quema de metano. Este ajuste permitiría incorporar proyecciones a largo plazo que consideran factores como las tecnologías específicas utilizadas por cada relleno, la variabilidad en la disposición de residuos y posibles ajustes en las regulaciones ambientales.

⁴⁶ <https://wastemap.earth/>

⁴⁷ Más información sobre el estudio "[*Estimating methane emissions from the waste sector in southern ontario using atmospheric measurements*](#)"

Este enfoque permitiría ir construyendo un modelo más robusto que no solo evalúe los costos, sino que también facilite una planificación de políticas públicas en el largo plazo, con el fin de asegurar el cumplimiento de los objetivos del PSM.

Evaluar disponibilidad de estándares internacionales para proyectos elegibles y/o diseño e implementación de programa nacional de acreditación de reducciones.

Es recomendable avanzar en la vinculación con estándares internacionales para evaluar su disposición a habilitar un esquema que permita extender el período de generación de créditos hasta el 2030, o más allá. Dado que la implementación de sistemas de captura de metano representa una inversión y/o un costo operacional adicional para los rellenos sanitarios, esta medida podría viabilizar la extensión del periodo crediticio de rellenos que ya cuentan con un Documento de Diseño de Proyecto (PDD, por sus siglas en inglés) validado en algún estándar, incentivando así la captura y quema de metano en el corto a mediano plazo.

Asimismo, se sugiere evaluar el diseño e implementación de un mecanismo nacional para habilitar la emisión de los créditos, considerando que se justificaría desde un punto económico para un porcentaje importante de los rellenos analizados.

Este programa podría aportar para sistemas como el impuesto verde, permitiendo a la industria de manejo de residuos generar créditos de carbono a tranzarse en el mercado local. Además de fortalecer la infraestructura de mitigación para la futura implementación de una NE, actualizaciones de la NDC y asegurar la sostenibilidad de las reducciones de emisiones en el largo plazo.

Estudiar en más detalle modificaciones a la normativa para robustecer estándares para el manejo de biogás de sitios de los rellenos sanitarios.

Se requiere estudiar más en detalle las potenciales modificaciones al DS 189/2005 y el desarrollo de una NE para relleno sanitarios. El robustecimiento de los estándares significa aumentar las exigencias de las tecnologías a utilizar; el MRV y fiscalización de los sistemas; y eventualmente automatización de los procesos mediante el uso de tecnología. Este estudio proporcionó *benchmarks* internacionales para dar insumos en la generación de nuevas regulaciones, las cuales se podrán tomar como referencia para el diseño detallado de la nueva normativa.

Por otro lado, se recomienda colaborar con el equipo de trabajo de la NE canadiense tomando como base la buena relación que existe entre ambos países y los esfuerzos de ambas naciones en la disminución de las emisiones de metano provenientes de residuos orgánicos.

Profundizar el sistema de financiamiento de gestión de residuos a nivel nacional y mejorar estándares de contratos de recolección, reciclaje, transporte y disposición final.

En línea con el Informe del Comité de Carbono-Neutralidad y Resiliencia 2024, es necesario profundizar en el sistema de financiamiento para los proyectos de gestión de residuos a nivel nacional. Lo anterior con tal de permitir incentivos para que los rellenos sanitarios mejoren sus prácticas de gestión del biogás con el mismo nivel de exigencia con el que hoy en día gestionan sus lixiviados.

Lo anterior incluye visitar el sistema de tarifas de disposición para incorporar mejores prácticas o uso de tecnologías más eficientes (como uso de *biocover*, quema del metano, separación y revalorización de residuos, entre otros).

Referencias y Anexos

5. Referencias

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (s.f.). *Landfill Gas Primer - An Overview for Environmental Health Professionals*. Obtenido de Chapter 5: Landfill Gas Control Measures: <https://www.atsdr.cdc.gov/hac/landfill/html/ch5.html>
- Department of the Environment and Energy. (2017). *Analysis of Waste Sector Projects and Methods: Performance of the landfill gas method against the offset integrity standards*.
- Environmental Protection Agency. (2020). *LFG Energy Project Development Handbook, Chapter 7: Best Practices for Landfill Gas Collection System Design and Installation*.
- EPA. (2011). *Available and emerging technologies for reducing greenhouse gas emissions from municipal solid waste landfills*. Obtenido de <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/landfills.pdf>
- Garland, E., Ayandele, E., & Frankiewicz, T. (2024). *Deploying Advanced Monitoring Technologies at US Landfills*. RMI.
- Gillespie et al. (2024). Estimating methane emissions from the waste sector in southern ontario using atmospheric measurements. *Journal of the Air & Waste Management Association*.
- Global Methane Initiative. (2023). *Review of Waste Methane Mitigation Measures, Abatement Costs, and Policy Options*.
- International Solid Waste Association. (2023). *The Impact of Management Choices on Landfill Methane Emissions*.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. .
- Ministerio de Salud. (2005). *Decreto Supremo 189*.
- Siegel, K., Humann-Guillemot, T., & Biniotoglou, I. (13 de Febrero de 2024). *A guide to monitoring and quantifying methane emissions from the waste sector*. Obtenido de Clean Air Task Force: <https://www.catf.us/2024/02/guide-monitoring-quantifying-methane-emissions-waste-sector/>
- Sullivan, P. S., & Huff, R. H. (2022). The Evolution of Methane Emissions Measurements at Landfills: Where are We Now? *A&WMA's 115th Annual Conference & Exhibition, Paper #1166621*.
- Sullivan, P., & Henkelman, J. (18 de Marzo de 2019). *Understanding landfill gas monitoring techniques*. Obtenido de Waste Today Magazine: <https://www.wastetodaymagazine.com/news/landfill-gas-monitoring-techniques/>
- Terraza, H., & Willumsen, H. (2009). *Guidance Note on Landfill Gas Capture and Utilization*. Inter-American Development Bank.

UNDP. (2022). *What are carbon markets and why are they important?* Obtenido de <https://climatepromise.undp.org/news-and-stories/what-are-carbon-markets-and-why-are-they-important>

6. Anexos

Anexo I: Metodología, principales supuestos y parámetros

A continuación, se presenta la metodología, y los principales supuestos y parámetros utilizados para el desarrollo y análisis de las actividades de la consultoría.

1. Metodologías

1.1. *Generación, captura, valorización y quema, y emisión de metano de los rellenos sanitarios del país*

Para el cálculo de la línea base de emisiones de metano de rellenos sanitarios se utilizaron dos bases de datos principales, el (1) SNP del MMA, y el (2) “Informe: diagnóstico y catastro nacional de residuos sólidos domiciliarios” de la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE) del 2024⁴⁸.

La primera fuente de información entrega un registro histórico y proyectado (1950 a 2060) de la cantidad de residuos sólidos que son dispuestos por tipo de sitio de disposición final, tipo de residuo, y por región, entre otros. Mientras que la segunda fuente de información entrega una visión más específica del estado actual de la disposición de residuos sólidos domiciliarios en el país, identificando aquellos sitios de disposición final vigentes, año de inicio y cierre esperado, la cantidad de residuos recibidos durante el 2023, entre otros.

Para la estimación de las emisiones de metano a nivel nacional, la principal fuente utilizada fue la proyección del SNP, mientras que para el análisis específico por relleno sanitario se realizó una combinación de ambas bases de datos con tal de considerar la disposición de residuos sólidos en el tiempo y su composición, y los plazos de operación identificados junto con la capacidad por sitio.

- **Estimación de emisiones a nivel nacional**

Para la estimación de emisiones a nivel nacional, se definieron dos escenarios. El Escenario A que considera una estimación de emisiones de metano basada en la proyección actual de residuos y su composición, y un Escenario B que considera la implementación del Anteproyecto del PSM del Minsal⁴⁹, con foco en aquellas medidas que desvían residuos desde los sitios de disposición final, como la “Medida 1: Valorización de Residuos Orgánicos”, la “Medida 3: Reciclaje de Papel y Cartón”, y la “Medida 4: Reducción del desperdicio de alimentos”.

Para el Escenario B, se consideró la cantidad de residuos desviados por región estimados en la consultoría “Propuesta de instrumentos y medidas de mitigación para el sector residuos” (IDS 608897-36-LE23)⁵⁰ desarrollado por ImplementaSur.

- **Estimación de emisiones a nivel de sitio de disposición**

⁴⁸ https://proactiva.subdere.gov.cl/handle/123456789/635?_ga=2.78561878.336877176.1713192383-1211940567.1713192383

⁴⁹ https://degreyd.minsal.cl/wp-content/uploads/2024/04/Propuesta_Anteproyecto_PSM_Sector_Residuos-1.pdf

⁵⁰ <https://degreyd.minsal.cl/cambio-climatico-plan-sectorial-de-mitigacion-sector-residuos-expediente-publico/>

El cálculo de las emisiones de metano por sitio de disposición servirá para hacer una modelación más detallada del efecto de los diferentes instrumentos en el presupuesto de emisiones de gases de efecto invernadero asignado al sector salud.

Para ello, se utilizaron principalmente las dos fuentes de información mencionadas anteriormente. De esta forma, el estudio de SUBDERE se utilizó como base para establecer la capacidad de tratamiento de cada relleno sanitario identificado en él, y la cantidad de RSD histórica y proyectada del SNP permitió estimar de manera gruesa cuántos residuos, y de qué tipo, se han dispuesto y se pueden llegar a disponer en cada sitio hasta el año de cierre proyectado.

A modo de contexto, de la base de datos de SUBDERE, se consideraron aquellos sitios de disposición clasificados como “rellenos sanitarios” y como “rellenos manuales”. En total, se identificaron 42 sitios de este tipo, donde 34 fueron rellenos sanitarios y los 8 restantes, manuales. Su distribución en las regiones del país se presenta en la Figura 6-1.

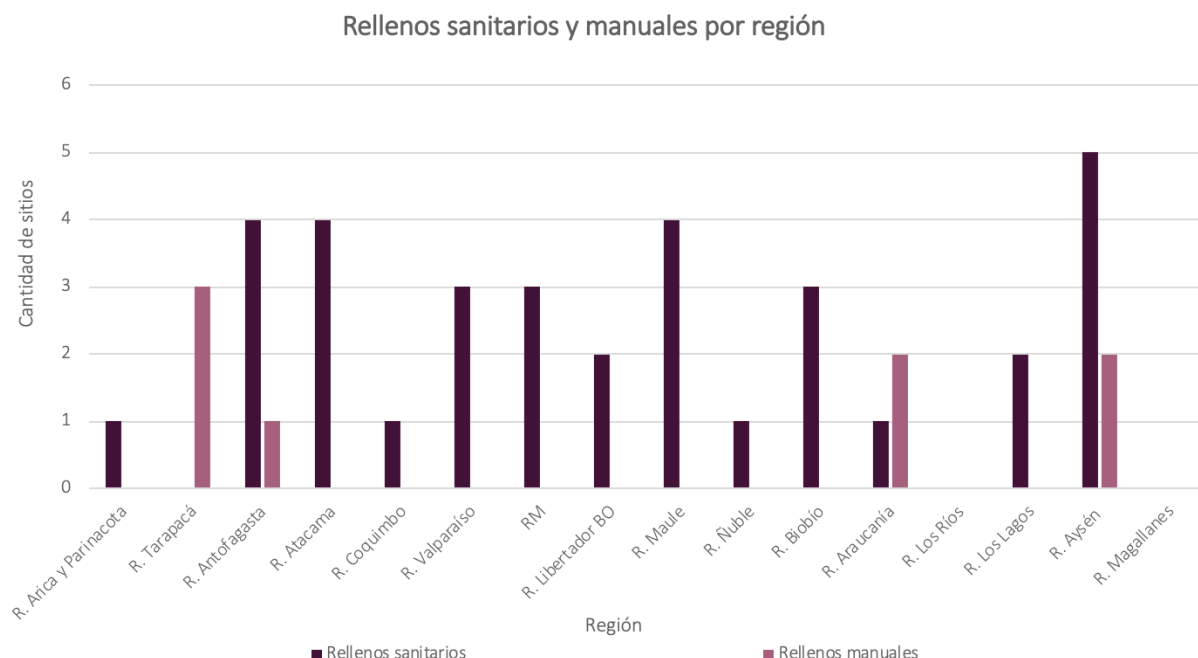


Figura 6-1: Cantidad de rellenos sanitarios y manuales distribuidos en las regiones del país.

Elaborado por: Equipo consultor.

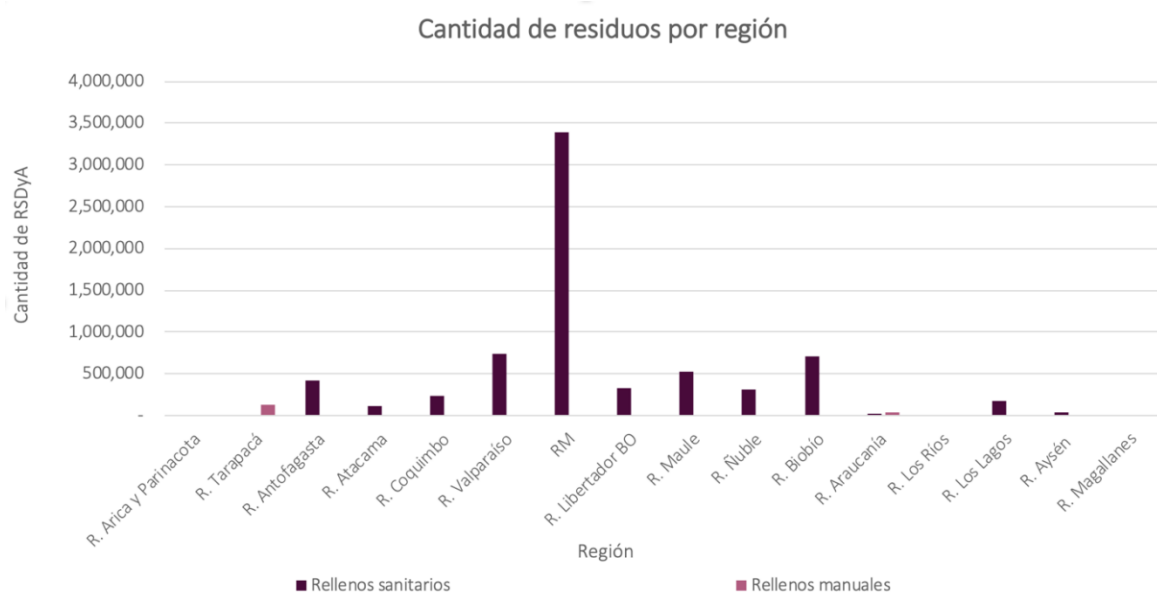


Figura 6-2: Cantidad de residuos en los rellenos sanitarios y manuales distribuidos en las regiones del país.

Elaborado por: Equipo consultor.

1.2. Tasa estimada de cumplimiento del Art. 16 del DS 189/2005

El Artículo 16 del DS 189/2005 del Minsal⁵¹ establece que

Todo proyecto de Relleno Sanitario **deberá contemplar un sistema de manejo de biogás** diseñado en base a una proyección de la cantidad de biogás que se generará en éste y que garantice condiciones de seguridad adecuadas tanto al interior de la instalación como en sus alrededores.

El diseño del sistema de manejo de biogás deberá **considerar la mayor extracción posible del biogás generado durante las etapas de operación y cierre de la instalación**, debiéndose contemplar la utilización del biogás extraído y en caso de que total o parcialmente ésta no sea posible, el biogás no utilizado deberá ser sometido a un proceso que garantice el control del riesgo de formación de mezclas explosivas tanto en el interior como en el exterior de la instalación.

Se **deberá justificar técnicamente el diseño de los componentes del sistema de manejo de biogás**, incluyendo los radios de influencia y ubicación de las chimeneas de captación y drenaje de gases (Ministerio de Salud, 2005).

Para la revisión del Artículo 16 del DS 189/2005, se consideraron los tres principales incisos: 1) si el relleno sanitario contempla un sistema de manejo de biogás, 2) si considera la mayor extracción posible del biogás generado y la utilización o control del biogás extraído y 3) si justifica el diseño de los componentes del sistema de manejo de biogás.

En la siguiente tabla se presenta el resumen de la cantidad de rellenos sanitarios por región que fueron identificados y se destacan los rellenos sanitarios que fueron revisados para

⁵¹ <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=268137>

estimar la tasa de cumplimiento con los tres incisos del Artículo 16 y su relación respecto a la cantidad de RSD dispuestos según la información de SUBDERE.

Para estimar la tasa de cumplimiento con los tres incisos, se revisaron antecedentes de 17 rellenos sanitarios del país⁵², considerando aquellos en los que se dispone mayor cantidad de RSD según el estudio de SUBDERE, correspondiente al 94,9% de RSD dispuestos en todos los rellenos sanitarios identificados. La estimación contempló la revisión de RCAs y/o fiscalizaciones (según disponibilidad) con foco en la búsqueda de evidencia textual sobre la incorporación de un sistema de manejo de biogás en el sitio, o la existencia de sanciones por la falta de este, respectivamente.

Se consideró este alcance principalmente por la falta de especificidad en lo exigido en el artículo en cuestión, sumado a la escasa información disponible al respecto.

Tabla 6-1: Análisis de la revisión de rellenos sanitarios revisados para el cumplimiento normativo.

Región	N° RS identificados	RSD de RS identificados (kton)	N° RS revisados	RSD de los revisados (kton)	% de RSD dispuesto en RS revisados
Región de Arica y Parinacota	1	0,2	0	-	0.0%
Región de Tarapacá	0	-	0	-	0.0%
Región de Antofagasta	4	424,1	2	343,2	80.9%
Región de Atacama	4	123,6	0	-	0.0%
Región de Coquimbo	1	238,6	1	238,6	100.0%
Región de Valparaíso	3	736,4	3	736,4	100.0%
Región Metropolitana de Santiago	3	3.388,7	3	3.388,7	100.0%
Región del Libertador General Bernardo O'Higgins	2	335,5	1	285,6	85.1%
Región del Maule	4	528,8	2	492,1	93.1%
Región del Ñuble	1	312,1	1	321,1	100.0%
Región del Biobío	3	709,7	3	709,7	100.0%
Región de La Araucanía	1	25,8	0	-	0.0%
Región de Los Ríos	0	0,0	0	-	0.0%
Región de Los Lagos	2	173,7	1	173,1	99.7%
Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo	5	42,6	0	-	0.0%
Región de Magallanes y de la Antártica Chilena	0	-	0	-	0.0%
Total	34	7.039,8	17	6.679,5	94.9%

Elaborado por: Equipo consultor

⁵² Para estimar la tasa de cumplimiento, se asumió, por la falta de información al respecto, que todos los rellenos sanitarios revisados tienen una altura total superior a seis metros y están obligados a contemplar con un sistema de manejo de biogás, como establece el Artículo 16 del Decreto Supremo 189/2005.

Como se pudo ver en la subsección anterior, la cantidad de residuos dispuestos en los 8 rellenos manuales identificados corresponde solo a 165,9 kilo tonelada o 2,3% de la cantidad dispuesta en todos los rellenos sanitarios y manuales identificados. Por lo que, para este análisis se desestimó su revisión por considerarse irrelevante comparado con el nacional.

1.3. Costos y eficiencias de medidas de captura, quema y valorización

Para el levantamiento de los costos de inversión y operación de los sistemas de captura, quema y/o valorización se utilizaron referencias internacionales, información confidencial levantada previamente por el Equipo consultor en asesorías anteriores y la validación de un Experto⁵³.

Esta información fue contrastada con otras referencias internacionales disponibles para evitar la sobre o subestimación de estos en el desarrollo de la siguiente actividad.

Para los costos y eficiencias de cobertura se utilizaron referencias bibliográficas e información levantada y validadas con el Experto.

1.4. Fuentes de financiamiento de medidas

Para identificar posibles fuentes de financiamiento de medidas, se hizo una búsqueda en internet para encontrar oportunidades nacionales e internacionales que podrían aplicar a proyectos de mitigación de este tipo en Chile. Además, se consideró como potenciales modelos de negocios habilitantes el SCE del Impuesto Verde nacional y mercado voluntario de carbono.

Para cada fuente identificada, se revisó información pública con el objetivo de caracterizar la fuente con información clave como su objetivo, el público al cual va dirigido, el año de vigencia y el periodo de postulación, como el tipo y monto de financiamiento, en caso de estar disponible.

1.5. Revisión: normas y protocolos internacionales

La Ley 21.455 o LMCC de Chile faculta al MMA para crear NEs que establezcan la cantidad máxima de un gas de efecto invernadero y/o forzante climático de vida corta con el objetivo de cumplir con la ECLP y Contribución Determinada a Nivel Nacional (CDN).

Para ello, la Ley define que cada NE debe contener:

- Cantidad máxima de emisión de uno o más gases de efecto invernadero,
- Estándar de emisiones de referencia por tecnología, sector y/o actividad,
- Ámbito territorial y periodo en que aplicará la norma, y
- Sinergias con otros instrumentos de gestión del cambio climático y de calidad de aire.

Además, la Ley también mandata a que la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) sancione a los infractores como parte de la fiscalización y el cumplimiento permanente de las NE. Además, mandata a que la SMA establezca los protocolos, procedimientos, requisitos y métodos de análisis para el monitoreo y verificación de las normas, según sea necesario.

⁵³ El Experto cuenta con más de 10 años en proyectos de captura y manejo de biogás desde rellenos sanitarios en el país.

En cuanto a su elaboración, cuando un plan sectorial de mitigación incluya una NE, el MMA tendrá un plazo de seis meses desde la publicación del DS donde se aprueba el plan sectorial de mitigación para iniciar el desarrollo de dicha NE.

Para guiar la elaboración de la NE de metano para Chile se ha realizado una revisión bibliográfica de NEs y protocolos internacionales en la que se identificaron y analizaron 11 experiencias nacionales y subnacionales que regulan las emisiones de metano de rellenos sanitarios.

2. Principales supuestos y parámetros

Por el tipo de metodología y análisis desarrollado, el único punto que requiere la presentación de principales supuestos y parámetros es la “Generación, captura, valorización y quema, y emisión de metano de los rellenos sanitarios del país”.

Por lo tanto, en esta subsección se presentarán las consideraciones y datos principales usados para esta actividad, en concreto, para la estimación de emisiones de metano desde rellenos sanitarios tanto a nivel nacional como a nivel específico por relleno sanitario.

2.1. Estimación de emisiones a nivel nacional

En primer lugar, se establece como principal supuesto que solo se consideraron los residuos sólidos dispuestos en rellenos anaeróbicos⁵⁴. No se consideraron los residuos dispuestos en vertederos y basurales debido al foco de la consultoría, la baja probabilidad de que estos sitios de disposición final cumplan con requisitos regulatorios y el bajo control que se tiene sobre estos.

De todas formas, se hizo un análisis general de los principales vertederos del país, y debido a la capacidad de disposición y las características propias de estos (ubicación, clima, año de cierre proyectado, entre otros), se concluyó que su impacto a nivel país podría ser bajo en comparación a la de los rellenos sanitarios⁵⁵.

Por otro lado, la distribución por clima se mantiene igual al utilizado en la estimación del SNP, tal como se presenta en la Tabla 6 -2. Es importante mencionar que en paréntesis se incluye el código por región, el cual se utilizará a lo largo de todo este informe.

⁵⁴ No se consideraron los rellenos semi aeróbicos porque, según la base de datos compartida, no tiene asignados residuos.

⁵⁵Según el último año disponible en el INGEI, las emisiones totales por disposición de RSD en vertederos corresponde a menos del 8% de las emisiones de metano totales por la disposición en rellenos sanitarios.

Tabla 6-2: Clima por región

Clima	Boreal templado y seco	Boreal templado y húmedo
Región	1. Región de Arica y Parinacota (CL-AP) 2. Región de Tarapacá (CL-TA) 3. Región de Antofagasta (CL-AN) 4. Región de Atacama (CL-AT) 5. Región de Coquimbo (CL-CO) 6. Región de Valparaíso (CL-VS) 7. Región Metropolitana de Santiago (CL-RM) 8. Región del Libertador General Bernardo O'Higgins (CL-LI)	1. Región del Maule (CL-ML) 2. Región del Ñuble (CL-NB) 3. Región del Biobío (CL-BI) 4. Región de La Araucanía (CL-AR) 5. Región de Los Ríos (CL-LR) 6. Región de Los Lagos (CL-LL) 7. Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo (CL-AI) 8. Región de Magallanes y de la Antártica Chilena (CL-MA)

Elaborado por: Equipo consultor.

En cuanto a los parámetros utilizados para la estimación de emisiones se consideraron los compartidos por el MMA, los cuales se revisaron en una sesión de trabajo con la contraparte para asegurar que la estimación fuera comparable.

2.2. Estimación de emisiones a nivel de sitio de disposición

En primer lugar, del estudio desarrollado por SUBDERE, se identificó para cada relleno sanitario y manual del país, la ubicación a nivel regional, la cantidad de residuos dispuestos y los periodos de operación de estos (año de inicio y cierre). Todo esto en torno a un año que se definió como base correspondiente al 2023, año en el que se asume que se levanta la información del estudio.

Identificado esto para cada uno de los sitios del estudio de SUBDERE, se estimó la participación regional de cada relleno, según la capacidad de tratamiento. Para calcular eso, se tomó como supuesto que la capacidad de cada relleno se traduciría en una capacidad de tratamiento de RSD porcentual respecto a la cantidad de residuos generados a nivel regional. Esto quiere decir que, para aquellas regiones que contaran con más de un sitio, cada sitio tendría una participación porcentual específica en relación con la cantidad de RSD generados y dispuestos en este tipo de sitios de disposición final. Esta participación porcentual aplicó tanto para el año definido como base (2022) como para la información histórica y proyección de la cantidad de RSD a tratar por relleno según la estimación del SNP, tomando como límite los años de inicio y cierre de operaciones.

De esta forma, se asume que la participación respecto al total regional es constante en el tiempo dentro de la vida útil del sitio. Esto es un supuesto grueso dentro de la consultoría, sin embargo, debido a la complejidad de ver cuánto variaría el volumen de disposición de los demás sitios aún operativos, o bien, cuánto se dispondría en un sitio nuevo, se considera un supuesto conservador al definir que no aumentará y, por ende, no se generarían más emisiones en el sitio de disposición en cuestión.

Es importante mencionar que esto se realiza solo con el objetivo de realizar una aproximación gruesa de la cantidad de residuos que trató y podría tratar un sitio específico.

De igual forma, otro supuesto que se realizó para cada sitio de disposición fue mantener la proporción de residuos por tipo que se presenta en la base de datos del INGEI a nivel regional.

Este supuesto, al igual que el anterior, solo tiene sentido para el desarrollo de una estimación gruesa y no corresponde necesariamente a una realidad.

Por último, debido a que la información en cuanto a la captura de metano no se encuentra desagregada a nivel de sitio de disposición, para efectos de esta estimación no se consideran, sin perjuicio de que estas si fueron considerados en el análisis a nivel país.

Anexo II: Resultados - Levantamiento y consolidación de la información

1. Generación de emisiones de metano a nivel país y por sitio de disposición identificado

1.1. Cantidad histórica y proyectada de RSD

Las siguientes figuras presentan la cantidad histórica y proyectada de RSD desde 1991 a 2050 por tipo de residuo para los dos escenarios evaluados.

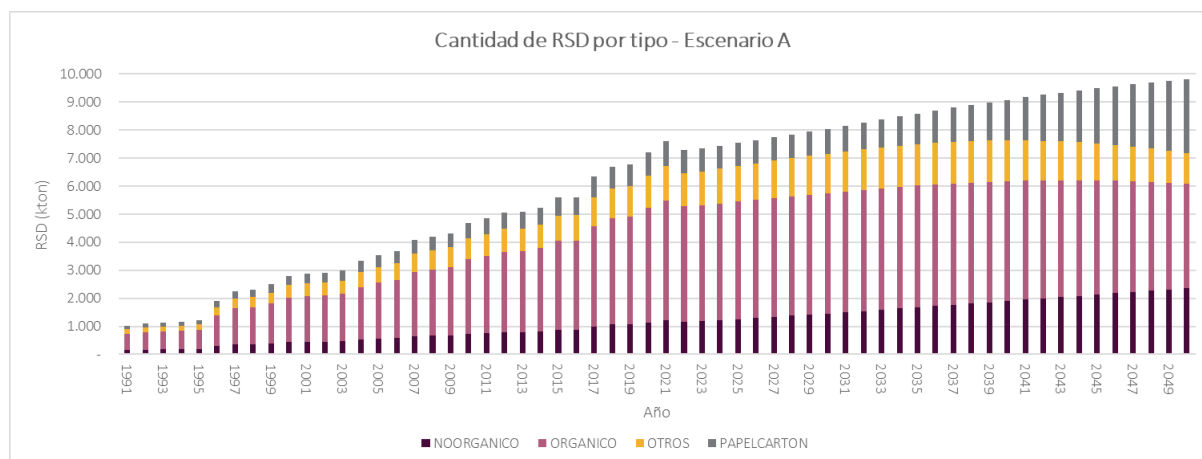


Figura 6-3: Cantidad de RSD dispuesto por tipo en rellenos sanitarios - Escenario A.
Elaborado por: Equipo consultor.

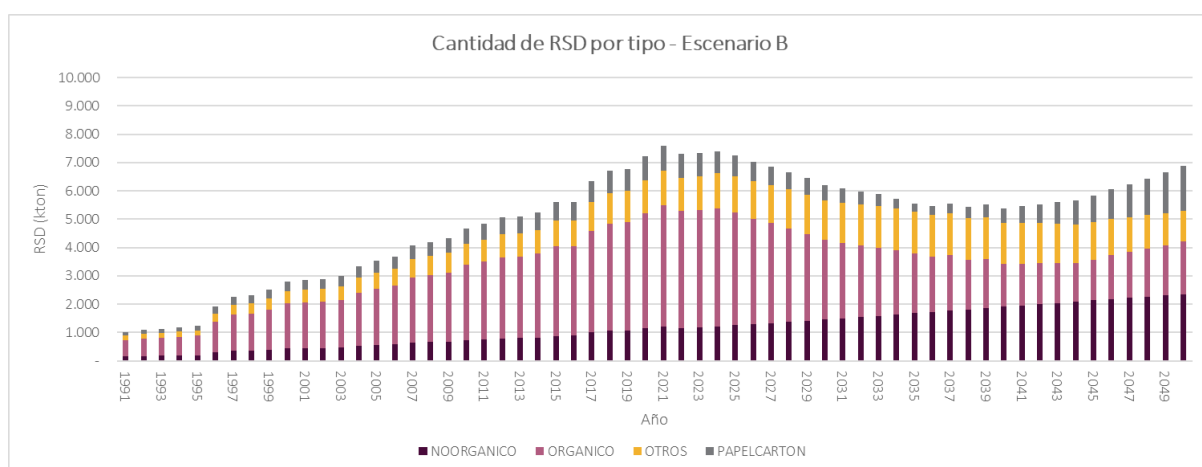


Figura 6-4: Cantidad de RSD dispuesto por tipo en rellenos sanitarios - Escenario B.
Elaborado por: Equipo consultor.

Es importante mencionar que, en el Escenario B, el aumento en la cantidad de papel y cartón que se observa no se debe a una disminución en el porcentaje de valorización de este residuo, el cual se asumió como un valor constante de 70%⁵⁶ desde 2035 al 2050, sino al aumento en la cantidad de papel y cartón que se proyecta para esos años, lo que se puede observar en el Escenario A.

⁵⁶ Este supuesto se apoya en la implementación de la Ley REP y, específicamente, en las metas de recolección y valorización de los Envases y Embalajes (EyE).

1.2. Proyección de la generación de metano

A continuación, se presentan la generación de metano estimada por relleno sanitario identificado.

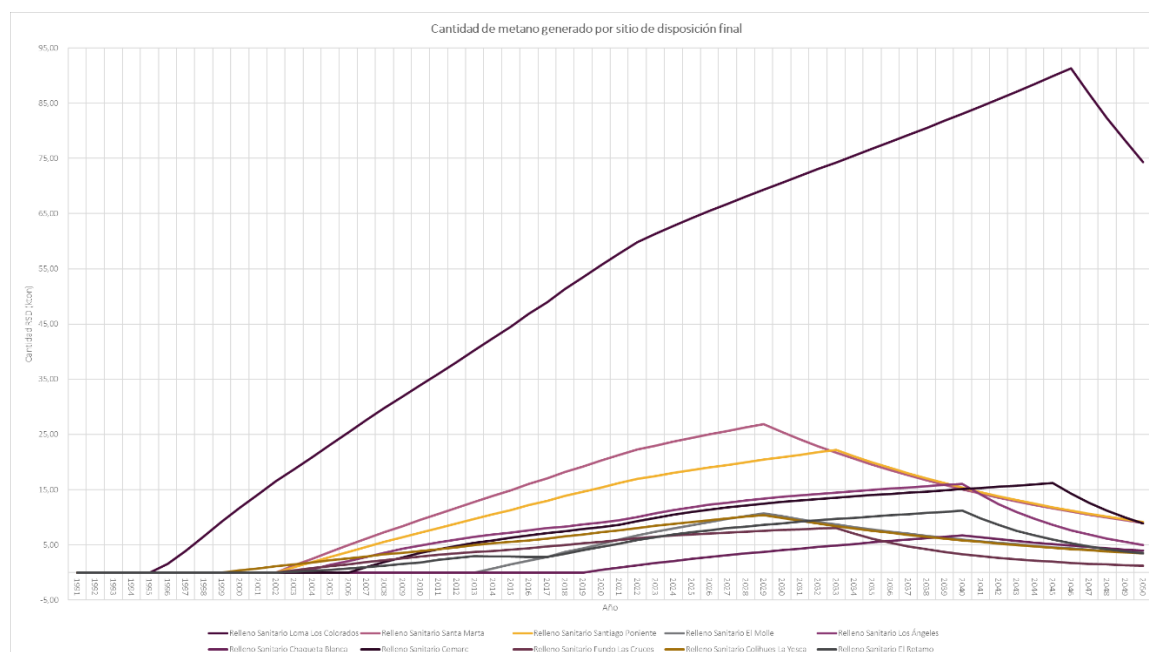


Figura 6-5: Generación de metano estimada de rellenos sanitario – Parte 1.
Elaborado por: Equipo consultor.

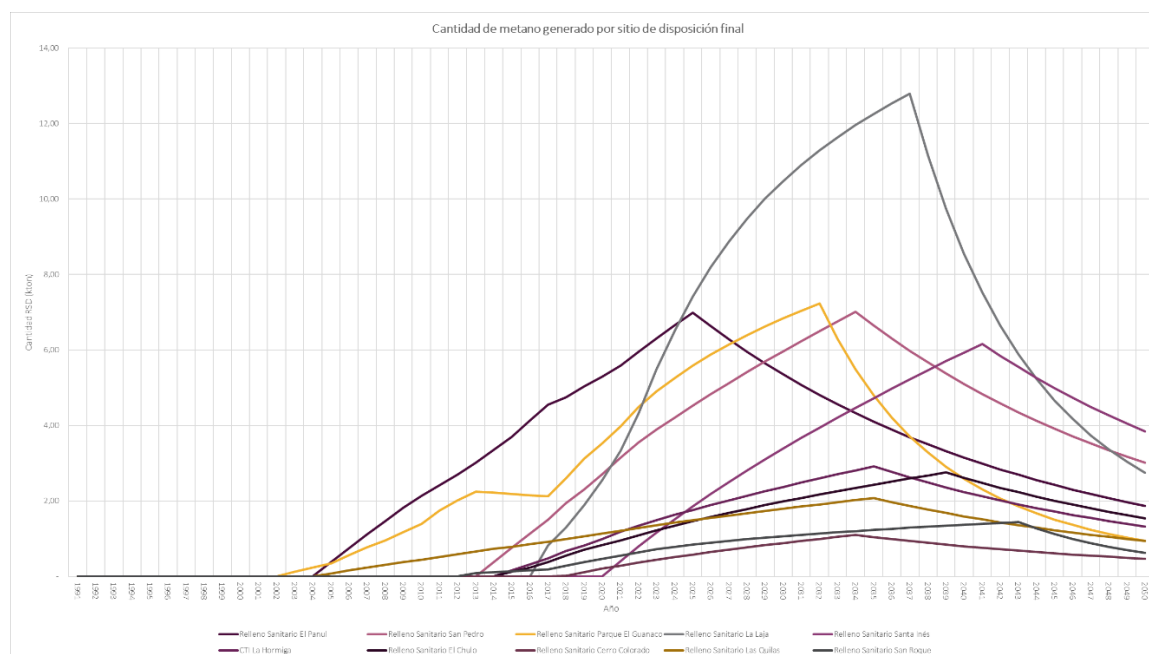


Figura 6-6: Generación de metano estimada de rellenos sanitario – Parte 2.
Elaborado por: Equipo consultor.

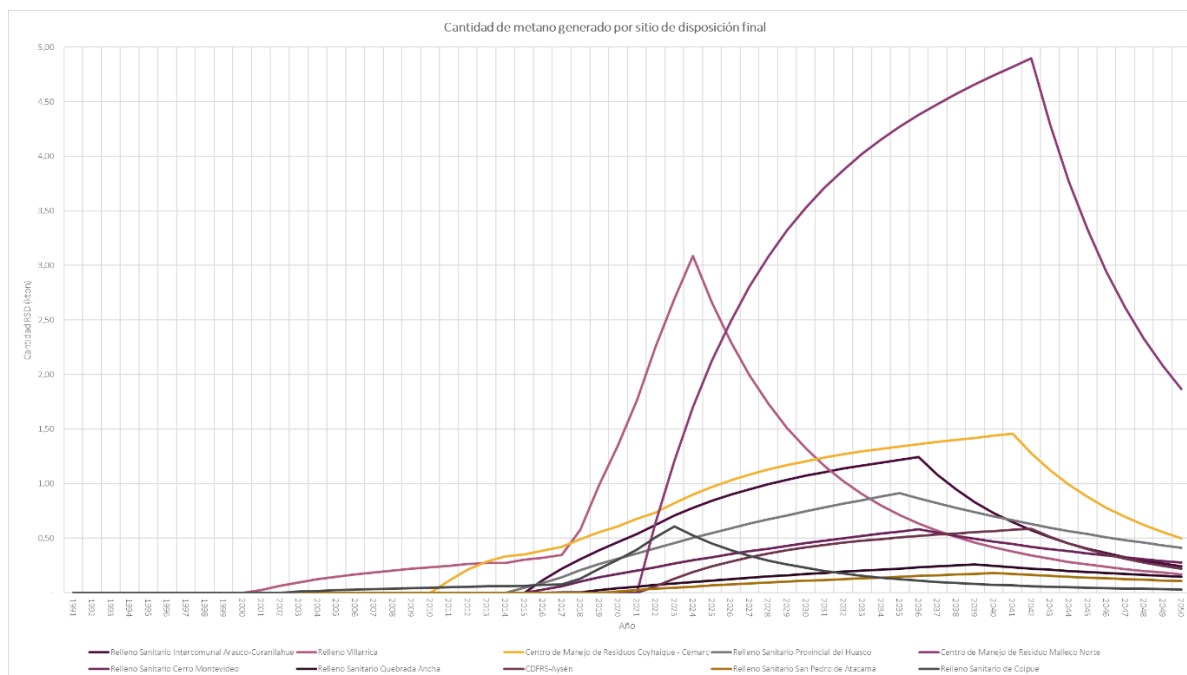


Figura 6-7: Generación de metano estimada de rellenos sanitario – Parte 3.
Elaborado por: Equipo consultor.

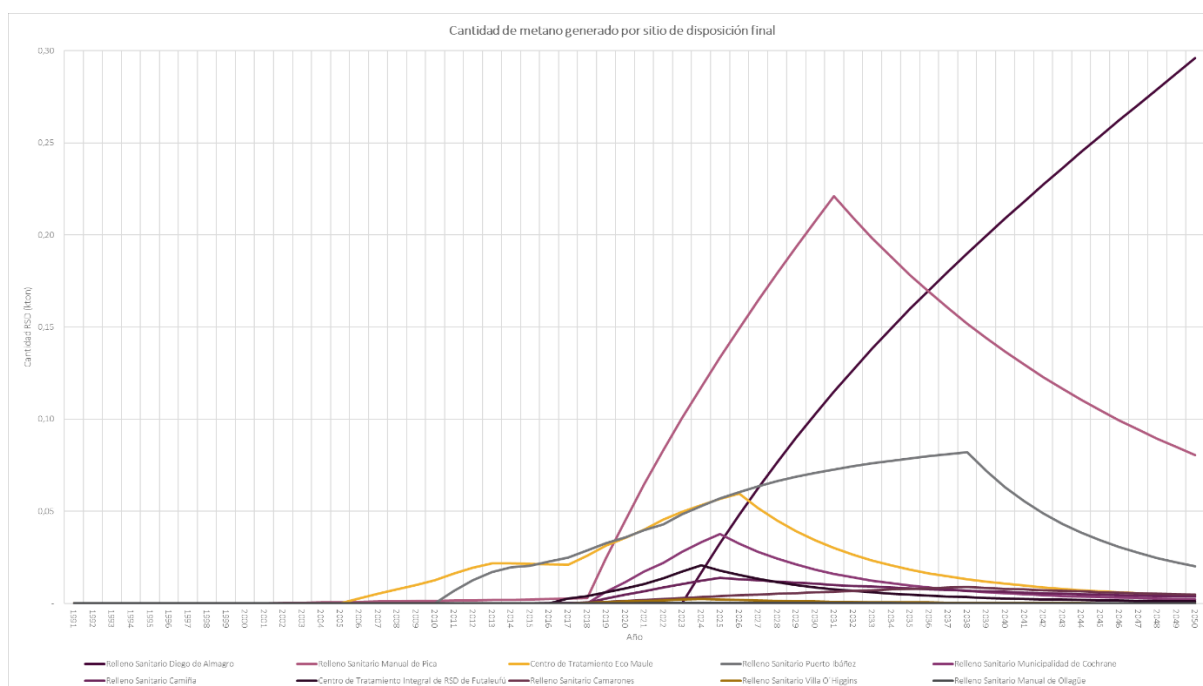


Figura 6-8: Generación de metano estimada de rellenos sanitario – Parte 4.
Elaborado por: Equipo consultor.

2. Costos y eficiencias de medidas de captura, quema y/o valorización

A continuación, se presenta un cuadro comparativo con las ventajas y desventajas de cada una de las tecnologías identificadas.

Tabla 6-3: Cuadro comparativo entre tipos de sistemas de manejo de biogás de relleno.

Tecnología	Ventajas	Desventajas	Componentes Requeridos
Ventilación (con captura pasiva)	Ventilar puede ser beneficioso al controlar olores y mitigar migración subterránea de LFG a vertederos y terrenos aledaños y mitigación de riesgos de fuego y explosión. En algunos casos, filtros de ventilación pasiva pueden romper la molécula de metano a CO ₂ y H ₂ O como medida de mitigación.	Sin quemas ni filtros, la ventilación LFG no provee reducciones de emisiones. En casos pasivos (sin vacío activo), el LFG puede migrar a estructuras del lugar o áreas residenciales cercanas y crear condiciones peligrosas y explosivas. Operación inapropiada y monitoreo activo de sistemas crea, potencialmente, condiciones aeróbicas que llevan a deformación de tuberías y fuegos subterráneos.	Pozos y cabezas de pozos, y kit registrador de datos para el monitoreo. La ingeniería, los permisos, la perforación de pozos y los estudios del sitio también generan costos.
Ventilación (con captura activa)	Ventilar puede ser beneficioso al controlar olores y mitigar migración subterránea de LFG a vertederos y terrenos aledaños y mitigación de riesgos de fuego y explosión. La captura activa permite al operador medir y regular la generación del gas para modificar el sistema a ser lo más eficiente posible.	Sin quemas ni filtros, la ventilación LFG no provee reducciones de emisiones.	Pozos y cabezas de pozos, sistema de recolección de tuberías, sistema de eliminación de condensado, equipo de soplador o compresor, y kit registrador de datos para el monitoreo. La ingeniería, los permisos, la perforación de pozos y los estudios del sitio también generan costos.
Quema controlada	Mitigación continua de metano. Reduce los olores y mitiga las emisiones en vertederos abiertos o cerrados. Más del 99% del metano puede ser destruido bajo condiciones óptimas.	Costos iniciales y continuos necesarios para instalar, operar y mantener el sistema de recolección y quema. Debe haber suficiente contenido de metano disponible para sustentar una combustión estable. Es posible que se requieran costos adicionales por propano suplementario en sitios con niveles de gas más bajos.	Los mismos componentes que el sistema de ventilación con captura activa, más antorchas. La ingeniería, los permisos, la perforación de pozos y los estudios del sitio también generan costos.

Fuentes: (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, n.d.), (Environmental Protection Agency, 2020), (Global Methane Initiative, 2023)

Elaborado por: Equipo consultor

3. Normas de emisión internacionales

Tabla 6-4: Normas de emisión y protocolos internacionales - extendida

País	Norma	Año de vigencia	Descripción	Límites de emisiones regulados	Monitoreo y reporte
Unión Europea	Directiva 1999/31/CE del Consejo	1999	- Aplica a todas las clases de vertederos. - Requiere tomar las medidas adecuadas para controlar la acumulación y emisiones de gases de vertedero. - Requiere recoger, tratar, y utilizar para producir energía o quemar los gases.	No establece límites específicos.	- Requiere que el operador lleve a cabo un plan de monitoreo y acción. - En el caso de efectos negativos, requiere que el operador notifique a las autoridades e implemente las acciones correctivas sugeridas por ellas. - Informe anual con los resultados del monitoreo a las autoridades relevantes.
Reino Unido	Inglaterra y Gales - Regulaciones de Rellenos Sanitarios	2002	- Aplica a todas las clases de rellenos sanitarios. - Requiere monitorear las emisiones de metano y contar con un sistema de captura y quema o uso de biogás.	El valor promedio de flujo de metano en la superficie de cada zona muestreada no deberá superar a: zonas cubiertas permanentemente (0,001 mg/m2/segundo) y zonas cubiertas temporalmente (0,1 mg/m2/segundo).	- Requiere que el operador se realice monitoreo a nivel anual o trimestral a través del método de flux boxes. - En caso de excederse el límite, requiere complementarse con planes de remediación.
	Escocia - Regulaciones de Rellenos Sanitarios	2003			
Nueva Zelanda	Resource Management Regulations	2004	- Aplica a todas las clases de rellenos sanitarios. - Requiere un sistema para recolectar gas que está diseñado para asegurar que la liberación no excede 5.000 ppm metano y que use una antorcha o que use el gas como combustible o para generar electricidad.	El sistema de recolección y control de gas no deberá permitir que la liberación excede 5.000 ppm.	No incluye información relevante.
Corea del Sur	Wastes Control Act	2007	- Aplica a todas las clases de rellenos sanitarios. - Requiere que los operadores midan los contaminantes vertidos de la instalación y entreguen un reporte al Ministro del Medio Ambiente. Ese mismo Ministro deberá publicar información sobre el ciclo de esas medidas y el reporte. - La regulación no menciona metano.	No establece límites específicos.	Requiere un reporte de contaminantes al Ministro del Medio Ambiente.
Estados Unidos – California	Subarticle 6. Methane Emissions from Municipal	2010	- Aplica a los rellenos sanitarios con más de 450.000 toneladas acumuladas de residuos y en que la capacidad calorífica del relleno debido al biogás acumulado es mayor a 3.000.000 British thermal units recuperadas por hora.	Ningún punto en la superficie de un relleno sanitario municipal puede exceder a los siguientes límites: (a) 500 ppm de metano por volumen	- Requiere seguimiento trimestral por el dueño/operador con monitoreo instantáneo de emisiones superficiales o monitoreo integrado de emisiones

País	Norma	Año de vigencia	Descripción	Límites de emisiones regulados	Monitoreo y reporte
	Solid Waste Landfills		- Requiere cumplir con los requisitos de la regulación o demostrar durante los cuatro periodos de monitoreo del año que no exceden a la concentración de 200 ppm metano por volumen, usando monitoreo instantáneo de la superficie. Si pueden mostrar la concentración menor a 200 ppm, siguen con el monitoreo y los reportes hasta reportar una concentración mayor a eso. - Requiere instalar un sistema de recolección y control de gas. Si el sistema ocupa antorchas cerradas, deberá destruir a menos 99% del metano por peso. Se necesita aprobación del gobierno para operar una antorcha abierta y solo bajo cumplimiento con ciertos requisitos. Si no usa una antorcha, deberá transportar el gas a un dispositivo de recuperación de energía, lo cual deberá destruir a menos 99% del metano por peso, o transportar el gas a un sistema de tratamiento que lo procesa para venta o uso.	- con monitoreo instantáneo de emisiones superficiales; o (b) una concentración promedia de 25 ppm por volumen con monitoreo integrado de emisiones superficiales. - Si se excede estos límites, el dueño u operador tiene que marcar la fecha, ubicación y valor; tomar acciones correctivas; y medir de nuevo dentro de 10 días.	- superficiales y seguimiento trimestral del sistema de recolección y control del gas. - Requiere entregar un reporte anual a las autoridades, las cuales pueden sancionar a los operadores por entregarlo tarde o sin toda la información requerida y por no cumplir con los requisitos de la regulación.
Colombia	Decreto 1077	2015	- Aplica a todas las clases de rellenos sanitarios. - Requiere que los diseños de nuevos rellenos sanitarios o ampliación de existentes incorporen un dren de evacuación de gases donde la captura y quema tecnificada deberá realizarse.	No establece límites específicos.	- Requiere monitorear el nivel de metano en frecuencia trimestral o semestral. - Establece que el operador es el responsable de monitoreo, seguimiento y control técnico del biogás.
España	Real Decreto 646	2020	- Aplica a todas las clases de vertederos. - Requiere recoger, tratar, y aprovechar los gases. Si el gas recogido no puede ser aprovechado para ser inyectado en la red gasista, como combustible vehicular o para producir energía, se deberá oxidar mediante antorchas u otros sistemas de oxidación pasiva.	No establece límites específicos.	- Requiere que el operador lleve a cabo un programa de control y vigilancia. - En el caso de efectos negativos, requiere que el operador notifique a las autoridades e implemente las acciones correctivas sugeridas por ellas. - Informe anual con los resultados del monitoreo a las autoridades relevantes. - Para la verificación del cumplimiento, las autoridades realizarán inspecciones.
Estados Unidos – Oregon	Chapter 340-Division 239-Landfill Gas Emissions	2021	- Aplica a los rellenos sanitarios con más de 200.000 toneladas acumuladas de residuos, pero los requisitos específicos dependen de la cantidad de metano generada. Si genera entre 664 y 7.755 MT (732 a 8.548 toneladas) de metano por año, deberá cumplir con los requisitos de la regulación o demostrar que, después de seguimiento trimestral por un año, no hay una concentración mayor a 200 ppm por volumen con monitoreo instantáneo de emisiones superficiales. Si pueden mostrar la concentración menor a 200 ppm, sigue con el monitoreo y los	- Ningún punto en la superficie de un relleno sanitario municipal puede exceder a los siguientes límites: (a) 500 ppm de metano por volumen con monitoreo instantáneo de emisiones superficiales; o (b) una concentración promedia de 25 ppm por	- Requiere seguimiento trimestral por el dueño/operador con monitoreo instantáneo de emisiones superficiales o monitoreo integrado de emisiones superficiales y seguimiento trimestral del sistema de recolección y control del gas. - Requiere entregar un reporte anual a las autoridades, las cuales pueden sancionar a los operadores por entregarlo tarde o

País	Norma	Año de vigencia	Descripción	Límites de emisiones regulados	Monitoreo y reporte
			reportes hasta reportar una concentración mayor a eso. Si genera más de 7.755 MT (8.548 toneladas) de metano por año, deberá cumplir con los requisitos de la regulación. - Requiere instalar un sistema de recolección y control de gas. Si el sistema ocupa antorchas cerradas, deberá destruir a menos 99% del metano por peso. Se necesita aprobación del gobierno para operar una antorcha abierta y solo bajo cumplimiento con ciertos requisitos. Si no usa una antorcha, deberá transportar el gas a un dispositivo de recuperación de energía, lo cual deberá destruir a menos 99% del metano por peso.	volumen con monitoreo integrado de emisiones superficiales. - Si se excede estos límites, el dueño u operador tiene que marcar la fecha, ubicación y valor; tomar acciones correctivas; y medir de nuevo dentro de 10 días.	sin toda la información requerida y por no cumplir con los requisitos de la regulación.
Estados Unidos – Maryland	COMAR 26.11.42 – Control of Methane Emissions from Municipal Solid Waste Landfills	2023	- Aplica a los rellenos sanitarios con más de 200.000 toneladas acumuladas de residuos, pero los requisitos específicos dependen de la cantidad de metano generada. Si genera entre 664 y 7.755 MT (732 a 8.548 toneladas) de metano por año, deberá cumplir con los requisitos de la regulación o demostrar que, después de seguimiento trimestral por un año, no hay una concentración mayor a 200 ppm por volumen con monitoreo instantáneo de emisiones superficiales. Si pueden mostrar la concentración menor a 200 ppm, sigue con el monitoreo y los reportes hasta reportar una concentración mayor a eso. Si genera más de 7.755 MT (8.548 toneladas) de metano por año, deberá cumplir con los requisitos de la regulación. - Requiere instalar un sistema de recolección y control de gas. Si el sistema ocupa antorchas cerradas, deberá destruir a menos 99% del metano por peso. Se necesita aprobación del gobierno para operar una antorcha abierta y solo bajo cumplimiento con ciertos requisitos. Si no usa una antorcha, deberá transportar el gas a un dispositivo de recuperación de energía, lo cual deberá destruir a menos 99% del metano por peso.	- Ningún punto en la superficie de un relleno sanitario municipal puede exceder a los siguientes límites: (a) 500 ppm de metano por volumen con monitoreo instantáneo de emisiones superficiales; o (b) una concentración promedia de 25 ppm por volumen con monitoreo integrado de emisiones superficiales. - Si se excede estos límites, el dueño o operador tiene que marcar la fecha, ubicación y valor; tomar acciones correctivas; y medir de nuevo dentro de 10 días.	- Requiere seguimiento trimestral por el dueño/operador con monitoreo instantáneo de emisiones superficiales o monitoreo integrado de emisiones superficiales y seguimiento trimestral del sistema de recolección y control del gas. - Requiere entregar un reporte anual a las autoridades.
Estados Unidos – Washington	Chapter 70A.450 RCW	2024	- Aplica a los rellenos sanitarios operacionales con más de 450.000 toneladas acumuladas de residuos y a los cerrados con más de 750.000 toneladas y en que la capacidad calorífica del relleno debido al biogás acumulado es mayor a 3.000.000 British thermal units recuperadas por hora. - Requiere cumplir con los requisitos de la regulación o demostrar durante los cuatro periodos de monitoreo del año que no exceden a la concentración de 200 ppm metano por volumen, usando monitoreo instantáneo de la superficie. Si pueden mostrar la concentración menor a 200 ppm, siguen con	- Ningún punto en la superficie de un relleno sanitario municipal puede exceder a los siguientes límites: (a) 500 ppm de metano por volumen con monitoreo instantáneo de emisiones superficiales; o (b) una concentración promedia de 25 ppm por volumen con monitoreo	- Requiere seguimiento trimestral por el dueño/operador con monitoreo instantáneo de emisiones superficiales o monitoreo integrado de emisiones superficiales y seguimiento trimestral del sistema de recolección y control del gas. - Requiere entregar un reporte anual a las autoridades, las cuales pueden sancionar a los operadores por entregarlo tarde o sin toda la información requerida y por no

País	Norma	Año de vigencia	Descripción	Límites de emisiones regulados	Monitoreo y reporte
			el monitoreo y los reportes hasta reportar una concentración mayor a eso. - Requiere instalar un sistema de recolección y control de gas. Si el sistema ocupa antorchas cerradas, deberá destruir a menos 99% del metano por peso. Si no usa una antorcha, deberá transportar el gas a un dispositivo de recuperación de energía, lo cual deberá destruir a menos 97% del metano por peso, o transportar el gas a un sistema de tratamiento que lo procesa para venta o uso. Si el sistema transporta el gas a un sistema de tratamiento para después vender o utilizarlo, el sistema deberá perder menos de 3% por peso.	integrado de emisiones superficiales. - Si se excede estos límites, el dueño o operador tiene que marcar la fecha, ubicación y valor; tomar acciones correctivas; y medir de nuevo dentro de 10 días.	cumplir con los requisitos de la regulación.
Canadá	Norma de emisión de metano para rellenos sanitarios	En proceso	- Va a aplicar a rellenos ya cerrados que cuenten con más de 450.000 toneladas de residuos municipales acumulados, y a rellenos abiertos que ya tengan más de 100.000 toneladas de residuos municipales o que acepten más de 10.000 toneladas anuales. - Va a requerir la implementación de un enfoque de control de emisiones que cumpla con ciertos estándares. - En materia de destrucción del metano, se acepta tanto el uso de antorchas para quema, sistemas de biocubierta o biofiltros que puedan demostrar al menos una eficiencia de destrucción de un 90%, y otros dispositivos para la reutilización del biogás como fuente energética. Tanto antorchas cerradas como motores de combustión interna requerirán alcanzar una eficiencia de destrucción del 99%.	- Si se genera más de 664 toneladas de metano anualmente, se hace obligatoria la implementación de sistemas de control de emisiones para mantenerse bajo los siguientes límites de emisión. - Los rellenos deberán asegurar que en todas sus áreas que cuenten con cobertura intermedia o final se genere una concentración de menos de 25 ppm-m, medido en 3 estaciones del año (primavera, verano y otoño) a través de un detector tipo dron.	- Si no se excede dicho límite, los rellenos están obligados a reportar anualmente una nueva evaluación de generación de metano para demostrar que las concentraciones se mantienen bajo el límite. - Para los rellenos sanitarios afectados, va a requerir que el dueño/operador implemente un plan de monitoreo y acción, lleve a cabo monitoreo, y entregue un reporte anual a las autoridades.

Elaborado por: Equipo consultor.

Anexo III: Diagrama de modelación

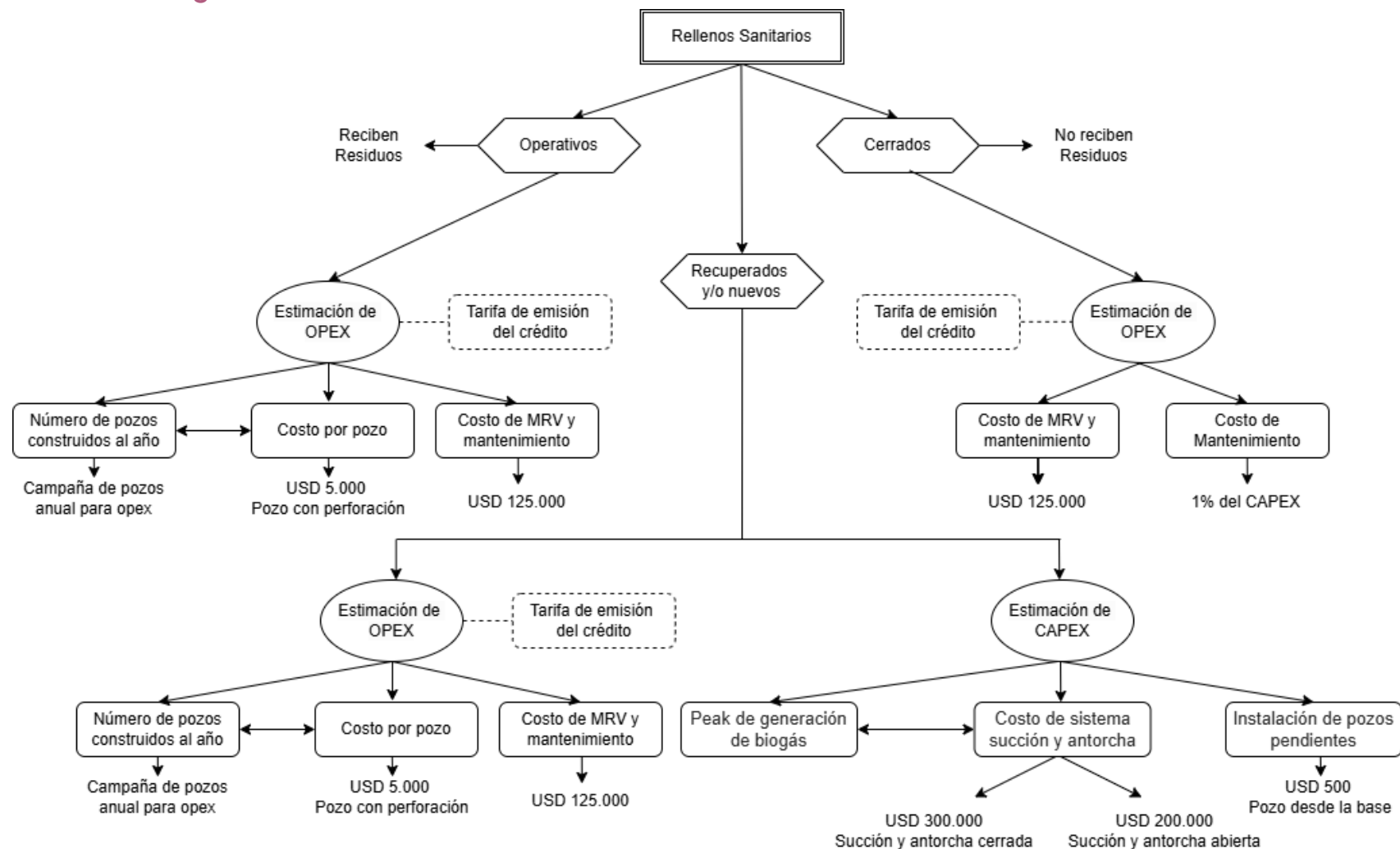


Figura 6-9: Diagrama de modelación.

Elaborado por: Equipo consultor

Parámetros modelación

En la siguiente tabla se presentan los parámetros utilizados para realizar la modelación del modelo financiero por concepto de implementación de sistema de captura y quema de biogás por los rellenos sanitarios.

Tabla 6-5: Parámetros modelación

Horas al año	8.760	[h]
Densidad Biogás	0,00125	[t/m3]
Succión y quema	750	[m3/h]
Costo succión y quema	300.000	[US\$]
Costo por pozo con perforación	5.000	[US\$/pozo]
Costo por pozo desde la base	500	[US\$/pozo]
Costos MRV y OPEX por succión y quema	125.000	[US\$]
Densidad CH4	0,7	[kg/m3]
Densidad CO2	1,9	[kg/m3]
Densidad H2O	0,8	[kg/m3]
Fracción de metano en biogás	50%	(% biogás)
Eficiencia de captura de biogás predeterminada para rellenos sin información	50%	%
Cantidad de biogás capturado por pozo	12	[m3/h]
OPEX (como % del CAPEX) después del cierre	1%	%
Factor de oxidación	0,1	[-]
Potencial de calentamiento global del metano (GWpch4)	28	[tCO ₂ e / tCH ₄]
Tasa de descuento (VAN)	8%	%
Tarifa de emisión del crédito	0,2	[US\$/tCO ₂ e]
Impuesto a la renta	27%	%

Elaborado por: Equipo consultor.

Anexo IV: Curva MAC

La MACC es una herramienta utilizada en el contexto de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Esta curva permite visualizar y comparar diferentes opciones de mitigación de emisiones en términos de costo y eficacia.

En el eje X (horizontal) se presentan las reducciones totales que cada relleno puede contribuir en el período 2026-2030 en toneladas de carbono equivalente. En el eje Y (vertical) se muestra el precio al que tendrían que venderse los créditos de carbono para rentabilizar la inversión y los costos de operación de los sistemas de captura, en dólares por tonelada de carbono equivalente.

En la Figura 6-10, las barras en color violeta representan a los catorce rellenos más costo-eficientes que permitirían cumplir con la meta global si estos capturan y queman el 100% de su potencial de captura para el año 2030. Las barras amarillas corresponden a rellenos menos costo-eficientes, ya que necesitan precios superiores de carbono para rentabilizar la inversión.

Los últimos 12 rellenos tienen valores de precio de los créditos de carbono superiores a los 22 US\$/tCO₂e, lo que hace que las barras excedan los límites del gráfico. Sin embargo, debido a que estas contribuyen aproximadamente solo al 1% de las emisiones totales, se decidió truncar el gráfico en 22 US\$ para simplificar su presentación.

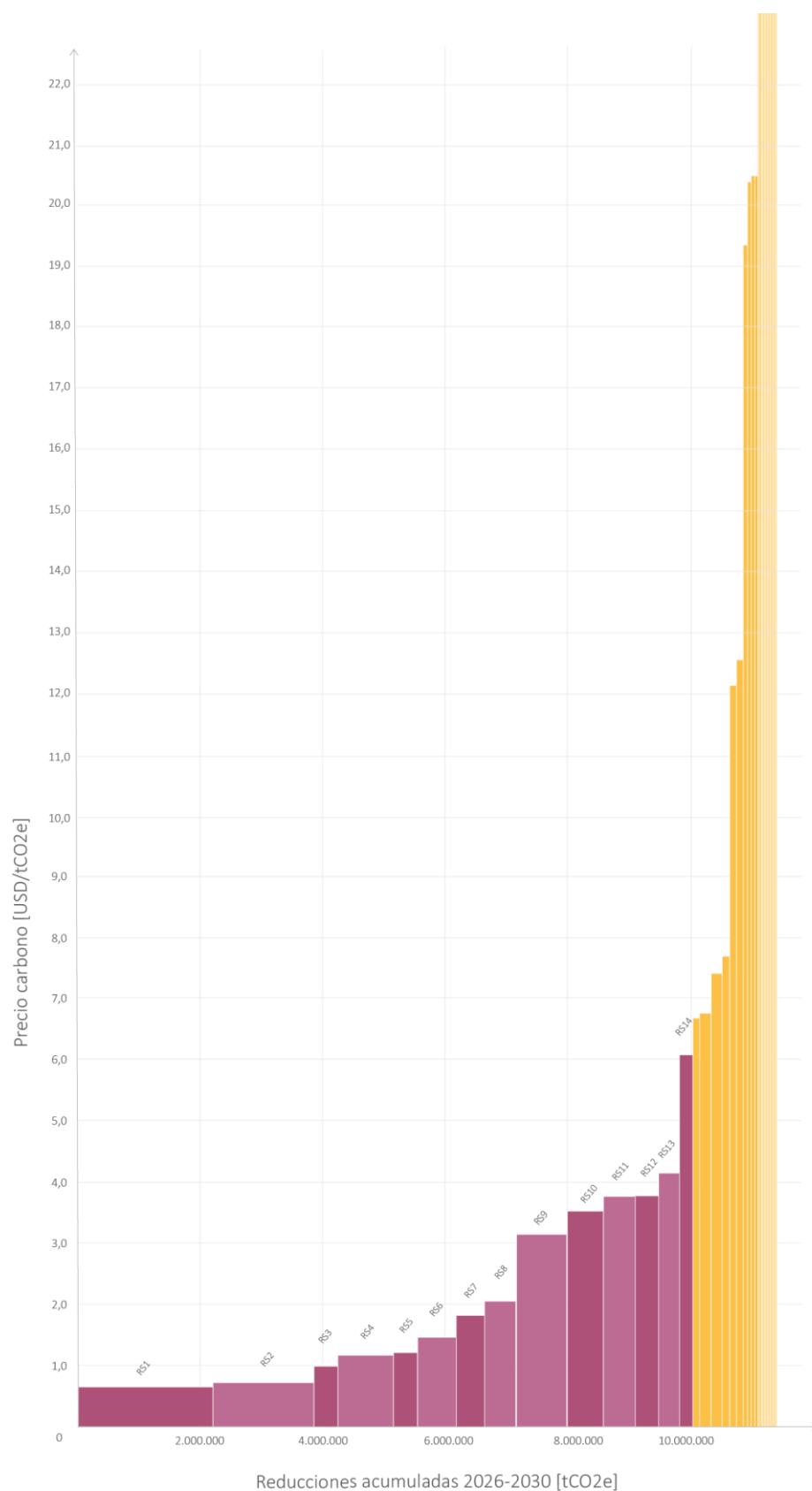


Figura 6-10: Curva MACC para 42 rellenos sanitarios

Elaborado por: Equipo consultor.

Anexo V: Formularios de Información WasteMap

Tabla 6-6: Recopilación de datos de ciudades

	Variable	Input	Notes/Data Sources
Required	General Information		
	City / Municipality		
	State / Province		
	Country		
	Population		
	Year the Population Data was Collected		
	Waste Generation Rate (Metric Tons/Year)*		
	Waste Generation Rate Per Capita (kg/Person/Day)*		
	Year the Waste Generation Data was Collected		
Preferred	Waste Collection		
	Waste Collection Rate (% of Waste Generated that is Collected)		
	Waste Composition		
	Waste Composition: Food (%)		
	Waste Composition: Green (%)		
	Waste Composition: Wood (%)		
	Waste Composition: Paper and Cardboard (%)		
	Waste Composition: Textiles (%)		
	Waste Composition: Plastic (%)		
	Waste Composition: Metal (%)		
	Waste Composition: Glass (%)		
	Waste Composition: Rubber/Leather (%)		
	Waste Composition: Other (%)		
	Is Waste composition equal to 100%?	No	
	Current Diversion Practices		
	Diversion: Composting (% of Waste Collected Sent to Composting Facilities)		
	Diversion: Anaerobic Digestion (% of Waste Collected Sent to Anaerobic Digesters)		
	Diversion: Incineration (% of Waste Collected Sent to Incineration Facilities)		
	Diversion: Recycling (% of Waste Collected Sent to Recycling Facilities)		
	Is Waste Diverted Less Than Waste Collected?	Yes	
	Current Waste Disposal Practices		
	Percent of Waste Sent to Dumpsites (% of Total Waste Sent to Final Disposal)		
	Percent of Waste Sent to Landfills with Gas Capture (% of Total Waste Sent to Final Disposal)		
	Percent of Waste Sent to Landfills without Gas Capture (% of Total Waste Sent to Final Disposal)		
	Is Percent of Waste Sent to Final Disposal Equal to 100%?	No	
	If waste is sent to landfills with gas capture, what is the gas capture efficiency of the site?		
	Growth Rates		
	Average Annual Population Growth Rate: Historical (%)		

	Variable	Input	Notes/Data Sources
	Average Annual Population Growth Rate: Future (%)		
	Average Annual Waste Collection Rate Improvement: Future (%), If Applicable		
Optional	Composition of Diverted Waste		
	Diverted Components: Composted Food (% of Total Composted)		
	Diverted Components: Composted Green (% of Total Composted)		
	Diverted Components: Composted Wood (% of Total Composted)		
	Diverted Components: Composted Paper and Cardboard (% of Total Composted)		
	Is Composition of Waste Composted Equal to 100%?	No	
	Diverted Components: Anaerobically Digested Food (% of Total Digested)		
	Diverted Components: Anaerobically Digested Green (% of Total Digested)		
	Diverted Components: Anaerobically Digested Wood (% of Total Digested)		
	Diverted Components: Anaerobically Digested Paper and Cardboard (% of Total Digested)		
	Is Composition of Waste Anaerobically Digested Equal to 100%?	No	
	Diverted Components: Incinerated Food (% of Total Incinerated)		
	Diverted Components: Incinerated Green (% of Total Incinerated)		
	Diverted Components: Incinerated Wood (% of Total Incinerated)		
	Diverted Components: Incinerated Paper and Cardboard (% of Total Incinerated)		
	Diverted Components: Incinerated Textiles (% of Total Incinerated)		
	Diverted Components: Incinerated Plastic (% of Total Incinerated)		
	Diverted Components: Incinerated Rubber/Leather (% of Total Incinerated)		
	Is Composition of Waste Incinerated Equal to 100%?	No	
	Diverted Components: Recycled Wood (% of Total Recycled)		
	Diverted Components: Recycled Paper and Cardboard (% of Total Recycled)		
	Diverted Components: Recycled Textiles (% of Total Recycled)		
	Diverted Components: Recycled Plastic (% of Total Recycled)		
	Diverted Components: Recycled Rubber/Leather (% of Total Recycled)		
	Diverted Components: Recycled Metal (% of Total Recycled)		
	Diverted Components: Recycled Glass (% of Total Recycled)		
	Diverted Components: Recycled Other (% of Total Recycled)		
	Is Composition of Waste Recycled Equal to 100%?	No	
	Diverted Masses: Composted Food (Metric Tons)		
	Diverted Masses: Composted Green (Metric Tons)		
	Diverted Masses: Composted Wood (Metric Tons)		
	Diverted Masses: Composted Paper And Cardboard (Metric Tons)		
	Diverted Masses: Anaerobically Digested Food (Metric Tons)		
	Diverted Masses: Anaerobically Digested Green (Metric Tons)		
	Diverted Masses: Anaerobically Digested Wood (Metric Tons)		
	Diverted Masses: Anaerobically Digested Paper and Cardboard (Metric Tons)		
	Diverted Masses: Incinerated Food (Metric Tons)		

	Variable	Input	Notes/Data Sources
	Diverted Masses: Incinerated Green (Metric Tons)		
	Diverted Masses: Incinerated Wood (Metric Tons)		
	Diverted Masses: Incinerated Paper and Cardboard (Metric Tons)		
	Diverted Masses: Incinerated Textiles (Metric Tons)		
	Diverted Masses: Incinerated Plastic (Metric Tons)		
	Diverted Masses: Incinerated Rubber/Leather (Metric Tons)		
	Diverted Masses: Recycled Wood (Metric Tons)		
	Diverted Masses: Recycled Paper and Cardboard (Metric Tons)		
	Diverted Masses: Recycled Textiles (Metric Tons)		
	Diverted Masses: Recycled Plastic (Metric Tons)		
	Diverted Masses: Recycled Rubber/Leather (Metric Tons)		
	Diverted Masses: Recycled Metal (Metric Tons)		
	Diverted Masses: Recycled Glass (Metric Tons)		
	Diverted Masses: Recycled Other (Metric Tons)		

Fuente: obtenido a partir del formulario de solicitud de información de la plataforma WasteMap.

Tabla 6-7: Distribución de disposición final

	Site Location (City)	Site Name	Amount disposed (tons/year)	City served	% of city's total waste deposited of sent to this disposal site	Latitude	Longitude	Notes
Example (not real data)	Glenns, VA	Landfill A	57,743	Washington, DC	20%	42.8121513	-81.3327220	Washington DC's waste are transported to neighboring states for disposal.
	Plymouth, VA	Landfill B	71,958	Washington, DC	25%	42.8793095	119.2025330	

Fuente: obtenido a partir del formulario de solicitud de información de la plataforma WasteMap.

Tabla 6-8: Recopilación de datos de sitios

	Variable	Input	Notes/Data Sources
Required	General Information		
	Disposal Facility Name		
	Facility Address		
	Latitude		
	Longitude		
	City		
	State/Province		

	Variable	Input	Notes/Data Sources
	Country		
	Facility Type (dumpsite, controlled dumpsite, or sanitary landfill)		
	Year opened		
	Annual disposal for latest year with data (tons)		
	Year of disposal estimate		
	% of city's total waste disposal sent to this site (%)		
	Estimated growth in annual disposal (%)		
	Is the site equipped with landfill gas collection systems?		
Preferred	Projected or actual facility closure year		
	Average site depth (Is the site deep or shallow? Select "deep" if site depth >5m. Otherwise, select "shallow".)		
	Estimated waste in place (tons)		
	Year of waste in place estimates		
	Site design and management practices		
	Year of initial landfill gas collection system start-up		
	Landfill gas collection efficiency estimate (%)		
	Year of landfill gas collection efficiency estimate		
	Percent of waste area covered with wells (%)		
	Percent of waste area with final cover (%)		
	Percent of waste area with intermediate cover (%)		
	Percent of waste area with daily cover (%)		
	Percent of waste area with no cover		
	Percent of waste area with clay or synthetic liner		
Optional	Is waste compacted on a regular basis?		
	Is waste delivered to a focused tipping area?		
	Is there leachate recirculation at the landfill?		
	Waste Composition at Disposal Facility		
	Waste Composition: Food (%)		
	Waste Composition: Green (%)		
	Waste Composition: Wood (%)		
	Waste Composition: Paper and Cardboard (%)		
	Waste Composition: Textiles (%)		
	Waste Composition: Plastic (%)		
	Waste Composition: Metal (%)		
	Waste Composition: Glass (%)		
	Waste Composition: Rubber/Leather (%)		
	Waste Composition: Other (%)		
	Is Waste composition equal to 100%?	No	

Fuente: obtenido a partir del formulario de solicitud de información de la plataforma WasteMap.



@ImplementaSur



ImplementaSur



info@implementasur.cl



www.implementasur.com

