



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA, BIOTECNOLOGÍA Y
MATERIALES

**EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN RENOVABLE DE HIDRÓGENO
MEDIANTE LA REVALORACIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS
SANITARIOS: PIRÓLISIS DE METANO.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERA CIVIL QUÍMICA

CAMILA ANDREA CARRASCO GALDÁMEZ

PROFESOR GUÍA:
FELIPE DIAZ ALVARADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LILIAN ROMERO VICENTE
FRANCISCO GRACIA CAROCA

SANTIAGO DE CHILE
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA
POR: CAMILA ANDREA CARRASCO GALDÁMEZ
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: FELIPE DIAZ ALVARADO

EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN RENOVABLE DE HIDRÓGENO MEDIANTE LA REVALORACIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS SANITARIOS: PIRÓLISIS DE METANO.

El presente trabajo de título tiene como objetivo evaluar la producción de hidrógeno mediante valorización energética de residuos orgánicos de tres rellenos sanitarios de la Región Metropolitana utilizando el método de pirólisis de metano, considerando aspectos técnicos, ambientales y económicos. Se considera como caso base la producción de electricidad a partir de biogás utilizando motores de combustión interna.

El máximo potencial eléctrico es alcanzado en el Relleno Sanitario Loma Los Colorados, obteniendo un potencial de 40 [MW] para el caso base y 47,5 [MW] utilizando hidrógeno como intermediario (alternativa 1), con un flujo de biogás de 17.281 [m^3/h] en el año 2042. Asimismo, se designa como unidad de comparación (denominada unidad energética (UE)) a la potencia obtenida por flujo volumétrico de biogás, obteniendo una UE máxima de 2,40 [$\frac{kWh}{m^3 \text{ de biogás}}$] y 2,75 [$\frac{kWh}{m^3 \text{ de biogás}}$] para el caso base y alternativa 1, respectivamente.

Se selecciona la descomposición térmica del plasma como principio para llevar a cabo la pirólisis de metano, obteniendo una producción de 83,4 gramos de hidrógeno por kilo de biogás.

Desde un punto de vista ambiental, se estudiaron dos categorías de impacto: potencial de calentamiento global (PCG) y potencial de toxicidad humana (PTH). Los resultados indican que para el potencial de calentamiento global, la alternativa 1 produce 0,08 [t CO_{2,eq}/MWh] y el caso base 1,14 [t CO_{2,eq}/MWh], mientras que para el potencial de toxicidad humana, la alternativa 1 produce 0,05 [t 1,4-DCBeq/MWh] y el caso base 0,06 [t 1,4-DCBeq/MWh]. Luego, la alternativa 1 genera menos emisiones que la tecnología utilizada en la actualidad.

Desde un punto de vista económico, los costos de inversión y de operación de la alternativa 1 son considerablemente mayores a los costos del caso base, esto se debe principalmente a la adquisición de las *fuel cells* para producir electricidad y por la operación de la antorcha de plasma. Se sugiere estudiar la viabilidad de utilizar turbinas de hidrógeno para reducir costos.

Finalmente, se concluye que la producción de hidrógeno mediante pirólisis de biogás es una alternativa con un potencial más atractivo que el caso base a los métodos utilizados en la industria desde un punto de vista técnico y ambiental. Por otro lado, los principales desafíos de la implementación de la pirólisis de metano es lograr disminuir los costos del proceso.

*Para mi mamá, papá y hermana
quienes han confiado en mí y me han permitido construir mi camino.*

Agradecimientos

A mi mamá, papá y hermana por enseñarme a ser perseverante, independiente y a luchar por lo que me parece correcto. También agradecer por apoyarme en todas mis decisiones y siempre estar ahí para mí. Asimismo quiero agradecer a mis tías, abuelas, tata, primas y primos por constituir una familia maravillosa y los valores que me han inculcado, realmente admiro a cada una de ustedes por darlo todo para cuidar a nuestra familia.

A mis amigas del colegio, Vale y Javi. Dos personas maravillosas que me han sido parte fundamental de la persona que soy hoy en día, muchas gracias por su amistad. A pesar de que nos veamos tres veces al año se que puedo contar con ustedes para lo que sea.

A mis amigas y amigos de la universidad que me han acompañado en esta acontecida etapa. En especial a Somos 12, hemos formado un grupo humano bacán que nació en plan común y se mantiene hasta ahora (y espero que dure mucho tiempo), de verdad que una de mis partes favoritas de la vida universitaria fue almorzar con ustedes cada día en las mesitas de química. Pase lo que pase les deseo lo mejor y espero que cumplan sus sueños. No puedo dejar de hacer una mención honorífica a la Javi, la Paza y Fran que sin ustedes no habría podido sobrevivir estos 6 años.

Agradezco enormemente al proyecto Eolian, que ha sido parte fundamental de mi vida universitaria. En el Eolian aprendí un montón, cosas con nunca hubiera pensado cuando decidí ser parte del equipo, desde trabajar en equipo, cómo abordar reuniones con auspiciadores hasta ocupar maquinaria y aprender el funcionamiento eléctrico de un auto. Este proyecto me ayudó a crecer tanto profesionalmente como persona, a pesar de que fue una experiencia difícil por la gran envergadura del proyecto, no me arrepiento de haberme quedado tanto tiempo. De verdad gracias a todas las personas que conocí en el Eolian, de todas me llevo un aprendizaje, quiero agradecer especialmente a la Mariana, Jorge, Rocío, Bryan, Nacho, Pancho por su amistad, sabiduría, confianza y por motivarme a continuar creciendo.

Gracias a mi profesor guía, Felipe Díaz, por la colaboración, comprensión y la confianza depositada en mí para llevar a cabo mi propuesta a mi ritmo de trabajo, también agradecer por la retroalimentación de mi trabajo para ir mejorando cada día. Gracias a Lilian por todos los valiosos comentarios, correcciones y entregarme una visión externa para visualizar que aspectos hay que tener en consideración si quiero continuar el desarrollo de la pirólisis.

Por último agradecer a todas las personas que desde temprana edad me ayudaron, educaron e impulsaron a seguir el área de la ingeniería. Asimismo, gracias a quienes me guiaron y enseñaron sobre temáticas de sostenibilidad y cómo se puede contribuir desde el área de ingeniería química a combatir el cambio climático.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. General	2
1.2.2. Específicos	2
2. Antecedentes	3
2.1. Residuos sólidos urbanos	3
2.2. Relleno sanitario	4
2.3. Biogás	4
2.3.1. Fases de la producción de biogás	4
2.3.2. Factores que afectan la producción de biogás	6
2.3.2.1. Composición de los residuos	6
2.3.2.2. Temperatura	6
2.3.2.3. Humedad	6
2.3.2.4. pH	7
2.3.2.5. Cobertura	7
2.3.3. Propiedades del biogás	7
2.3.4. Sistemas de extracción de biogás	7
2.3.5. Modelos de estimación de producción de biogás	8
2.3.5.1. Modelo LandGEM	9
2.3.5.2. Modelo Mexicano de biogás	9
2.3.5.3. Modelo IPPC	10
2.3.5.4. Parámetros	10
2.3.6. Aplicaciones del biogás	13
2.3.7. Sistemas de tratamiento del biogás	14
2.3.8. Generación de electricidad	14
2.4. Hidrógeno en Chile	15
2.5. Estado del Arte	17
2.5.1. Producción de hidrógeno termoquímico basado en metano	17
2.5.1.1. Reformado de metano con vapor	17
2.5.1.2. Oxidación parcial	18
2.5.1.3. Reformado auto-térmico	18
2.5.1.4. Pirólisis de metano	18
2.5.2. Proyectos de pirólisis de metano	20
2.5.2.1. Descomposición térmica: Empresa BASF	21
2.5.2.2. Descomposición térmica: Columna de burbujas de galio fundido	21

2.5.2.3.	Descomposición catalítica: Empresa Hazer Group	22
2.5.2.4.	Descomposición de plasma: Monolith	23
3.	Metodología	24
3.1.	Estimación de producción de biogás	24
3.2.	Estimación de la generación de electricidad a partir de biogás	24
3.3.	Diseño del proceso de pirólisis de metano	25
3.4.	Dimensionamiento de los equipos del proceso de producción de hidrógeno . .	25
3.5.	Evaluación ambiental	25
3.6.	Evaluación económica	25
4.	Potencial de generación de biogás	26
4.1.	Caracterización de los rellenos sanitarios en la Región Metropolitana	26
4.1.1.	Condiciones meteorológicas	28
4.1.2.	Proyectos de tratamiento de los residuos en los rellenos sanitarios . .	29
4.2.	Estimación de producción de biogás	29
4.2.1.	Determinación de parámetros	30
4.2.1.1.	Tasa de generación de metano	30
4.2.1.2.	Potencial de generación de metano	30
4.2.1.3.	Residuos	31
4.2.2.	Captura de biogás	34
4.2.3.	Resultados	35
4.2.3.1.	Relleno Sanitario Loma Los Colorados	35
4.2.3.2.	Relleno Sanitario Santa Marta	37
4.2.3.3.	Relleno Sanitario Santiago Poniente	38
4.2.3.4.	Características generales	40
4.3.	Discusiones	40
5.	Potencial de generación eléctrico	42
5.1.	Estimación potencial eléctrico disponible	42
5.1.1.	Relleno Sanitario Loma Los Colorados	42
5.1.2.	Relleno Sanitario Santa Marta	43
5.1.3.	Relleno Sanitario Santiago Poniente	43
5.2.	Tecnologías disponibles	44
5.3.	Estimación potencial eléctrico a instalar	45
5.3.1.	Relleno Sanitario Loma Los Colorados	45
5.3.2.	Relleno Sanitario Santa Marta	47
5.3.3.	Relleno Sanitario Santiago Poniente	48
5.4.	Discusiones	50
6.	Producción de hidrógeno	51
6.1.	Descripción del proceso	51
6.2.	Balance de masa	54
6.2.1.	Adsorción I: Dióxido de carbono	54
6.2.1.1.	Descripción de corrientes	54
6.2.1.2.	Supuestos y cálculos	55
6.2.1.3.	Resultados	55
6.2.2.	Pirólisis de metano	56

6.2.2.1.	Descripción de corrientes	56
6.2.2.2.	Supuestos y cálculos	56
6.2.2.3.	Resultados	57
6.2.3.	Adsorción II: Metano	57
6.2.3.1.	Descripción de corrientes	57
6.2.3.2.	Supuestos y cálculos	58
6.2.3.3.	Resultados	59
6.2.4.	Resultados por relleno sanitario	60
6.2.4.1.	Relleno Sanitario Loma Los Colorados	60
6.2.4.2.	Relleno Sanitario Santa Marta	60
6.2.4.3.	Relleno Sanitario Santiago Poniente	61
6.3.	Producción de electricidad	62
6.3.1.	Resultados	62
6.3.1.1.	Relleno Sanitario Loma Los Colorados	62
6.3.1.2.	Relleno Sanitario Santa Marta	63
6.3.1.3.	Relleno Sanitario Santiago Poniente	63
6.4.	Discusiones	64
7.	Dimensionamiento de equipos	66
7.1.	Adsorción I: Dióxido de carbono	66
7.1.1.	Cálculos y resultados	66
7.2.	Pirólisis de metano	68
7.2.1.	Cálculos y resultados	68
7.3.	Adsorción II: Metano	69
7.3.1.	Cálculos y resultados	69
7.4.	Resultados por relleno sanitario	72
7.4.1.	Relleno Sanitario Loma Los Colorados	72
7.4.2.	Relleno Sanitario Santa Marta	73
7.4.3.	Relleno Sanitario Santiago Poniente	73
7.5.	Discusiones	73
8.	Evaluación ambiental	75
8.1.	Aspectos generales	75
8.2.	Potencial de calentamiento global	76
8.3.	Potencial de toxicidad humana	78
8.4.	Discusiones	81
9.	Evaluación económica	82
9.1.	Estimación de costos de inversión (CAPEX)	82
9.1.1.	Caso Base	82
9.1.2.	Alternativa 1	83
9.2.	Estimación de costos de operación (OPEX)	84
9.2.1.	Caso Base	84
9.2.2.	Alternativa 1	85
9.3.	Discusiones	86
10.	Conclusiones	87

Bibliografía	92
Anexos	93
A. Proyección de residuos	94
A.1. Tasa de crecimiento de la población	94
A.2. Resultados proyección de residuos y población atendida	96
B. Resultados Balance de masa	98
B.1. Relleno Sanitario Loma Los Colorados	99
B.2. Relleno Sanitario Santa Marta	100
B.3. Relleno Sanitario Santiago Poniente	101
C. Evaluación Ambiental	102
C.1. Potencial de Calentamiento Global	102
C.1.1. Relleno Sanitario Loma Los Colorados	102
C.1.2. Relleno Sanitario Santa Marta	103
C.1.3. Relleno Sanitario Santiago Poniente	105
C.2. Potencial de Toxicidad Humana	107
C.2.1. Relleno Sanitario Loma Los Colorados	107
C.2.2. Relleno Sanitario Santa Marta	109
C.2.3. Relleno Sanitario Santiago Poniente	111
D. Evaluación Económica	114
D.1. CAPEX	114
D.1.1. Caso base	114
D.1.2. Alternativa 1	114
D.2. OPEX	115
D.2.1. Caso base	115
D.2.2. Alternativa 1	116

Índice de Tablas

2.1.	Composición molar del biogás [9].	4
2.2.	Propiedades del biogás [11].	7
2.3.	Factor de corrección de metano según el manejo y profundidad del sitio de disposición final [14].	11
2.4.	Descripción general de los procesos de pirólisis de metano [23].	20
4.1.	Residuos sólidos dispuestos en instalaciones autorizadas [5].	27
4.2.	Características generales de los sitios autorizados de recepción de residuos sólidos [5].	28
4.3.	Temperaturas ambientales en los rellenos sanitarios de la Región Metropolitana.	29
4.4.	Tasa de generación de metano.	30
4.5.	Parámetros para obtener L_0 para cada relleno sanitario.	31
4.6.	Población atendida por los rellenos sanitarios de la Región Metropolitana. . . .	33
4.7.	Flujo de residuos dispuestos en los rellenos sanitarios de la Región Metropolitana.	34
4.8.	Eficiencia de extracción de biogás según el tipo de cobertura y sistema de extracción [38].	35
4.9.	Potencial de generación de biogás y metano en RSLLC en el horizonte de evaluación.	37
4.10.	Potencial de generación de biogás y metano en RSSM en el horizonte de evaluación.	38
4.11.	Potencial de generación de biogás y metano en RSSP en el horizonte de evaluación.	40
4.12.	Composición biogás.	40
5.1.	Potencia eléctrica disponible en RSLLC en el horizonte de evaluación.	43
5.2.	Potencia eléctrica disponible en RSSM en el horizonte de evaluación.	43
5.3.	Potencia eléctrica disponible en RSSP en el horizonte de evaluación.	44
5.4.	Rangos típicos de flujos, potencias y eficiencias de tecnologías de generación eléctrica [40].	44
5.5.	Potencia eléctrica, eficiencias eléctricas, térmicas y total según el modelo de motor CAT [41, 42, 43].	45
5.6.	Potencia eléctrica a instalar y modelos de motores a utilizar en el RSLLC. . .	46
5.7.	Potencia eléctrica a instalar y modelos de motores a utilizar en el RSSM. . . .	48
5.8.	Potencia eléctrica a instalar y modelos de motores a utilizar en el RSSP. . . .	49
6.1.	Condiciones de operación en la etapa de adsorción de dióxido de carbono [44].	52
6.2.	Condiciones de operación en la etapa de pirólisis de metano [28].	52
6.3.	Condiciones de operación en la adsorción de metano [45].	53
6.4.	Composición corriente de entrada.	54
6.5.	Descripción de corrientes en Adsorción I: Dióxido de carbono.	55
6.6.	Corrientes en la etapa de adsorción de dióxido de carbono en $[kg/h]$	56
6.7.	Descripción de corrientes en Pirólisis de metano.	56
6.8.	Corrientes en la etapa de pirólisis de metano en $[kg/h]$	57

6.9.	Descripción de corrientes en Adsorción II: Metano.	58
6.10.	Corrientes en la etapa de adsorción de metano en $[kg/h]$	59
6.11.	Resultados producción de hidrógeno y carbono en RSLLC.	60
6.12.	Resultados producción de hidrógeno y carbono en RSSM.	61
6.13.	Resultados producción de hidrógeno y carbono en RSSP.	61
6.14.	Potencia eléctrica en RSLLC en el horizonte de evaluación.	62
6.15.	Potencia eléctrica en RSSM en el horizonte de evaluación.	63
6.16.	Potencia eléctrica en RSSP en el horizonte de evaluación.	64
7.1.	Parámetros de equilibrio de Langmuir para el carbón activado [45].	71
7.2.	Resumen dimensionamiento de equipos para el RSLLC.	72
7.3.	Resumen dimensionamiento de equipos para el RSSM.	73
7.4.	Resumen dimensionamiento de equipos para el RSSP.	73
8.1.	Compuestos presentes en el biogás y categoría de impacto correspondiente. . .	75
8.2.	Factores de PCG para la caracterización de emisiones de gases de efecto invernadero.	76
8.3.	Emisiones de gases de efecto invernadero por Megawatt-hora según el proceso evaluado.	77
8.4.	Factores para la caracterización de emisiones de gases de toxicidad humana. . .	79
8.5.	Emisiones de gases de toxicidad humana por Megawatt-hora según el proceso evaluado.	80
9.1.	Costos de inversión para el caso base.	83
9.2.	Costos de inversión para el caso base por relleno sanitario.	83
9.3.	Costos de inversión directos e indirectos.	83
9.4.	Costos de equipos e insumos para la alternativa 1.	84
9.5.	Costos de inversión para la alternativa 1 por relleno sanitario.	84
9.6.	Costos de operación y mantenimiento para el caso base.	84
9.7.	Costos de inversión para la alternativa 1 por relleno sanitario.	85
9.8.	Costos de operación variables y fijos.	85
9.9.	Consumo eléctricos equipos alternativa 1.	85
9.10.	Costos de operación para la alternativa 1 por relleno sanitario.	86
A.1.	Tasas de crecimiento por comuna y promedio para el RSLLC. Elaboración propia.	94
A.2.	Tasas de crecimiento por comuna y promedio para el RSSM. Elaboración propia.	95
A.3.	Tasas de crecimiento por comuna y promedio para el RSSP. Elaboración propia.	95
A.4.	Resultados proyección de residuos y población atendida para el RSLLC. Elaboración propia.	96
A.5.	Resultados proyección de residuos y población atendida para el RSSM. Elaboración propia.	97
A.6.	Resultados proyección de residuos y población atendida para el RSSP. Elaboración propia.	97
B.1.	Resultados balance de masa para el RSLLC. Elaboración propia.	99
B.2.	Resultados balance de masa para el RSLLC (continuación). Elaboración propia.	99
B.3.	Resultados balance de masa para el RSSM. Elaboración propia.	100
B.4.	Resultados balance de masa para el RSSM (continuación). Elaboración propia.	100
B.5.	Resultados balance de masa para el RSSP. Elaboración propia.	101
B.6.	Resultados balance de masa para el RSSP (continuación). Elaboración propia.	101
C.1.	Resultados del potencial de calentamiento global para el caso base en el RSLLC. Elaboración propia.	102

C.2.	Resultados del potencial de calentamiento global para la alternativa 1 en el RSLLC. Elaboración propia.	103
C.3.	Resultados del potencial de calentamiento global para el caso base en el RSSM. Elaboración propia.	104
C.4.	Resultados potencial de calentamiento global para la alternativa 1. Elaboración propia.	105
C.5.	Resultados del potencial de calentamiento global para el caso base en el RSSP. Elaboración propia.	106
C.6.	Resultados del potencial de calentamiento global para la alternativa 1. Elaboración propia.	107
C.7.	Resultados del potencial de toxicidad humana para el caso base en el RSLLC. Elaboración propia.	108
C.8.	Resultados del potencial de toxicidad humana para la alternativa 1 en el RSLLC. Elaboración propia.	109
C.9.	Resultados del potencial de toxicidad humana para el caso base en el RSSM. Elaboración propia.	110
C.10.	Resultados del potencial de toxicidad humana para la alternativa 1 en el RSSM. Elaboración propia.	111
C.11.	Resultados del potencial de toxicidad humana para el caso base en el RSSP. Elaboración propia.	112
C.12.	Resultados del potencial de toxicidad humana para la alternativa 1 en el RSSP. Elaboración propia.	113
D.1.	Costos de inversión para el caso base para los tres rellenos sanitarios.	114
D.2.	Costos de equipos e insumos para la alternativa 1.	115
D.3.	Resultados de los costos directos e indirectos para la alternativa 1. Elaboración propia.	115
D.4.	Costos de operación para el caso base para los tres rellenos sanitarios. Elaboración propia	116
D.5.	Resultados de los costos de electricidad para la alternativa 1. Elaboración propia.	116
D.6.	Resultados de los costos de operación para la alternativa 1. Elaboración propia.	116

Índice de Ilustraciones

2.1.	Composición de los residuos sólidos urbanos [5]. Elaboración propia.	3
2.2.	Evolución de la composición del biogás según fase de desarrollo del cultivo [10].	5
2.3.	Esquema de relleno sanitario [7].	8
2.4.	Distribución de las fuentes de hidrógeno [2].	15
2.5.	Aplicaciones del hidrógeno [2].	16
2.6.	Categorías de procesos de pirólisis de metano [23, 24].	19
2.7.	Esquema de reactor de lecho móvil con granulos de carbón propuesto por Basf [23].	21
2.8.	Esquema de reactor de columna de burbujas de metal líquido con galio puro y placa de cuarzo [25].	22
2.9.	Esquema de reactores de lecho fluidizados propuesto por Hazer Group [23]. . .	22
2.10.	Esquema de reactor de plasma propuesto por Monolith Materials [33].	23
4.1.	Instalaciones autorizadas para el manejo de residuos domiciliarios en la Región Metropolitana [5].	27
4.2.	Ciclo anual de la temperatura ambiental promedio en los rellenos sanitarios de la Región Metropolitana [34]. Elaboración propia.	28
4.3.	Población atendida por el RSLLC, RSSM y RSSP. Elaboración propia.	33
4.4.	Proyección flujo de residuos dispuestos en el RSLLC, RSSM y RSSP. Elaboración propia.	34
4.5.	Curvas de generación de biogás y metano en RSLLC. Elaboración propia. . . .	36
4.6.	Comparación de curvas de biogás generado y biogás capturado en RSLLC. Elaboración propia.	36
4.7.	Curvas de generación de biogás y metano en RSSM. Elaboración propia. . . .	37
4.8.	Comparación de curvas de biogás generado y biogás capturado en RSSM. Elaboración propia.	38
4.9.	Curvas de generación de biogás y metano en RSSP. Elaboración propia.	39
4.10.	Comparación de curvas de biogás generado y biogás capturado en RSSP. Elaboración propia.	39
5.1.	Variación de la potencia disponible y potencia real a instalar en el RSLLC. Elaboración propia.	46
5.2.	Variación de la potencia disponible y potencia real a instalar en el RSSM. Elaboración propia.	47
5.3.	Variación de la potencia disponible y potencia real a instalar en el RSSP. Elaboración propia.	49
6.1.	Diagrama de bloques del proceso. Elaboración propia.	51
6.2.	Esquema de la etapa de adsorción de dióxido de carbono. Adaptado de [44]. . .	52
6.3.	Esquema de la etapa de pirólisis de metano. Adaptado de [23].	53
6.4.	Esquema de la etapa de adsorción de metano. Adaptado de [45].	53

6.5.	Esquema de Adsorción I: Dióxido de carbono.	54
6.6.	Esquema de Pirólisis de metano.	56
6.7.	Esquema de Adsorción II: Metano.	58
6.8.	Diagrama de equilibrio de la descomposición de metano [49].	64
8.1.	Comparación de ambas alternativas según la categoría de impacto PCG para el RSSM. Elaboración propia.	77
8.2.	Comparación de ambas alternativas según la categoría de impacto PCG para el RSSM descontando las emisiones evitadas. Elaboración propia.	78
8.3.	Comparación de ambas alternativas según la categoría de impacto PTH para el RSSM. Elaboración propia.	80
8.4.	Comparación de ambas alternativas según la categoría de impacto PTH para el RSSM descontando las emisiones evitadas. Elaboración propia.	81
B.1.	Diagrama de bloques del proceso. Elaboración propia.	98

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Actualmente la acumulación de residuos orgánicos constituye un problema a nivel social, ambiental y económico, por lo que es urgente diseñar soluciones que apunten a la disminución de estos. Una de las alternativas para su tratamiento es la producción de biogás mediante digestión anaeróbica. El biogás producido puede ser capturado y usado como combustible, disminuyendo así, la cantidad de materia orgánica contaminante y, al mismo tiempo, producir energía.

Según el estudio realizado por la Comisión Nacional de Energía y la Cooperación Técnica Alemana (GTZ) en el año 2007, el potencial disponible de biogás en Chile a partir de residuos sólidos urbanos varía entre $84.611 \text{ [km}^3/\text{año]}$ y $135.378 \text{ [km}^3/\text{año]}$. Adicionalmente, el potencial de energía eléctrica total varía entre $160.215 \text{ [MWh/año]}$ a $256.343 \text{ [MWh/año]}$ y el potencial de energía cogenerada total varía entre $370.353 \text{ [MWh/año]}$ a $592.565 \text{ [MWh/año]}$ [1].

Sin embargo, el biogás aún no se ha logrado posicionar en la industria como una alternativa a las tecnologías convencionales a una gran escala, debido a que su capacidad energética es inferior a la de los combustibles fósiles.

Por otro lado, el avance del calentamiento global se ha vuelto crítico, por lo que el desarrollo de nuevas tecnologías en el ámbito energético ha sido orientado a potenciar soluciones que permitan mitigar dicho problema. Una de las soluciones para reemplazar los combustibles fósiles corresponde al hidrógeno, debido a que es un combustible con una alta eficiencia energética y no emite gases de efecto invernadero en su combustión.

El hidrógeno tiene diversas aplicaciones en la industria. Entre ellas destacan, la refinación de petróleo, la producción de amoníaco, metanol, acero, vidrio y alimentos. Asimismo, se está potenciando el uso de hidrógeno en el transporte, en la producción de electricidad y su integración en las redes de gas [2].

Si bien, el uso del hidrógeno no contamina, alrededor del 96% de la producción de hidrógeno en Chile se realiza mediante combustibles fósiles en procesos que emiten gases de efecto invernadero [3]. Es por esto que diversos centros de investigación, empresas productoras

e instituciones gubernamentales están trabajando en el desarrollo de una producción de hidrógeno sin emisiones o también conocida como hidrógeno verde.

Teniendo en consideración el potencial de la producción de hidrógeno en Chile y el flujo de residuos que continúan acumulándose en los rellenos sanitarios, se propone evaluar la factibilidad técnica de utilizar los residuos orgánicos de la Región Metropolitana para producir hidrógeno mediante pirólisis de metano, una tecnología que proporciona hidrógeno libre de dióxido de carbono.

Además, para determinar si es conveniente la implementación de la pirólisis, se plantea comparar la generación de electricidad utilizando hidrógeno como intermediario con la producción de electricidad a partir de biogás directo, que es el método utilizado actualmente, considerando aspectos ambientales y económicos.

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Evaluar el proceso de valorización energética de residuos orgánicos de los rellenos sanitarios de la Región Metropolitana mediante la generación de hidrógeno: pirólisis de metano, considerando aspectos técnicos, ambientales y económicos.

1.2.2. Específicos

1. Estimar el potencial energético de los residuos orgánicos de los rellenos sanitarios de la Región Metropolitana.
2. Estimar la generación de electricidad a partir de biogás en cada relleno sanitario de la Región.
3. Diseñar el proceso de pirólisis de metano, considerando una entrada de biogás de acuerdo a la proyección realizada de la valorización de los residuos orgánicos generados por la Región Metropolitana.
4. Dimensionar los equipos principales del proceso de pirólisis de metano.
5. Evaluar ambientalmente las alternativas proyectadas utilizando las categorías de impacto: Potencial de calentamiento global y Potencial de toxicidad humana.
6. Evaluar económicamente las alternativas proyectadas considerando su CAPEX y OPEX.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Residuos sólidos urbanos

Los residuos sólidos urbanos (RSU) están compuestos por residuos orgánicos (alimentos, cartón, papeles, restos de poda y jardín) y por residuos inorgánicos (plásticos, metales, vidrios, tetra pack). Dichos residuos sólidos son generados en los hogares y sus asimilables, como por ejemplo, los desechos generados en servicios públicos, establecimientos educacionales, hoteles, comercio, entre otros [4].

Según el Quinto Reporte del Estado del Medio Ambiente realizado por el Ministerio del Medioambiente (2019), en el año 2017, se generaron cerca de 23 millones de toneladas de residuos, de los cuales, alrededor de 7,8 millones corresponden a residuos sólidos urbanos (34,3%) [4]. Cabe señalar que la Región Metropolitana presentó la mayor generación de residuos sólidos urbanos del total nacional, con 3,45 millones de toneladas, equivalente al 44,2% [5].

En la Figura 2.1 se presenta la composición porcentual de los residuos sólidos urbanos para la Región Metropolina para el año 2010, según el estudio de “Factibilidad Técnico Ambiental, Social y Económica Para la Implementación del Plan de Acción Santiago Recicla 2010” elaborado por Ingeniería Alemana S.A. [5].

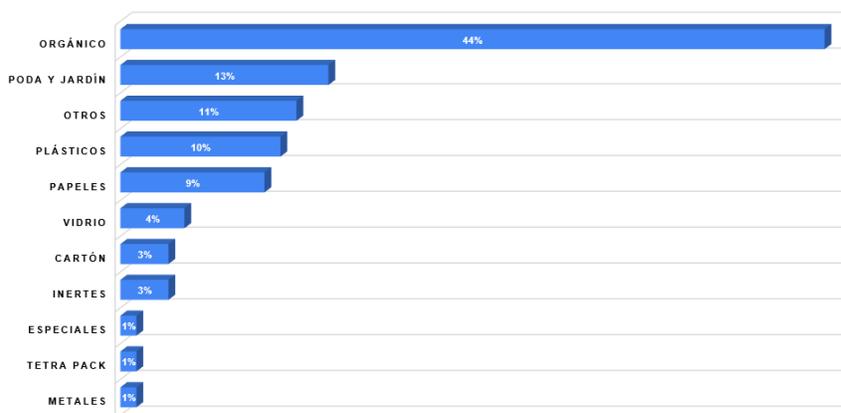


Figura 2.1: Composición de los residuos sólidos urbanos [5]. Elaboración propia.

En Chile, más del 70 % de los residuos sólidos urbanos son depositados en sitios de disposición final autorizados, tales como vertederos o rellenos sanitarios. En particular, en la Región Metropolitana el 91,3 % de los residuos posee una disposición final adecuada [4].

2.2. Relleno sanitario

Según el Decreto 189/05, un relleno sanitario es una instalación de eliminación de residuos sólidos en la cual se disponen residuos sólidos domiciliarios y asimilables, diseñada, construida y operada para minimizar molestias y riesgos para la salud y la seguridad de la población y daños para el medio ambiente, en la cual las basuras son compactadas en capas al mínimo volumen practicable y son cubiertas diariamente [6].

Es posible representar un relleno sanitario como un reactor bioquímico, cuyas entradas principales son residuos y agua, mientras que sus principales salidas son gases y lixiviados [7].

Las salidas mencionadas son riesgosas para la salud y el medio ambiente. Algunas de estas salidas corresponden a gases de efecto invernadero por la descomposición anaeróbica de los residuos orgánicos, contaminación de aguas superficiales y subterráneas, infertilidad de los suelos y malos olores [8]. Es por esto que los rellenos sanitarios deben velar por una gestión integral de residuos, realizando un manejo apropiado de las emisiones atmosféricas y líquidas.

2.3. Biogás

El biogás es una mezcla gaseosa producida por la digestión anaeróbica de la biomasa, en la cual microorganismos se encargan de descomponer material biodegradable en ausencia de oxígeno, generando así un gas cuyos componentes principales son el metano y el dióxido de carbono, con trazas de otros elementos.

En la Tabla 2.1 se presenta la composición molar del biogás obtenido mediante digestión anaeróbica según la literatura [9]. Cabe señalar que su composición depende fuertemente de la materia prima utilizada y de las condiciones del medio.

Tabla 2.1: Composición molar del biogás [9].

Compuesto	% Composición molar
Metano	55-65
Dióxido de carbono	35-45
Trazas de otros gases	~ 0

2.3.1. Fases de la producción de biogás

La producción de biogás en un relleno sanitario es un proceso biológico complejo debido al número de reacciones y cantidad de microorganismos involucrados en ellas. Según la literatura, el proceso de degradación orgánica ocurre en cinco fases secuenciales, como se

muestra en la Figura 2.2.

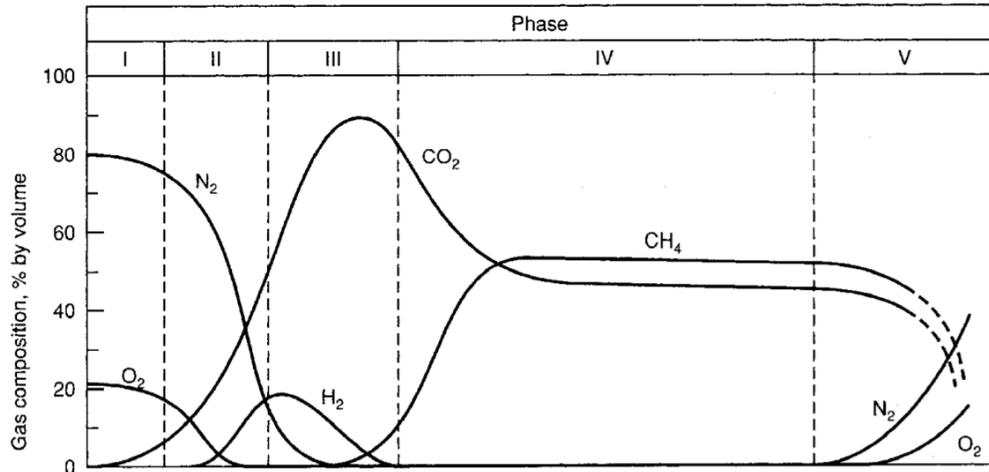


Figura 2.2: Evolución de la composición del biogás según fase de desarrollo del cultivo [10].

1. **Fase I - Ajuste Inicial** (Descomposición Aeróbica): La primera fase consiste en la descomposición bacteriana de los componentes orgánicos de los residuos sólidos urbanos una vez que son ingresados al relleno sanitario [10]. Dicha descomposición ocurre en condiciones aeróbicas porque una cierta cantidad de aire queda atrapada dentro del vertedero. En esta fase se produce dióxido de carbono, calor y agua [7].
2. **Fase II - Fase de Transición** (Descomposición anóxica, no metanogénica): En la segunda fase, los microorganismos consumen el oxígeno y nitrógeno residual, comenzando el desarrollo de condiciones anaeróbicas. Las reacciones involucradas producen ácidos orgánicos, gas de hidrógeno y dióxido de carbono [10].
3. **Fase III - Fase Ácida** (Descomposición Anaeróbica Metanogénica inestable): En la tercera fase, la actividad bacteriana se acelera con la producción de ácidos orgánicos y la producción de dióxido de carbono decrece, gracias a los procesos de hidrólisis y acidogénesis [10].

La hidrólisis consiste en descomponer polímeros generalmente insolubles o poco solubles, entre ellas, carbohidratos, proteínas y ácidos grasos en sus monómeros correspondientes (solubles) gracias a la acción de enzimas extracelulares [11], con el objetivo de que los microorganismos puedan utilizar los compuestos como fuente de energía y carbono celular. Por otro lado, en la acidogénesis ocurre la transformación de los monómeros del proceso anterior en compuestos que pueden ser usados por otras bacterias, como ácido acético o acetato, ácido fórmico o hidrógeno; y otros que no sirven de alimento a otras bacterias, como etanol o aromáticos [11, 12].

4. **Fase IV - Fase de Fermentación del Metano** (Descomposición Anaeróbica Metanogénica estable): En la cuarta fase, los microorganismos metanogénicos actúan sobre el ácido acético y el hidrógeno para formar metano y dióxido de carbono [10].

5. **Fase V - Fase de Maduración** (Descomposición Anaeróbica Metanogénica en disminución): La quinta fase, ocurre después de que la mayoría del material orgánico biodegradable se ha convertido en metano y dióxido carbono. En esta fase, los microorganismos actúan sobre los desechos que antes no estaban disponibles, gracias a que la humedad al interior del relleno continúa migrando. No obstante, la tasa de generación de biogás disminuye significativamente debido a la escasez de nutrientes y que los sustratos disponibles son de degradación lenta [10].

2.3.2. Factores que afectan la producción de biogás

Como se mencionó previamente, el biogás se genera en un relleno sanitario como resultado de reacciones biológicas que ocurren al interior de los rellenos sanitarios, estos procesos son altamente susceptibles a los cambios en las condiciones ambientales, por lo que existen diversos factores que determinan la producción de biogás. Estos factores se discuten a continuación:

2.3.2.1. Composición de los residuos

La composición de los residuos presentes en los rellenos sanitarios afecta directamente la actividad microbiana del sistema anaeróbico, siendo favorecida cuando el porcentaje de residuos orgánicos es mayor [11].

Es importante mencionar que el proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono sino que también requiere de macronutrientes (nitrógeno y fósforo) y micronutrientes (sales minerales) [11].

2.3.2.2. Temperatura

En cuanto a las condiciones de operación de la digestión anaeróbica, esta depende directamente de la temperatura de reacción debido a que este parámetro influye en la tasa de crecimiento microbiano y la cinética de reacción, siendo favorecidas cuando la temperatura es mayor. Existen tres rangos de temperatura en este proceso:

- Psicofílico: ≤ 20 [°C]
- Mesofílico: 35-40 [°C]
- Termofílico: 55-60 [°C]

El rango óptimo de operación es el termofílico, dado que se obtiene una mayor velocidad del proceso, garantiza un porcentaje mayor de producción de biogás y de eliminación de organismos patógenos [11]. Asimismo, para un óptimo funcionamiento del biodigestor, se recomienda que la variación de temperatura no exceda 1 [°C] dentro del equipo, pues esto desajusta el metabolismo de la comunidad microbiana [12].

2.3.2.3. Humedad

En cuanto al contenido de humedad de los residuos, bajos índices de este limitan la descomposición de los residuos, y por consecuencia restringen la generación de biogás. El contenido de humedad óptimo es entre 50 % - 60 % para la producción de biogás [7].

Debido a que el contenido de humedad varía dependiendo de la zona del relleno sanitario, se recomienda recircular los líquidos percolados para homogenizar la humedad al interior del relleno [7, 13].

2.3.2.4. pH

Los cambios en los niveles del pH en el relleno sanitario afecta directamente al proceso anaeróbico. Asimismo, el valor del pH determina la producción de biogás y la composición del gas [11]. Para que el proceso anaeróbico se lleve a cabo satisfactoriamente, el valor del pH debe estar entre 6 y 8, siendo el óptimo, un pH neutro [11].

2.3.2.5. Cobertura

El recubrimiento continuo del relleno sanitario evita el contacto de los residuos con el oxígeno, permitiendo que se mantengan las condiciones anaeróbicas en el sistema. Además, reduce la entrada de aguas lluvias manteniendo una adecuada humedad en los residuos [13].

2.3.3. Propiedades del biogás

La presencia de metano en concentraciones superiores al 45 %, le concede un poder calorífico competitivo al biogás [11]. En la Tabla 2.2 se presentan las principales características del biogás:

Tabla 2.2: Propiedades del biogás [11].

Poder Calorífico	6,0 - 6,5 [kWh/m^3]
Equivalente de combustible	0,60 - 0,65 [L petróleo/ m^3 biogás]
Límite de explosión	6 % - 12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 - 750 [$^{\circ}C$]
Presión crítica	74 - 88 [atm]
Temperatura crítica	-82,5 [$^{\circ}C$]
Densidad normal	1,2 [kg/m^3]
Masa molar	16.043 [$kg/kmol$]

2.3.4. Sistemas de extracción de biogás

Para aprovechar el biogás producido es necesario diseñar un sistema eficiente de extracción de biogás. Existen dos métodos de extracción: pasivo y activo. El sistema pasivo consiste en generar un cambio de presión al interior del relleno sanitario provocando que el gas circule hacia el exterior del vertedero [10]. El sistema activo consiste en generar vacío dentro de los pozos de captación forzando la evacuación del biogás del interior del relleno sanitario [10, 13]. Debido a que la presión al interior del relleno sanitario es relativamente baja, se recomienda utilizar el sistema de extracción activo para el aprovechamiento energético [10].

En la Figura 2.3 se presenta el esquema de un relleno sanitario con sistema de extracción activo.

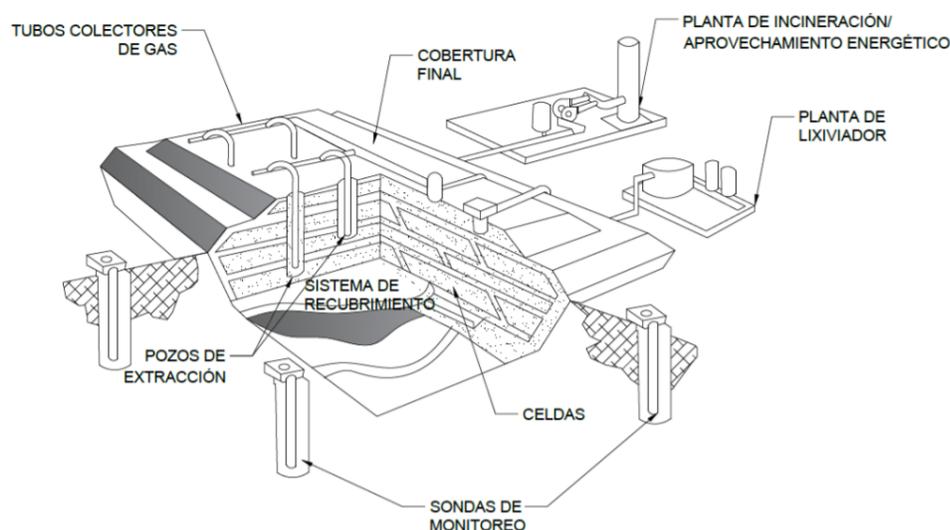


Figura 2.3: Esquema de relleno sanitario [7].

El sistema de extracción activo se compone de los siguientes elementos:

- **Pozos de extracción:** Son tuberías perforadas o ranuradas permeables que se instalan en el relleno sanitario a profundidades de que van del 50 % al 90 % del espesor de los residuos acumulados que se encargan de capturar el biogás producido en el relleno sanitario. Los pozos pueden ser con tuberías verticales, horizontales y mixtas, siendo los sistemas verticales los más utilizados [7, 13].
- **Cabezal de pozo:** El cabezal de pozo es un sistema de monitoreo de la captación del biogás que se sitúa en la parte superior de los pozos de extracción. Este se encarga de controlar la extracción del biogás, regular el flujo del gas, eliminar la condensación de agua y medir la temperatura, presión y caudal del gas [7].
- **Tuberías colectoras:** Son tuberías de polietileno o polipropileno que se encargan de transportar el biogás desde los pozos de extracción a la estación de aprovechamiento energético. Asimismo, el sistema de tuberías debe contar con puntos de eliminación de agua condensada [7].
- **Bombeo de extracción:** El sistema de bombeo de extracción incluye todos los componentes para inducir un vacío que permite la extracción del biogás y suministro de este para su uso final. Los equipos utilizados son compresores o sopladores centrífugos. Adicionalmente, para minimizar el riesgo de explosión en el proceso, se deben incorporar supresores de llama en caso de auto combustión [7].

2.3.5. Modelos de estimación de producción de biogás

Para evaluar la factibilidad de implementar proyectos de aprovechamiento del biogás en sitios de disposición final es necesario estimar la generación de biogás y su potencial energético en el tiempo.

Para ello, se han desarrollado modelos matemáticos que describen la degradación de la materia orgánica. A continuación se detallan los principales modelos:

2.3.5.1. Modelo LandGEM

El modelo LandGEM diseñado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), es una herramienta basada en una ecuación de tasa de descomposición de primer orden para cuantificar las emisiones provenientes de la descomposición de desechos vertidos en rellenos sanitarios (Ecuación 2.1). Cabe señalar, que la EPA desarrolló un software *open source* automatizado en Microsoft Excel que se utiliza para estimar las tasas de emisión del biogás, metano, dióxido de carbono, compuestos orgánicos no metano (CONM) y contaminantes.

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k \cdot L_0 \cdot \left(\frac{M_i}{10} \right) \cdot e^{-kt_{ij}} \quad (2.1)$$

Donde:

- Q_{CH_4} : Generación anual de metano en el año de cálculo [$m^3/año$].
- i : Incremento de tiempo de un año.
- n : Diferencia entre año de cálculo y año que el relleno empieza a recibir residuos.
- j : Incremento de tiempo de 0,1 año.
- k : Tasa de generación de metano [$1/año$].
- L_0 : Potencial de generación de metano [m^3/ton].
- M_i : Cantidad de residuos recibidos en el año i [ton].
- t_{ij} : Año de la sección j de los residuos acumulados en el año i .

Cabe destacar que el modelo LandGEM ha sido diseñado con valores de entrada estándar para L_0 y k en función de la composición típica de los residuos sólidos en Estados Unidos. No obstante, dichos parámetros se pueden ingresar manualmente y se pueden calcular siguiendo la metodología detallada en la Sección 2.3.5.4.

2.3.5.2. Modelo Mexicano de biogás

El modelo mexicano de biogás diseñado por SCS Engineers, es una herramienta basada una ecuación de degradación de primer orden para cuantificar la generación de biogás (Ecuación 2.2) [14].

$$Q_{LFG} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 2 \cdot k \cdot L_0 \cdot \left(\frac{M_i}{10} \right) \cdot e^{-kt_{ij}} \cdot MCF \cdot F \quad (2.2)$$

Donde:

- Q_{LFG} : Flujo de biogás máximo esperado en el año de cálculo [$m^3/año$].
- MCF : Factor de corrección de metano.
- F : Factor de ajuste por incendios.

A diferencia del modelo LandGEM, el modelo mexicano incluye un factor de corrección de metano (MCF) y un factor de ajuste por incendios (F). Además, asume automáticamente que la composición del biogás es de 50 % metano al incluir una constante de 2.

Cabe señalar que el modelo provee automáticamente los valores de L_0 y k representativos de México. De todas formas, al igual que el modelo LandGEM, los parámetros se pueden ser calcular para adecuarse a las condiciones específicas del relleno sanitario siguiendo la metodología explicada en la Sección 2.3.5.4.

2.3.5.3. Modelo IPPC

El modelo IPPC es una herramienta basada en una ecuación cinética de descomposición de primer orden para cuantificar las emisiones de metano provenientes de la degradación de los residuos presentes en rellenos sanitarios (Ecuación 2.3) [14, 13].

$$Emisiones\ de\ CH_{4,i} = (MSW_i \cdot MSW_F \cdot MCF \cdot DOC \cdot DOC_F \cdot F \cdot \frac{16}{12} - R) \cdot (1 - OX) \quad (2.3)$$

Donde:

- Emisiones de $CH_{4,i}$: Flujo másico de metano emitido en el año i [t/año].
- MSW_i : Flujo másico de residuos sólidos generados en el año i [t/año].
- MSW_F : Fracción de residuos sólidos dispuestos en el relleno sanitario.
- R : Flujo másico de metano recuperado en el año i [t/año].
- OX : Factor de oxidación.

2.3.5.4. Parámetros

A continuación, se describen los principales parámetros de los modelos y cómo se calculan.

- **Potencial de generación de metano (L_0):**

Este parámetro depende de la composición de los residuos del relleno sanitario. Dado que la composición de los residuos varía según la zona geográfica y la población atendida, es necesario estimar su valor según las condiciones ambientales del caso de estudio. Es posible estimar su valor empleando la relación descrita en la Ecuación 2.4:

$$L_0 = 1000 \cdot MCF \cdot DOC \cdot DOC_F \cdot F \cdot \frac{16}{12} \quad (2.4)$$

Donde:

- L_0 : Potencial de generación de metano [m^3/ton].
- MCF : Factor de corrección de metano.
- DOC : Factor de ajuste de la composición de los residuos.
- DOC_F : Factor de proporción de carbono disponible convertida en biogás.

- F : Fracción de metano contenido en biogás, su asume típicamente 0,5.
- Factor $\frac{16}{12}$: Constante estequiométrica.

El factor de corrección de metano (MCF) ajusta el grado de degradación anaeróbica de los residuos dependiendo de las condiciones del relleno sanitario. En la Tabla 2.3 se presentan los valores de MCF según las prácticas del manejo y profundidad del sitio de disposición final.

Tabla 2.3: Factor de corrección de metano según el manejo y profundidad del sitio de disposición final [14].

Manejo del sitio	Profundidad inferior a 5 metros	Profundidad superior a 5 metros
Gestionado - anaeróbico	0,8	1,0
Gestionado - semi-aneróbico	0,4	0,5
No gestionado	0,4	0,8
Sitio no categorizado	0,4	0,8

El factor de ajuste de la composición de los residuos (DOC) considera que la composición de los residuos de cada sitio de disposición final es variable debido a que dependen de la población, cultura, condiciones climáticas, entre otros. Para estimar su valor se utiliza la Ecuación 2.5 [14].

$$DOC = 0,4 \cdot A + 0,17 \cdot B + 0,15 \cdot C + 0,3 \cdot D \quad (2.5)$$

Donde:

- A: Porcentaje de residuos que corresponde a papel, cartón y textiles.
- B: Porcentaje de residuos que corresponde a desechos de jardín, parques u orgánicos putrescibles (excluidos los alimentos).
- C: Porcentaje de residuos que corresponde a desechos de alimentos.
- D: Porcentaje de residuos que corresponde a madera y paja.

La estimación del factor de proporción de carbono disponible convertida en biogás (DOC_F), descrita por la Ecuación 2.6, está basada en un modelo teórico que varía solo con la temperatura en la zona anaeróbica del relleno sanitario [14].

$$DOC_F = 0,014 \cdot T + 0,28 \quad (2.6)$$

Donde:

- T: Temperatura [°C].

El valor predeterminado utilizado por la IPCC¹ es de 0,77 [14].

¹ IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

La fracción de metano contenido en biogás (F) depende de la composición de los residuos orgánicos que ingresan a los rellenos. El valor predeterminado es 0,5 debido a que la composición molar del biogás producido en rellenos sanitarios suele ser un 50%(v/v) de metano, un 50%(v/v) de dióxido de carbono y trazas de otros compuestos (menor al 1%(v/v))[14].

■ **Tasa de generación de metano k :**

Representa la tasa de biodegradación de primer orden que se convierte en metano durante la digestión anaeróbica. El parámetro k depende del contenido de humedad, la disponibilidad de nutrientes, el pH y la temperatura [14].

Para efectos del estudio se utiliza el valor de k determinado en la tesis de DANIEL LÓPEZ (2016) a partir de un modelo de estimación de k mediante evaluación difusa. El valor de k obtenido para los rellenos sanitarios de la Región Metropolitana, Relleno Sanitario Santa Marta y Relleno Sanitario Santiago Poniente, corresponde a 0,026 [7].

■ **Proyección de residuos**

La estimación de la generación de residuos sólidos urbanos para el año i queda determinada por la Ecuación 2.7.

$$M_i = PPC \cdot población \cdot (1 + tasa_{crec})^{Año_i - Año_0} \quad (2.7)$$

Donde:

- M_i : Cantidad de residuos recibidos en el año i [t].
- PPC : Producción de residuos per cápita [t/hab – año]
- $Población$: Población atendida por el relleno sanitario en el año 0
- $tasa_{crec}$: Tasa de crecimiento de la población anual.
- $Año_i$: Año de evaluación.
- $Año_0$: Año de referencia.

La producción de residuos per cápita se calcula mediante la relación descrita en la Ecuación 2.8:

$$PPC = \frac{M_j}{P_j} \quad (2.8)$$

Donde:

- M_j : Cantidad de residuos dispuestos en el relleno sanitario en el año j [t/año].
- P_j : Población atendida por el relleno sanitario en el año j [hab].

Dado que el análisis del trabajo de título se enfocará en rellenos sanitarios de la Región Metropolitana, es necesario utilizar una tasa de crecimiento anual que se adecúe específicamente a la población atendida del sitio de disposición final. Sin embargo, debido a la falta de información disponible de los habitantes por comuna para cada año, se opta por estimar dicha tasa.

Para ello, se recolecta la información obtenida en los Censos de Población y Vivienda realizada por el Instituto Nacional de Estadísticas (*INE*) en los años 1992, 2002 y 2017. Se seleccionan los Censos de dichos años debido a que el rango de estimación de residuos se realizará desde el año 1996 al 2046 (período de operación más largo de los rellenos sanitarios de la Región Metropolitana).

Con la información obtenida es posible estimar la tasa de crecimiento anual mediante la relación descrita en la Ecuación 2.10:

$$Población_t = Población_i \cdot (1 + tasa_{crec,i})^{año_t - año_i} \quad (2.9)$$

$$\Rightarrow \frac{Población_t}{Población_i} = (1 + tasa_{crec,i})^{año_t - año_i}$$

$$\Rightarrow tasa_{crec,i} = \left(\frac{Población_t}{Población_i} \right)^{\frac{1}{año_t - año_i}} - 1 \quad (2.10)$$

Debido a que la población fluctúa a lo largo del tiempo, se estimará una tasa de crecimiento anual por comuna para el período 1992-2002 y otra para el período 2002-2017.

Ahora bien, con lo descrito previamente solo se estimará la población, y en consecuencia, los residuos para el período 1992-2017. Por lo que es necesario utilizar otro método para estimar la proyección de la población para el período faltante (2018-2046).

Para lo anterior, se utiliza la tasa de crecimiento anual estimada para cada comuna de la región por el “Estudio de Análisis de Proyecciones de Población INE Período 2015-2035” desarrollado por el Seremi de Desarrollo Social y Familia Metropolitana en el año 2019 [15].

Si bien, la tasa de crecimiento anual determinada por el estudio contempla solo el período 2015-2035, para efectos del trabajo de título se considerará que la tasa de crecimiento anual se mantiene constante para el periodo 2015-2046, por lo que se utilizará la tasa del estudio.

Con lo anterior, la Ecuación 2.7 queda simplificada a:

$$M_i = PPC \cdot Población_i \quad (2.11)$$

Donde:

- $Población_i$: Población estimada para el año i .

2.3.6. Aplicaciones del biogás

Existen diversas alternativas para la utilización del biogás. Dentro de estas destacan la generación de electricidad y uso directo del gas.

- Generación de electricidad o sistemas combinados (calor-electricidad): El biogás de relleno sanitario puede ser usado como combustible en motores de combustión interna, turbinas a gas (> 100 kW) y microturbinas (25kW - 100kW) que conducen un generador eléctrico [11]. Para utilizar el biogás en los equipos mencionados se requiere la remoción de ácido sulfhídrico (H_2S) (bajo 100 ppm) y vapor de agua.
- Uso directo del gas como combustible de mediano Poder Calorífico Inferior (50% metano): El biogás puede ser utilizado en calderas, secadores, hornos, entre otros [7]. También, se puede ser usada en escala domiciliaria para actividades básicas como cocinar, calentar agua e iluminación [11].
- Conversión de biogas a un gas combustible enriquecido de alto Poder Calorífico Inferior (90% - 99% metano): El gas enriquecido puede ser inyectado a la red de gas natural o como combustible para vehículos [7, 11]. Para alcanzar una concentración de metano superior al 90%, es necesario remover dióxido de carbono, vapor de agua y contaminantes trazas como sulfuros y compuestos orgánicos volátiles.

2.3.7. Sistemas de tratamiento del biogás

Como se mencionó anteriormente, para utilizar el biogás es necesario realizar un tratamiento para eliminar compuestos no deseados presentes en el gas. El nivel del tratamiento depende de la aplicación del biogás.

- Remoción de dióxido de carbono CO_2 : Su eliminación incrementa el poder calorífico y genera un gas de calidad similar a la del gas natural. Existen diversos métodos para su eliminación, entre ellos destacan: absorción con agua como agente de lavado; adsorción en carbón activado o zeolitas; separaciones por membrana y criogénicas [11].
- Remoción de agua: Su eliminación previene la formación de condensado en las tuberías de transporte, el cual puede corroer las paredes de las tuberías. Los métodos utilizados para remover el vapor de agua son: secado por compresión y/o enfriamiento del gas, adsorción en carbón activado o sílica gel o absorción [11].
- Remoción del ácido sulfhídrico (H_2S): El H_2S en combinación con el vapor de agua en el biogás crudo, puede formar ácido sulfúrico, un compuesto corrosivo para los motores y sus componentes. Asimismo, H_2S es tóxico a concentraciones superiores a 100 [ppm]. Su remoción se realiza mediante adsorción en carbón activo o lavado con soluciones de hidróxido de sodio, agua o sales de hierro [11].

2.3.8. Generación de electricidad

Dependiendo del flujo de biogás obtenido para el relleno sanitario y la pureza del gas, este puede ser utilizado como combustible en motores de combustión interna, turbinas a gas o microturbina que conducen un generador eléctrico.

Una vez determinado el caudal de biogás, es posible calcular la potencia disponible mediante la Ecuación 2.12 [16]:

$$Potencia\ disponible\ [kW] = \eta_t \cdot PCI_{biogás} \cdot Q_{biogás, cap} \quad (2.12)$$

Donde:

- η_t : Rendimiento térmico de la generación eléctrica.
- $PCI_{biogás}$: Poder calorífico inferior del biogás [kWh/Nm^3].
- $Q_{biogás, cap}$: Caudal de biogás capturado [$Nm^3/hora$].

2.4. Hidrógeno en Chile

El hidrógeno es el gas más abundante del universo, que se caracteriza por ser incoloro, inodoro, insípido e inflamable. Además, el combustible posee una alta densidad energética por unidad de masa, tres veces más que la gasolina y tiene potencial de aplicación en todos los sectores que requieren energía [2].

A pesar de su gran abundancia, el hidrógeno no se encuentra en su estado puro en la Tierra. Por esta razón, debe ser obtenido a partir de fuentes de energía. Luego, esta molécula se propone como un portador o vector energético ya que facilita el almacenamiento y transporte de energía, en forma de hidrógeno gaseoso, líquido o sólido [17].

Las principales materias primas para producir hidrógeno comprenden recursos renovables, como el agua y la biomasa, y recursos fósiles como gas natural, carbón y derivados del petróleo [19]. En la Figura 2.4 se presenta la distribución de las fuentes de hidrógeno en Chile, donde el 96 % de la producción de hidrógeno se realiza mediante combustibles fósiles (metano, petróleo y carbón) y solo un 4 % a través de agua [2]. No obstante, gracias a la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde 2020 planteada por el Ministerio de Energía, se espera que en los próximos años, la obtención de hidrógeno mediante agua sea la predominante en el mercado [18].

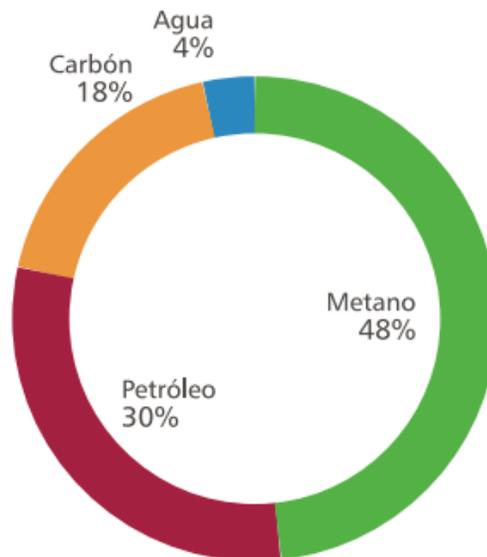


Figura 2.4: Distribución de las fuentes de hidrógeno [2].

Por otro lado, el hidrógeno puede ser producido a través de diversos procesos, que se pueden clasificar en tres grupos:

- **Termoquímicos:** Se produce hidrógeno a partir de combustibles fósiles, biomasa o agua, mediante la aplicación de calor y reacciones químicas. Existen variados métodos termoquímicos, entre ellos, se distinguen reformado de metano, oxidación parcial y gasificación [2, 3, 19].
- **Electroquímicos:** Proceso que disocia la molécula de agua en hidrógeno y oxígeno por medio de electricidad. Los métodos electroquímicos principales son la electrólisis y fotólisis [2, 3].
- **Bioquímicos:** Se obtiene hidrógeno a partir de microorganismos, como, bacterias y algas, mediante procesos biológicos. Entre los métodos bioquímicos se destaca la biofotólisis y la fermentación [2, 3].

Como se mencionó anteriormente, existen variadas aplicaciones del hidrógeno. Estas pueden ser clasificadas en convencionales, transporte, estacionarias, móviles y uso de hidrógeno como gas, como se presenta en la Figura 2.5.

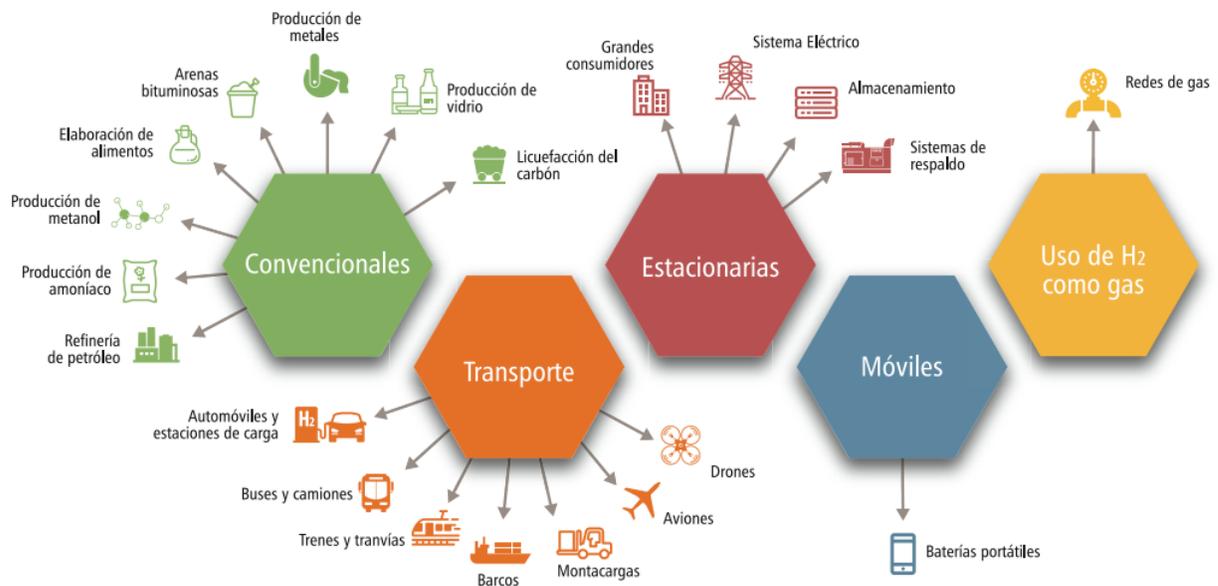


Figura 2.5: Aplicaciones del hidrógeno [2].

Las aplicaciones convencionales, están asociadas al uso de hidrógeno en procesos industriales. Los principales usos industriales se detallan a continuación:

- **Refinería de petróleo:** El hidrógeno se utiliza en los procesos de hidrodesulfuración e hidrocrqueo. La hidrodesulfuración consiste en disminuir la presencia de azufre de los combustibles. El proceso de hidrocrqueo se encarga de descomponer las moléculas de hidrocarburos en moléculas más simples.
- **Producción de amoníaco:** Se realiza mediante el proceso de Haber-Bosch, donde se lleva a cabo la reacción representada en la Ecuación 2.13:



- **Producción de metanol:** El metanol se sintetiza mediante un proceso catalítico a partir de monóxido de carbono e hidrógeno, también conocido como gas de síntesis.

En cuanto a las aplicaciones en el transporte, el hidrógeno se puede usar en estaciones de carga, buses, camiones, vehículos comerciales, de carrera y prototipos en base a *fuelcells* (también conocidas como celdas de combustible).

Con respecto a las aplicaciones estacionarias, se utilizan sistemas basados en fuel cells para producir energía de respaldo, electricidad y/o calor. Dichos sistemas tienen como principales ventajas las bajas emisiones, no hay pérdidas de eficiencia por transmisión ya que proveen directamente la energía al cliente y los equipos de instalación son de menor tamaño en comparación a otras tecnologías como energía solar o eólica. Lo anterior, promueve la instalación de sistemas de mayor escala para abastecer energéticamente a hospitales, supermercados, edificios, aeropuertos, entre otros.

En cuanto a las aplicaciones móviles, es posible utilizar fuel cells para abastecer equipos eléctricos y baterías. Finalmente, se tiene el uso del hidrógeno como gas, siendo inyectado a la red de gas como una alternativa al gas natural.

2.5. Estado del Arte

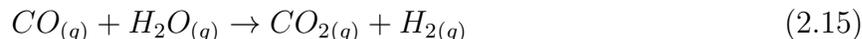
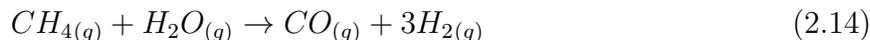
2.5.1. Producción de hidrógeno termoquímico basado en metano

A continuación se presentan los principales métodos de producción de hidrógeno termoquímico basado en metano utilizados en la industria, junto con la descripción de una nueva tecnología: pirólisis de metano. Cabe señalar que es posible utilizar como materia prima biogás en los métodos descritos siempre que se considere una etapa previa de purificación de biogás.

2.5.1.1. Reformado de metano con vapor

El reformado de metano con vapor de agua, o “steam methane reforming” (SMR), es uno de los principales métodos para producir hidrógeno a escala industrial debido a la alta pureza, por la elevada relación $H_2 : CO$ obtenida (3 : 1) y bajo costos [2].

El proceso se basa en la reacción del metano con vapor de agua en presencia de un catalizador para producir hidrógeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono. El mecanismo de reacción se puede explicar a partir de dos reacciones: reformado con vapor de agua y la reacción de Water-Gas Shift (WGS), representadas por las Ecuaciones 2.14 y 2.15, respectivamente [20].



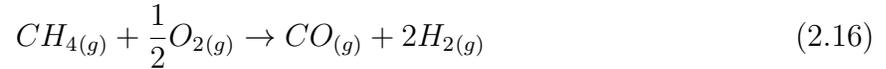
El reformado de metano es un proceso fuertemente endotérmico y limitado por el equilibrio termodinámico del metano. La reacción se lleva a cabo a altas temperaturas, alrededor de 1.000 °C, obteniéndose un hidrógeno de alta pureza (99,99%). La eficiencia térmica del proceso a escala industrial es de alrededor del 70 % al 85 % [17].

La principal desventaja del proceso es la producción de dióxido de carbono (CO_2) liberando

gases de efecto invernadero. Si no se quiere liberar este gas, es posible su procesamiento. Esa posibilidad, sin embargo, requiere un proceso adicional que establece una diferencia significativa con los procesos que no producen CO₂, como la pirólisis.

2.5.1.2. Oxidación parcial

La oxidación parcial consiste en reaccionar un combustible de hidrocarburo con oxígeno, para producir una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono (gas de síntesis). El mecanismo de reacción se puede explicar por la ruta directa de oxidación parcial representada por la Ecuación 2.16 [21, 20].



La reacción tiene lugar a altas temperaturas, entre 1100°C y 1500°C, sin la presencia de catalizador. Mientras que en presencia de un catalizador, se puede operar a una menor temperatura, entre 600°C y 900°C [21].

La oxidación parcial se utiliza principalmente en la producción de metanol o hidrocarburos a través de la síntesis de Fischer-Tropsch, gracias al gas de síntesis obtenido cuya la relación molar $H_2 : CO$ es similar a 2 [20].

2.5.1.3. Reformado auto-térmico

El reformado auto-térmico (ATR) es una combinación del reformado con vapor y la oxidación parcial. En este proceso, el calor producido en la oxidación parcial es transferido al proceso de reformado [21]. De esta forma, la tasa de producción de hidrógeno aumenta, manteniendo un bajo contenido de monóxido de carbono. Asimismo, no se requiere calor externo, pues parte del poder calorífico del combustible es invertido para mantener la temperatura del proceso, y tiene un menor costo que el reformado con vapor [17].

2.5.1.4. Pirólisis de metano

La pirólisis de metano consiste en la descomposición térmica no oxidativa del metano, para producir hidrógeno y carbono sólido. La principal reacción del proceso es representada según la Ecuación 2.17 [22].



Este método se propone como una potencial alternativa al reformado de metano debido a que proporciona hidrógeno libre de dióxido de carbono. Otra ventaja es que la pirólisis de metano tiene un requerimiento energético cercano a la mitad del requerimiento del reformado de metano por mol de metano. Además, el carbono generado se puede vender como un producto para compensar los costos asociados con la producción de hidrógeno.

Existen tres métodos para llevar a cabo la pirólisis de metano: descomposición térmica, descomposición catalítica y descomposición de plasma. En la Figura 2.6 se presenta el lugar donde ocurre la pirólisis de metano según el principio de descomposición.

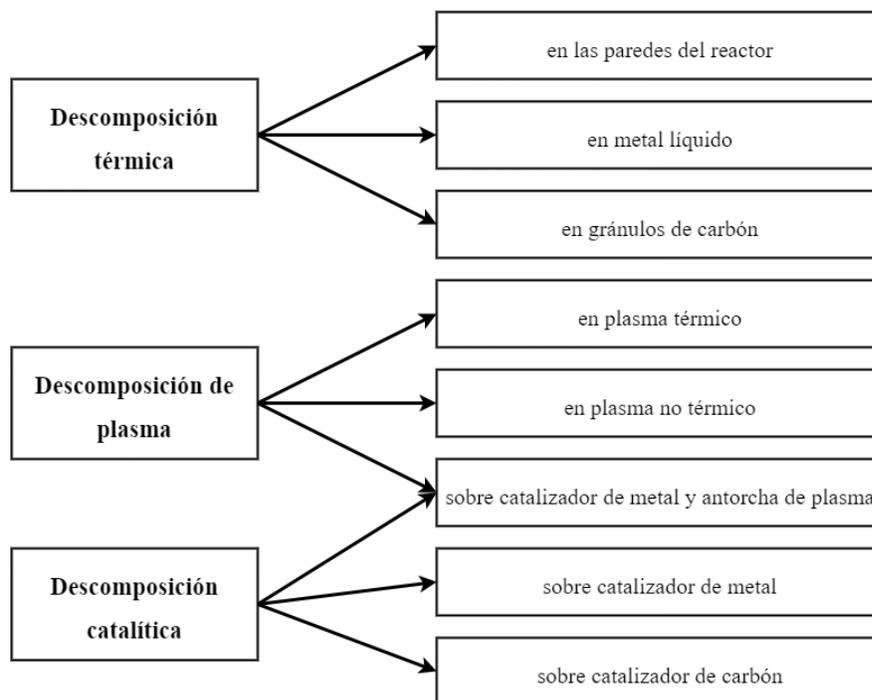


Figura 2.6: Categorías de procesos de pirólisis de metano [23, 24].

La descomposición térmica del metano requiere temperaturas superiores de 1000 °C para que ocurra la reacción. Para facilitar la transferencia de calor, se utilizan gránulos de carbono o metales líquidos, entre ellos, estaño, cobre, galio o magnesio [23, 25].

Una de las desventajas de dicha descomposición, es el depósito de hollín en las superficies calientes cuando el calentamiento del reactor se proporciona a través de sus paredes. Lo anterior, conduce generalmente a perturbaciones operativas y un deterioro en la transferencia de calor [23].

En cuanto a la descomposición del plasma, se caracteriza por generar altas densidades de energía local y alcanzar temperaturas superiores a 2000 [°C], produciendo hidrógeno de alta pureza y partículas de carbono de alta calidad [23, 26]. Además, posee una alta eficiencia de conversión y tiempo de respuesta rápido (< 1 segundo), obteniendo un reactor compacto [27].

Los procesos de plasma se pueden clasificar como térmicos o no térmicos. En los plasmas térmicos se utiliza un arco eléctrico o antorcha de plasma para producir hidrógeno, su principal desventaja es que la eficiencia energética es baja en comparación con otras tecnologías debido a las pérdidas térmicas del proceso.

En el caso del plasma no térmico, las fuentes típicas utilizadas para la pirólisis de metano son microondas, descarga de barrera dieléctrica, arco deslizante o haz de electrones, siendo este último, el método con menor consumo energético y mayor rendimiento de hidrógeno y carbono [24]. Esta alternativa es prometedora, sin embargo, hasta la fecha solo se han realizado estudios de diseño conceptual (TRL 2-3), por lo que las eficiencias enérgicas en la práctica podrían ser menores a las reportadas.

La producción de hidrógeno y carbono a partir de pirólisis de metano puede verse favorecida por el uso de catalizadores, dado que aumentan la tasa de descomposición del metano. Los catalizadores pueden ser metales sólidos o fundidos, tales como, níquel-bismuto, níquel-plata, níquel, hierro, cobalto, entre otros, y no metales como el carbón o carbón activado [28, 29, 30]. Para determinar el catalizador a utilizar es relevante tomar en consideración su rendimiento, toxicidad y precio.

En cuanto a las condiciones de operación, la producción de hidrógeno aumenta al aumentar la temperatura y disminuir la presión, siendo las condiciones óptimas presión atmosférica y temperaturas superiores a 900 [K] [27].

La dificultad de la implementación a escala industrial de la descomposición catalítica es la desactivación del catalizador por la acumulación del carbón sólido formado sobre las superficies activas de este. Para poder continuar con el proceso es necesario regenerar el catalizador periódicamente [23].

Cabe señalar que la descomposición de plasma es principalmente utilizada para la producción de carbono sólido, mientras que la descomposición térmica y catalítica apuntan a la producción de hidrógeno.

2.5.2. Proyectos de pirólisis de metano

En relación a la implementación de la pirólisis de metano, la descomposición catalítica aún se encuentra en una etapa muy temprana de desarrollo. En cambio, proyectos de descomposición del plasma, en particular, con antorcha de plasma, han logrado implementar plantas piloto y de producción [23]. En la Tabla 2.4 se presenta la descripción general de los principales proyectos de pirólisis de metano.

Tabla 2.4: Descripción general de los procesos de pirólisis de metano [23].

Principio	Desarrollador	Producto objetivo	Periodo	Reactor	Estado de desarrollo	TRL
Térmico	BASF	H_2	2012-	Lecho móvil de gránulos de carbón	Planta de laboratorio, proyecto para escalamiento	4
Térmico	KIT/IASS	H_2	2013-	Columna de burbujas de estaño líquido	Laboratorio, proyecto para el desarrollo de procesos	3
Plasma	Kvaerner	Carbón	1992-2003	Antorcha de plasma	Planta piloto, con proyecciones de escalamiento	6
Plasma	Kvaerner, Karbomont plant	Carbón	1997-2003	Antorcha de plasma	Planta de producción (desmantelada)	8
Plasma	Monolith materials, Seaport plant	Carbón	2014-2018	Antorcha de plasma	Planta de piloto (desmantelada)	6
Plasma	Monolith materiales, Olive Creek Plant	Carbón	2016-	Antorcha de plasma	Planta de producción (fase de puesta en marcha)	8
Plasma	Atlantic hydrogen, carbonsaver	Mezcla H_2 y gas natural	2005-2015	Antorcha de plasma	Planta piloto (no puesta en funcionamiento)	5
Catalítico - Plasma	Tomks Universities, TOMKS-GAZPROM	H_2	2008-	Microondas, lecho catalítico de Ni + antorcha de plasma	Laboratorio	3
Catalítico	UOP, HYPRO process	H_2	1963	Lecho fluidizado de 2 etapas con catalizador de Ni	Planta de laboratorio	4
Catalítico	Florida Solar Energy Center	H_2	2003-2005	Lecho fluidizado de 2 etapas con catalizador de C	Laboratorio	3
Catalítico	Hazer Group	H_2	2010-	Lecho fluidizado de 3 etapas con catalizador de Fe	Laboratorio, planta piloto en construcción	3

2.5.2.1. Descomposición térmica: Empresa BASF

BASF en el año 2013 inició el desarrollo de una planta a escala de laboratorio de pirólisis de metano con el objetivo principal de producir hidrógeno a partir de gas natural, además, se decide comercializar el carbono sólido obtenido [22].

BASF opta por diseñar el proceso mediante descomposición térmica y utiliza un reactor de lecho móvil con granulos de carbono. Dichos granulos se conducen en contracorriente a la fase gaseosa a una temperatura entre 1000°C y 1400°C con calentamiento eléctrico. Cabe señalar que BASF declara que la electricidad es producida mediante fuentes renovables para tener un proceso libre de emisiones [23, 31].

En cuanto al proceso, el flujo de gas natural frío es precalentado por los granulos de carbón que salen del reactor. En la zona de reacción, el lecho de carbón se calienta directamente mediante electrodos. El carbono sólido obtenido pasa por un filtro donde se separa el producto de carbono con el flujo de carbón que es reingresado al reactor. Asimismo, el hidrógeno producido previo a la salida del reactor, va calentando los granulos de carbono frío que van reingresando al reactor [23]. En la Figura 2.7 se muestra es el esquema de pirólisis de metano diseñado por BASF.

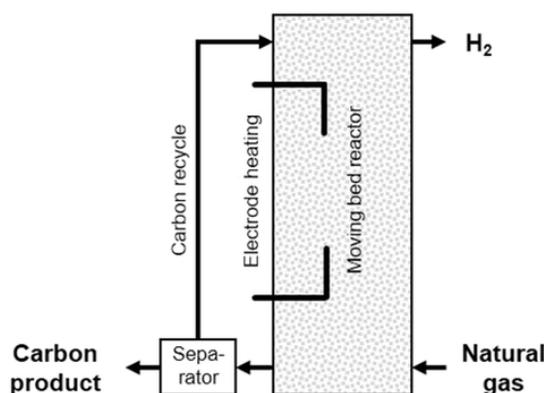


Figura 2.7: Esquema de reactor de lecho móvil con granulos de carbón propuesto por Basf [23].

2.5.2.2. Descomposición térmica: Columna de burbujas de galio fundido

En el estudio realizado por Leal. et al. (2021) se realiza un diseño conceptual de un reactor de columna de burbujas de metal líquido, que opera a altas temperaturas, entre 750°C y 1200°C , y a presión atmosférica. Se utiliza galio puro como metal fundido y una placa porosa de cuarzo para la distribución de burbujas [25].

En la Figura 2.8 se muestra un esquema del proceso. La operación del reactor comienza con la alimentación de metano puro que ingresa al fondo del reactor, el cual tiene en su interior un baño de metal fundido (galio puro) encima de una placa porosa. Dicha placa se distribuye homogéneamente en la fase gaseosa a lo largo del reactor, formando burbujas por el contacto entre el gas y los medios líquidos. Luego, la reacción se lleva a cabo en la interfaz gas-líquido entre la burbuja y el galio fundido. Seguidamente, el carbono se genera y se deposita a lo largo de la interfaz gas-líquido, la reacción finaliza una vez que toda la interfaz queda cubierta por

carbono. Las burbujas continúan su ascenso hasta alcanzar la superficie del galio fundido. Aquí, las burbujas estallan, liberando tanto hidrógeno como carbono, donde este último se deposita en el metal fundido debido a la diferencia de densidades, obteniendo una segregación completa de fases. Posteriormente, el hidrógeno sale del reactor por la salida (outflow en la Figura) [25].

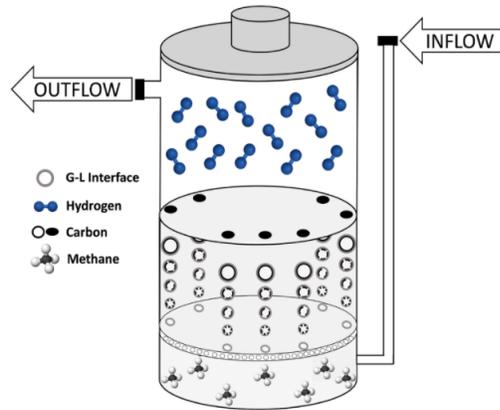


Figura 2.8: Esquema de reactor de columna de burbujas de metal líquido con galio puro y placa de cuarzo [25].

2.5.2.3. Descomposición catalítica: Empresa Hazer Group

En el año 2016, la empresa australiana Hazer Group patentó un proceso de reactores de lecho fluidizado en donde el gas natural se descompone para producir hidrógeno y grafito de alta calidad, utilizando mineral de hierro como catalizador del proceso. Hazer busca ser un productor de hidrógeno limpio para ser utilizado en las grandes industrias [32]. La construcción de la planta piloto está prevista para el 2021 [23].

En la Figura 2.9 se presenta el esquema propuesto por Hazer Group. El proceso consiste en un sistema de lecho fluidizado a contracorriente de tres etapas que operan a distintas presiones, con el propósito de controlar el rendimiento del hidrógeno, calidad del carbón y desactivación del catalizador [23].

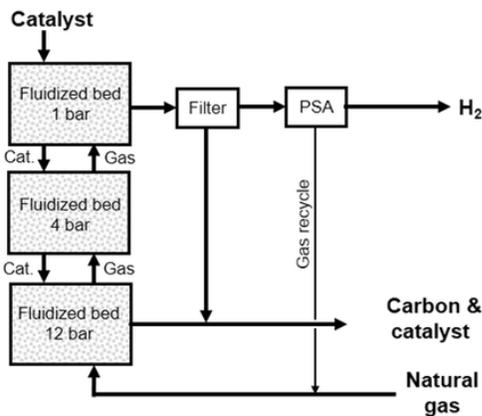


Figura 2.9: Esquema de reactores de lecho fluidizados propuesto por Hazer Group [23].

2.5.2.4. Descomposición de plasma: Monolith

Monolith Materials inició en el 2012 el desarrollo de un proceso de pirólisis de metano a partir de una antorcha de plasma basado en la tecnología Kvaerner y el trabajo de Fulcheri et al., definiendo como producto objetivo principal el carbón [23]. No obstante, actualmente están enfocados en la producción de hidrógeno limpio a escala comercial para proporcionar la clave para la transición energética hacia un mundo descarbonizado [33].

En la Figura 2.10 se presenta el esquema propuesto por Monolith Materials. El proceso consiste en alimentar gas natural a una antorcha de plasma, que funciona con hidrógeno recirculado y energía eléctrica, el metano al entrar en contacto con el plasma, se descompone en hidrógeno y carbono sólido [23].



Figura 2.10: Esquema de reactor de plasma propuesto por Monolith Materials [33].

Cabe señalar que actualmente no existen aplicaciones de esta tecnología a pirólisis de biogás reportadas en la literatura, ni siquiera en un nivel de laboratorio.

Capítulo 3

Metodología

A continuación se describe la metodología utilizada en el presente trabajo de título. La metodología se compone de seis etapas y se planifica de acuerdo a los objetivos propuestos en la Sección 1.2.

3.1. Estimación de producción de biogás

En primer lugar, se realizó una revisión bibliográfica enfocada en la búsqueda de publicaciones relacionadas con la composición de los residuos sólidos urbanos para la Región Metropolitana y modelos de estimación de producción de biogás a partir de residuos vertidos en rellenos sanitarios.

En segundo lugar, se seleccionaron los casos de estudio, el horizonte de evaluación y el modelo a utilizar para estimar el caudal de biogás. Luego, se determinaron los parámetros del modelo: potencial de generación de metano, tasa de generación de metano y flujo másico de residuos vertidos en el relleno para cada año de evaluación. Hecho lo anterior, se calculó el caudal de biogás potencial del relleno sanitario.

Finalmente, se realizó un análisis sobre los resultados obtenidos para cada relleno sanitario estudiado y de las repercusiones de los supuestos tomados.

3.2. Estimación de la generación de electricidad a partir de biogás

Esta etapa comenzó con una revisión bibliográfica de las metodologías para estimar la generación de electricidad a partir de biogás y los principales equipos involucrados en el proceso de generación. Además, se estudiaron las tecnologías para la remoción de contaminantes y purificación del gas para que dicho gas pueda ser empleado como combustible.

Luego, se escogió la metodología y se estimó la energía eléctrica generada en [$kWh/año$] para cada año y relleno sanitario. Con lo anterior, se realizó una búsqueda de los equipos disponibles en el mercado para generar electricidad según el caudal de biogás de entrada. Lo anterior, para posteriormente realizar la evaluación ambiental y económica.

3.3. Diseño del proceso de pirólisis de metano

Se realizó una revisión bibliográfica de las tecnologías actuales del proceso de pirólisis de metano. Luego, se optó por el reactor de antorcha de plasma debido al nivel de madurez tecnológica alcanzado.

Posteriormente, se diseñó la ruta de procesos que involucra la remoción de dióxido de carbono de la corriente de biogás, la producción de hidrógeno y la purificación de hidrógeno. Con lo anterior, se realiza el balance de masa, determinando los flujos de entrada y salida del proceso.

Finalmente, se estimó la producción de electricidad en [$kWh/año$] para cada año y relleno sanitario utilizando hidrógeno como combustible.

3.4. Dimensionamiento de los equipos del proceso de producción de hidrógeno

Una vez determinados los flujos de cada operación unitaria, se definieron los equipos principales de cada proceso. A partir de las ecuaciones de diseño y las condiciones de operación de cada etapa se dimensionaron los equipos para cada relleno sanitario.

3.5. Evaluación ambiental

Para realizar la evaluación ambiental se definieron dos categorías de impacto: Potencial de calentamiento mundial (PCG) y Potencial de toxicidad humana (PTH). Para calcular el impacto de cada alternativa se multiplican los flujos de salida del balance de masa y la energía eléctrica utilizada con los factores de equivalencia de los gases involucrados en $t\ CO_{2,eq}$ y $t\ 1,4 - DCB_{eq}$ para el PCG y PTH, respectivamente, reportadas en la literatura (ver Tabla 8.2 y Tabla 8.4).

A partir de los resultados obtenidos de la evaluación ambiental, se analizó comparativamente los resultados de ambas alternativas para cada categoría de impacto.

3.6. Evaluación económica

Se estimaron los costos de inversión (CAPEX) de la producción de electricidad y la producción de hidrógeno, considerando los costos directos e indirectos. Luego, se estimaron los costos de operación y mantenimiento (OPEX) para cada alternativa.

En particular, para estimar los costos de la producción de electricidad a partir de biogás se utilizó la herramienta “LFGcost-Web – Landfil Gas Energy Cost Model”, mientras que para la producción de electricidad a partir de hidrógeno se utilizó la guía “Plant design and economics for chemical engineers”.

Capítulo 4

Potencial de generación de biogás

En este capítulo se estudian las características principales de los rellenos sanitarios de la Región Metropolitana. Posteriormente, se utiliza el modelo LandGEM para estimar la producción de biogás para cada sitio de disposición final.

4.1. Caracterización de los rellenos sanitarios en la Región Metropolitana

Para realizar una correcta estimación de la producción de biogás y generación de electricidad (a partir de motores de combustión interna o hidrógeno) es necesario estudiar las características generales de cada relleno sanitario, tales como, los sectores atendidos, prácticas de manejo, años de operación, entre otros. Lo anterior, con el fin de ingresar al modelo, los parámetros que representen el contexto de cada sitio de disposición final.

El manejo actual de los residuos sólidos domiciliarios de la Región Metropolitana se realiza en cinco puntos dispuestos en la región, estos corresponden a los rellenos sanitarios Loma Los Colorados (RSLLC), Cerro La Leona (RSCLL), Santa Marta (RSSM), Santiago Poniente (RSSP) y el vertedero controlado de Popeta (CVP). Dichos rellenos operan en coordinación con las estaciones de transferencia de Quilicura, Cerro Los Cóndores y Puerta Sur.

En la Figura 4.1 se presentan los cinco sitios de disposición final autorizados y las estaciones de transferencia para el manejo de residuos domiciliarios en la Región Metropolitana [5].

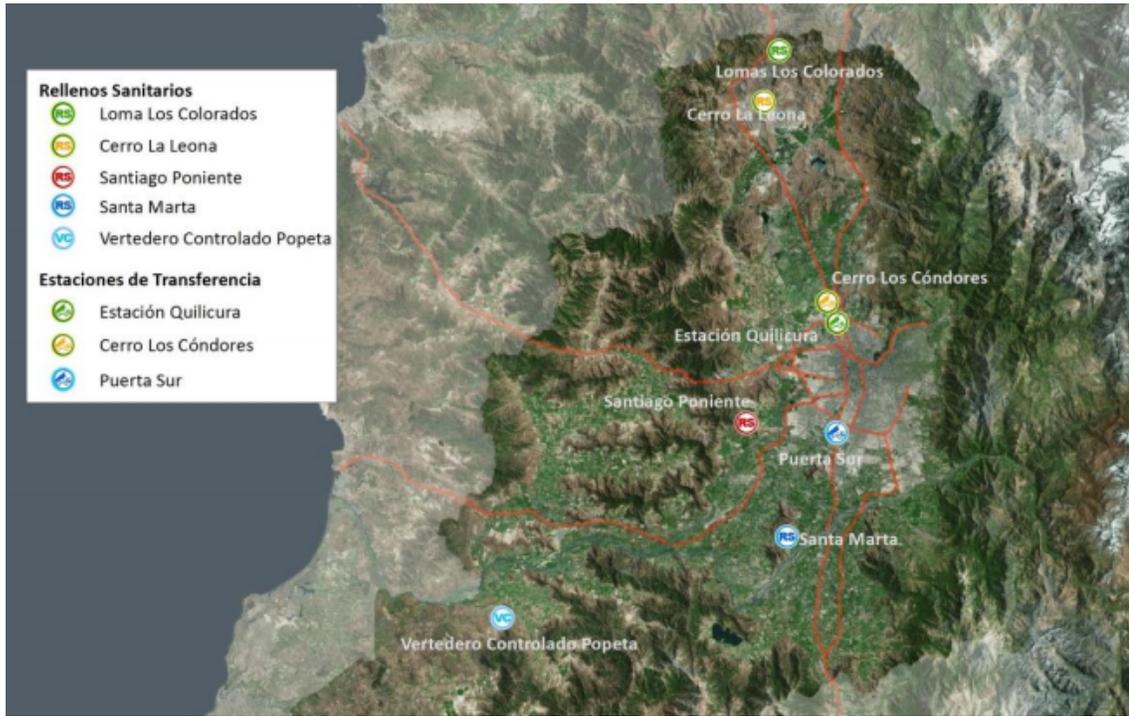


Figura 4.1: Instalaciones autorizadas para el manejo de residuos domiciliarios en la Región Metropolitana [5].

En el año 2017, los rellenos sanitarios de la región recibieron un total de 3.450.803 toneladas de residuos domiciliarios y 948.781 toneladas de residuos sólidos asimilables a domiciliarios. De lo anterior, alrededor de un 57% del total de residuos corresponden a residuos orgánicos [5]. En la Tabla 4.1 se presenta la cantidad de residuos sólidos dispuestos en cada instalación para el año 2017.

Tabla 4.1: Residuos sólidos dispuestos en instalaciones autorizadas [5].

Instalación	Flujo de residuos sólidos domiciliarios [t/año 2017]	Flujo de residuos sólidos asimilables [t/año 2017]
Relleno sanitario Loma Los Colorados	1.619.729	242.588
Relleno sanitario Santa Marta	1.208.565	272.610
Relleno sanitario Santiago Poniente	559.376	210.034
Relleno sanitario Cerro La Leona	-	223.508
Vertedero controlado de Popeta	63.132	40
Total	3.450.803	948.781

A partir de la información publicada en los estudios y/o evaluaciones de impacto ambiental de los proyectos de relleno sanitario en la Región Metropolitana se elabora la Tabla 4.2 en que se presenta las principales características de los sitios autorizados de recepción de residuos sólidos.

Tabla 4.2: Características generales de los sitios autorizados de recepción de residuos sólidos [5].

Características	RSLLC	RSSM	RSSP	RSCLL	VCP
Titular	KDM Energía	Consorcio Santa Marta S.A	Proactiva Servicios Urbanos S.A	Gestión Ecológica de Residuos S.A	Municipalidad de Melipilla
Ubicación	Til Til	Talagante	Maipú	Til Til	Melipilla
Comunas atendidas	Recoleta, San Miguel, Independencia, Ñuñoa, Lo Barnechea, Vitacura, Pudahuel, Santiago, Providencia, Quilicura, Las Condes, La Reina, Quinta Normal, Colina, Curacaví, La Cisterna, Lampa, Til Til, Cerro Navia, Huechuraba, Renca, Lo Prado, Maipú	Lo Espejo, San Joaquín, Calera de Tango, Pirque, Macul, Paine, San José de Maipo, La Granja, PAC, La Pintana, La Florida, Puente Alto, Talagante, Buin, San Bernardo, San Ramón, El Bosque, Estación Central, Conchalí	Padre Hurtado, Peñalolén, El Monte, Cerrillos, Peñaflor, Isla de Maipo	Empresas que generan residuos asimilables a domiciliarios	San Pedro, Alhué, Melipilla, María Pinto
Año de apertura	1996	2002	2002	2013	1994
Año de cierre	2046	2035	2024	2050	2012
Vida útil	50 años	33 años	22 años	37 años	Cumplida
Producción de biogás	Sí	Sí	Sí	Sí	No
Planta de tratamiento de lixiviados	Sí	Sí	No	No	No
Manejo del sitio	Gestionado - anaeróbico Profundidad > 5 [m]	Gestionado - anaeróbico Profundidad > 5 [m]	Gestionado - anaeróbico Profundidad > 5 [m]	Gestionado - anaeróbico Profundidad > 5 [m]	No Gestionado Profundidad < 5 [m]

4.1.1. Condiciones meteorológicas

Como se mencionó anteriormente, la temperatura afecta directamente la producción del biogás, por lo que es relevante estudiar las condiciones climáticas del lugar donde se sitúa cada relleno sanitario.

En la Figura 4.2 se muestra el ciclo anual de la temperatura ambiental promedio en los cinco rellenos sanitarios de la Región Metropolitana.

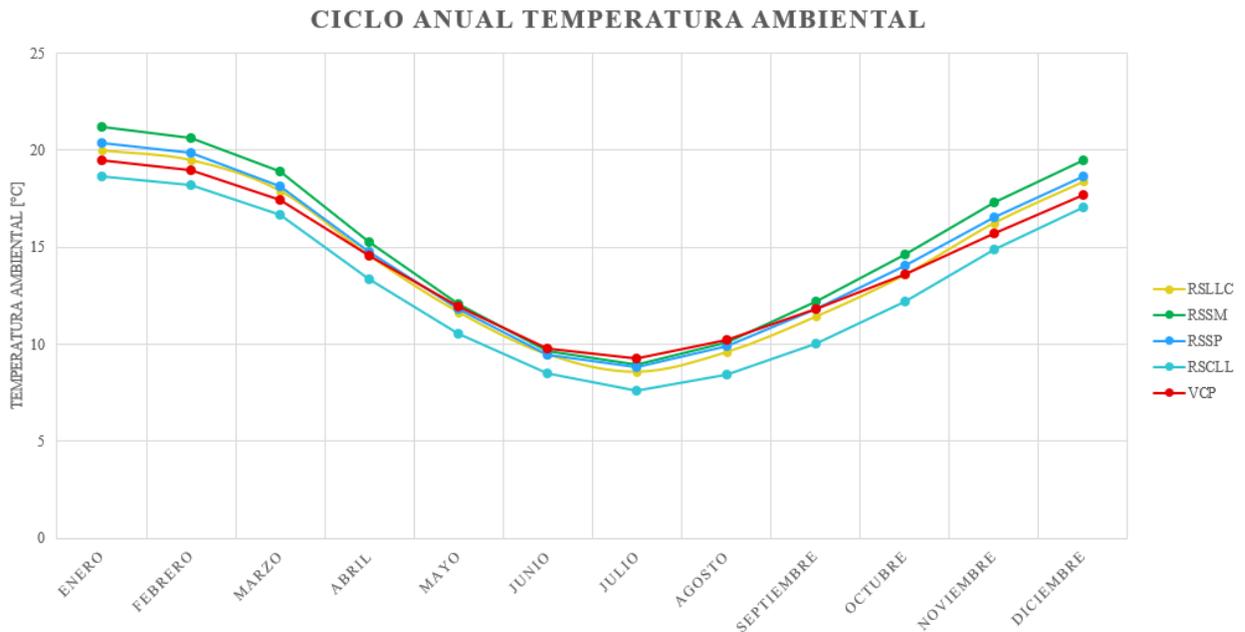


Figura 4.2: Ciclo anual de la temperatura ambiental promedio en los rellenos sanitarios de la Región Metropolitana [34]. Elaboración propia.

En base a la Figura 4.2 se elabora la Tabla 4.3 en que se muestra la temperatura ambiental promedio, máxima y mínima para cada relleno sanitario.

Tabla 4.3: Temperaturas ambientales en los rellenos sanitarios de la Región Metropolitana.

Parámetros	RSLLC	RSSM	RSSP	RSCLL	VCP
T° ambiental máxima [°C]	20,00	21,22	20,35	18,65	19,46
T° ambiental mínima [°C]	8,58	8,92	8,80	7,60	9,26
T° ambiental promedio [°C]	14,24	15,04	14,51	13,00	14,20

4.1.2. Proyectos de tratamiento de los residuos en los rellenos sanitarios

- **Relleno Sanitario Loma Los Colorados:**

La administración del relleno ha optado por la instalación un sistema activo de extracción de biogás para aprovechar energéticamente el gas. A partir del biogás generado, la “Central Loma Los Colorados” produce electricidad. Cabe señalar, que el biogás no consumido por la central es enviado a una planta de termodegradación de biogás, proceso que permite la disminución de los gases de efecto invernadero.

- **Relleno Sanitario Santa Marta:**

El RSSM cuenta con el mismo sistema de extracción de biogás que el RSLLC. El biogás producido en el relleno es utilizado en la “Central ERNC Santa Marta” para generar electricidad. La central opera mediante moto-generadores que poseen un 40 % de rendimiento en conversión eléctrica, con una potencia instalada actual de 20 MW, energía que es inyectada al Sistema Interconectado Central (SIC) mediante la línea Alto Jahuel- Chena 220 kW.

Asimismo, el Relleno Sanitario Santa Marta cuenta con una planta de tratamiento de líquidos lixiviados (PTL) de tecnología de lodos activados y una unidad fisicoquímica.

- **Relleno Sanitario Santiago Poniente:**

Para el tratamiento de los residuos orgánicos, el relleno cuenta con una planta de quema de biogás, que opera a una tasa de 3.000 $[m^3/h]$.

Para efectos del trabajo de título, se analizará la producción de biogás, generación de electricidad y producción de hidrógeno en los Rellenos Sanitarios Lomas Los Colorados, Santa Marta y Santiago Poniente. Lo anterior, para estudiar el comportamiento del potencial eléctrico en las distintas etapas de operación de un sitio de disposición final. Por otro lado, se consideran 20 años como horizonte de evaluación, desde el año 2022 hasta el año 2042.

4.2. Estimación de producción de biogás

Se selecciona el modelo LandGEM para estimar la producción de biogás en rellenos sanitarios debido a la información disponible de los rellenos sanitarios a estudiar y que los

parámetros se pueden calcular para adecuarse al contexto chileno. Además, a diferencia de los otros modelos, el modelo LandGEM no solo permite obtener las tasas de emisión de metano, sino también tasas de emisión de biogás, dióxido de carbono, entre otros contaminantes.

4.2.1. Determinación de parámetros

4.2.1.1. Tasa de generación de metano

Como se mencionó en la Sección 2, se utiliza el valor de k determinado en la tesis de DANIEL LÓPEZ (2016) [7]. En la Tabla 4.4 se muestra la tasa de generación de metano para los tres rellenos a estudiar.

Tabla 4.4: Tasa de generación de metano.

Parámetro	RSSM	RSSP	RSLLC
k	0,026	0,026	0,026

Cabe señalar, que se toma como supuesto que la tasa de generación de metano calculada para el RSSM y RSSP es la misma para RSLLC.

4.2.1.2. Potencial de generación de metano

Para determinar el potencial de generación de cada relleno se utiliza la Ecuación 2.4 y se sigue la metodología explicada en la Sección 2.3.5.4.

A continuación se describe el procedimiento y supuestos tomados para obtener el potencial de generación de metano para el Relleno Sanitario Santa Marta. Cabe señalar, que dicho procedimiento es análogo para los Rellenos Sanitarios Loma Los Colorados y Santiago Poniente.

- MCF : El manejo del sitio es gestionado - anaeróbico y la profundidad es mayor a 5 metros, luego, MCF es 1.
- DOC : Al no contar con la información del porcentaje de residuos que corresponde a madera y paja para la Región Metropolitana, se decide atribuir el peso a los desechos de poda y jardín debido a que es el grupo de residuos que mejor se asemeja a la composición de la madera y paja. Luego, DOC queda definido como:

$$DOC = 0,4 \cdot A + (0,17 + 0,30) \cdot B + 0,15 \cdot C \quad (4.1)$$

$$= 0,4 \cdot A + 0,47 \cdot B + 0,15 \cdot C \quad (4.2)$$

A partir de la Figura 2.1 que presenta la composición de los residuos sólidos urbanos de la Región Metropolitana es posible calcular los valores de A , B y C , luego:

- A : 0,12
- B : 0,13
- C : 0,44

Reemplazando los valores de A , B y C en la Ecuación 4.2 se obtiene el valor de DOC :

$$\begin{aligned} DOC &= 0,4 \cdot 0,12 + 0,47 \cdot 0,13 + 0,15 \cdot 0,44 \\ &= 0,175 \end{aligned} \quad (4.3)$$

- DOC_F : Para efectos del estudio se considera que la temperatura al interior del Relleno Sanitario Santa Marta es temperatura ambiente, es decir, 25 [°C], luego:

$$\begin{aligned} DOC_F &= 0,014 \cdot 25 + 0,28 \\ &= 0,63 \end{aligned} \quad (4.4)$$

- F : Según lo observado en la Tabla 2.1, que presenta el rango de la composición molar del biogás. Ahora bien, para estimar la fracción de metano contenido en biogás se calcula la media de la composición molar del metano, luego, F corresponde a 0,6

Con lo anterior, se calcula el potencial de generación de metano L_0 para el Relleno Sanitario Santa Marta:

$$\begin{aligned} L_0 &= 1000 \cdot MCF \cdot DOC \cdot DOC_F \cdot F \cdot \frac{16}{12} \\ &= 1000 \cdot 1 \cdot 0,175 \cdot 0,491 \cdot 0,60 \cdot \frac{16}{12} \\ &= 68,7 \end{aligned} \quad (4.5)$$

En la Tabla 4.5 se muestra los parámetros para obtener el potencial de generación de metano para cada relleno sanitario.

Tabla 4.5: Parámetros para obtener L_0 para cada relleno sanitario.

Parámetro	RSSM	RSSP	RSLLC
MCF	1,00	1,00	1,00
DOC	0,18	0,18	0,18
DOC_F	0,63	0,63	0,63
F	0,60	0,60	0,60
L_0	88,25	88,25	88,25

4.2.1.3. Residuos

Para determinar el flujo másico de residuos sólidos que ingresará cada año en los rellenos sanitarios se utiliza la Ecuación 2.11 y se sigue la metodología explicada en la Sección 2.3.5.4.

Para estimar la producción de residuos per cápita se toma como referencia el flujo de residuos sólidos domiciliarios dispuestos en el año 2017 (Tabla 4.1). Además, según el Censo 2017 la población en la Región Metropolitana para dicho año corresponde a 7.112.808 [5], luego:

$$\begin{aligned}
PPC_{RM} &= \frac{3.450.803}{7.112.808} \\
&= 0,485 \left[\frac{t}{hab - año} \right] = 1,33 \left[\frac{kg}{hab - día} \right]
\end{aligned} \tag{4.6}$$

Ahora bien, para obtener tasas de crecimiento de la población para la comuna Santiago se toma como referencia la población censada en el año 1992, 2002 y 2017, que corresponde a 230.977, 200.972 y 404.495, respectivamente [35, 36, 37]. Luego, se utiliza la Ecuación 2.10 para estimar la $tasa_{crec,1992-2002}$ y $tasa_{crec,2002-2017}$:

$$\begin{aligned}
tasa_{crec,1992-2002,sant} &= \left(\frac{200.972}{230.977} \right)^{\frac{1}{2002-1992}} - 1 \\
&= -1,38 \%
\end{aligned} \tag{4.7}$$

$$\begin{aligned}
tasa_{crec,2002-2017,sant} &= \left(\frac{404.495}{200.972} \right)^{\frac{1}{2017-2002}} - 1 \\
&= 4,77 \%
\end{aligned} \tag{4.8}$$

Por otro lado, la tasa de crecimiento anual estimada para Santiago en el “Estudio de Análisis de Proyecciones de Población INE Período 2015-2035” corresponde a 2% [15].

Cabe señalar, que el procedimiento descrito es análogo para el resto de las comunas de la Región Metropolitana. Una vez calculada cada tasa de crecimiento para cada comuna se procede a estimar la población para cada año.

Por ejemplo, para el año 2007, la población en Santiago corresponde a:

$$\begin{aligned}
Población_{sant,2007} &= 200.972 \cdot (1 + 0,0477)^{2007-2002} \\
&= 253.700
\end{aligned} \tag{4.9}$$

Una vez estimada la población por comuna para cada año, se procede a agrupar la población según el relleno sanitario que dispone sus residuos. Por ejemplo, para calcular la población atendida por el Relleno Sanitario Santiago Poniente para cada año, se consideran las comunas: Padre Hurtado, Peñalolén, El Monte, Cerrillos, Peñaflor e Isla de Maipo.

Hecho lo anterior, se elabora el gráfico (Figura 4.3) que expone la población atendida por los rellenos sanitarios Loma Los Colorados, Santa Marta y Santiago Poniente durante los años de operación de cada relleno.

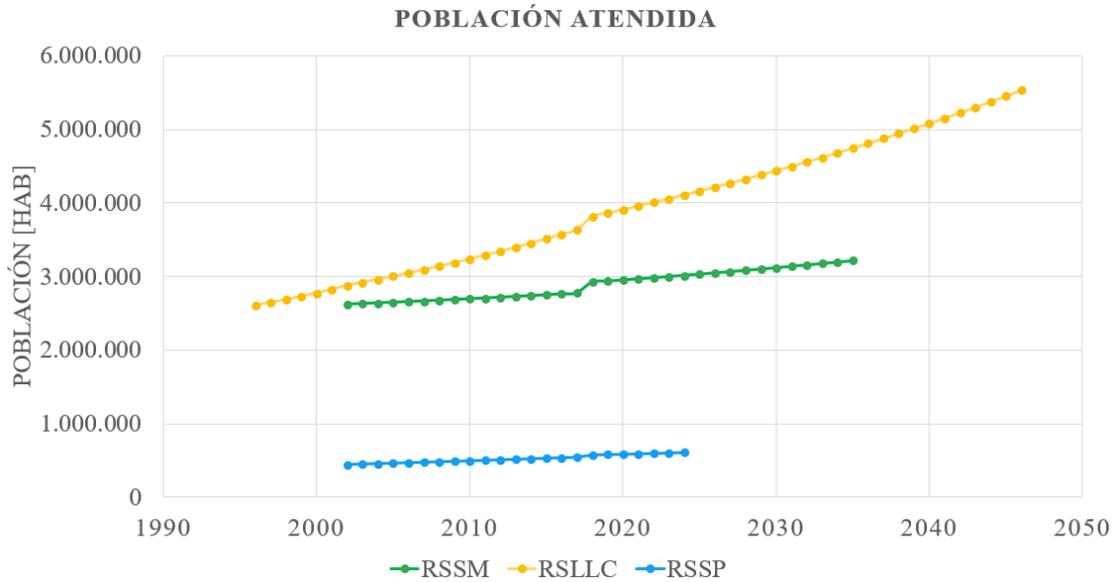


Figura 4.3: Población atendida por el RSSLC, RSSM y RSSP. Elaboración propia.

En base a la Figura 4.3 se elabora la Tabla 4.7 en que se muestra la población atendida mínima y máxima para cada relleno sanitario, junto con la tasa de crecimiento promedio.

Tabla 4.6: Población atendida por los rellenos sanitarios de la Región Metropolitana.

Parámetros	RSSLC	RSSM	RSSP
Población mínima	2.607.178	2.621.054	445.610
Población máxima	5.533.180	3.215.296	611.809
Tasa de crecimiento promedio	1,52 %	0,62 %	1,45 %

De acuerdo a lo presentado en la Figura 4.3, el Relleno Sanitario Loma Los Colorados atiende a mayor habitantes de la región, lo anterior se debe principalmente porque dicho relleno atiende 23 comunas, equivalente al 44 % del total.

Luego de estimar la población atendida por cada relleno sanitario y calcular la producción de residuos per cápita, se realiza la proyección del flujo de residuos sólidos dispuestos cada año en los rellenos sanitarios Loma Los Colorados, Santa Marta y Santiago Poniente, cuyo resultado se muestran en la Figura 4.4.

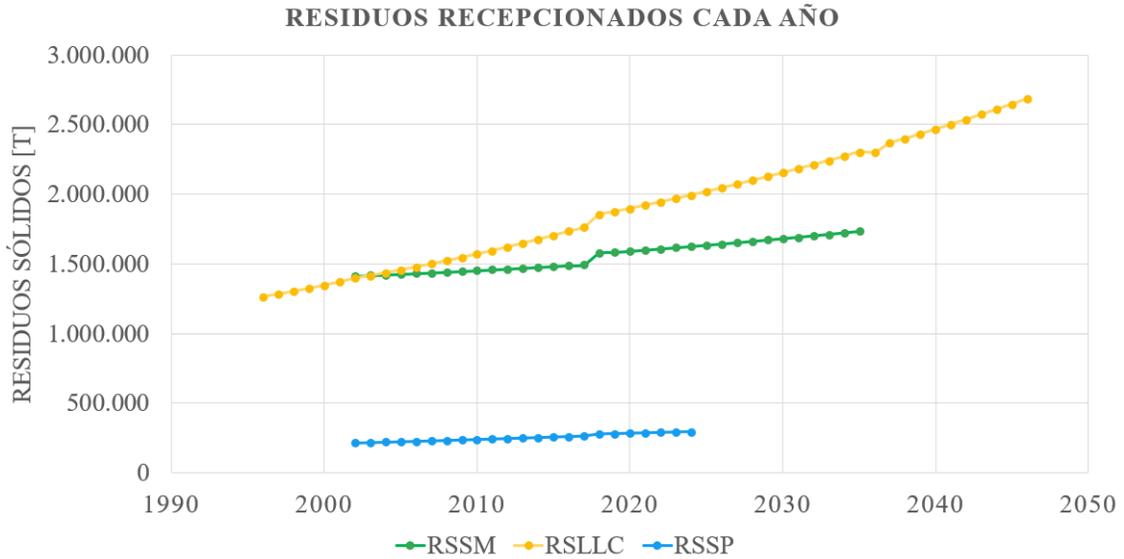


Figura 4.4: Proyección flujo de residuos dispuestos en el RSLLC, RSSM y RSSP. Elaboración propia.

De la Figura 4.4 se aprecia que el Relleno Sanitario Loma Los Colorados es el relleno que recepciona la mayor cantidad de residuos sólidos de la región, esto se debe a que la población atendida es directamente proporcional a la cantidad de residuos generados.

A partir de la Figura 4.4 se elabora la Tabla 4.7 en que se muestra el flujo de residuos dispuestos mínimo y máximo para cada relleno sanitario.

Tabla 4.7: Flujo de residuos dispuestos en los rellenos sanitarios de la Región Metropolitana.

Parámetros	RSLLC	RSSM	RSSP
Flujo de residuos mínimo	1.265.655	1.413.767	216.321
Flujo de residuos máximo	2.686.082	1.734.295	297.003

El detalle de los resultados de las proyecciones de la población atendida y el flujo de residuos sólidos se encuentra en el Anexo A.

4.2.2. Captura de biogás

Una vez determinado el flujo de biogás de cada relleno sanitario y sus características generales, se debe calcular la cantidad de biogás que se puede recolectar para uso.

La eficiencia de un sistema de captación o extracción depende de varios factores, entre ellos destacan, el diseño del sistema de extracción, el espesor e integridad del material de cobertura y manejo de lixiviados.

En la Tabla 4.8 se observan valores de eficiencias promedio de extracción de biogás, según el tipo de cobertura y sistema de extracción instalado.

Tabla 4.8: Eficiencia de extracción de biogás según el tipo de cobertura y sistema de extracción [38].

Cobertura	Sistema de extracción	Eficiencia de extracción promedio
Diaria	Pozos verticales	0,67
Intermedia	Pozos verticales	0,75
Intermedia	Trincheras horizontales y pozos verticales	0,87
Final	Pozos verticales	0,87
Final y geomembrana	Trincheras horizontales o pozos verticales	0,90

Con lo anterior, el caudal de biogás captura ($Q_{biogas,cap}$) se puede calcular utilizando la relación descrita en la Ecuación 4.10:

$$Q_{biogas,cap} = \sum_{i=1}^n \eta_{cap,i} \cdot Q_{biogas} \quad (4.10)$$

Donde:

- $\eta_{cap,i}$: Eficiencia de extracción de biogás en el año i .
- Q_{biogas} : Caudal de biogás determinado en el modelo LandGEM en [$m^3/año$]

Para determinar la eficiencia de extracción de biogás de los tres rellenos sanitarios se consideran los siguientes supuestos:

1. Captación operación del relleno: Cobertura intermedia con un sistema de extracción de pozos verticales.
2. Captación cierre del relleno: Cobertura final con un sistema de extracción de pozos verticales.

4.2.3. Resultados

Una vez determinado el potencial de generación de metano, la tasa de generación de metano y la cantidad de residuos recibidos por el sitio de disposición final, se estiman las curvas de generación de biogás, metano y dióxido de carbono utilizando el modelo LandGEM.

Cabe señalar que el modelo LandGEM contempla un período de evaluación mayor al período de operación del relleno sanitario debido a que la acumulación de residuos permite que la generación de biogás continúe a pesar de que ya no ingresen nuevos residuos.

A continuación se presentan los principales resultados del potencial de generación de biogás de los rellenos sanitarios Lomas Los Colorados, Santa Marta y Santiago Poniente.

4.2.3.1. Relleno Sanitario Loma Los Colorados

En la Figura 4.5 se muestran las curvas de generación de biogás y metano en el Relleno Sanitario Loma Los Colorados.

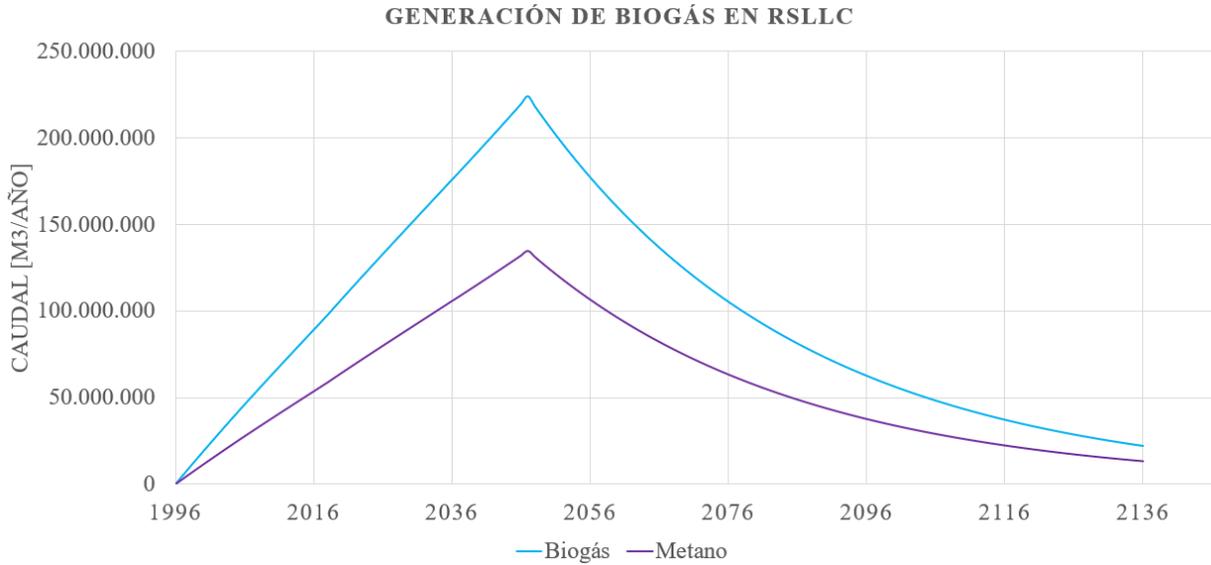


Figura 4.5: Curvas de generación de biogás y metano en RSLLC. Elaboración propia.

En la Figura 4.5 se aprecia que el flujo de biogás máximo se alcanza alrededor del año de cierre del relleno. Esto se debe a que la acumulación de residuos llega al máximo en el último año de operación del relleno. Este mismo suceso ocurre en los rellenos sanitarios Santa Marta y Santiago Poniente (Figuras 4.7 y 4.9).

En la Figura 4.6 se muestra la comparación de las curvas de biogás generado y biogás capturado en el Relleno Sanitario Loma Los Colorados.

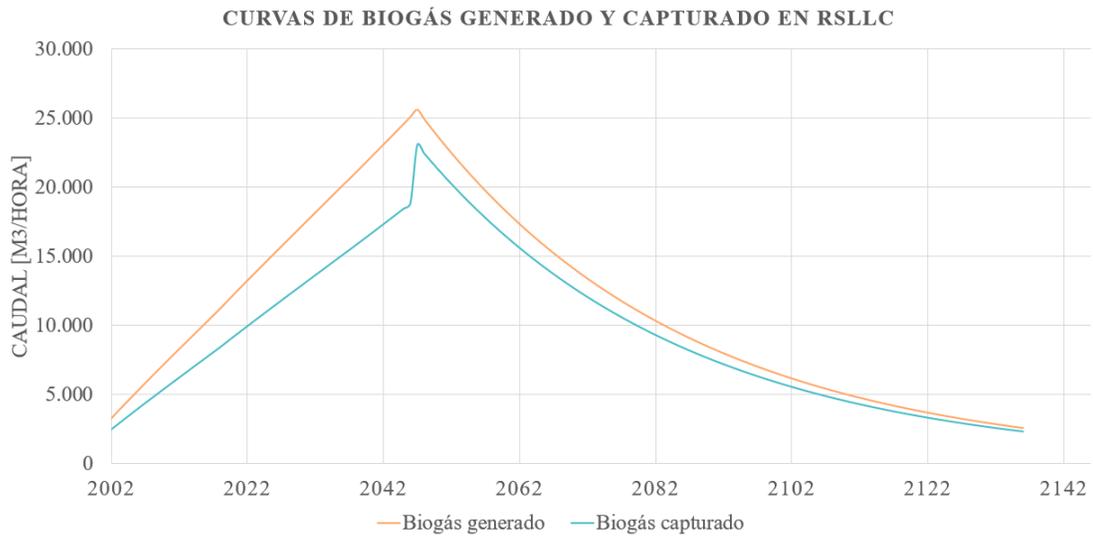


Figura 4.6: Comparación de curvas de biogás generado y biogás capturado en RSLLC. Elaboración propia.

Con los resultados del modelo LandGEM y cálculo del biogás que puede ser efectivamente recuperado para el Relleno Sanitario Loma Los Colorados se elabora la Tabla 4.9 que contiene el flujo de biogás y de metano en $[m^3/h]$ a lo largo del horizonte de evaluación (20 años).

Tabla 4.9: Potencial de generación de biogás y metano en RSLLC en el horizonte de evaluación.

Año	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Flujo biogás [m^3/h]	9.889	10.265	10.638	11.011	11.382	11.752	12.120
Flujo metano [m^3/h]	5.933	6.159	6.383	6.606	6.829	7.051	7.272
Año	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Flujo biogás [m^3/h]	12.488	12.856	13.223	13.590	13.957	14.324	14.692
Flujo metano [m^3/h]	7.493	7.714	7.934	8.154	8.374	8.595	8.815
Año	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Flujo biogás [m^3/h]	15.060	15.418	15.788	16.160	16.532	16.906	17.281
Flujo metano [m^3/h]	9.036	9.251	9.473	9.696	9.919	10.144	10.369

De la Tabla 4.9 se observa que los flujos de biogás y metano máximos se alcanzan en el año 2042, que corresponden a 17.281 [m^3/h] y 10.369 [m^3/h], respectivamente. No obstante, el máximo se alcanza en el año 2047 (un año después al cierre del relleno), posterior al período de evaluación del trabajo de título.

4.2.3.2. Relleno Sanitario Santa Marta

En la Figura 4.7 se muestran las curvas de generación de biogás y metano en el Relleno Sanitario Santa Marta.

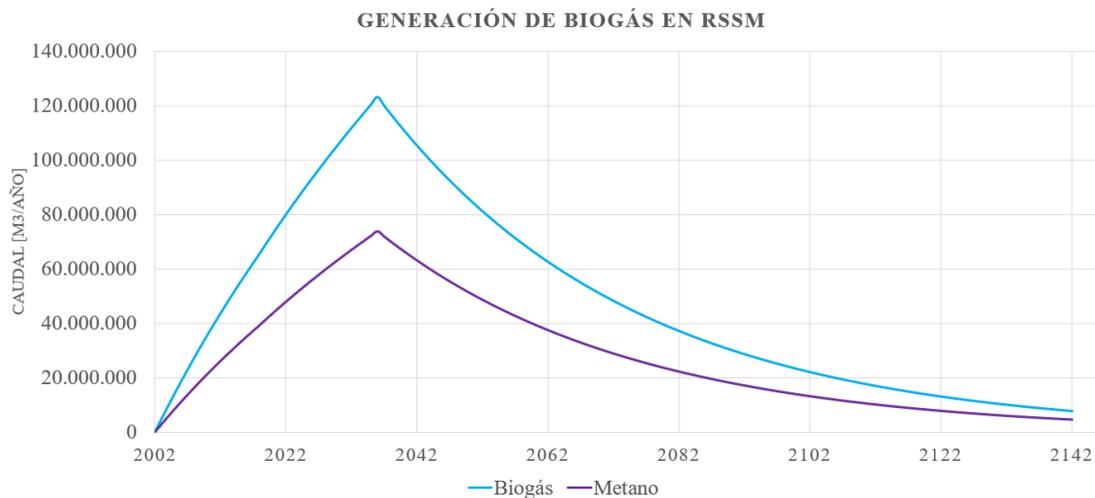


Figura 4.7: Curvas de generación de biogás y metano en RSSM. Elaboración propia.

En la Figura 4.8 se muestra la comparación de las curvas de biogás generado y biogás capturado en el Relleno Sanitario Santa Marta.

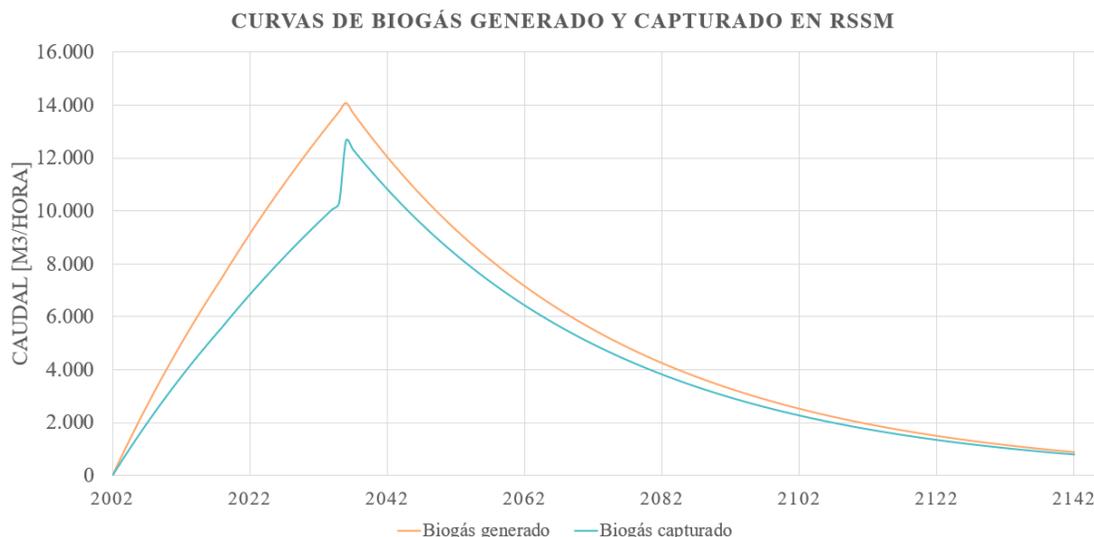


Figura 4.8: Comparación de curvas de biogás generado y biogás capturado en RSSM. Elaboración propia.

Con los resultados del modelo LandGEM y cálculo del biogás que puede ser efectivamente recuperado para el Relleno Sanitario Santa Marta se elabora la Tabla 4.10 que contiene el flujo de biogás y de metano en $[m^3/h]$ a lo largo del horizonte de evaluación.

Tabla 4.10: Potencial de generación de biogás y metano en RSSM en el horizonte de evaluación.

Año	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Flujo biogás $[m^3/h]$	6.845	7.138	7.425	7.708	7.987	8.261	8.530
Flujo metano $[m^3/h]$	4.107	4.283	4.455	4.625	4.792	4.956	5.118
Año	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Flujo biogás $[m^3/h]$	8.795	9.057	9.314	9.568	9.818	10.065	10.309
Flujo metano $[m^3/h]$	5.277	5.434	5.589	5.741	5.891	6.039	6.185
Año	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Flujo biogás $[m^3/h]$	12.659	12.334	12.018	11.709	11.409	11.116	10.831
Flujo metano $[m^3/h]$	7.596	7.401	7.211	7.026	6.845	6.670	6.498

De la Tabla 4.10 se observa que los flujos de biogás y metano máximos se alcanzan en el año 2036, que corresponden a $12.659 [m^3/h]$ y $7.596 [m^3/h]$, respectivamente.

4.2.3.3. Relleno Sanitario Santiago Poniente

En la Figura 4.9 se muestran las curvas de generación de biogás y metano en el Relleno Sanitario Santiago Poniente.

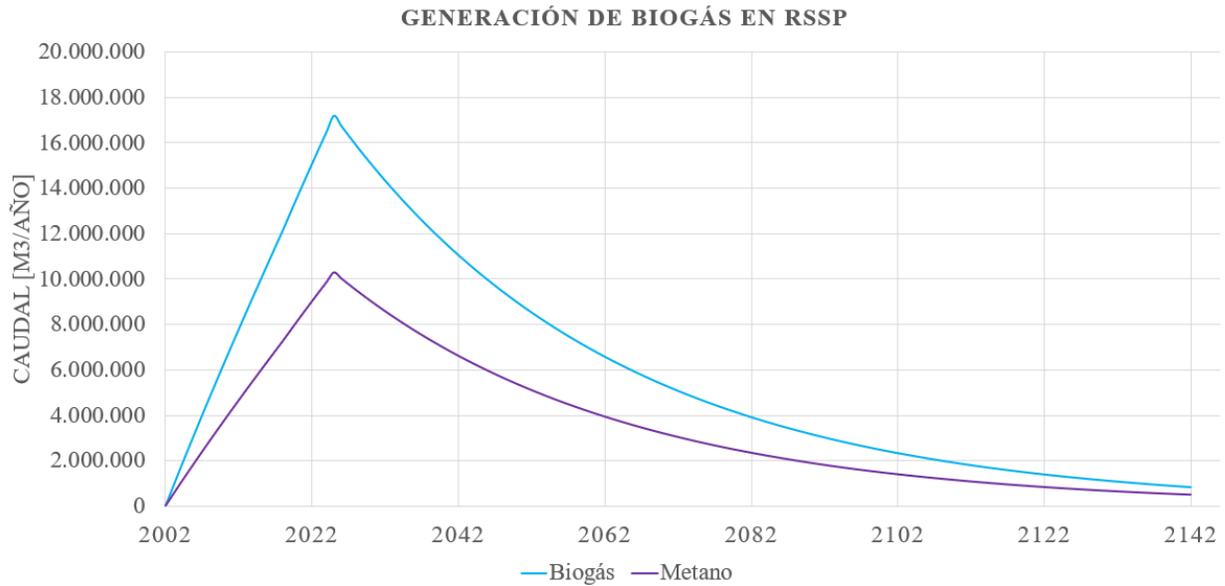


Figura 4.9: Curvas de generación de biogás y metano en RSSP. Elaboración propia.

En la Figura 4.10 se muestra la comparación de las curvas de biogás generado y biogás capturado en el Relleno Sanitario Santiago Poniente.

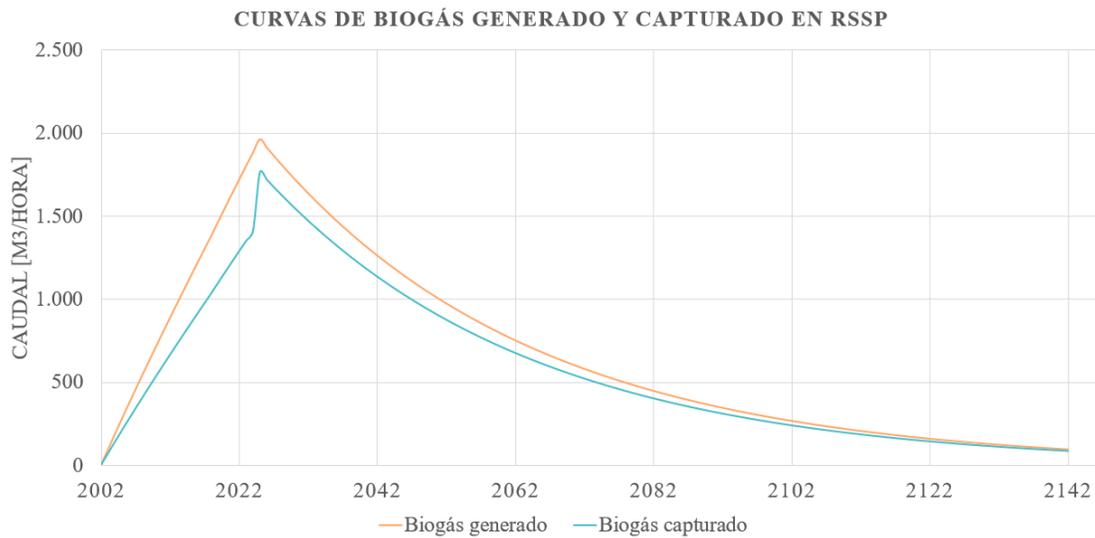


Figura 4.10: Comparación de curvas de biogás generado y biogás capturado en RSSP. Elaboración propia.

Con los resultados del modelo LandGEM y cálculo del biogás que puede ser efectivamente recuperado para el Relleno Sanitario Santiago Poniente se elabora la Tabla 4.11 que contiene el flujo de biogás y de metano en $[m^3/h]$ a lo largo del horizonte de evaluación.

Tabla 4.11: Potencial de generación de biogás y metano en RSSP en el horizonte de evaluación.

Año	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Flujo biogás [m^3/h]	1.290	1.351	1.411	1.766	1.720	1.676	1.633
Flujo metano [m^3/h]	774	811	847	1.059	1.032	1.006	980
Año	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Flujo biogás [m^3/h]	1.591	1.550	1.510	1.472	1.434	1.397	1.361
Flujo metano [m^3/h]	955	930	906	883	860	838	817
Año	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Flujo biogás [m^3/h]	1.326	1.292	1.259	1.227	1.195	1.165	1.135
Flujo metano [m^3/h]	796	775	755	736	717	699	681

De la Tabla 4.11 se observa que los flujos de biogás y metano máximos se alcanzan en el año 2025, que corresponden a 1.766 [m^3/h] y 1.059 [m^3/h], respectivamente.

4.2.3.4. Características generales

En cuanto a las condiciones de operación del biogás a la salida, la presión es 1 [atm] y la temperatura es 25 [°C]. Asimismo, en la Tabla 4.12 se presenta la composición del biogás obtenida.

Tabla 4.12: Composición biogás.

Compuesto	% Composición molar	% Composición másica
Metano	60	35,35
Dióxido de carbono	40	64,65
Trazas ^a	~ 0	~ 0

^a Trazas: Compuestos orgánicos volátiles distintos del metano, cloruros, sulfuros, monóxido de carbono, entre otros.

4.3. Discusiones

El potencial de generación de biogás es la base para determinar el potencial eléctrico disponible de acuerdo a los dos procesos estudiados: uso de biogás de forma directa y uso de hidrógeno como intermediario. Por lo tanto, es clave validar las proyecciones de biogás realizadas con proyectos operativos de captación de biogás en la Región Metropolitana.

Sin embargo, la información disponible de la caracterización de los rellenos sanitarios de la Región Metropolitana, de la composición actual de los residuos dispuestos en cada sitio de disposición final y de las proyecciones de producción de residuos es escasa. Por otro lado, la producción de biogás en rellenos sanitarios se puede ver perjudica debido a que la Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos al año 2040, pretende valorizar alrededor del 66% de los residuos orgánicos, evitando que, dichos residuos lleguen a los sitios de disposición final [39].

Por lo anterior, se decide tomar supuestos conservadores para estimar los parámetros del modelo y así, obtener resultados subestimados. Por ejemplo, el relleno Sanitario Santa Marta declara que el flujo de biogás promedio para el año 2013 es $7.898 [m^3/h]$, mientras que el modelo estima que para el mismo año el potencial de biogás capturado es $4.063 [m^3/h]$.

Capítulo 5

Potencial de generación eléctrico

En este capítulo se aborda la producción de electricidad a partir de biogás. En primer lugar, se estima el potencial eléctrico disponible. Luego, se estudian las tecnologías disponibles, seleccionando los motores de combustión interna. Finalmente, se estima el potencial eléctrico a instalar para cada relleno sanitario.

5.1. Estimación potencial eléctrico disponible

Una vez determinado el potencial de generación de biogás de cada sitio de disposición final, se estima la potencia eléctrica disponible para cada relleno sanitario. Para ello, se utilizan las Ecuaciones 2.12 y se sigue la metodología descrita en la Sección 2.3.8.

Para calcular el potencial disponible se considera que el rendimiento térmico de la generación eléctrica (η_t) es de un 40%. Dicho supuesto es tomado en base al rendimiento térmico mínimo de los modelos de motores de combustión interna disponibles en el mercado (Sección 5.2). Asimismo, el poder calorífico inferior del biogás es de 6 [kWh/Nm³] [11].

Luego, se calcula el potencial disponible para cada relleno sanitario en el horizonte de evaluación. Por ejemplo, el potencial disponible del Relleno Sanitario Santa Marta para el año 2025 es:

$$\begin{aligned} \text{Potencia disponible [kW]} &= \eta_t \cdot PCI_{\text{biogás}} \cdot Q_{\text{biogás,cap}} \\ &= 0,40 \cdot 6 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3} \right] \cdot 7.708 \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right] \\ &= 18.499 \text{ [kW]} \end{aligned} \tag{5.1}$$

A continuación se presentan los principales resultados del potencial de generación eléctrica de los rellenos sanitarios Loma Los Colorados, Santa Marta y Santiago Poniente.

5.1.1. Relleno Sanitario Loma Los Colorados

En la Tabla 5.1 se presentan los resultados de la potencia eléctrica disponible en el Relleno Sanitario Loma Los Colorados durante el horizonte de evaluación. En este caso, el potencial eléctrico disponible mínimo y máximo corresponden a 23.733 [kW] y 41.475 [kW],

respectivamente.

Tabla 5.1: Potencia eléctrica disponible en RSLLC en el horizonte de evaluación.

Año	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Potencia disponible [kW]	23.733	24.635	25.532	26.426	27.316	28.204	29.089
Año	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Potencia disponible [kW]	29.972	30.854	31.736	32.616	33.497	34.378	35.260
Año	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Potencia disponible [kW]	36.144	37.004	37.892	38.783	39.677	40.574	41.475

5.1.2. Relleno Sanitario Santa Marta

En la Tabla 5.2 se presentan los resultados de la potencia eléctrica disponible en el Relleno Sanitario Santa Marta durante el horizonte de evaluación. En este caso, el potencial eléctrico disponible mínimo y máximo corresponden a 16.428 [kW] y 30.382 [kW], respectivamente.

Tabla 5.2: Potencia eléctrica disponible en RSSM en el horizonte de evaluación.

Año	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Potencia disponible [kW]	16.428	17.130	17.821	18.500	19.168	19.825	20.472
Año	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Potencia disponible [kW]	21.109	21.736	22.354	22.963	23.564	24.157	24.741
Año	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Potencia disponible [kW]	30.382	29.603	28.843	28.103	27.381	26.679	25.994

5.1.3. Relleno Sanitario Santiago Poniente

En la Tabla 5.3 se presentan los resultados de la potencia eléctrica disponible en el Relleno Sanitario Santiago Poniente durante el horizonte de evaluación. En este caso, el potencial eléctrico disponible mínimo y máximo corresponden a 2.723 [kW] y 4.237 [kW], respectivamente.

Tabla 5.3: Potencia eléctrica disponible en RSSP en el horizonte de evaluación.

Año	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Potencia disponible [kW]	3.095	3.242	3.387	4.237	4.128	4.023	3.919
Año	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Potencia disponible [kW]	3.819	3.721	3.625	3.532	3.441	3.353	3.267
Año	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Potencia disponible [kW]	3.183	3.102	3.022	2.944	2.869	2.795	2.723

5.2. Tecnologías disponibles

Para poder determinar el potencial técnico de cada uno de los rellenos sanitarios, es necesario seleccionar la tecnología de generación de electricidad a partir de biogás mpas apropiada a las condiciones del sitio de disposición final.

Como se mencionó anteriormente, las tecnologías disponibles a utilizar, tales como, motores de combustión interna, turbinas a gas y microturbinas, dependen del flujo de biogás producido. En la Tabla 5.4 se presentan los rangos de flujo de biogás, potencias y eficiencia según el tipo de tecnología de generación.

Tabla 5.4: Rangos típicos de flujos, potencias y eficiencias de tecnologías de generación eléctrica [40].

Tecnología	Rango de flujo de biogás [m^3/h]	Potencia eléctrica [kW]	Eficiencia de conversión eléctrica
Microturbina	< 170	< 100	25 % - 30 %
Motores de combustión interna	255 - 8.490	500 - 12.000	32 % - 40 %
Turbinas de gas	6.790 - 33.960	3.000 - 18.000	26 % - 32 %
Turbinas de vapor	10.190 - 42.445	10.000 - 50.000	24 % - 29 %
Sistemas de ciclo combinado	8.490 - 42.445	> 10.000	38 % - 45 %

La tecnología a utilizar corresponde a motores de combustión interna debido a la eficiencia de conversión del grupo electrogeno y los flujos de biogás disponibles. Asimismo, debido a que el flujo de biogás fluctúa a lo largo del tiempo, se opta por tener motores en paralelo e ir agregando motores para suplir la potencia disponible, en vez de tener un único gran motor para todo el horizonte de evaluación.

A continuación se presentan las principales características de los modelos comerciales de motores de combustión interna, que están diseñados para ser utilizados con biogás de relleno

sanitario.

Finning, distribuidora de maquinaria Caterpillar (CAT) en Chile, proporciona soluciones completas para generar electricidad a partir de biogás. En particular, cuentan con sistemas de extracción de biogás de rellenos sanitarios, de tratamiento y generadores diseñados especialmente para operar en rellenos sanitarios. En la Tabla 5.5 se presenta el rendimiento de los principales modelos de motores a combustión interna CAT.

Tabla 5.5: Potencia eléctrica, eficiencias eléctricas, térmicas y total según el modelo de motor CAT [41, 42, 43].

Modelo	Potencia eléctrica [kW]	Eficiencia eléctrica [%]	Eficiencia térmica [%]	Eficiencia total [%]
CG132B-V08	400	41,7	43,3	85,0
CG132B-V12	600	41,7	43,6	85,3
CG132B-V16	800	41,9	43,3	85,2
CG170-12	1.200	42,1	43,8	85,9
CG170-16	1.560	41,8	44,0	85,8
CG170-20	2.000	42,9	43,3	86,2
CG260-12	2.830	42,3	40,8	83,1
CG260-16	3.370	42,9	39,4	82,3

5.3. Estimación potencial eléctrico a instalar

A partir de lo anterior, se seleccionan los equipos comerciales a utilizar para cada sitio de disposición final y con ello, se estima el potencial eléctrico a instalar. A continuación se presentan los principales resultados de los rellenos sanitarios Loma Los Colorados, Santa Marta y Santiago Poniente.

5.3.1. Relleno Sanitario Loma Los Colorados

En la Figura 5.1 se observa la comparación de la potencia eléctrica disponible con la potencia eléctrica a instalar, en donde la mínima y máxima potencia instalada es de 23.590 [kW] y 40.440 [kW], respectivamente.

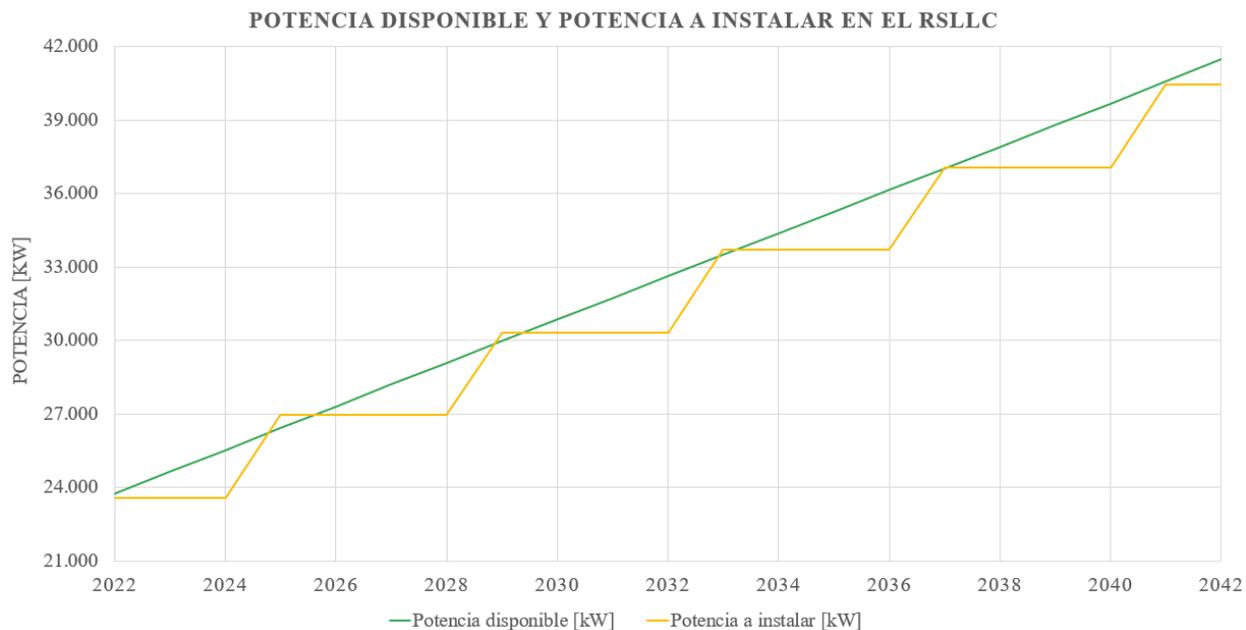


Figura 5.1: Variación de la potencia disponible y potencia real a instalar en el RSLLC. Elaboración propia.

Para el Relleno Sanitario Loma Los Colorados se selecciona el modelo CG260-16, que es capaz de producir 3.370 [kW] por motor. Además, se considera que cada 3 o 4 años se incorpora un nuevo motor para suplir la potencia disponible. En la Tabla 5.6 se resume la potencia eléctrica a instalar cada año y la cantidad de motores a utilizar.

Tabla 5.6: Potencia eléctrica a instalar y modelos de motores a utilizar en el RSLLC.

Año	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Potencia a instalar [kW]	23.590	23.590	23.590	26.960	26.960	26.960	26.960
Modelo	CG260-16						
Cantidad	7	7	7	8	8	8	8
Año	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Potencia a instalar [kW]	30.330	30.330	30.330	30.330	33.700	33.700	33.700
Modelo	CG260-16						
Cantidad	9	9	9	9	10	10	10
Año	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Potencia a instalar [kW]	33.700	37.070	37.070	37.070	37.070	40.440	40.440
Modelo	CG260-16						
Cantidad	10	11	11	11	11	12	12

Para comparar los dos procesos de generación de electricidad a partir de biogás: el primero de forma directa y el segundo, utilizando hidrógeno como intermediario, se escoge como unidad energética (UE): [kWh/m^3 de biogás], es decir, los kilowatts producidos por caudal de biogás. Dicha unidad energética se calcula mediante la expresión descrita en la Ecuación 5.2.

$$UE \left[\frac{kWh}{m^3 \text{ de biogás}} \right] = \frac{P_{ins,i}}{Q_{biogas,cap,i}} \quad (5.2)$$

Donde:

- UE : Unidad energética en $[kWh/m^3 \text{ de biogás}]$.
- $P_{ins,i}$: Potencia a instalar en el año i en $[kW]$.
- $Q_{biogas,cap,i}$: Caudal de biogás captura en el año i en $[m^3/h]$.

Con la información obtenida de las Tablas 4.9 y 5.6 se calcula la unidad energética para cada año para el Relleno Sanitario Loma Los Colorados. En las Ecuaciones 5.3, 5.4 y 5.5 se muestran la unidad energética mínima, máxima y teórico para el RSLLC, respectivamente.

$$UE_{RSLLC,min} = 2,22 \left[\frac{kWh}{m^3 \text{ de biogás}} \right] \quad (5.3)$$

$$UE_{RSLLC,max} = 2,45 \left[\frac{kWh}{m^3 \text{ de biogás}} \right] \quad (5.4)$$

$$UE_{RSLLC,teo} = 2,40 \left[\frac{kWh}{m^3 \text{ de biogás}} \right] \quad (5.5)$$

5.3.2. Relleno Sanitario Santa Marta

En la Figura 5.2 se observa la comparación de la potencia eléctrica disponible con la potencia eléctrica a instalar, en donde la mínima y máxima potencia instalada es de 16.850 [kW] y 23.050 [kW], respectivamente.

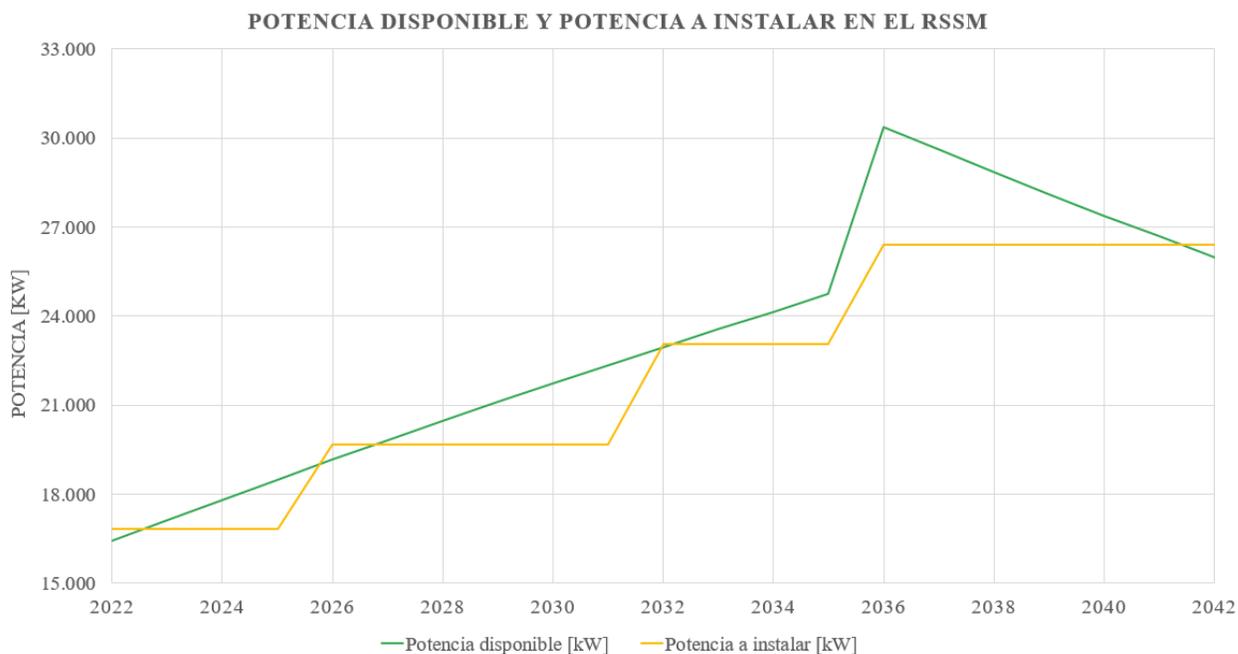


Figura 5.2: Variación de la potencia disponible y potencia real a instalar en el RSSM. Elaboración propia.

Para el Relleno Sanitario Santa Marta se seleccionan los modelos CG260-16 y CG260-12, que son capaces de producir 3.370 [kW] y 2.830 [kW] por motor, respectivamente. En este caso, se considera incorporar un nuevo motor cada 4 o 6 años para suplir la potencia disponible. En la Tabla 5.7 se resume la potencia eléctrica a instalar cada año y la cantidad de motores a utilizar.

Tabla 5.7: Potencia eléctrica a instalar y modelos de motores a utilizar en el RSSM.

Año	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Potencia a instalar [kW]	16.850	16.850	16.850	16.850	19.680	19.680	19.680
Modelo	CG260-16	CG260-16	CG260-16	CG260-16	CG260-16; CG260-12	CG260-16; CG260-12	CG260-16; CG260-12
Cantidad	5	5	5	5	5; 1	5; 1	5; 1
Año	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Potencia a instalar [kW]	19.680	19.680	19.680	23.050	23.050	23.050	23.050
Modelo	CG260-16; CG260-12						
Cantidad	5; 1	5; 1	5; 1	6; 1	6; 1	6; 1	6; 1
Año	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Potencia a instalar [kW]	26.420	26.420	26.420	26.420	26.420	26.420	26.420
Modelo	CG260-16; CG260-12						
Cantidad	7; 1	7; 1	7; 1	7; 1	7; 1	7; 1	7; 1

Con la información obtenida de las Tablas 4.10 y 5.7 se calcula la unidad energética para cada año para el Relleno Sanitario Santa Marta. En las Ecuaciones 5.6, 5.7 y 5.8 se muestran la unidad energética mínima, máxima y teórico para el RSSM, respectivamente.

$$UE_{RSSM,min} = 2,09 \left[\frac{kWh}{m^3 \text{ de biogás}} \right] \quad (5.6)$$

$$UE_{RSSM,max} = 2,46 \left[\frac{kWh}{m^3 \text{ de biogás}} \right] \quad (5.7)$$

$$UE_{RSSM,teo} = 2,40 \left[\frac{kWh}{m^3 \text{ de biogás}} \right] \quad (5.8)$$

5.3.3. Relleno Sanitario Santiago Poniente

En la Figura 5.3 se observa la comparación de la potencia eléctrica disponible con la potencia eléctrica a instalar, en donde la mínima y máxima potencia instalada es de 2.830 [kW] y 3.630 [kW], respectivamente.

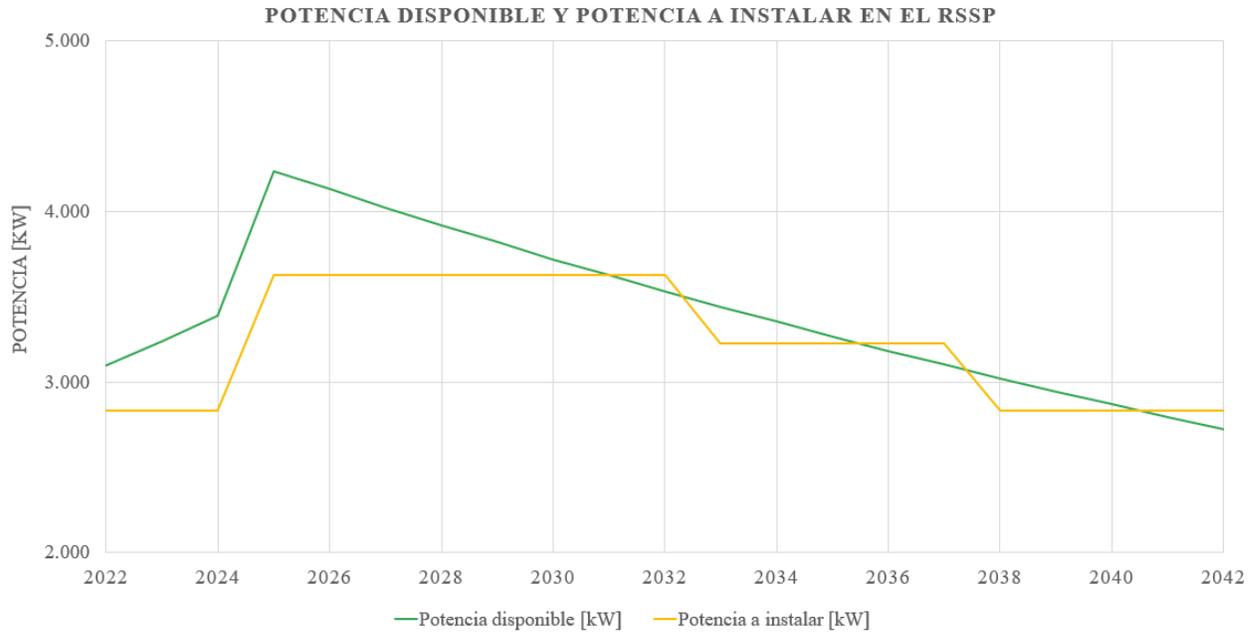


Figura 5.3: Variación de la potencia disponible y potencia real a instalar en el RSSP. Elaboración propia.

Para el Relleno Sanitario Santiago Poniente se seleccionan los modelos CG260-12 y CG132B-V08, que son capaces de producir 2.830 [kW] y 400 [kW] por motor, respectivamente. En este caso, se considera incorporar dos motores de 400 [kW] al cuarto año y retirar uno al doceavo año y el otro al decimoséptimo, para suplir la potencia disponible. En la Tabla 5.8 se resume la potencia eléctrica a instalar cada año y la cantidad de motores a utilizar.

Tabla 5.8: Potencia eléctrica a instalar y modelos de motores a utilizar en el RSSP.

Año	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Potencia a instalar [kW]	2.830	2.830	2.830	3.630	3.630	3.630	3.630
Modelo	CG260-12	CG260-12	CG260-12	CG260-12; CG132B-V08	CG260-12; CG132B-V08	CG260-12; CG132B-V08	CG260-12; CG132B-V08
Cantidad	1	1	1	1; 2	1; 2	1; 2	1; 2
Año	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Potencia a instalar [kW]	3.630	3.630	3.630	3.630	3.230	3.230	3.230
Modelo	CG260-12; CG132B-V08						
Cantidad	1; 2	1; 2	1; 2	1; 2	1; 1	1; 1	1; 1
Año	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Potencia a instalar [kW]	3.230	3.230	2.830	2.830	2.830	2.830	2.830
Modelo	CG260-12; CG132B-V08	CG260-12; CG132B-V08	CG260-12	CG260-12	CG260-12	CG260-12	CG260-12
Cantidad	1; 1	1; 1	1	1	1	1	1

Con la información obtenida de las Tablas 4.11 y 5.8 se calcula la unidad energética para cada año para el Relleno Sanitario Santiago Poniente. En las Ecuaciones 5.9, 5.10 y 5.8 se muestran la unidad energética mínima, máxima y teórico para el RSSP, respectivamente.

$$UE_{RSSP,min} = 2,01 \left[\frac{kWh}{m^3 \text{ de biogás}} \right] \quad (5.9)$$

$$UE_{RSSP,max} = 2,50 \left[\frac{kWh}{m^3 \text{ de biogás}} \right] \quad (5.10)$$

$$UE_{RSSP,teo} = 2,40 \left[\frac{kWh}{m^3 \text{ de biogás}} \right] \quad (5.11)$$

5.4. Discusiones

Debido a que no se cuenta con datos asociados a la producción real de energía eléctrica en los rellenos sanitarios estudiados, ni de los modelos de los equipos de generación utilizados, se tomaron supuestos para estimar el potencial de generación eléctrico.

En cuanto a la tecnología de aprovechamiento energético seleccionada, los motores a combustión interna representan la mejor alternativa para rellenos sanitarios de gran capacidad. Esta elección es apropiada para los rellenos Loma Los Colorados y Santa Marta ya que los flujos de biogás son entre 7.000 - 17.000 [m^3/h]. No obstante, el relleno Santiago Poniente produce biogás a una tasa inferior a 1.800 [m^3/h] por lo que se recomienda evaluar la factibilidad tecno-económica de utilizar microturbinas en vez de motores a combustión interna.

En cuanto al modelo de motor elegido, al utilizar un motor a gas diseñado específicamente para funcionar con biogás se reduce la inversión en procesos de tratamiento previo. Además, con el modelo elegido se aprovecha de manera óptima el metano disponible, dado que al ir pasando por etapas de tratamiento, parte del metano queda retenido en dichas etapas (considerando eficiencias menores a 100%). Lo anterior y la eficiencia térmica asumida, tiene como consecuencia que la estimación está sobreestimada.

En el caso del relleno Sanitario Santa Marta, el potencial eléctrico a instalar máximo para el horizonte de evaluación es de 26,4 [MW], mientras que la central de generación del relleno tiene una capacidad instalada de 20 [MW], esta diferencia se explica por los supuestos adoptados en la estimación.

Capítulo 6

Producción de hidrógeno

En este capítulo se aborda la evaluación técnica de la producción de hidrógeno. En primer lugar, se describe el proceso propuesto, definiendo las operaciones unitarias y especies involucradas. Posteriormente, se realizan los balances de masa por operación. Finalmente, a partir de los balances realizados, estima la producción de electricidad y la unidad energética para cada relleno sanitario.

6.1. Descripción del proceso

El proceso propuesto fue diseñado en régimen continuo y puede ser dividido en tres etapas principales: (i) adsorción de dióxido de carbono, (ii) pirólisis de metano y (iii) adsorción de metano. En la Figura 6.1, se presenta el diagrama de bloques del proceso.

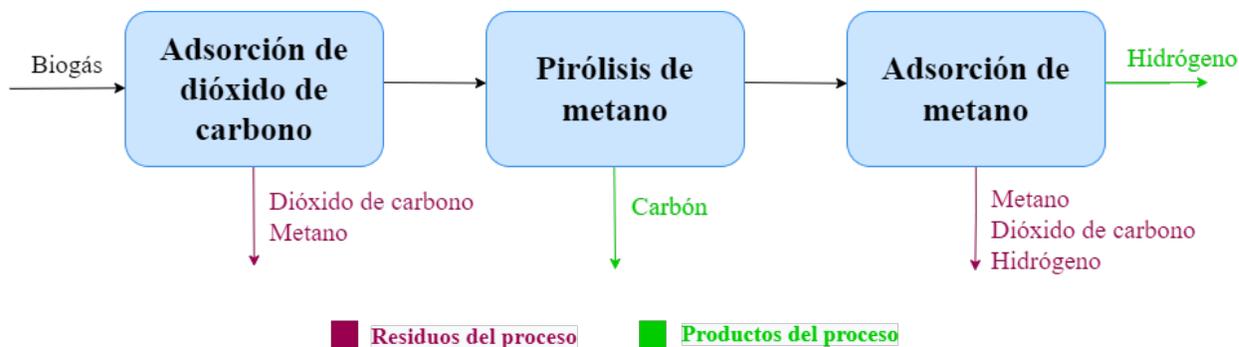


Figura 6.1: Diagrama de bloques del proceso. Elaboración propia.

La primera operación unitaria, detallada en la Figura 6.2, tiene como objetivo purificar el biogás eliminando el dióxido de carbono de la corriente de gas. Esta operación se realiza mediante la adsorción en dos unidades de adsorción por oscilación de presión (PSA), utilizando Zeolita 5A como material adsorbente [28]. Esta operación tiene dos salidas: Una corriente residual de gases compuesta de CO_2 y trazas de CH_4 ; y una corriente de metano que sigue en la línea del proceso.

Las condiciones de operación del proceso están descritas en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1: Condiciones de operación en la etapa de adsorción de dióxido de carbono [44].

Condiciones de operación	Valor
Razón molar CH_4 / CO_2	1,5
Temperatura	25 [°C]
Presión en cada PSA	6 [atm]
Tiempo de residencia PSA ₁	740 [s]
Tiempo de residencia PSA ₂	500 [s]

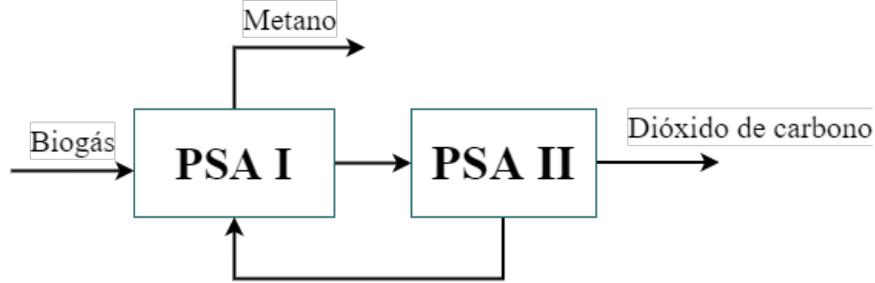


Figura 6.2: Esquema de la etapa de adsorción de dióxido de carbono. Adaptado de [44].

La segunda operación, detallada en la Figura 6.3, se inicia en un reactor de pirólisis mediante descomposición de plasma, donde ingresa el biometano proveniente de la etapa anterior, produciendo hidrógeno y carbono sólido mediante pirólisis de metano según la reacción descrita en la Ecuación 6.1. Esta operación tiene dos salidas: Una corriente sólida de carbón; y una corriente gaseosa de hidrógeno que sigue en la línea del proceso.



Las condiciones de operación del proceso están descritas en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2: Condiciones de operación en la etapa de pirólisis de metano [28].

Condiciones de operación	Valor
Temperatura	2.000 [K]
Presión	1 [atm]
Tiempo de residencia	0,005 [s]

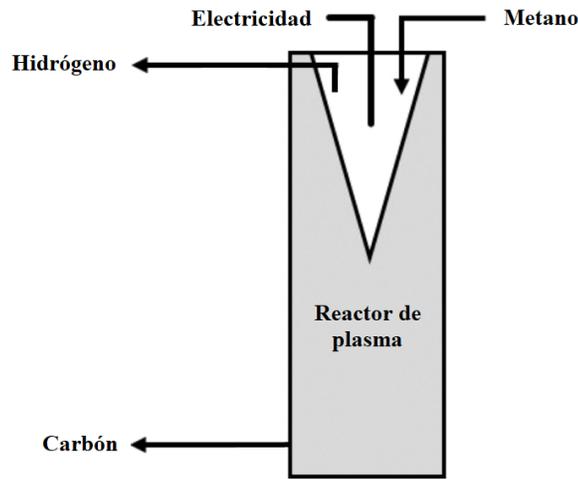


Figura 6.3: Esquema de la etapa de pirólisis de metano. Adaptado de [23].

La última operación, detalla en la Figura 6.4, consiste en la remoción de metano y trazas de dióxido de carbono de la corriente de hidrógeno. Dicha operación se realiza mediante la adsorción en cuatro unidades de adsorción por oscilación de presión (PSA), utilizando carbón activado como material adsorbente [45]. Esta operación tiene dos salidas: Una corriente residual de gases compuesta de CH_4 , CO_2 y trazas de H_2 ; y una corriente de hidrógeno.

Las condiciones de operación del proceso están descritas en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3: Condiciones de operación en la adsorción de metano [45].

Condiciones de operación	Valor
Razón molar H_2 / CH_4	1,5 - 9,0
Temperatura	30 [°C]
Presión en cada PSA	14,61 [atm]
Tiempo de residencia por PSA	240 [s]

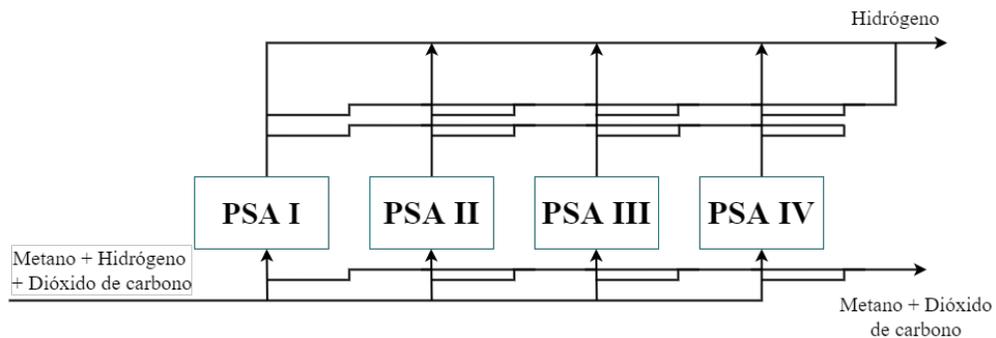


Figura 6.4: Esquema de la etapa de adsorción de metano. Adaptado de [45].

6.2. Balance de masa

A continuación se presenta el balance de masa para todas las etapas del proceso. El balance de masa está dado por la ley de conservación de la masa (Ecuación 6.2), para la que se asume estado estacionario, luego el término asociado a acumulación es nulo.

$$acumulación = entrada - salida + producción - consumo \quad (6.2)$$

Debido a que la evaluación técnica está enfocada en tres rellenos sanitarios cuyos flujos de biogás fluctúan cada año, se explicarán los supuestos y cálculos realizados para el año 2025 del Relleno Sanitario Santa Marta, siendo análogo para los tres rellenos sanitarios. En la Tabla 6.4 se presenta la composición de la corriente de biogás de entrada del proceso.

Tabla 6.4: Composición corriente de entrada.

Nombre	Especie	% Composición másica	Flujo [kg/h]
Biogás	CH_4	35,35	3.086
	CO_2	64,65	5.644
	Total	100	8.730

Los resultados principales para cada relleno sanitario se encuentran en la Sección 6.2.4.

6.2.1. Adsorción I: Dióxido de carbono

La remoción de dióxido de carbono de la corriente de biogás se realiza mediante la adsorción en dos unidades de adsorción por oscilación de presión (PSA), utilizando Zeolita 5A como material adsorbente.

6.2.1.1. Descripción de corrientes

la Figura 6.5 se muestra el diagrama de la etapa con las corrientes involucradas en la operación. En la Tabla 6.5 se presentan las especies involucradas en cada una de ellas.

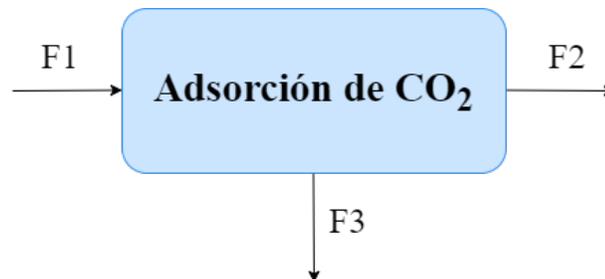


Figura 6.5: Esquema de Adsorción I: Dióxido de carbono.

Tabla 6.5: Descripción de corrientes en Adsorción I: Dióxido de carbono.

Flujo	Nombre	Especies involucradas
F1	Biogás	CH_4, CO_2
F2	Biometano	CH_4, CO_2
F3	Gases residuales I	CH_4, CO_2

6.2.1.2. Supuestos y cálculos

Esta etapa no considera reacción, luego el balance de masa solo tiene los términos de entrada y salida. A continuación se presentan los balances por especies y global de la etapa de adsorción I:

$$0 = F1 - F2 - F3 \quad (6.3)$$

$$0 = F1_{CH_4} - F2_{CH_4} - F3_{CH_4} \quad (6.4)$$

$$0 = F1_{CO_2} - F2_{CO_2} - F3_{CO_2} \quad (6.5)$$

Según el estudio realizado por AUGELLETTI ET AL (2017) el proceso de adsorción por oscilación de presión (PSA) tiene una recuperación del 99,4% de metano y recuperación del 98,2% de dióxido de carbono presentes en la corriente de biogás, utilizando Zeolita 5A como material adsorbente [44].

Debido a que la composición molar de biogás obtenida es de 60% metano y 40% dióxido de carbono (Tabla 4.12) es válido utilizar el valor de la recuperación de metano y de dióxido de carbono, luego se cumple que:

$$F2_{CH_4} = 0,994 \cdot F1_{CH_4} \quad (6.6)$$

$$F3_{CO_2} = 0,982 \cdot F1_{CO_2} \quad (6.7)$$

Para determinar el flujo de metano en $F3$ se reemplaza la Ecuación 6.6 en la Ecuación 6.4:

$$F3_{CH_4} = F1_{CH_4} - 0,994 \cdot F1_{CH_4} \quad (6.8)$$

Análogamente se calcula el flujo de dióxido de carbono en $F2$.

$$F2_{CO_2} = F1_{CO_2} - 0,982 \cdot F1_{CO_2} \quad (6.9)$$

6.2.1.3. Resultados

Con los cálculos anteriores se obtienen los flujos mostrados en la Tabla 6.6.

Tabla 6.6: Corrientes en la etapa de adsorción de dióxido de carbono en [kg/h].

Especie	F1	F2	F3
CH_4	3.086	3.067	19
CO_2	5.644	102	5.542
Global	8.730	3.169	5.561

6.2.2. Pirólisis de metano

Se utiliza un reactor tubular para la producción de hidrógeno mediante pirólisis de metano con una antorcha de plasma.

6.2.2.1. Descripción de corrientes

En la Figura 6.6 se muestra el diagrama de la etapa con las corrientes involucradas en la operación. En la Tabla 6.7 se presentan las especies involucradas en cada una de ellas.

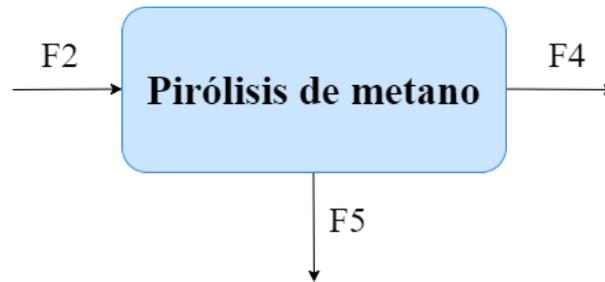


Figura 6.6: Esquema de Pirólisis de metano.

Tabla 6.7: Descripción de corrientes en Pirólisis de metano.

Flujo	Nombre	Especies involucradas
F2	Biometano	CH_4, CO_2
F4	Hidrógeno	CH_4, CO_2, H_2
F5	Carbón sólido	C

6.2.2.2. Supuestos y cálculos

En la etapa de pirólisis ocurre la reacción heterogénea presentada en la Ecuación 6.10



Según el estudio realizado por KEUN ET AL (2005) las condiciones de operación óptimas para el proceso de pirólisis de metano para un reactor tubular con una antorcha de plasma son las mostradas en la Tabla 6.2. Bajo dichas condiciones se obtiene una conversión del 99,8 % [46], sin embargo, para efectos del estudio se considera una conversión de metano de 95 %.

Realizando un balance molar de la reacción descrita por la Ecuación 6.10 se obtienen las siguientes expresiones para calcular el flujo de cada una de las especies presentes en el $F6$ y $F5$.

$$F6_{CH_4} = PM_{CH_4} \cdot \left((1 - X) \cdot \frac{F4_{CH_4}}{PM_{CH_4}} \right) \quad (6.11)$$

$$F6_{H_2} = PM_{H_2} \cdot \left(2 \cdot X \cdot \frac{F4_{CH_4}}{PM_{CH_4}} \right) \quad (6.12)$$

$$F6_C = PM_C \cdot \left(X \cdot \frac{F4_{CH_4}}{PM_{CH_4}} \right) \quad (6.13)$$

Por su parte, el balance global se expresa como:

$$0 = F2 - F4 - F5 \quad (6.14)$$

Por otro lado, el flujo másico en $F2$ del dióxido de carbono tiene el mismo valor en el flujo $F4$ debido a que no participa en la reacción, luego:

$$F2_{CO_2} = F4_{CO_2} \quad (6.15)$$

6.2.2.3. Resultados

Con los cálculos anteriores se obtienen los flujos mostrados en la Tabla 6.8.

Tabla 6.8: Corrientes en la etapa de pirólisis de metano en $[kg/h]$.

Especie	F2	F4	F5
CH_4	3.067	153	-
CO_2	102	102	-
H_2	-	728	-
C	-	-	2.186
Global	3.169	983	2.186

6.2.3. Adsorción II: Metano

La remoción de metano y trazas de dióxido de carbono de la corriente de hidrógeno se realiza mediante la adsorción en cuatro unidades de adsorción por oscilación de presión (PSA), utilizando carbón activado como material adsorbente.

6.2.3.1. Descripción de corrientes

En la Figura 6.7 se muestra el diagrama del equipo con las corrientes involucradas en la operación. En la Tabla 6.9 se presentan las especies involucradas en cada una de ellas.

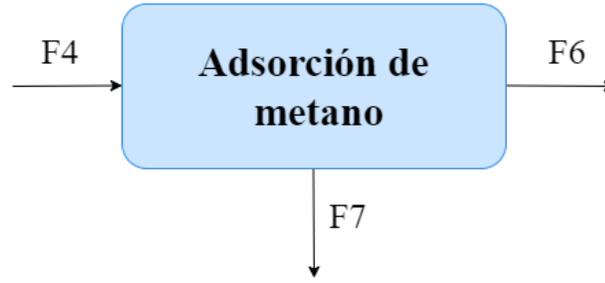


Figura 6.7: Esquema de Adsorción II: Metano.

Tabla 6.9: Descripción de corrientes en Adsorción II: Metano.

Flujo	Nombre	Especies involucradas
F4	Hidrógeno	CH_4, CO_2, H_2
F6	Hidrógeno purificado	CH_4, CO_2, H_2
F7	Gases residuales II	CH_4, CO_2, H_2

6.2.3.2. Supuestos y cálculos

Esta etapa no considera reacción, luego el balance de masa solo tiene los términos de entrada y salida. A continuación se presentan el balance global de la etapa de adsorción II:

$$0 = F4 - F6 - F7 \quad (6.16)$$

Según el estudio realizado por WALDRON & SIRCAR (2000) el proceso de adsorción por oscilación de presión (PSA) tiene una recuperación molar del 99,9% de hidrógeno de la corriente gaseosa, utilizando carbón activado como material adsorbente [45].

Para obtener el flujo molar de cada especie en $F4$ se utiliza la siguiente expresión:

$$\dot{n}_i = \frac{F_i}{PM_i} \quad (6.17)$$

$$i = CH_4, CO_2, H_2$$

Ahora bien, para el obtener el flujo molar de hidrógeno en $F6$ se utiliza que la recuperación de hidrógeno es de 99,99%, luego:

$$\dot{n}_{6_{H_2}} = 0,9999 \cdot \left(\frac{F4_{H_2}}{PM_{H_2}} \right) \quad (6.18)$$

Debido a que el estudio de WALDRON & SIRCAR (2000) trabaja con una mezcla gaseosa de hidrógeno y metano, y por tanto no considera dióxido de carbono en el proceso, se toma como supuesto que la fracción molar de metano y dióxido de carbono en $F6$ es la misma, luego:

$$\begin{aligned}
1 &= x_{H_2} + x_{CH_4} + x_{CO_2} & (6.19) \\
1 &= 0,999 + 2 \cdot x_i \\
1 - 0,999 &= 2 \cdot x_i \\
x_i &= 0,0005
\end{aligned}$$

Entonces, el flujo molar para el metano y el dióxido de carbono en F6 es:

$$\dot{n}_{CH_4} = x_i \cdot \left(\frac{F_{4CH_4}}{PM_{CH_4}} \right) \quad (6.20)$$

$$\dot{n}_{CO_2} = x_i \cdot \left(\frac{F_{4CO_2}}{PM_{CO_2}} \right) \quad (6.21)$$

Para determinar \dot{n}_7 se realiza el balance molar por especie en la etapa de adsorción de metano, luego:

$$\dot{n}_{7H_2} = \dot{n}_{4H_2} - \dot{n}_{6H_2} \quad (6.22)$$

$$\dot{n}_{7CH_4} = \dot{n}_{4CH_4} - \dot{n}_{6CH_4} \quad (6.23)$$

$$\dot{n}_{7CO_2} = \dot{n}_{4CO_2} - \dot{n}_{6CO_2} \quad (6.24)$$

6.2.3.3. Resultados

Con los cálculos anteriores se obtienen los flujos mostrados en la Tabla 6.10.

Tabla 6.10: Corrientes en la etapa de adsorción de metano en [kg/h].

Especie	F4	F6	F5
CH_4	153	0,0	153
CO_2	102	0,0	102
H_2	728	728	0,0
Global	983	728	255

Para determinar la pureza del hidrógeno, se utiliza la Ecuación 6.25:

$$\begin{aligned}
\%pureza &= \frac{F_{6H_2}}{F_6} \cdot 100 & (6.25) \\
&= 99,99\%
\end{aligned}$$

A partir de los resultados obtenidos en el balance de masa se puede establecer la relación de masa de hidrógeno producido por masa de biogás:

$$\left[\frac{kg \text{ de hidrógeno}}{kg \text{ de biogás}} \right] = \frac{728}{8.730} = 0,0834 \quad (6.26)$$

6.2.4. Resultados por relleno sanitario

A continuación se presentan los resultados de la producción de hidrógeno y carbono sólido para cada relleno sanitario para el horizonte de evaluación. El detalle de los resultados de cada flujo se encuentra en el Anexo B.

6.2.4.1. Relleno Sanitario Loma Los Colorados

En la Tabla 6.11 se presentan los resultados de la producción de hidrógeno y carbono sólido en el Relleno Sanitario Loma Los Colorados durante el horizonte de evaluación. En este caso, los flujos de hidrógeno y carbono sólido máximos obtenidos son 1.633 [kg/h] y 4.900, respectivamente.

Tabla 6.11: Resultados producción de hidrógeno y carbono en RSLLC.

Año	2.022	2.023	2.024	2.025	2.026	2.027	2.028
Flujo de Hidrógeno [kg/h]	935	970	1.005	1.041	1.076	1.111	1.145
Flujo de Carbón [kg/h]	2.804	2.910	3.016	3.122	3.227	3.332	3.436
Año	2.029	2.030	2.031	2.032	2.033	2.034	2.035
Flujo de Hidrógeno [kg/h]	1.180	1.215	1.250	1.284	1.319	1.354	1.388
Flujo de Carbón [kg/h]	3.541	3.645	3.749	3.853	3.957	4.061	4.166
Año	2.036	2.037	2.038	2.039	2.040	2.041	2.042
Flujo de Hidrógeno [kg/h]	1.423	1.457	1.492	1.527	1.562	1.598	1.633
Flujo de Carbón [kg/h]	4.270	4.372	4.476	4.582	4.687	4.793	4.900

6.2.4.2. Relleno Sanitario Santa Marta

En la Tabla 6.12 se presentan los resultados de la producción de hidrógeno y carbono sólido en el Relleno Sanitario Santa Marta durante el horizonte de evaluación. En este caso, los flujos de hidrógeno y carbono sólido máximos obtenidos son 1.196 [kg/h] y 3.589, respectivamente.

Tabla 6.12: Resultados producción de hidrógeno y carbono en RSSM.

Año	2.022	2.023	2.024	2.025	2.026	2.027	2.028
Flujo de Hidrógeno [kg/h]	647	675	702	728	755	781	806
Flujo de Carbón [kg/h]	1.941	2.024	2.105	2.186	2.264	2.342	2.419
Año	2.029	2.030	2.031	2.032	2.033	2.034	2.035
Flujo de Hidrógeno [kg/h]	831	856	880	904	928	951	974
Flujo de Carbón [kg/h]	2.494	2.568	2.641	2.713	2.784	2.854	2.923
Año	2.036	2.037	2.038	2.039	2.040	2.041	2.042
Flujo de Hidrógeno [kg/h]	1.196	1.166	1.136	1.107	1.078	1.050	1.024
Flujo de Carbón [kg/h]	3.589	3.497	3.407	3.320	3.235	3.152	3.071

6.2.4.3. Relleno Sanitario Santiago Poniente

En la Tabla 6.13 se presentan los resultados de la producción de hidrógeno y carbono sólido en el Relleno Sanitario Santiago Poniente durante el horizonte de evaluación. En este caso, los flujos de hidrógeno y carbono sólido máximos obtenidos son 167 [kg/h] y 400, respectivamente.

Tabla 6.13: Resultados producción de hidrógeno y carbono en RSSP.

Año	2.022	2.023	2.024	2.025	2.026	2.027	2.028
Flujo de Hidrógeno [kg/h]	122	128	133	167	163	158	154
Flujo de Carbón [kg/h]	366	383	400	501	488	475	463
Año	2.029	2.030	2.031	2.032	2.033	2.034	2.035
Flujo de Hidrógeno [kg/h]	150	147	143	139	136	132	129
Flujo de Carbón [kg/h]	451	440	428	417	407	396	386
Año	2.036	2.037	2.038	2.039	2.040	2.041	2.042
Flujo de Hidrógeno [kg/h]	125	122	119	116	113	110	107
Flujo de Carbón [kg/h]	376	366	357	348	339	330	322

6.3. Producción de electricidad

Luego de estimar la producción de hidrógeno mediante pirólisis de metano, se determina la producción de electricidad utilizando la Ecuación 6.27. Para determinar el caudal de hidrógeno se consideran condiciones de operación normales ($P = 1$ [atm] y $T = 25$ [°C]), además, la densidad energética del hidrógeno es de 3 [kWh/Nm^3] y la eficiencia de conversión de hidrógeno a electricidad en una *fuelcell* de hidrógeno-oxígeno es de $0,793$ [47, 48].

$$Potencia\ disponible\ [kW] = \eta_{FC} \cdot PC_{H_2} \left[\frac{kWh}{Nm^3} \right] \cdot Q_{H_2} \left[\frac{Nm^3}{h} \right]$$

Ahora, se calcula el potencial eléctrico disponible para cada relleno sanitario en el horizonte de evaluación. Por ejemplo, el potencial eléctrico disponible del Relleno Sanitario Santa Marta para el año 2025 es:

$$\begin{aligned} Potencia\ disponible\ [kW] &= \eta_{FC} \cdot PC_{H_2} \cdot Q_{H_2} \\ &= 0,793 \cdot 3 \left[\frac{kWh}{Nm^3} \right] \cdot 8.910,4 \left[\frac{Nm^3}{h} \right] \\ &= 21.198 [kW] \end{aligned} \tag{6.27}$$

A continuación se presentan los principales resultados del potencial de generación eléctrica de los rellenos sanitarios Loma Los Colorados, Santa Marta y Santiago Poniente.

6.3.1. Resultados

6.3.1.1. Relleno Sanitario Loma Los Colorados

En la Tabla 6.14 se presentan los resultados de la potencia eléctrica disponible en el Relleno Sanitario Loma Los Colorados durante el horizonte de evaluación. En este caso, el potencial eléctrico mínimo y máximo corresponden a 27.194 [kW] y 47.523 [kW], respectivamente.

Tabla 6.14: Potencia eléctrica en RSLLC en el horizonte de evaluación.

Año	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Potencia disponible [kW]	27.194	28.227	29.255	30.279	31.299	32.316	33.330
Año	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Potencia disponible [kW]	34.343	35.353	36.363	37.372	38.381	39.391	40.401
Año	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Potencia disponible [kW]	41.414	42.400	43.417	44.438	45.462	46.490	47.523

A partir de la información obtenida de las Tablas 4.9 y 6.14 se calcula la unidad energética para cada año para el Relleno Sanitario Loma Los Colorados utilizando la Ecuación 5.2. En la Ecuación 6.28 se muestra la unidad energética para el RSLLC. Debido a la metodología utilizada para determinar el potencial eléctrico disponible la unidad energética se mantiene

constante.

$$UE_{RSLLC_2} = 2,75 \left[\frac{kWh}{m^3 \text{ de biogás}} \right] \quad (6.28)$$

6.3.1.2. Relleno Sanitario Santa Marta

En la Tabla 6.15 se presentan los resultados de la potencia eléctrica disponible en el Relleno Sanitario Santa Marta durante el horizonte de evaluación. En este caso, el potencial eléctrico mínimo y máximo corresponden a 18.823 [kW] y 34.812 [kW], respectivamente.

Tabla 6.15: Potencia eléctrica en RSSM en el horizonte de evaluación.

Año	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Potencia disponible [kW]	18.823	19.628	20.420	21.198	21.963	22.716	23.457
Año	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Potencia disponible [kW]	24.187	24.906	25.614	26.312	27.000	27.679	28.349
Año	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Potencia disponible [kW]	34.812	33.919	33.048	32.200	31.374	30.569	29.784

A partir de la información obtenida de las Tablas 4.10 y 6.15 se calcula la unidad energética para cada año para el Relleno Sanitario Santa Marta utilizando la Ecuación 5.2. En la Ecuación 6.29 se muestra la unidad energética para el RSSM. Debido a la metodología utilizada para determinar el potencial eléctrico disponible la unidad energética se mantiene constante.

$$UE_{RSSM_2} = 2,75 \left[\frac{kWh}{m^3 \text{ de biogás}} \right] \quad (6.29)$$

6.3.1.3. Relleno Sanitario Santiago Poniente

En la Tabla 6.16 se presentan los resultados de la potencia eléctrica disponible en el Relleno Sanitario Santiago Poniente durante el horizonte de evaluación. En este caso, el potencial eléctrico mínimo y máximo corresponden a 3.121 [kW] y 4.855 [kW], respectivamente.

Tabla 6.16: Potencia eléctrica en RSSP en el horizonte de evaluación.

Año	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Potencia disponible [kW]	3.547	3.715	3.881	4.855	4.730	4.609	4.491
Año	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Potencia disponible [kW]	4.375	4.263	4.154	4.047	3.943	3.842	3.743
Año	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Potencia disponible [kW]	3.647	3.554	3.463	3.374	3.287	3.203	3.121

A partir de la información obtenida de las Tablas 4.11 y 6.16 se calcula la unidad energética para cada año para el Relleno Sanitario Santiago Poniente utilizando la Ecuación 5.2. En la Ecuación 6.30 se muestra la unidad energética para el RSSP. Debido a la metodología utilizada para determinar el potencial eléctrico disponible la unidad energética se mantiene constante.

$$UE_{RSSP_2} = 2,75 \left[\frac{kWh}{m^3 \text{ de biogás}} \right] \quad (6.30)$$

6.4. Discusiones

Para realizar el balance de masa se toma como principal supuesto que los contaminantes, también considerados como trazas (ver Tabla 4.12), son inertes en el proceso y son liberados en la primera operación unitaria, esto para evitar que los gases reaccionen en la etapa de pirólisis de metano. Dado que el flujo másico de los gases contaminantes es notoriamente inferior a los flujos de metano y dióxido de carbono, el supuesto es razonable.

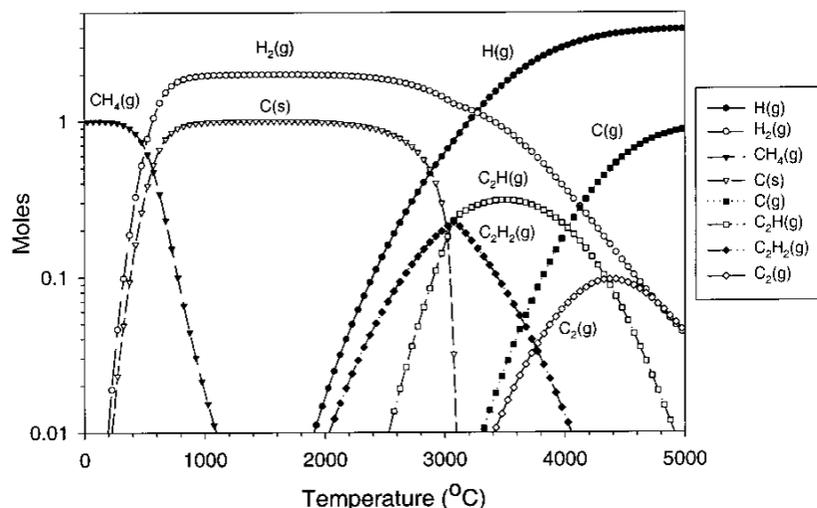


Figura 6.8: Diagrama de equilibrio de la descomposición de metano [49].

La temperatura de operación y tiempo de residencia en la reacción de descomposición de

metano son parámetros relevantes para disminuir la formación de hidrocarburos no deseados y favorecer la producción de hidrógeno. En la Figura 6.8 se muestra el digrama de equilibrio de la descomposición de metano tomando como referencia 1 mol de metano.

En la etapa de pirólisis se toma como principal supuesto que los únicos productos son hidrógeno y carbono, considerando que la temperatura de reacción es 2000 [K], el supuesto no se aleja de la realidad.

En cuanto a la producción de electricidad a partir de hidrógeno, la unidad energética obtenida ([kWh/ m^3 de biogás]) es superior a la determinada en el caso base. No obstante, la eficiencia de conversión de hidrógeno a electricidad en una *fuel cells* utilizada es teórica para el sistema hidrógeno-aire, además, es alta en comparación a las eficiencias de las *fuel cells* disponibles en el mercado como las celdas PEM o SOFC, luego, la producción de energía eléctrica podría estar sobreestimada.

Capítulo 7

Dimensionamiento de equipos

En este capítulo se aborda el dimensionamiento de los equipos de las operaciones unitarias descritas en la Sección 6.1. En primer lugar se describen los supuestos tomados y la memoria de cálculo de los dimensionamientos para cada etapa. Finalmente, se presentan los resultados principales para cada sitio de disposición final.

7.1. Adsorción I: Dióxido de carbono

7.1.1. Cálculos y resultados

Para el dimensionamiento de una unidad de adsorción por oscilación de presión es necesario determinar el volumen gaseoso y el volumen del adsorbente. Para ello, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$V_{PSA_i} = V_{gas_{PSA_i}} + V_{ads_{PSA_i}} \quad (7.1)$$

Donde:

- V_{PSA_i} : Volumen total de la unidad de PSA_i .
- $V_{gas_{PSA_i}}$: Volumen gaseoso de la unidad de PSA_i .
- $V_{ads_{PSA_i}}$: Volumen adsorbente presente en la unidad de PSA_i .

En primer lugar, se calcula el volumen gaseoso de la unidad de PSA a partir de la expresión descrita en la Ecuación 7.2.

$$V_{gas_{PSA_i}} = Q_{in} \cdot t_{r,i} \quad (7.2)$$

Donde:

- $V_{gas_{PSA_i}}$: Volumen de la unidad de PSA_i .
- Q_{in} : Flujo volumétrico de entrada al equipo.
- $t_{r,i}$: Tiempo de residencia de unidad de PSA_i .

El flujo de entrada al equipo corresponde a $F1$ (Figura 6.5), ahora bien, para calcular el flujo volumétrico se utiliza la ley de gases ideales con la información descrita en la Tabla 6.1, luego:

$$Q1 = \frac{\frac{F1}{PM_{biogás}} \cdot R \cdot T}{P} \quad (7.3)$$

El peso molecular del biogás se calcula ponderando la fracción molar de las especies involucradas en el gas, es decir, metano y dióxido de carbono, con su respectivo peso molecular:

$$PM_{biogás} = X_{CH_4} \cdot PM_{CH_4} + X_{CO_2} \cdot PM_{CO_2} \quad (7.4)$$

$$= 0,6 \cdot 16,04 \left[\frac{g}{mol} \right] + 0,4 \cdot 44,01 \left[\frac{g}{mol} \right] \quad (7.5)$$

$$= 27,23 \left[\frac{g}{mol} \right] \quad (7.6)$$

Por otro lado, el tiempo de residencia para alcanzar el equilibrio de los PSA_1 y PSA_2 corresponden a 740 [s] y 500 [s], respectivamente [44]. Luego, se calcula el volumen de cada PSA según la Ecuación 7.2. Por ejemplo, el volumen de las dos unidades de PSA del Relleno Sanitario Santa Marta para el año 2025 es:

$$Q1 = \frac{\frac{8.730 \left[\frac{kg}{h} \right] \cdot 1000 \left[\frac{g}{kg} \right]}{27,23 \left[\frac{g}{mol} \right]} \cdot 8,314 \left[\frac{Pa \cdot m^3}{mol \cdot K} \right] \cdot 298,15 [K]}{607.950 [Pa]} \quad (7.7)$$

$$= 1.307,2 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow V_{gas_{PSA_I}} &= 1.307,2 \left[\frac{m^3}{h} \right] \cdot \frac{1}{3600} \left[\frac{h}{s} \right] \cdot 740 [s] \\ &= 268,7 [m^3] \end{aligned} \quad (7.8)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow V_{gas_{PSA_{II}}} &= 1.307,2 \left[\frac{m^3}{h} \right] \cdot \frac{1}{3600} \left[\frac{h}{s} \right] \cdot 500 [s] \\ &= 181,6 [m^3] \end{aligned} \quad (7.9)$$

Hecho lo anterior, se procede a calcular el volumen del adsorbente necesario para poder remover el dióxido de carbono de la corriente de biogás. Para ello, se considera que la capacidad de adsorción (n_i^{0*}) de dióxido de carbono en la zeolita 5A es de 5.000 [$mol CO_2$ adsorbido/ m^3 de zeolita], determinada en el trabajo de AUGELLETTI ET AL (2017) a partir de la isoterma de equilibrio de Langmuir a 25°C [44]. Luego, el volumen de zeolita 5A se calcula según la siguiente expresión:

$$Vads_{PSA,i} = \frac{\dot{n}3 \cdot \tau_{r,i}}{n_i^{0*}} \quad (7.10)$$

Cabe señalar que se considera el flujo de salida del equipo $F3$ debido a que es el flujo adsorbido por la zeolita 5A. Luego, se calcula el volumen de adsorbente para cada PSA según la Ecuación 7.10. Por ejemplo, el volumen de adsorbente de las dos unidades de PSA del Relleno Sanitario Santa Marta para el año 2025 es:

$$\begin{aligned} \dot{n}3 &= \frac{F3_{CO_2}}{PM_{CO_2}} + \frac{F3_{CH_4}}{PM_{CH_4}} \quad (7.11) \\ &= \frac{5.542 \left[\frac{kg}{h} \right] \cdot 1000 \left[\frac{g}{kg} \right]}{44,01 \left[\frac{g}{mol} \right]} + \frac{19 \left[\frac{kg}{h} \right] \cdot 1000 \left[\frac{g}{kg} \right]}{16,04 \left[\frac{g}{mol} \right]} \\ &= 127.087 \left[\frac{mol}{h} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow Vads_{PSA_I} &= \frac{127.087 \left[\frac{mol}{h} \right] \cdot \frac{1}{3600} \left[\frac{h}{s} \right] \cdot 740 [s]}{5.000 \left[\frac{mol}{m^3 \text{ zeolita}} \right]} \quad (7.12) \\ &= 5,22 [m^3] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow Vgas_{PSA_{II}} &= \frac{127.087 \left[\frac{mol}{h} \right] \cdot \frac{1}{3600} \left[\frac{h}{s} \right] \cdot 500 [s]}{5.000 \left[\frac{mol}{m^3 \text{ zeolita}} \right]} \quad (7.13) \\ &= 3,53 [m^3] \end{aligned}$$

Luego, el volumen total de las dos unidades de PSA del RSSM para el año 2025 es:

$$V_{PSA_I} = Vgas_{PSA_I} + Vads_{PSA_I} = 273,94 [m^3] \quad (7.14)$$

$$V_{PSA_{II}} = Vgas_{PSA_{II}} + Vads_{PSA_{II}} = 185,1 [m^3] \quad (7.15)$$

7.2. Pirólisis de metano

7.2.1. Cálculos y resultados

En este equipo ocurre la reacción descrita por la Ecuación 6.1, donde el metano se disocia formando hidrógeno y carbono sólido. Para dimensionar el reactor se emplea la siguiente ecuación:

$$V = Q_{in} \cdot \tau_r \quad (7.16)$$

Donde:

- V es el volumen del reactor.

- τ_r es el tiempo de residencia.
- Q_{in} es el flujo volumétrico de entrada al reactor.

El flujo volumétrico Q_{in} se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Q_{in} = Q_2 = \frac{\frac{F_2}{PM_{CH_4}} \cdot R \cdot T}{P} \quad (7.17)$$

Cabe señalar que debido a que la presencia de metano predomina en F_4 (fracción molar del 99 %) se toma como supuesto que el peso molecular de la mezcla gaseosa es igual al peso molecular del metano.

El tiempo de residencia para alcanzar la descomposición de metano en la antorcha de plasma es de 0,005 [s] [46]. No obstante, para dimensionar el equipo se considera el tiempo de residencia teórico que corresponde a 0,02 [s] [46]. Con todo lo anterior se calcula el volumen del reactor para cada caso utilizando la Ecuación 7.16. Por ejemplo, el volumen del reactor del Relleno Sanitario Santa Marta para el año 2025 es:

$$Q_2 = \frac{\frac{3.169 \left[\frac{kg}{h} \right] \cdot 1000 \left[\frac{g}{kg} \right]}{16,04 \left[\frac{g}{mol} \right]} \cdot 8,314 \left[\frac{Pa \cdot m^3}{mol \cdot K} \right] \cdot 2.000 [K]}{101.325 [Pa]} \quad (7.18)$$

$$= 32.422 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

$$\Rightarrow V = 32.422 \left[\frac{m^3}{h} \right] \cdot \frac{1}{3600} \left[\frac{h}{s} \right] \cdot 0,02 [s] \quad (7.19)$$

$$= 0,18 [m^3] = 180 [L]$$

7.3. Adsorción II: Metano

7.3.1. Cálculos y resultados

Para el dimensionamiento de una unidad de adsorción por oscilación de presión es necesario determinar el volumen gaseoso y el volumen del adsorbente. Para ello, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$V_{PSA_i} = V_{gas_{PSA_i}} + V_{ads_{PSA_i}} \quad (7.20)$$

Donde:

- V_{PSA_i} : Volumen total de la unidad de PSA_i .
- $V_{gas_{PSA_i}}$: Volumen gaseoso de la unidad de PSA_i .
- $V_{ads_{PSA_i}}$: Volumen adsorbente presente en la unidad de PSA_i .

En primer lugar, se calcula el volumen gaseoso de la unidad de PSA a partir de la expresión descrita en la Ecuación 7.21.

$$V_{gasPSA_i} = Q_{in} \cdot t_{r,i} \quad (7.21)$$

Donde:

- V_{gasPSA_i} : Volumen de la unidad de PSA_i.
- Q_{in} : Flujo volumétrico de entrada al equipo.
- $t_{r,i}$: Tiempo de residencia de unidad de PSA_i.

En este caso, el flujo de entrada al equipo corresponde a $F4$ (Figura 6.7). Como se mencionó anteriormente, para calcular el flujo volumétrico se utiliza la ley de gases ideales con la información descrita en la Tabla 6.3, luego:

$$Q4 = \frac{\frac{F4}{PM_{F4}} \cdot R \cdot T}{P} \quad (7.22)$$

El peso molecular de la mezcla gaseosa presente en $F4$ se calcula ponderando la fracción molar de las especies involucradas en el gas, con su respectivo peso molecular, luego:

$$PM_{F4} = X_{H_2} \cdot PM_{H_2} + X_{CH_4} \cdot PM_{CH_4} + X_{CO_2} \cdot PM_{CO_2} \quad (7.23)$$

$$\begin{aligned} &= 0,967 \cdot 2 \left[\frac{g}{mol} \right] + 0,025 \cdot 16,04 \left[\frac{g}{mol} \right] + 0,0061 \cdot 44,01 \left[\frac{g}{mol} \right] \\ &= 2,61 \left[\frac{g}{mol} \right] \end{aligned} \quad (7.24)$$

El tiempo de residencia de las cuatro unidades de PSA es de 240 [s] por equipo [45]. Luego, se calcula el volumen de cada PSA según la Ecuación 7.21. Por ejemplo, el volumen de las cuatro unidades de PSA del Relleno Sanitario Santa Marta para el año 2025 es:

$$\begin{aligned} Q4 &= \frac{\frac{983 \left[\frac{kg}{h} \right] \cdot 1000 \left[\frac{g}{kg} \right]}{2,61 \left[\frac{g}{mol} \right]} \cdot 8,314 \left[\frac{Pa \cdot m^3}{mol \cdot K} \right] \cdot 303,15 [K]}{1.480.358,3 [Pa]} \\ &= 640,4 \left[\frac{m^3}{h} \right] \end{aligned} \quad (7.25)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow V_{PSA_I} &= 640,4 \left[\frac{m^3}{h} \right] \cdot \frac{1}{3600} \left[\frac{h}{s} \right] \cdot 240 [s] \\ &= 42,69 [m^3] \end{aligned} \quad (7.26)$$

Dado que las cuatro unidades tienen el mismo tiempo de residencia, se cumple que:

$$V_{PSA_I} = V_{PSA_{II}} = V_{PSA_{III}} = V_{PSA_{IV}} = 42,69 [m^3] \quad (7.27)$$

Luego, se procede a calcular el volumen del adsorbente necesario para poder remover el metano de la corriente de hidrógeno. Para ello, se calcula la capacidad de adsorción (n_i^{0*}) de metano en carbón activado, según los parámetros de equilibrio de Langmuir (Tabla 7.1) mediante la expresión descrita en la Ecuación 7.28 [45].

$$n_i^{0*} = \frac{m \cdot b_i \cdot P}{1 + b_i \cdot P}; \quad b_i = b_i^0 \cdot \exp\left[\frac{q_i^0}{R \cdot T}\right] \quad (7.28)$$

Tabla 7.1: Parámetros de equilibrio de Langmuir para el carbón activado [45].

Gas	m [mol/kg]	b_i^0 [1/atm]	q_i^0 [kcal/mol]
Metano	3,24	0,000432	3,984

A partir de la Ecuación 7.28 y la información descrita en las Tablas 6.3 y 7.1 se calcula la capacidad de adsorción del adsorbente, luego:

$$n_i^{0*} = 2,67 \left[\frac{\text{mol } CH_4 \text{ adsorbido}}{\text{kg } CA} \right] \quad (7.29)$$

Luego, la masa y volumen de carbón activado necesario para remover el metano se calcula según las siguientes expresiones:

$$M_{CA_i} = \frac{\dot{n}_7 \cdot \tau_{r,i}}{n_i^{0*}} \quad (7.30)$$

$$\Rightarrow V_{ads_{PSA_i}} = \frac{M_{CA_i}}{\rho_{aparente_{CA}}} \quad (7.31)$$

Luego, se calcula el volumen de adsorbente para cada PSA según la Ecuación 7.31. Por ejemplo, el volumen de adsorbente de las cuatro unidades de PSA del Relleno Sanitario Santa Marta para el año 2025 es:

$$\begin{aligned} \dot{n}_7 &= \frac{F7_{CH_4}}{PM_{CH_4}} + \frac{F7_{CO_2}}{PM_{CO_2}} + \frac{F7_{H_2}}{PM_{H_2}} \quad (7.32) \\ &= \frac{153 \left[\frac{kg}{h} \right] \cdot 1000 \left[\frac{g}{kg} \right]}{16,04 \left[\frac{g}{mol} \right]} + \frac{102 \left[\frac{kg}{h} \right] \cdot 1000 \left[\frac{g}{kg} \right]}{44,01 \left[\frac{g}{mol} \right]} + \frac{0,073 \left[\frac{kg}{h} \right] \cdot 1000 \left[\frac{g}{kg} \right]}{2 \left[\frac{g}{mol} \right]} \\ &= 11.906 \left[\frac{mol}{h} \right] \end{aligned}$$

$$\Rightarrow M_{CA} = \frac{11.906 \left[\frac{mol}{h} \right] \cdot \frac{1}{3600} \left[\frac{h}{s} \right] \cdot 240 [s]}{2,67 \left[\frac{mol}{kg CA} \right]} \quad (7.33)$$

$$\begin{aligned} &= 297 [kg] \\ \Rightarrow V_{ads_{PSA_I}} &= \frac{297 [kg]}{481 \left[\frac{kg}{m^3} \right]} \quad (7.34) \\ &= 0,62 [m^3] \end{aligned}$$

Debido a que las cuatro unidades tienen el mismo tiempo de residencia, se cumple que:

$$V_{ads_{PSA_I}} = V_{ads_{PSA_{II}}} = V_{ads_{PSA_{III}}} = V_{ads_{PSA_{IV}}} = 0,88 [m^3] \quad (7.35)$$

Finalmente, el volumen total de cada unidad de PSA corresponde a:

$$V_{PSA_i} = 42,69 [m^3] + 0,62 [m^3] = 43,31 [m^3] \quad (7.36)$$

7.4. Resultados por relleno sanitario

Como se mencionó previamente, se dimensionaron los equipos para cada año según el sitio de disposición final. Sin embargo, no es conveniente tanto económicamente como técnicamente instalar un nuevo equipo cada año que se adecúe al volumen dimensionado para dicho año. Es por esto, que para realizar la evaluación técnica, económica y ambiental se opta por seleccionar el equipo de mayor volumen para cada relleno sanitario.

A continuación se presentan los resultados del dimensionamiento de los equipos para los tres rellenos sanitarios. En particular, se muestran los resultados de volumen mínimo y máximo para visualizar la diferencia entre ambos equipos.

7.4.1. Relleno Sanitario Loma Los Colorados

En la Tabla 7.2 se muestra el resumen de las dimensiones de todos los equipos del proceso para el Relleno Sanitario Loma Los Colorados. El volumen máximo se alcanza en el año 2042 y el mínimo en el año 2022.

Tabla 7.2: Resumen dimensionamiento de equipos para el RSLLC.

Etapa	Equipo	$Volumen_{max}$ [m ³]	$Volumen_{min}$ [m ³]
Adsorción I	PSA _I	614,15	351,43
	PSA _{II}	414,96	237,46
Pirólisis de metano	Reactor	0,40	0,23
Adsorción II	PSA _I	97,09	55,56
	PSA _{II}	97,09	55,56
	PSA _{III}	97,09	55,56
	PSA _{IV}	97,09	55,56

7.4.2. Relleno Sanitario Santa Marta

En la Tabla 7.3 se muestra el resumen de las dimensiones de todos los equipos del procesos para el Relleno Sanitario Santa Marta. En este caso, el volumen máximo se alcanza en el año 2036 y el volumen mínimo en el año 2022.

Tabla 7.3: Resumen dimensionamiento de equipos para el RSSM.

Etapa	Equipo	$Volumen_{max}$ [m ³]	$Volumen_{min}$ [m ³]
Adsorción I	PSA _I	449,89	303,98
	PSA _{II}	243,25	164,36
Pirólisis de metano	Reactor	0,30	0,16
Adsorción II	PSA _I	71,13	38,46
	PSA _{II}	71,13	38,46
	PSA _{III}	71,13	38,46
	PSA _{IV}	71,13	38,46

7.4.3. Relleno Sanitario Santiago Poniente

En la Tabla 7.4 se muestra el resumen de las dimensiones de todos los equipos del procesos para el Relleno Sanitario Santiago Poniente. El volumen máximo se logran en el año 2025 y el volumen mínimo en el año 2042.

Tabla 7.4: Resumen dimensionamiento de equipos para el RSSP.

Etapa	Equipo	$Volumen_{max}$ [m ³]	$Volumen_{min}$ [m ³]
Adsorción I	PSA _I	62,74	40,33
	PSA _{II}	42,39	27,25
Pirólisis de metano	Reactor	0,03	0,03
Adsorción II	PSA _I	9,92	6,38
	PSA _{II}	9,92	6,38
	PSA _{III}	9,92	6,38
	PSA _{IV}	9,92	6,38

7.5. Discusiones

Las unidades de PSA son equipos utilizados comúnmente en la industria para purificar gases, incluyendo al biogás e hidrógeno, por lo que la selección del equipo es apropiada para los procesos de adsorción.

En cuanto a las dimensiones obtenidas de las unidades de PSA para las etapas de adsorción I y II, se puede mencionar que presentan un tamaño adecuado de acuerdo a la magnitud del flujo tratado y que es posible encontrar un equipos de dicha capacidad en catálogos

industriales.

En contraste, el volumen obtenido para los reactores de pirólisis de metano tiene dimensiones de escala de laboratorio, esto se debe principalmente al tiempo de residencia de la reacción al utilizar la antorcha de plasma. Para mejorar el dimensionamiento, se sugiere utilizar la ecuación de diseño de reactores de flujo pistón y estudiar la constante cinética de la reacción.

Capítulo 8

Evaluación ambiental

En este capítulo se aborda la evaluación ambiental de los dos procesos de generación de electricidad a partir de biogás: el primero de forma directa y el segundo, utilizando hidrógeno como intermediario. Para ello, se seleccionan dos categorías de impacto: Potencial de calentamiento global (PCG) y Potencial de toxicidad humana (PTH). Para facilitar la comprensión se denominará caso base (CB) al proceso directo y alternativa 1 a la producción de electricidad utilizando hidrógeno como intermediario. El detalle de los cálculos se encuentra en el Anexo C.

8.1. Aspectos generales

Para realizar la evaluación ambiental se requiere analizar todos los compuestos presentes en el biogás, incluidas las trazas, debido a su toxicidad. En la Tabla 8.1 se presentan los contaminantes presentes en el biogás, calculados por el Modelo LandGEM.

Tabla 8.1: Compuestos presentes en el biogás y categoría de impacto correspondiente.

Compuesto	Categoría de impacto	Compuesto	Categoría de impacto	Compuesto	Categoría de impacto
Metano	PCG	Monóxido de carbono	PTH	Dibromuro de etileno	No
Dióxido de carbono	PCG	Tetracloruro de carbono	PCG	Fluorotriclorometano	PCG
Compuestos orgánicos volátiles no metano	No	Sulfuro de carbonilo	No	Hexano	No
1,1,1-Tricloroetano (metil cloroformo)	PCG - PTH	Clorobenceno	PTH	Sulfuro de hidrógeno	PTH
1,1,2,2-Tetracloroetano	No	Clorodifluorometano	PCG	Mercurio (total)	PTH
1,1-Dicloroetano (dicloruro de etilideno)	No	Cloroetano (cloruro de etilo)	No	Metiletacetona	No
1,1-Dicloroetano (cloruro de vinilideno)	No	Cloroformo	No	Metilisobutilcetona	No
1,2-Dicloroetano (dicloruro de etileno)	No	Clorometano	PCG	Metil mercaptano	No
1,2-Dicloropropano (dicloruro de propileno)	No	Diclorobenceno	PTH	Pentano	No
2-Propanol (alcohol isopropílico)	No	Diclorodifluorometano	PCG	Percloroetileno (tetracloroetileno)	PTH
Acetona	No	Diclorofluorometano	PTH	Propano	No
Acilonitrilo	PTH	Diclorometano (cloruro de metileno)	PCG	t-1,2-Dicloroetano	PTH
Benceno - Sin disposición conjunta o desconocida	PTH	Sulfuro de dimetilo (sulfuro de metilo)	No	Tolueno - Sin disposición conjunta o desconocida	PTH
Benceno - disposición conjunta	PTH	Etano	No	Tolueno - Disposición conjunta	PTH
Bromodiclorometano	No	Etanol	No	Tricloroetileno (tricloroetano)	PTH
Butano	No	Etil mercaptano (etanotiol)	No	Cloruro de vinilo	PTH
Disulfuro de carbono	PTH	Etilbenceno	PTH	Xilenos	No

En líneas generales la evaluación contempla cuantificar las emisiones de ambas alternativas desde que ingresa el residuo en el relleno sanitario hasta la producción de electricidad. Para ello, se cuantifican los gases de salida en cada operación unitaria de cada proceso y la energía requerida para llevarlo a cabo.

Se toma como principal supuesto que todos los contaminantes producidos en la digestión anaeróbica son liberados en los gases de escape del motor de combustión interna y en la adsorción de dióxido de carbono, para el caso base y alternativa 1, respectivamente.

8.2. Potencial de calentamiento global

El potencial de calentamiento global se define como el forzamiento radiativo acumulativo, en un horizonte de tiempo específico que resulta de la emisión de una unidad de masa de gas relacionada con el dióxido de carbono (gas de referencia) [50].

En la Tabla 8.2 se muestran los factores de potencial de calentamiento global de los gases presentes en el biogás [51]. Asimismo, para el año 2018, el factor de emisiones de gases de efecto invernadero del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) es 0,4187 [$t CO_{2,eq}/MWh$] [52].

Tabla 8.2: Factores de PCG para la caracterización de emisiones de gases de efecto invernadero.

Compuesto	PCG _{100 años} [$t CO_{2,eq}/t gas$]
Methane	25
Carbon dioxide	1
Trichloroethane	146
Carbon tetrachloride	1.400
Chlorodifluoromethane	1.810
Chloromethane	13
Dichlorodifluoromethane	10.900
Dichloromethane	8,7
Fluorotrichloromethane	4.750

Para determinar las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al caso base se toma como supuesto que la combustión completa de biogás y la conversión de la reacción es 1, obteniendo como productos dióxido de carbono y vapor de agua.

En cuanto a las emisiones asociadas a la alternativa 1, se consideran los flujos máxicos de salida y el requerimiento energético de la antorcha de plasma. Para determinar este último, se toma como referencia los resultados obtenidos en el estudio de FINCKE ET. AL. (2002), que determina que la energía requerida para lograr la descomposición de metano con la antorcha de plasma es 1,2 [MWh/Nm^3 de H_2] [49].

En la Figura 8.1 se muestra comparación de ambas alternativas según el potencial de calentamiento global, y en la Tabla 8.3 se presenta el factor de PCG por megawatt-hora para el Relleno Sanitario Santa Marta para el horizonte de evaluación.

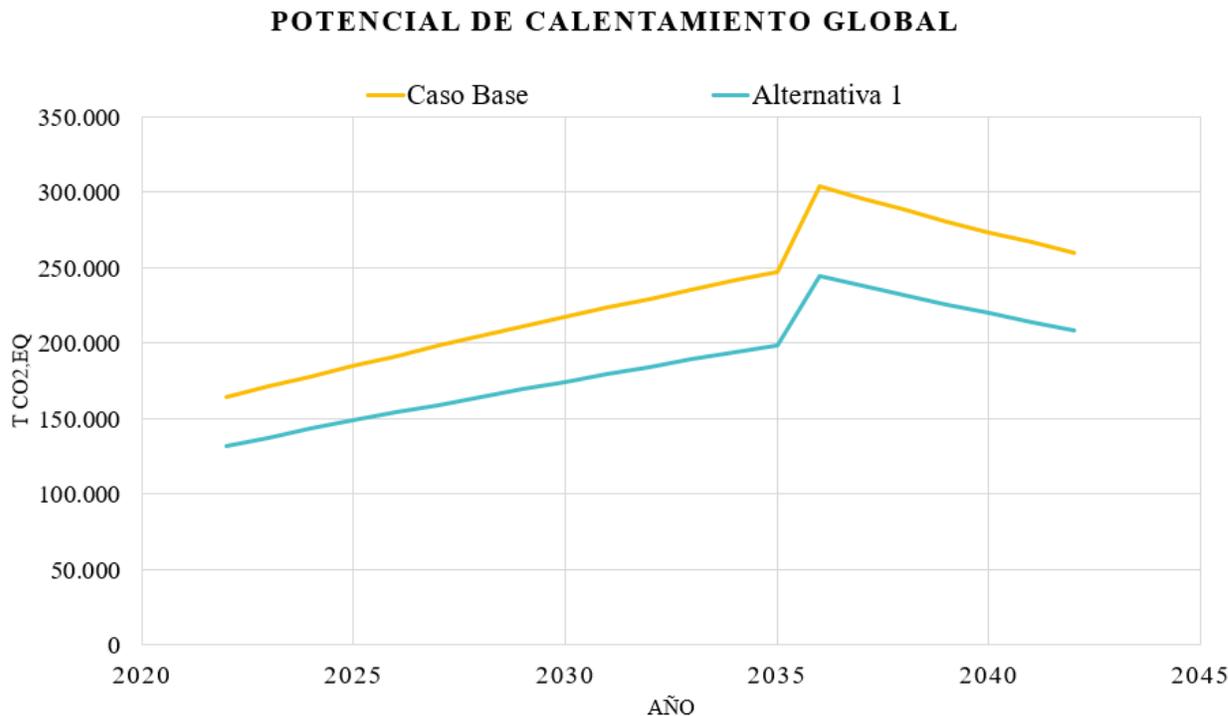


Figura 8.1: Comparación de ambas alternativas según la categoría de impacto PCG para el RSSM. Elaboración propia.

Tabla 8.3: Emisiones de gases de efecto invernadero por Megawatt-hora según el proceso evaluado.

Proceso	$\frac{t CO_{2,eq}}{MWh}$
Caso Base	1,14
Alternativa 1	0,8
Matriz eléctrica chilena	0,42

De acuerdo a lo presentado en la Figura 8.1, las emisiones de $CO_{2,eq}$ del caso base son superiores a las de la alternativa 1. Lo anterior se debe principalmente al dióxido de carbono producido en la reacción de combustión, comprendiendo alrededor del 67% de las emisiones.

Por otro lado, para la alternativa 1 el 25% de las emisiones $CO_{2,eq}$ es consecuencia de la producción de hidrógeno, en particular por liberación del metano que no reaccionó. En este caso, el dióxido de carbono proveniente de la digestión anaeróbica es liberado en la primera unidad de PSA.

En cuanto a los contaminantes, a pesar de que la composición másica del gas diclorodifluorometano es de 0,0071%, al tener un índice de PCG alto (Tabla 8.2), dicho gas comprende gran parte de las emisiones de efecto invernadero, representando un 32% y

40 % del total de emisiones para el caso base y alternativa 1, respectivamente.

Ahora bien, la energía producida por ambos procesos al ser inyectada a la red eléctrica, evita la producción dicha energía por los métodos convencionales, evitando así, sus emisiones. Por ejemplo, al inyectar 1 MW producido a partir de biogás a la red, se previene la producción de 1MW a partir de combustibles fósiles.

En la Figura 8.2 se presenta comparación de ambas alternativas según el potencial de calentamiento global, luego de descontar las emisiones de generación de energía evitadas por producir energía con dichas alternativas. Los resultados presentados corresponden al Relleno Sanitario Santa Marta para el horizonte de evaluación.

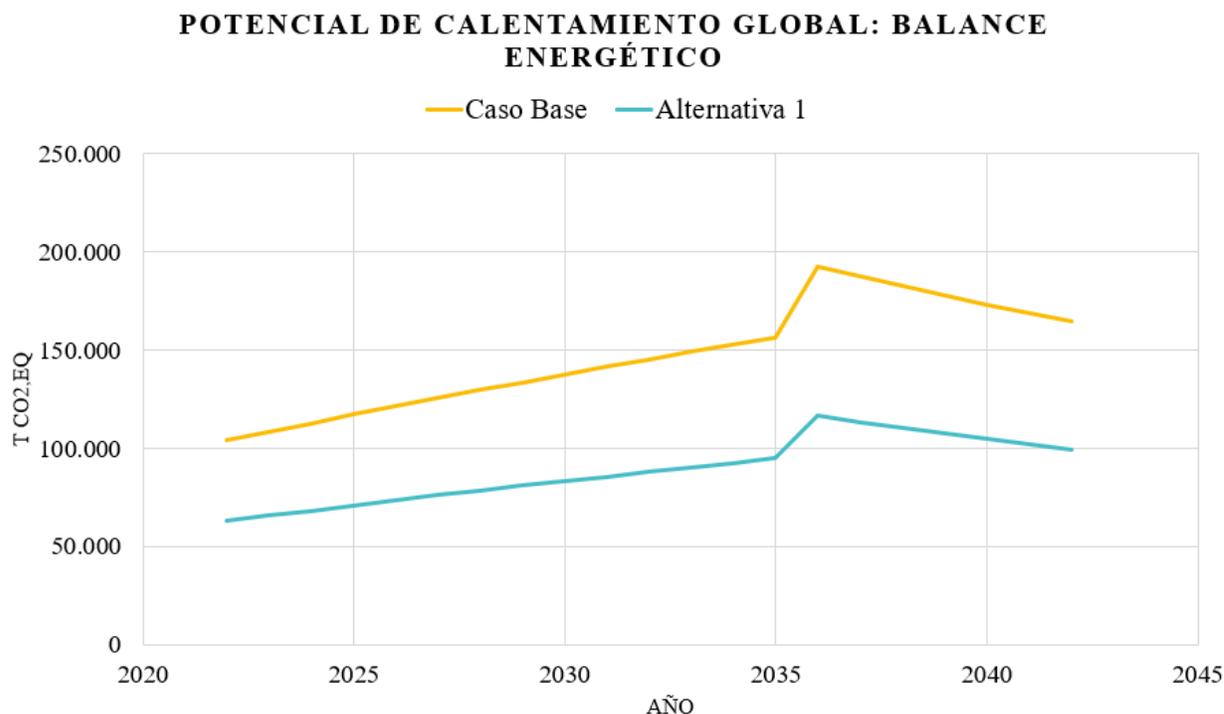


Figura 8.2: Comparación de ambas alternativas según la categoría de impacto PCG para el RSSM descontando las emisiones evitadas. Elaboración propia.

De acuerdo a lo presentado en la Figura 8.2, debido a que la unidad energética de la alternativa 1 es superior a la del caso base, es decir, que la energía producida por flujo volumétrico de biogás es mayor, la brecha entre ambas curvas aumenta.

8.3. Potencial de toxicidad humana

El potencial de toxicidad humana cuantifica los impactos, en un horizonte de tiempo específico, de las sustancias tóxicas presentes en el ambiente sobre la salud humana. Esta categoría de impacto utiliza como gas de referencia el 1,4-diclorobenceno [53].

En la Tabla 8.2 se presentan los factores de toxicidad humana de los gases presentes en el biogás y producidos en la combustión [53, 54]. Asimismo, para el año 2014, el factor de toxicidad humana de la generación de electricidad según la matriz eléctrica nacional es 0,180 [$t\ 1,4 - DCB_{eq}/MWh$] [55].

Tabla 8.4: Factores para la caracterización de emisiones de gases de toxicidad humana.

Compuesto	PTH_{100 años} <i>[t 1,4 - DCB_{eq}/t gas]</i>
1,1,1-Tricloroetano	16
Acrilonitrilo	3,400
Benceno	1,900
Disulfuro de carbono	2,40
Monóxido de carbono	0,01
Clorobenceno	9,20
Diclorobenceno	9,10
Diclorometano	2,00
Etilbenceno	0,97
Sulfuro de hidrógeno	0,22
Mercurio	260
Percloroetileno	5,50
t-1,2-dicloroetano	6,80
Tolueno	0,33
Tricloroetileno	34
Cloruro de vinilo	84
MP10	0,82
NO _x	1,20
SO _x	0,10
Amoníaco	0,10

Para cuantificar las emisiones de gases de toxicidad humana asociadas al caso base, se consideran los flujos máxicos de los gases de salida del motor, que para el PTH corresponden a $MP10$, CO , SO_x , NO_x y NH_3 . Para ello, se utilizan los factores de emisión de emisiones gaseosas para grupos electrógenos y motores industriales usando el gas natural como combustible [56].

Para determinar las emisiones de gases de toxicidad humana asociadas a la alternativa 1, se toman los mismos supuestos descritos para el PCG para calcular el requerimiento energético de la antorcha de plasma.

En la Figura 8.3 se muestra comparación de ambas alternativas según el potencial de toxicidad humana, y en la Tabla 8.5 se presenta el factor de PTH por megawatt-hora, para el Relleno Sanitario Santa Marta para el horizonte de evaluación.

POTENCIAL DE TOXICIDAD HUMANA

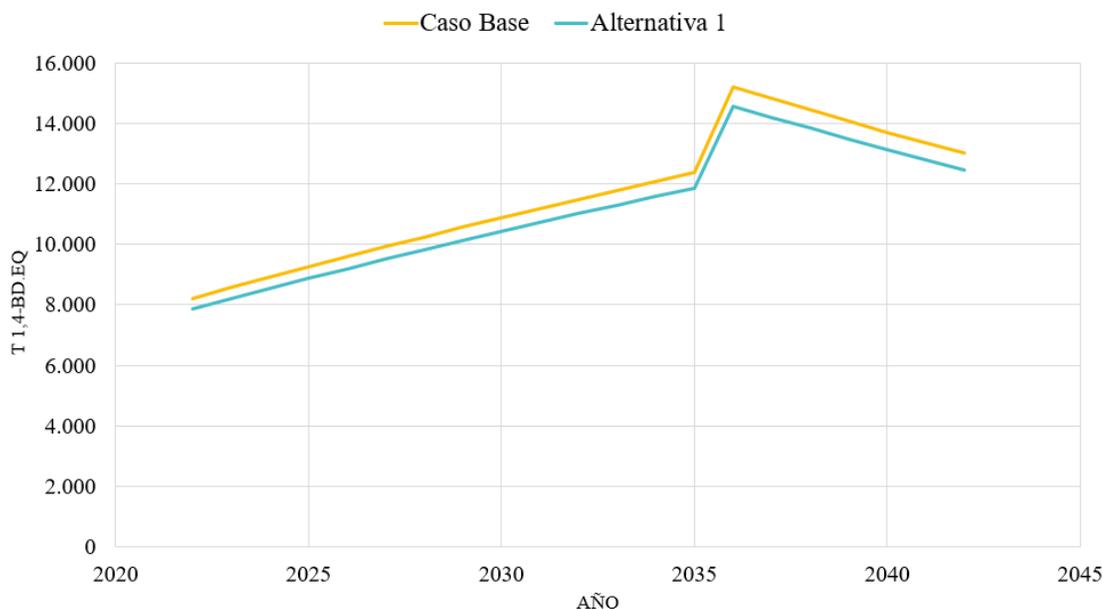


Figura 8.3: Comparación de ambas alternativas según la categoría de impacto PTH para el RSSM. Elaboración propia.

Tabla 8.5: Emisiones de gases de toxicidad humana por Megawatt-hora según el proceso evaluado.

Proceso	$\frac{t_{1,4-DCB_{eq}}}{MWh}$
Caso Base	0,06
Alternativa 1	0,05
Matriz eléctrica chilena	0,18

Según lo expuesto en la Figura 8.3, las emisiones de $1,4 - DCB_{eq}$ de ambas alternativas son similares, siendo sutilmente superiores las emisiones del caso base. Esta diferencia se debe a los gases producidos en la combustión que no genera la alternativa 1.

En cuanto a la alternativa 1, la mayoría de las emisiones provienen del proceso de digestión anaeróbica y las únicas emisiones de $1,4 - DCB_{eq}$ asociadas a la producción de hidrógeno es la electricidad, que tan solo representa el 1 % del total.

En este caso, el contaminante que abarca gran parte de las emisiones de toxicidad humana es el benceno, representando un 58 % y 61 % del total de emisiones para el caso base y alternativa 1, respectivamente.

Análogamente al potencial de calentamiento global, en la Figura 8.4 se presenta comparación de ambas alternativas según el potencial de toxicidad humana, luego de descontar las emisiones de generación de energía evitadas por producir energía con dichas alternativas. Los resultados presentados corresponden al Relleno Sanitario Santa Marta para el horizonte de evaluación.

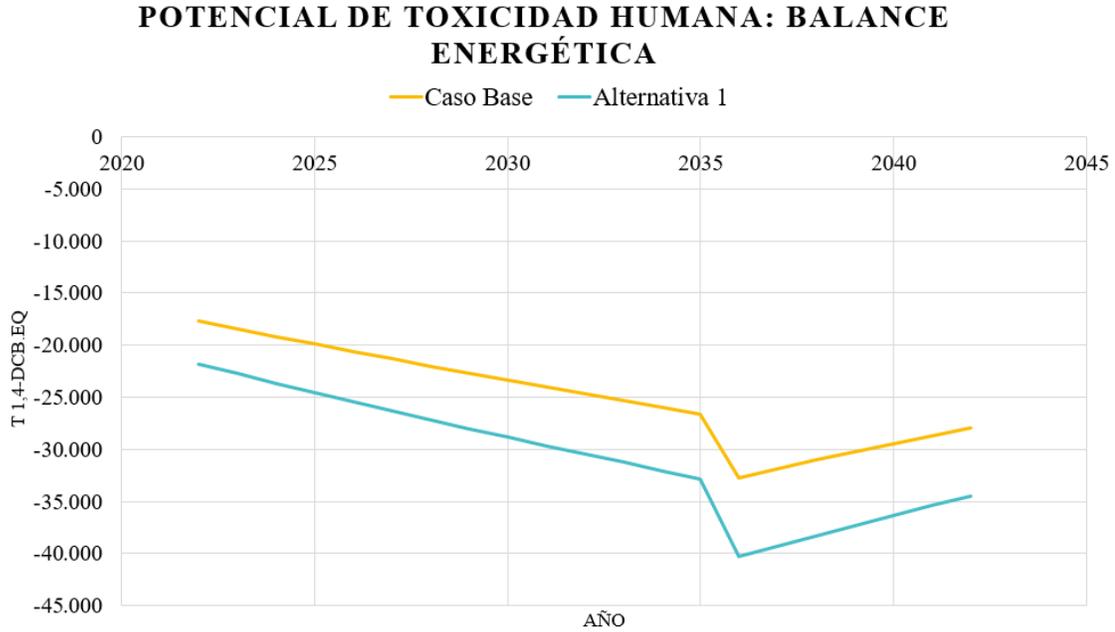


Figura 8.4: Comparación de ambas alternativas según la categoría de impacto PTH para el RSSM descontando las emisiones evitadas. Elaboración propia.

Según lo presentado en la Figura 8.2, al igual en que el potencial de calentamiento global, la brecha entre ambas curvas aumenta debido a que la unidad energética de la alternativa 1 es superior a la del caso base.

Por otro lado, debido a que las emisiones de $1,4 - DCB_{eq}$ por MWh del caso base y la alternativa 1 son considerablemente inferiores a las emisiones de la matriz eléctrica chilena, al realizar el balance energético se obtienen emisiones de $1,4 - DCB_{eq}$ negativas.

8.4. Discusiones

La mayoría de las emisiones provienen de la descomposición anaeróbica de los residuos orgánicos, por lo que implementar proyectos de aprovechamiento energético contribuyen a la reducción de las emisiones.

Ahora bien, al comparar los resultados obtenidos para las dos categorías de impacto estudiadas, se puede decir que la alternativa 1 genera menores emisiones que el caso base, reduciendo en un 86 % y 24 % las emisiones generadas por el relleno sanitario para el potencial de calentamiento global y el potencial de toxicidad humana, respectivamente, mientras que el caso base reduce en un 82 % y 21 %, respectivamente.

A pesar de que la producción de hidrógeno mediante pirólisis de biogás no es un proceso libre de emisiones, si contribuye a la disminución de contaminantes, luego, es una tecnología potencial para sustituir las formas de energía actuales.

Capítulo 9

Evaluación económica

En este capítulo se aborda la evaluación económica del proyecto. Se detallan los costos de inversión y los costos de operación del caso base y la alternativa 1. El desglose de los cálculos se encuentra en el Anexo D.

9.1. Estimación de costos de inversión (CAPEX)

Los costos de inversión (Capital Expenditures, CAPEX), corresponden a los costos requeridos para la instalación del proyecto. A continuación, se detallan los costos asociados a la implementación del caso base y la alternativa 1.

9.1.1. Caso Base

Para determinar los costos de inversión del caso base se utiliza la metodología presentada en la herramienta “LFGcost-Web – Landfil Gas Energy Cost Model” elaborada por la Agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA), dichas estimaciones tienen una precisión del $\pm 30\%$ [57].

Los costos de inversión incluyen los costos de capital y mano de obra para comprar e instalar todo el equipo necesario para tratar el gas y generar electricidad. Los componentes típicos para la generación de electricidad a partir de motores de combustión interna incluyen:

- Compresión y tratamiento de gases (incluye equipos de deshidratación y filtración).
- Motor y generador (incluye controlador de motor, interruptores, radiadores, silenciadores de escape, cableado y la plomería).
- Equipos de interconexión eléctrica.
- Mano de obra, obras civiles, servicios públicos, ingeniería, diseño de instalaciones y permisos.

En la Tabla 9.1 se presentan los costos de inversión para el caso base y en la Tabla 9.2 se exponen los resultados del CAPEX para el RSLLC, RSSM y RSSP.

Tabla 9.1: Costos de inversión para el caso base.

Costo	Valor	Unidad
Equipos de compresión, tratamiento de biogás y obras civiles	1.100.000	[USD]
Interconexión eléctrica	250.000	[USD]
Motor de combustión interna	1.300	[USD/kW]

Tabla 9.2: Costos de inversión para el caso base por relleno sanitario.

Relleno Sanitario	Valor	Unidad
RSLLC	53.922	[kUSD]
RSSM	35.696	[kUSD]
RSSP	6.069	[kUSD]

9.1.2. Alternativa 1

La estimación de los costos de inversión de la alternativa 1 se realiza según las segun las indicaciones de la guía “Plant design and economics for chemical engineers” [58]. Asimismo, la proyección de los costos directos e indirectos se realiza en base a la proyección de costos de los equipos, dichas estimaciones tienen una precisión del $\pm 30\%$.

En la Tabla 9.7 se muestran el rango típico de los costos de inversión directos e indirectos junto al porcentaje seleccionado. Se utiliza el porcentaje sugerido por la guía para el tipo de planta de procesos y equipos utilizados.

Tabla 9.3: Costos de inversión directos e indirectos.

Item	Rango	%
Costos Directos		
Equipos	15-40 %	30,00 %
Instalación de equipos	6-14 %	6,00 %
Instrumentación y control	2-8 %	3,00 %
Piping	3-20 %	7,00 %
Instalación eléctrica	2-10 %	3,00 %
Construcciones	3-18 %	11,00 %
Mejoras de terreno	2-5 %	2,00 %
Instalaciones de servicios	8-20 %	10,00 %
Terreno	1-2 %	1,00 %
Costos Indirectos		
Ingeniería y supervisión	4-21 %	8 %
Gastos de construcción	4-16 %	10 %
Honorarios de contratistas	2-6 %	2 %
Contingencia	5-15 %	7 %
TOTAL	-	100,0 %

La Tabla 9.4 expone la cotización de los equipos para el RSSM, con los cuales se realiza la proyección de los costos directos e indirectos del relleno.

Tabla 9.4: Costos de equipos e insumos para la alternativa 1.

Equipo	Valor	Unidad
PSA I	\$ 151	[kUSD]
Zeolita 5A	\$ 100	[kUSD]
Reactor de pirólisis	\$ 1,60	[kUSD]
Antorcha de plasma	\$ 646	[kUSD]
PSA II	\$ 24	[kUSD]
Carbón activado	\$ 0,50	[kUSD]
Fuel Cells	\$ 21.232	[kUSD]
Total	\$ 22.155	[kUSD]

Luego, se calculan los costos presentados en la Tabla 9.7 para el RSSM, repitiendo el procedimiento para el resto de los rellenos sanitarios. En la Tabla 9.7 se presentan los costos de inversión para la alternativa 1 para el RSLLC, RSSM y RSSP.

Tabla 9.5: Costos de inversión para la alternativa 1 por relleno sanitario.

Relleno Sanitario	Valor	Unidad
RSLLC	106.568	[kUSD]
RSSM	73.851	[kUSD]
RSSP	14.080	[kUSD]

9.2. Estimación de costos de operación (OPEX)

Los costos operacionales (Operational Expenditures, OPEX), son los costos asociados a la puesta en marcha y operación del proceso. A continuación, se detallan los costos de operación del caso base y la alternativa 1.

9.2.1. Caso Base

La proyección de los costos de operación y mantenimiento se realiza a partir de las recomendaciones de la EPA. En la Tabla 9.6 se presentan los costos típicos de operación y mantenimiento anual para el caso base.

Tabla 9.6: Costos de operación y mantenimiento para el caso base.

Costo	Valor	Unidad
Operación y mantenimiento de motores	0,025	[USD/kWh generado al año]
Consumo eléctrico compresión y tratamiento	0,011	[USD/kWh generado al año]

En la Tabla 9.7 se presentan los costos de operación para el caso base para el RSLLC,

RSSM y RSSP.

Tabla 9.7: Costos de inversión para la alternativa 1 por relleno sanitario.

Relleno Sanitario	Valor	Unidad
RSLLC	12.576	[kUSD/año]
RSSM	8.216	[kUSD/año]
RSSP	1.129	[kUSD/año]

9.2.2. Alternativa 1

La proyección de los costos de inversión de la alternativa 1 se realiza según las indicaciones de la guía “Plant design and economics for chemical engineers” [58]. En la Tabla 9.8 se presentan los costos de operación variables y fijos, y cómo se estiman.

Tabla 9.8: Costos de operación variables y fijos.

Item	Origen
Costos variables	
Materias primas	Cálculo
Insumos	Cálculo
Servicios	Cálculo
Mano de obra de operaciones (MOOP)	20 % OPEX
Supervisión directa	25 % MOOP
Mantenimiento	10 % CAPEX
Cargos de laboratorio	20 % MOOP
Costos fijos	
Depreciación	10 % del CAPEX
Impuestos	4 % del CAPEX
Seguros	1 % CAPEX
TOTAL	Cálculo

Para estimar los servicios se considera que el consumo eléctrico en Chile tiene un costo de 0,15 [USD/kWh]. En la Tabla 9.9 se detalla el consumo anual de los equipos para la producción de hidrógeno.

Tabla 9.9: Consumo eléctricos equipos alternativa 1.

Equipo	Consumo total [MWh/año]	Consumo total [kUSD/año]
PSA I	1.752	\$ 262
Reactor	1.051	\$ 157
Antorcha de plasma	5.007	\$ 751
PSA II	8.760	\$ 1,314
Total	16.570	2.485

La Tabla 9.10 expone los resultados del cálculo de los costos de operación para la alternativa 1 para cada relleno sanitario: RSLLC, RSSM y RSSP.

Tabla 9.10: Costos de operación para la alternativa 1 por relleno sanitario.

Relleno Sanitario	Valor	Unidad
RSLLC	41.218	[kUSD/año]
RSSM	29.228	[kUSD/año]
RSSP	6.595	[kUSD/año]

9.3. Discusiones

La diferencia entre ambas alternativas para el CAPEX es significativa, los resultando arrojan que la alternativa 1 tienen costos de inversión que duplican los costos del caso base, luego, conviene económicamente el caso base.

Los altos costos de inversión de la alternativa 1 se deben principalmente a las *fuel cells*, contemplan alrededor del 30 % de la inversión. Para reducir los costos se propone cambiar el método de producción de energía eléctrica, reemplazando las *fuel cells* por turbinas de hidrógeno. Actualmente, las turbinas de gas utilizan mezclas de gas natural-hidrógeno, sin embargo, la empresa Siemens Energy está desarrollando en la fabricación de turbinas de 100 % hidrógeno que esperan lanzar al mercado para el año 2030.

En cuanto a los costos operacionales, el caso base tiene menores que la alternativa 1. Los altos costos de operación se deben al consumo eléctrico de los equipos. Cabe destacar que el consumo eléctrico de las unidades de PSA se obtuvo de la ficha técnica de un equipo industrial que opera a un flujo entre 500-1.000 [m^3/h], sin embargo, al implementar las unidades de PSA apropiadas para cada relleno, el consumo debiese variar.

Para aumentar el margen de ganancias de la alternativa 1 se recomienda realizar un estudio de mercado para la venta del carbón sólido y del hidrógeno.

Capítulo 10

Conclusiones

La base de la evaluación del trabajo de título es la estimación del potencial de generación de biogás, por lo tanto, es importante contar con información actualizada de la caracterización del relleno sanitario a analizar y de la población atendida, para que los resultados sean representativos.

En cuanto a la estimación del potencial eléctrico, se obtiene una unidad energética de 2,40 $\left[\frac{kWh}{m^3 \text{ de biogás}}\right]$ y 2,75 $\left[\frac{kWh}{m^3 \text{ de biogás}}\right]$ para el caso base y alternativa 1, respectivamente. Luego, es conveniente energéticamente utilizar hidrógeno como intermediario para producir energía eléctrica, en comparación al uso directo en un motor de combustión interna, que es el proceso más utilizado en la actualidad.

En relación a la tecnología seleccionada para producir hidrógeno, se escoge la descomposición térmica del plasma debido a que ha alcanzado un nivel de maduración tecnológica superior al resto de las categorías, llegando a la construcción de una planta de producción. No obstante, los costos de adquisición de la antorcha de plasma y de operación son altos, por lo que se debe optimizar el uso energético del sistema. Una alternativa que se recomienda analizar es utilizar una parte del hidrógeno producido para calentar la antorcha.

En cuanto al dimensionamiento, el tamaño obtenido para las unidades de PSA se ajusta a equipos de dicha capacidad en catálogos industriales. En contraste, el dimensionamiento del reactor que es considerablemente menor, debido al tiempo de residencia teórico utilizado (0,02 segundos). En consecuencia, es relevante que en etapas posteriores se evalúe la viabilidad de que 0,02 segundos sea suficiente para que se lleve a cabo la reacción.

En relación a los resultados de la evaluación ambiental, se desprende que la mayoría de las emisiones provienen de la descomposición de los residuos orgánicos por lo que ambas alternativas de aprovechamiento energético ayudan a la reducción de emisiones. Al comparar ambas alternativas, se obtiene que la alternativa 1 produce menores emisiones por energía generada, específicamente para el potencial de calentamiento global y potencial de toxicidad humana produce 0,08 $[t \text{ CO}_{2,eq}/MWh]$ y 0,05 $[t \text{ 1,4-DCB}_{eq}/MWh]$, respectivamente, en comparación al caso base que produce 1,14 $[t \text{ CO}_{2,eq}/MWh]$ y 0,06 $[t \text{ 1,4-DCB}_{eq}/MWh]$ para el PCG y PTH, respectivamente.

En cuanto a los resultados de la evaluación económica, los costos de inversión y de operación del caso base son significativamente menores que los costos de la alternativa 1. Esto se debe a que los motores de combustión internos son equipos utilizados comúnmente en la industria para producir electricidad. En cambio, actualmente las *fuel cells* son equipos costosos en el mercado, es por esto que se propone evaluar la factibilidad de utilizar turbinas de hidrógeno para producir electricidad.

Cabe destacar que una ventaja de la pirólisis de biogás que no fue estudiada en el trabajo es que la generación de biogás no se limita solo a rellenos sanitarios, también se puede obtener de los residuos orgánicos de lecherías, agricultura, sanitarias, entre otros.

Finalmente, pese a que la producción de hidrógeno mediante pirólisis de biogás no es un proceso libre de emisiones, sí contribuye a la reducción de las emisiones de los rellenos sanitarios y tiene mayor potencial eléctrico que el método utilizado actualmente. Luego, los resultados obtenidos apuntan a que es una tecnología con un potencial más atractivo que el caso base para sustituir las formas de energía actuales y es necesario que continúe la investigación del proceso para reducir los costos y para lograr la madurez comercial de dicha tecnología.

Bibliografía

- [1] ROLANDO CHAMY & ELBA VIVANCO. 2007. *Identificación y clasificación de los distintos tipos de biomasa disponibles en Chile para la generación de biogás*. Chile. 82p.
- [2] MINISTERIO DE ENERGÍA. 2019. *Tecnologías del hidrógeno y perspectivas para Chile*. 135p.
- [3] ASOCIACIÓN CHILENA DE HIDRÓGENO. 2021. *Producción de Hidrógeno* [en línea] <www.h2chile.cl/produccion-del-h2> [Consulta: 24 de mayo 2021]
- [4] MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. 2019. *Quinto Reporte del Estado del Medio Ambiente - 2019*. 269p.
- [5] SEREMI DEL MEDIO AMBIENTE DE LA REGIÓN METROPOLITANA. 2018. *Informe rellenos sanitarios - residuos sólidos urbanos en la RM - 2017*. 21p.
- [6] CHILE. Ministerio de Salud. 2005. *Decreto Supremo 189: Aprueba reglamento sobre condiciones sanitarias y de seguridad básicas en los rellenos sanitarios*, 18 de agosto de 2005. 17p.
- [7] DANIEL ÁLVARO LÓPEZ ARRIAZA 2016. *Modelo para el diseño de sistemas de captación y aprovechamiento de biogás producido en rellenos sanitarios*. Memoria para optar título de Ingeniero Civil Mecánico. Santiago. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 169p.
- [8] MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. 2012. *Informe del Estado del Medio Ambiente 2011*. Santiago de Chile. 531p.
- [9] ARTHUR WELLINGER, JERRY MURPHY & DAVID BAXTER. 2013. *The biogas handbook: science, production and applications*. Woodhead Publishing Limited. 508p.
- [10] GEORGE TCHOBANOGLOUS & FRANK KREITH. 2002. *Handbook of Solid Waste Management*. 2da ed, McGraw-Hill. 834p.
- [11] MARÍA TERESA VARNERO. 2011. *Manual de Biogás*. Santiago de Chile. Ministerio de Energía. 120p.
- [12] JENNY MIRANDA. 2018. *Diseño a escala local: equipo domiciliario para el aprovechamiento de residuos*. Memoria para optar título de Ingeniera Civil Química. Santiago. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 369p.
- [13] JOSÉ PABLO GARCÍA ALCALDE. 2019. *Evaluación del potencial de generación de energía eléctrica a partir de biogás producido en rellenos sanitarios en Chile*. Memoria para optar título de Ingeniero Civil Mecánico. Santiago. Universidad Técnica Federico Santa María, Facultad de Ingeniería. 153p.

- [14] VIRGEN AGUILAR. ET AL. 2011. *Modelo mexicano para la estimación de la generación de biogás*. Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán. Vol 15(1): 37-45.
- [15] MINISTERIO DE DESARROLLO SOCIAL Y FAMILIA. 2019. *Región Metropolitana de Santiago: Análisis de proyecciones de población INE período 2015-2035*. 20p.
- [16] GABRIEL BLANCO. ET AL. 2017. *Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: Un análisis teórico-práctico*. Banco Interamericano de Desarrollo. Vol 52.
- [17] ZAINUL ABDIN. ET AL. 2020. *Hydrogen as an energy vector*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol 120: 109620.
- [18] MAX CORREA. ET AL. 2020. *Estrategia Nacional Hidrógeno Verde*. Ministerio de Energía. Santiago. 33p.
- [19] ANTONIO GONZÁLEZ. 2010. *Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno*. Asociación Española del Hidrógeno. 16p.
- [20] PUYUELO NAVARRO. ET AL. 2017. *Rutas y retos para la valorización de biogás*. Avances: Investigación en Ingeniería. Vol 14(1): 211-224.
- [21] IEA. 2014. *Hydrogen Production Distribution* [en línea] <https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/P12_H2_Feb2014_FINAL%203_CRES-2a-GS%20Mz%20GSOK.pdf> [Consulta: 03 de junio 2021]
- [22] RILEY JARRETT. ET AL. 2021. *Technoeconomic analysis for hydrogen and carbon Co-Production via catalytic pyrolysis of methane*. International Journal of Hydrogen Energy. Vol 46(39): 20338-20358.
- [23] STEFAN SCHNEIDER. ET AL. 2020. *State of the art of hydrogen production via pyrolysis of natural gas*. ChemBioEng Rev. Vol 7: 150-158.
- [24] KERSCHER. ET AL. 2021. *Low-carbon hydrogen production via electron beam plasma methane pyrolysis: Techno-economic analysis and carbon footprint assessment*. International Journal of Hydrogen Energy. Vol 46(38): 19897-19912.
- [25] BRANDON LEAL PÉREZ. ET AL. 2021. *Methane pyrolysis in a molten gallium bubble column reactor for sustainable hydrogen production: Proof of concept techno-economic assessment*. International Journal of Hydrogen Energy. Vol 46(7): 4917-4935.
- [26] ALAN MAŠLÁNI. ET AL. 2021. *Pyrolysis of methane via thermal steam plasma for the production of hydrogen and carbon black*. International Journal of Hydrogen Energy. Vol 46(2): 1605-1614.
- [27] AURÉLIO REIS DA COSTA LABANCA. 2007. *desenvolvimento de reator de pirólise a plasma para a decomposição do metano em hidrogênio e carbono sólido*. Tesis para optar título de Doctor en Ciencias en Ingeniería metalúrgica y de Materiales. Rio de Janeiro. Universidad Federal de Rio de Janeiro. 114p.
- [28] UPHAM. ET AL. 2017. *Catalytic molten metals for the direct conversion of methane to hydrogen and separable carbon*. Science. Vol 358(6365): 917-921.
- [29] RILEY JARRETT. ET AL. 2021. *Technoeconomic analysis for hydrogen and carbon Co-Production via catalytic pyrolysis of methane*. International Journal of Hydrogen Energy. Vol 46(39): 20338-20358.

- [30] MALEK MSHEIK. ET AL. 2021. *Methane cracking for hydrogen production: a review of catalytic and molten media pyrolysis*. *Energies*. Vol 14(11): 3107.
- [31] BASF. *Interview Methane Pyrolysis* [en línea] <<https://on.basf.com/3wHM1mx>> [Consulta: 4 de mayo 2021]
- [32] HAZER GROUP. *The Hazer Process* [en línea] <<https://hazergroup.com.au/about/#hazerprocess>> [Consulta: 7 de mayo 2021]
- [33] MONOLITH MATERIALS. *The Monolith Process* [en línea] <<https://monolith-corp.com/methane-pyrolysis>> [Consulta: 16 de diciembre 2021]
- [34] MINISTERIO DE ENERGÍA. *Explorador solar* [en línea] <<https://solar.minenergia.cl/exploracion>> [Consulta: 12 de enero 2022]
- [35] INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS. 1992. *Censo de Población y Vivienda 1992*.
- [36] INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS. 2002. *Censo de Población y Vivienda 2002*.
- [37] INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS. 2017. *Censo de Población y Vivienda 2017*.
- [38] HAMID AMINI. ET AL. 2013. *Comparison of first-order-decay modeled and actual field measured municipal solid waste landfill methane data*. *Waste management*. Vol 33(12): 2720-2728.
- [39] MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. 2020. *Estrategia Nacional de residuos orgánicos Chile 2040*. 64p.
- [40] CONESTORGA ROVERS. ET AL. 2004. *Manual para la preparación de proyectos de generación de energía a partir de gas de rellenos sanitarios en America Latina y el Caribe*. 218p.
- [41] CATERPILLAR. 2018. *Datasheet modelo CG132B*. 12p
- [42] CATERPILLAR. *Datasheet modelo CAT CG170: Series Gas Generator Sets*. 8p
- [43] CATERPILLAR. *Datasheet modelo CAT CG260: Series Gas Generator Sets*. 8p
- [44] ROSARIA AUGELLETTI. ET AL. 2017. *Pressure swing adsorption for biogas upgrading. A new process configuration for the separation of biomethane and carbon dioxide*. *Journal of Cleaner Production*. Vol 140: 1390-1398.
- [45] WALDRON, WE & SIRCAR, S. 2000. *Parametric study of a pressure swing adsorption process*. *Adsorption*. Vol 6(2): 179-188.
- [46] KEUN SU KIM. ET AL. 2005. *Production of hydrogen and carbon black by methane decomposition using DC-RF hybrid thermal plasmas*. *IEEE transactions on plasma science*. Vol 33(2): 813-823.
- [47] JOSÉ HURTADO & BEATRIZ SORIA. 2007. *El hidrógeno y la energía*. Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI.
- [48] YOUSEF HASELI. 2018. *Maximum conversion efficiency of hydrogen fuel cells*. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol 43(18): 9015-9021.
- [49] JAMES FINCKE. ET AL. 2002. *Plasma pyrolysis of methane to hydrogen and carbon black*. *Industrial & engineering chemistry research*. Vol 41(6): 1425-1435.
- [50] MURALIKRISHNA, IYYANKI V & MANICKAM, VALLI. 2017. *Air pollution control*

- technologies*. Environmental management science and engineering for industry. 337-397p.
- [51] SUSAN SOLOMON. ET AL. 2007. *Technical summary: Report accepted by the Working Group and the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.
- [52] MINISTERIO DE ENERGÍA. *Factor de emisiones GEI del Sistema Eléctrico Nacional* [en línea] <<https://energia.gob.cl/indicadores-ambientales-factor-de-emisiones-gei-del-sistema-electrico-nacional>> [Consulta: 03 de febrero 2022]
- [53] HANS BRUIJN. ET AL. 2002. *Handbook on life cycle assessment*. Kluwer Academic Publishers. 688p.
- [54] HENGCHONG LI. ET AL. 2012. *Life cycle assessment of coal-based methanol*. Computer Aided Chemical Engineering. Vol 31: 530-534.
- [55] CARLOS GAETE MORALES. ET AL. 2018. *Assessing the environmental sustainability of electricity generation in Chile*. Science of the Total Environment. Vol 636: 1155-1170.
- [56] AMBIOSIS. 2011. *Guía Metodológica Inventario de Emisiones Atmosféricas*. 377p.
- [57] EPA. 2021. *Landfill Gas Energy Cost Model (LFGcost-Web) User's Manual*. 80p.
- [58] MAX PETERS. ET AL. 2003. *Plant design and economics for chemical engineers*. McGraw-Hill New York. Vol 4. 925p.

Anexos

Anexo A

Proyección de residuos

A.1. Tasa de crecimiento de la población

En las Tablas A.1, A.2 y A.3 se presentan las tasas de crecimiento por comuna y promedio para el RSLLC, RSSM y RSSP, respectivamente.

Tabla A.1: Tasas de crecimiento por comuna y promedio para el RSLLC.
Elaboración propia.

Comuna	Tasa Crec. población 1992-2002 (%)	Tasa Crec. población 2002-2017 (%)	Tasa Crec. población 2015-2050 (%)
Cerro Navia	-0,49 %	-0,70 %	-0,4 %
Colina	3,96 %	4,29 %	2,5 %
Curacaví	2,46 %	1,97 %	1,2 %
Huechuraba	1,83 %	1,93 %	1,3 %
Independencia	-1,71 %	2,88 %	3,2 %
La Cisterna	-1,06 %	0,38 %	0,3 %
La Reina	0,46 %	-0,39 %	-0,2 %
Lampa	4,86 %	6,40 %	2,9 %
Las Condes	1,85 %	1,09 %	1,1 %
Lo Barnechea	4,09 %	2,35 %	1,5 %
Lo Prado	-0,61 %	-0,54 %	-0,5 %
Maipú	6,20 %	0,71 %	0,4 %
Ñuñoa	-0,54 %	1,63 %	1,9 %
Providencia	0,84 %	1,08 %	1,0 %
Pudahuel	3,56 %	1,09 %	0,7 %
Quilicura	11,89 %	3,45 %	2,0 %
Quinta Normal	-1,11 %	0,37 %	1,4 %
Recoleta	-1,05 %	0,42 %	1,3 %
Renca	0,35 %	0,65 %	0,4 %
San Miguel	-0,49 %	2,11 %	2,7 %
Santiago	-1,39 %	4,78 %	2,0 %
Til-Til	1,40 %	1,81 %	1,1 %
Vitacura	0,26 %	0,33 %	0,2 %
Promedio	1,5 %	1,7 %	1,2 %

Tabla A.2: Tasas de crecimiento por comuna y promedio para el RSSM.
Elaboración propia.

Comuna	Tasa Crec. población 2002-2017 (%)	Tasa Crec. población 2015-2050 (%)
Buín	2,85 %	1,7 %
Calera de Tango	2,23 %	1,4 %
Conchalí	-0,32 %	-0,3 %
El Bosque	-0,52 %	-0,3 %
Estación Central	0,80 %	2,8 %
La Florida	0,02 %	0,3 %
La Granja	-0,86 %	-0,6 %
La Pintana	-0,43 %	-0,1 %
Lo Espejo	-0,87 %	-0,7 %
Macul	0,24 %	0,9 %
Paine	2,53 %	1,5 %
Pedro Aguirre Cerda	-0,83 %	-0,7 %
Pirque	3,19 %	1,9 %
Puente Alto	0,93 %	0,7 %
San Bernardo	1,34 %	1,0 %
San Joaquín	-0,22 %	0,0 %
San José de Maipo	2,07 %	1,1 %
San Ramón	-0,90 %	-0,8 %
Talagante	1,42 %	1,0 %
Promedio	0,67 %	0,57 %

Tabla A.3: Tasas de crecimiento por comuna y promedio para el RSSP.
Elaboración propia.

Comuna	Tasa Crec. población 2002-2017 (%)	Tasa Crec. población 2015-2050 (%)
Cerrillos	0,78 %	0,4 %
El Monte	2,06 %	1,2 %
Isla de Maipo	2,29 %	1,2 %
Padre Hurtado	3,32 %	2,3 %
Peñaflor	2,04 %	1,3 %
Peñalolén	0,75 %	0,6 %
Promedio	1,9 %	1,2 %

A.2. Resultados proyección de residuos y población atendida

En las Tablas A.4, A.5 y A.6 se presentan los resultados de la proyección de residuos y población atendida para el RSLLC, RSSM y RSSP, respectivamente.

Tabla A.4: Resultados proyección de residuos y población atendida para el RSLLC. Elaboración propia.

Año	Año	Población atendida	Proyección Residuos [t]	Año	Año	Población atendida	Proyección Residuos [t]
1996	0	2.607.178	1.265.655	2022	26	4.006.401	1.944.908
1997	1	2.644.322	1.283.686	2023	27	4.056.692	1.969.321
1998	2	2.684.348	1.303.117	2024	28	4.107.962	1.994.210
1999	3	2.727.462	1.324.046	2025	29	4.160.233	2.019.585
2000	4	2.773.886	1.346.583	2026	30	4.213.528	2.045.457
2001	5	2.823.868	1.370.847	2027	31	4.267.867	2.071.836
2002	6	2.877.654	1.396.957	2028	32	4.323.276	2.098.734
2003	7	2.917.694	1.416.395	2029	33	4.379.776	2.126.162
2004	8	2.958.983	1.436.438	2030	34	4.437.393	2.154.132
2005	9	3.001.570	1.457.112	2031	35	4.496.150	2.182.656
2006	10	3.045.507	1.478.442	2032	36	4.556.073	2.211.746
2007	11	3.090.849	1.500.452	2033	37	4.617.189	2.241.414
2008	12	3.137.651	1.523.173	2034	38	4.679.523	2.271.674
2009	13	3.185.973	1.546.631	2035	39	4.743.103	2.302.539
2010	14	3.235.878	1.570.857	2036	40	4.743.103	2.302.539
2011	15	3.287.430	1.595.883	2037	41	4.874.112	2.366.138
2012	16	3.340.699	1.621.742	2038	42	4.941.599	2.398.899
2013	17	3.395.754	1.648.469	2039	43	5.010.448	2.432.322
2014	18	3.452.672	1.676.100	2040	44	5.080.688	2.466.420
2015	19	3.511.530	1.704.672	2041	45	5.152.352	2.501.209
2016	20	3.572.410	1.734.226	2042	46	5.225.472	2.536.705
2017	21	3.637.039	1.765.601	2043	47	5.300.080	2.572.924
2018	22	3.814.626	1.851.810	2044	48	5.376.211	2.609.882
2019	23	3.861.202	1.874.420	2045	49	5.453.899	2.647.595
2020	24	3.908.676	1.897.467	2046	50	5.533.180	2.686.082
2021	25	3.957.070	1.920.959				

Tabla A.5: Resultados proyección de residuos y población atendida para el RSSM. Elaboración propia.

Año	Año	Población atendida	Proyección Residuos [t]	Año	Año	Población atendida	Proyección Residuos [t]
2002	0	2.621.054	1.272.391	2019	17	2.936.101	1.425.330
2003	1	2.629.215	1.276.353	2020	18	2.951.153	1.432.637
2004	2	2.637.644	1.280.444	2021	19	2.966.499	1.440.087
2005	3	2.646.344	1.284.668	2022	20	2.982.143	1.447.682
2006	4	2.655.319	1.289.025	2023	21	2.998.093	1.455.424
2007	5	2.664.573	1.293.517	2024	22	3.014.352	1.463.317
2008	6	2.674.112	1.298.148	2025	23	3.030.926	1.471.363
2009	7	2.683.939	1.302.918	2026	24	3.047.821	1.479.565
2010	8	2.694.059	1.307.831	2027	25	3.065.043	1.487.925
2011	9	2.704.476	1.312.888	2028	26	3.082.597	1.496.447
2012	10	2.715.196	1.318.092	2029	27	3.100.489	1.505.132
2013	11	2.726.223	1.323.445	2030	28	3.118.725	1.513.985
2014	12	2.737.563	1.328.950	2031	29	3.137.312	1.523.008
2015	13	2.749.220	1.334.609	2032	30	3.156.256	1.532.204
2016	14	2.761.200	1.340.425	2033	31	3.175.563	1.541.577
2017	15	2.774.358	1.346.812	2034	32	3.195.241	1.551.130
2018	16	2.921.339	1.418.164	2035	33	3.215.296	1.560.865

Tabla A.6: Resultados proyección de residuos y población atendida para el RSSP. Elaboración propia.

Año	Año	Población atendida	Proyección Residuos [t]	Año	Año	Población atendida	Proyección Residuos [t]
2002	0	445.610	216.321	2014	12	525.102	254.911
2003	1	451.569	219.214	2015	13	532.592	258.547
2004	2	457.639	222.161	2016	14	540.230	262.255
2005	3	463.824	225.163	2017	15	548.024	266.038
2006	4	470.126	228.223	2018	16	577.242	280.222
2007	5	476.548	231.340	2019	17	582.815	282.928
2008	6	483.092	234.517	2020	18	588.462	285.669
2009	7	489.761	237.755	2021	19	594.184	288.446
2010	8	496.560	241.055	2022	20	599.981	291.261
2011	9	503.490	244.419	2023	21	605.856	294.113
2012	10	510.555	247.849	2024	22	611.809	297.003
2013	11	517.758	251.345				

Anexo B

Resultados Balance de masa

A continuación se presentan los resultados del balance de masa para los tres rellenos estudiados. En la Figura B.1 se muestra el diagrama de bloques y la numeración de los flujos del proceso.

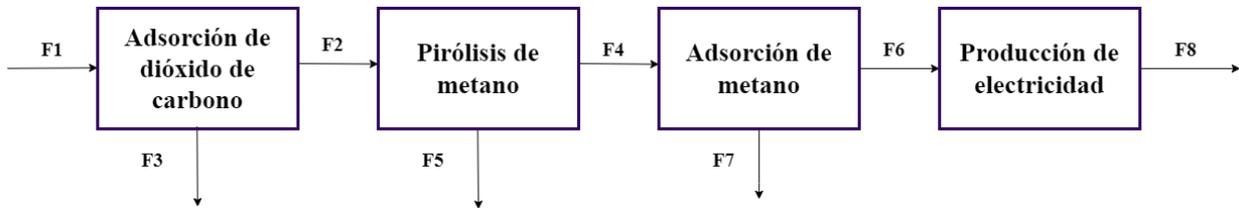


Figura B.1: Diagrama de bloques del proceso. Elaboración propia.

B.1. Relleno Sanitario Loma Los Colorados

Tabla B.1: Resultados balance de masa para el RSLLC. Elaboración propia.

Año	F1 [kg/h]			F2 [kg/h]			F3 [kg/h]			F4 [kg/h]			
	Total	CH4	CO2	Total	CH4	CO2	Total	CH4	CO2	Total	CH4	CO2	H2
2022	11.199	3.959	7.240	4.065	3.935	130	7.134	24	7.110	1.262	197	130	935
2023	11.624	4.109	7.515	4.220	4.085	135	7.405	25	7.380	1.310	204	135	970
2024	12.048	4.259	7.789	4.374	4.233	140	7.674	26	7.649	1.357	212	140	1.005
2025	12.470	4.408	8.062	4.527	4.382	145	7.943	26	7.916	1.405	219	145	1.041
2026	12.890	4.556	8.333	4.679	4.529	150	8.210	27	8.183	1.452	226	150	1.076
2027	13.308	4.705	8.604	4.831	4.676	155	8.477	28	8.449	1.499	234	155	1.111
2028	13.726	4.852	8.874	4.983	4.823	160	8.743	29	8.714	1.546	241	160	1.145
2029	14.143	5.000	9.143	5.134	4.970	165	9.009	30	8.979	1.593	248	165	1.180
2030	14.559	5.147	9.413	5.285	5.116	169	9.274	31	9.243	1.640	256	169	1.215
2031	14.975	5.294	9.681	5.436	5.262	174	9.539	32	9.507	1.687	263	174	1.250
2032	15.391	5.441	9.950	5.587	5.408	179	9.804	33	9.771	1.734	270	179	1.284
2033	15.806	5.588	10.219	5.738	5.554	184	10.068	34	10.035	1.781	278	184	1.319
2034	16.222	5.734	10.488	5.889	5.700	189	10.333	34	10.299	1.828	285	189	1.354
2035	16.638	5.882	10.757	6.040	5.846	194	10.598	35	10.563	1.874	292	194	1.389
2036	17.055	6.029	11.026	6.191	5.993	198	10.864	36	10.828	1.921	300	198	1.423
2037	17.461	6.173	11.289	6.339	6.136	203	11.123	37	11.085	1.967	307	203	1.457
2038	17.880	6.321	11.560	6.491	6.283	208	11.389	38	11.351	2.014	314	208	1.492
2039	18.301	6.469	11.831	6.643	6.430	213	11.657	39	11.618	2.062	322	213	1.527
2040	18.722	6.618	12.104	6.796	6.579	218	11.926	40	11.886	2.109	329	218	1.562
2041	19.146	6.768	12.378	6.950	6.727	223	12.195	41	12.155	2.157	336	223	1.598
2042	19.571	6.918	12.653	7.105	6.877	228	12.466	42	12.425	2.205	344	228	1.633

Tabla B.2: Resultados balance de masa para el RSLLC (continuación).
Elaboración propia.

Año	F5 [kg/h]		F6 [kg/h]				F7 [kg/h]				F8 [kW]
	Total	C	Total	CH4	CO2	H2	Total	CH4	CO2	H2	Total
2022	2.804	2.804	935	0	0	935	327	197	130	0	27.194
2023	2.910	2.910	970	0	0	970	340	204	135	0	28.227
2024	3.016	3.016	1.005	0	0	1.005	352	212	140	0	29.255
2025	3.122	3.122	1.041	0	0	1.041	364	219	145	0	30.279
2026	3.227	3.227	1.076	0	0	1.076	377	226	150	0	31.299
2027	3.332	3.332	1.111	0	0	1.111	389	234	155	0	32.316
2028	3.436	3.436	1.145	0	0	1.145	401	241	160	0	33.330
2029	3.541	3.541	1.180	0	0	1.180	413	248	165	0	34.343
2030	3.645	3.645	1.215	0	0	1.215	425	256	169	0	35.353
2031	3.749	3.749	1.250	0	0	1.250	437	263	174	0	36.363
2032	3.853	3.853	1.284	0	0	1.284	450	270	179	0	37.372
2033	3.957	3.957	1.319	0	0	1.319	462	278	184	0	38.381
2034	4.061	4.061	1.354	0	0	1.354	474	285	189	0	39.391
2035	4.166	4.166	1.388	0	0	1.388	486	292	194	0	40.401
2036	4.270	4.270	1.423	0	0	1.423	498	300	198	0	41.414
2037	4.372	4.372	1.457	0	0	1.457	510	307	203	0	42.400
2038	4.476	4.476	1.492	0	0	1.492	522	314	208	0	43.417
2039	4.582	4.582	1.527	0	0	1.527	535	322	213	0	44.438
2040	4.687	4.687	1.562	0	0	1.562	547	329	218	0	45.462
2041	4.793	4.793	1.598	0	0	1.598	559	336	223	0	46.490
2042	4.900	4.900	1.633	0	0	1.633	572	344	228	0	47.523

B.2. Relleno Sanitario Santa Marta

Tabla B.3: Resultados balance de masa para el RSSM. Elaboración propia.

Año	F1 [kg/h]			F2 [kg/h]			F3 [kg/h]			F4 [kg/h]			
	Total	CH4	CO2	Total	CH4	CO2	Total	CH4	CO2	Total	CH4	CO2	H2
2022	7.752	2.740	5.011	2.814	2.724	90	4.938	16	4.921	873	136	90	647
2023	8.083	2.857	5.226	2.934	2.840	94	5.149	17	5.132	911	142	94	675
2024	8.409	2.973	5.437	3.053	2.955	98	5.357	18	5.339	947	148	98	702
2025	8.730	3.086	5.644	3.169	3.067	102	5.561	19	5.542	983	153	102	729
2026	9.045	3.197	5.848	3.283	3.178	105	5.761	19	5.742	1.019	159	105	755
2027	9.355	3.307	6.048	3.396	3.287	109	5.959	20	5.939	1.054	164	109	781
2028	9.660	3.415	6.245	3.507	3.394	112	6.153	20	6.133	1.088	170	112	806
2029	9.961	3.521	6.440	3.616	3.500	116	6.345	21	6.324	1.122	175	116	831
2030	10.257	3.626	6.631	3.723	3.604	119	6.533	22	6.512	1.156	180	119	856
2031	10.548	3.729	6.819	3.829	3.706	123	6.719	22	6.697	1.188	185	123	880
2032	10.836	3.830	7.005	3.934	3.807	126	6.902	23	6.879	1.221	190	126	904
2033	11.119	3.931	7.189	4.036	3.907	129	7.083	24	7.059	1.253	195	129	928
2034	11.399	4.029	7.369	4.138	4.005	133	7.261	24	7.237	1.284	200	133	951
2035	11.675	4.127	7.548	4.238	4.102	136	7.437	25	7.412	1.315	205	136	974
2036	14.337	5.068	9.269	5.204	5.038	167	9.132	30	9.102	1.615	252	167	1.196
2037	13.969	4.938	9.031	5.071	4.908	163	8.898	30	8.868	1.574	245	163	1.166
2038	13.610	4.811	8.799	4.941	4.782	158	8.669	29	8.641	1.533	239	158	1.136
2039	13.261	4.688	8.573	4.814	4.660	154	8.447	28	8.419	1.494	233	154	1.107
2040	12.920	4.567	8.353	4.690	4.540	150	8.230	27	8.203	1.456	227	150	1.078
2041	12.589	4.450	8.139	4.570	4.423	146	8.019	27	7.992	1.418	221	146	1.051
2042	12.266	4.336	7.930	4.453	4.310	143	7.813	26	7.787	1.382	215	143	1.024

Tabla B.4: Resultados balance de masa para el RSSM (continuación).
Elaboración propia.

Año	F5 [kg/h]		F6 [kg/h]				F7 [kg/h]				F8 [kW]
	Total	C	Total	CH4	CO2	H2	Total	CH4	CO2	H2	Total
2022	1.941	1.941	647	0	0	647	226	136	90	0	18.823
2023	2.024	2.024	675	0	0	675	236	142	94	0	19.628
2024	2.105	2.105	702	0	0	702	246	148	98	0	20.420
2025	2.186	2.186	728	0	0	728	255	153	102	0	21.198
2026	2.264	2.264	755	0	0	755	264	159	105	0	21.963
2027	2.342	2.342	781	0	0	781	273	164	109	0	22.716
2028	2.419	2.419	806	0	0	806	282	170	112	0	23.457
2029	2.494	2.494	831	0	0	831	291	175	116	0	24.187
2030	2.568	2.568	856	0	0	856	300	180	119	0	24.906
2031	2.641	2.641	880	0	0	880	308	185	123	0	25.614
2032	2.713	2.713	904	0	0	904	317	190	126	0	26.312
2033	2.784	2.784	928	0	0	928	325	195	129	0	27.000
2034	2.854	2.854	951	0	0	951	333	200	133	0	27.679
2035	2.923	2.923	974	0	0	974	341	205	136	0	28.349
2036	3.589	3.589	1.196	0	0	1.196	419	252	167	0	34.812
2037	3.497	3.497	1.166	0	0	1.166	408	245	163	0	33.919
2038	3.407	3.407	1.136	0	0	1.136	398	239	158	0	33.048
2039	3.320	3.320	1.107	0	0	1.107	387	233	154	0	32.200
2040	3.235	3.235	1.078	0	0	1.078	377	227	150	0	31.374
2041	3.152	3.152	1.050	0	0	1.050	368	221	146	0	30.569
2042	3.071	3.071	1.024	0	0	1.024	358	215	143	0	29.784

B.3. Relleno Sanitario Santiago Poniente

Tabla B.5: Resultados balance de masa para el RSSP. Elaboración propia.

Año	F1 [kg/h]			F2 [kg/h]			F3 [kg/h]			F4 [kg/h]			
	Total	CH4	CO2	Total	CH4	CO2	Total	CH4	CO2	Total	CH4	CO2	H2
2022	1.461	516	944	530	513	17	930	3	927	165	26	17	122
2023	1.530	541	989	555	538	18	974	3	971	172	27	18	128
2024	1.598	565	1.033	580	562	19	1.018	3	1.015	180	28	19	133
2025	1.999	707	1.293	726	703	23	1.274	4	1.269	225	35	23	167
2026	1.948	689	1.259	707	685	23	1.241	4	1.237	219	34	23	163
2027	1.898	671	1.227	689	667	22	1.209	4	1.205	214	33	22	158
2028	1.849	654	1.196	671	650	22	1.178	4	1.174	208	32	22	154
2029	1.802	637	1.165	654	633	21	1.148	4	1.144	203	32	21	150
2030	1.756	621	1.135	637	617	20	1.118	4	1.115	198	31	20	147
2031	1.711	605	1.106	621	601	20	1.090	4	1.086	193	30	20	143
2032	1.667	589	1.078	605	586	19	1.062	4	1.058	188	29	19	139
2033	1.624	574	1.050	590	571	19	1.034	3	1.031	183	29	19	136
2034	1.582	559	1.023	574	556	18	1.008	3	1.005	178	28	18	132
2035	1.542	545	997	560	542	18	982	3	979	174	27	18	129
2036	1.502	531	971	545	528	17	957	3	954	169	26	17	125
2037	1.464	517	946	531	514	17	932	3	929	165	26	17	122
2038	1.426	504	922	518	501	17	908	3	905	161	25	17	119
2039	1.389	491	898	504	488	16	885	3	882	157	24	16	116
2040	1.354	479	875	491	476	16	862	3	859	153	24	16	113
2041	1.319	466	853	479	463	15	840	3	837	149	23	15	110
2042	1.285	454	831	467	452	15	819	3	816	145	23	15	107

Tabla B.6: Resultados balance de masa para el RSSP (continuación).
Elaboración propia.

Año	F5 [kg/h]		F6 [kg/h]				F7 [kg/h]				F8 [kW]
	Total	C	Total	CH4	CO2	H2	Total	CH4	CO2	H2	Total
2022	366	366	122	0	0	122	43	26	17	0	3.547
2023	383	383	128	0	0	128	45	27	18	0	3.715
2024	400	400	133	0	0	133	47	28	19	0	3.881
2025	501	501	167	0	0	167	58	35	23	0	4.855
2026	488	488	163	0	0	163	57	34	23	0	4.730
2027	475	475	158	0	0	158	55	33	22	0	4.609
2028	463	463	154	0	0	154	54	32	22	0	4.491
2029	451	451	150	0	0	150	53	32	21	0	4.375
2030	440	440	147	0	0	147	51	31	20	0	4.263
2031	428	428	143	0	0	143	50	30	20	0	4.154
2032	417	417	139	0	0	139	49	29	19	0	4.047
2033	407	407	136	0	0	136	47	29	19	0	3.943
2034	396	396	132	0	0	132	46	28	18	0	3.842
2035	386	386	129	0	0	129	45	27	18	0	3.743
2036	376	376	125	0	0	125	44	26	17	0	3.647
2037	366	366	122	0	0	122	43	26	17	0	3.554
2038	357	357	119	0	0	119	42	25	17	0	3.463
2039	348	348	116	0	0	116	41	24	16	0	3.374
2040	339	339	113	0	0	113	40	24	16	0	3.287
2041	330	330	110	0	0	110	39	23	15	0	3.203
2042	322	322	107	0	0	107	38	23	15	0	3.121

Anexo C

Evaluación Ambiental

C.1. Potencial de Calentamiento Global

C.1.1. Relleno Sanitario Loma Los Colorados

En la Tabla C.1 se presentan los resultados de la categoría de impacto: potencial de calentamiento para el caso base.

Tabla C.1: Resultados del potencial de calentamiento global para el caso base en el RSLLC. Elaboración propia.

Año	Emisiones relleno total [t CO ₂ , eq]	Emisiones Caso Base [t CO ₂ ,eq]	Emisiones generación de energía (evitadas) [t CO ₂ ,eq]	Balance energético [t CO ₂ ,eq]
2022	1.345.200	237.145	87.050	150.095
2023	1.396.293	246.152	90.356	155.796
2024	1.447.149	255.117	93.647	161.470
2025	1.497.795	264.046	96.925	167.121
2026	1.548.259	272.942	100.190	172.752
2027	1.598.566	281.811	103.446	178.365
2028	1.648.744	290.656	106.693	183.964
2029	1.698.818	299.484	109.933	189.551
2030	1.748.814	308.298	113.168	195.129
2031	1.798.758	317.102	116.400	200.702
2032	1.848.676	325.902	119.631	206.272
2033	1.898.594	334.702	122.861	211.841
2034	1.948.536	343.507	126.093	217.414
2035	1.998.529	352.320	129.328	222.992
2036	2.048.597	361.146	132.568	228.578
2037	2.097.381	369.746	135.725	234.022
2038	2.147.712	378.619	138.982	239.637
2039	2.198.193	387.518	142.248	245.270
2040	2.248.851	396.449	145.527	250.922
2041	2.299.709	405.415	148.818	256.597
2042	2.350.793	414.420	152.123	262.297
Total	38.813.966	6.842.496	2.511.711	4.330.786

En la Tabla C.2 se presentan los resultados de la categoría de impacto: potencial de calentamiento para la alternativa 1.

Tabla C.2: Resultados del potencial de calentamiento global para la alternativa 1 en el RSLLC. Elaboración propia.

Año	Emisiones relleno total [t CO ₂ , eq]	Emisiones Alternativa 1 [t CO ₂ ,eq]	Emisiones generación de energía (evitadas) [t CO ₂ ,eq]	Balance energético [t CO ₂ ,eq]
2022	1.345.200	190.627	99.742	90.885
2023	1.396.293	197.868	103.531	94.337
2024	1.447.149	205.074	107.302	97.773
2025	1.497.795	212.252	111.057	101.195
2026	1.548.259	219.403	114.799	104.604
2027	1.598.566	226.532	118.529	108.003
2028	1.648.744	233.642	122.249	111.393
2029	1.698.818	240.738	125.962	114.776
2030	1.748.814	247.823	129.669	118.154
2031	1.798.758	254.901	133.372	121.529
2032	1.848.676	261.975	137.074	124.901
2033	1.898.594	269.048	140.775	128.274
2034	1.948.536	276.126	144.478	131.648
2035	1.998.529	283.210	148.185	135.026
2036	2.048.597	290.305	151.897	138.408
2037	2.097.381	297.218	155.514	141.704
2038	2.147.712	304.351	159.246	145.105
2039	2.198.193	311.505	162.989	148.515
2040	2.248.851	318.683	166.745	151.938
2041	2.299.709	325.890	170.516	155.374
2042	2.350.793	333.129	174.304	158.825
Total	38.813.966	5.500.301	2.877.934	2.622.367

C.1.2. Relleno Sanitario Santa Marta

En la Tabla C.3 se presentan los resultados de la categoría de impacto: potencial de calentamiento para el caso base.

Tabla C.3: Resultados del potencial de calentamiento global para el caso base en el RSSM. Elaboración propia.

Año	Emisiones relleno total [t CO ₂ ,eq]	Emisiones Caso Base [t CO ₂ ,eq]	Emisiones generación de energía (evitadas) [t CO ₂ ,eq]	Balance energético [t CO ₂ ,eq]
2022	931.110	164.145	60.254	103.891
2023	970.942	171.167	62.831	108.336
2024	1.010.092	178.069	65.365	112.704
2025	1.048.585	184.855	67.856	116.999
2026	1.086.445	191.529	70.305	121.223
2027	1.123.693	198.095	72.716	125.379
2028	1.160.354	204.558	75.088	129.470
2029	1.196.449	210.921	77.424	133.497
2030	1.232.000	217.189	79.725	137.464
2031	1.267.028	223.364	81.991	141.372
2032	1.301.554	229.450	84.226	145.225
2033	1.335.600	235.452	86.429	149.024
2034	1.369.184	241.373	88.602	152.771
2035	1.402.326	247.215	90.747	156.469
2036	1.435.047	303.580	111.437	192.144
2037	1.398.216	295.789	108.577	187.212
2038	1.362.331	288.198	105.790	182.407
2039	1.327.367	280.801	103.075	177.726
2040	1.293.300	273.594	100.430	173.165
2041	1.260.108	266.573	97.852	168.720
2042	1.227.767	259.731	95.341	164.390
Total	25.739.499	4.865.649	1.786.059	3.079.590

En la Tabla C.4 se presentan los resultados de la categoría de impacto: potencial de calentamiento para la alternativa 1.

Tabla C.4: Resultados potencial de calentamiento global para la alternativa
1. Elaboración propia.

Año	Emisiones relleno total [t CO ₂ , eq]	Emisiones Alternativa 1 [t CO ₂ ,eq]	Emisiones generación de energía (evitadas) [t CO ₂ ,eq]	Balance energético [t CO ₂ ,eq]
2022	931.110	131.947	69.039	62.908
2023	970.942	137.592	71.992	65.599
2024	1.010.092	143.140	74.895	68.244
2025	1.048.585	148.594	77.749	70.845
2026	1.086.445	153.959	80.556	73.403
2027	1.123.693	159.238	83.318	75.919
2028	1.160.354	164.433	86.037	78.396
2029	1.196.449	169.548	88.713	80.835
2030	1.232.000	174.586	91.349	83.237
2031	1.267.028	179.550	93.946	85.604
2032	1.301.554	184.442	96.506	87.936
2033	1.335.600	189.267	99.031	90.236
2034	1.369.184	194.026	101.521	92.505
2035	1.402.326	198.723	103.978	94.745
2036	1.435.047	244.031	127.685	116.346
2037	1.398.216	237.768	124.408	113.360
2038	1.362.331	231.666	121.215	110.451
2039	1.327.367	225.720	118.104	107.616
2040	1.293.300	219.927	115.073	104.854
2041	1.260.108	214.283	112.120	102.163
2042	1.227.767	208.783	109.242	99.541
Total	25.739.499	3.911.224	2.046.478	1.864.746

C.1.3. Relleno Sanitario Santiago Poniente

En la Tabla C.5 se presentan los resultados de la categoría de impacto: potencial de calentamiento para el caso base.

Tabla C.5: Resultados del potencial de calentamiento global para el caso base en el RSSP. Elaboración propia.

Año	Emisiones relleno total [t CO ₂ ,eq]	Emisiones Caso Base [t CO ₂ ,eq]	Emisiones generación de energía (evitadas) [t CO ₂ ,eq]	Balance energético [t CO ₂ ,eq]
2022	175.439	30.928	11.353	19.575
2023	183.758	32.395	11.891	20.503
2024	191.989	33.846	12.424	21.422
2025	200.136	42.338	15.541	26.797
2026	194.999	41.252	15.142	26.109
2027	189.995	40.193	14.754	25.439
2028	185.118	39.161	14.375	24.786
2029	180.367	38.156	14.006	24.150
2030	175.738	37.177	13.647	23.530
2031	171.228	36.223	13.297	22.926
2032	166.833	35.293	12.955	22.338
2033	162.552	34.387	12.623	21.765
2034	158.380	33.505	12.299	21.206
2035	154.315	32.645	11.983	20.662
2036	150.354	31.807	11.676	20.132
2037	146.496	30.991	11.376	19.615
2038	142.736	30.195	11.084	19.111
2039	139.073	29.420	10.800	18.621
2040	135.503	28.665	10.522	18.143
2041	132.026	27.930	10.252	17.677
2042	128.637	27.213	9.989	17.224
Total	3.465.670	713.720	261.989	451.731

En la Tabla C.6 se presentan los resultados de la categoría de impacto: potencial de calentamiento para la alternativa 1

Tabla C.6: Resultados del potencial de calentamiento global para la alternativa 1. Elaboración propia.

Año	Emisiones relleno total [t CO ₂ , eq]	Emisiones Alternativa 1 [t CO ₂ ,eq]	Emisiones generación de energía (evitadas) [t CO ₂ ,eq]	Balance energético [t CO ₂ ,eq]
2022	175.439	24.861	13.008	11.853
2023	183.758	26.040	13.625	12.415
2024	191.989	27.207	14.235	12.971
2025	200.136	34.033	17.807	16.226
2026	194.999	33.160	17.350	15.810
2027	189.995	32.309	16.905	15.404
2028	185.118	31.480	16.471	15.008
2029	180.367	30.672	16.048	14.623
2030	175.738	29.884	15.637	14.248
2031	171.228	29.118	15.235	13.882
2032	166.833	28.370	14.844	13.526
2033	162.552	27.642	14.463	13.179
2034	158.380	26.933	14.092	12.841
2035	154.315	26.241	13.730	12.511
2036	150.354	25.568	13.378	12.190
2037	146.496	24.912	13.035	11.877
2038	142.736	24.272	12.700	11.572
2039	139.073	23.649	12.374	11.275
2040	135.503	23.042	12.057	10.986
2041	132.026	22.451	11.747	10.704
2042	128.637	21.875	11.446	10.429
Total	3.465.670	573.720	300.189	273.531

C.2. Potencial de Toxicidad Humana

C.2.1. Relleno Sanitario Loma Los Colorados

En la Tabla C.7 se presentan los resultados de la categoría de impacto: potencial de toxicidad humana para el caso base.

Tabla C.7: Resultados del potencial de toxicidad humana para el caso base en el RSLLC. Elaboración propia.

Año	Emissiones relleno total [t 1,4-DCB,eq]	Emissiones Caso Base [t 1,4-DCB,eq]	Emissiones generación de energía (evitadas) [t 1,4-DCB,eq]	Balance energético [t 1,4-DCB,eq]
2022	14.981	11.877	37.423	-40.527
2023	15.549	12.328	38.844	-42.066
2024	16.116	12.777	40.259	-43.598
2025	16.680	13.224	41.668	-45.124
2026	17.242	13.669	43.072	-46.644
2027	17.802	14.113	44.472	-48.160
2028	18.361	14.556	45.867	-49.672
2029	18.919	14.999	47.260	-51.180
2030	19.475	15.440	48.651	-52.687
2031	20.031	15.881	50.041	-54.191
2032	20.587	16.322	51.429	-55.695
2033	21.143	16.762	52.818	-57.199
2034	21.699	17.203	54.208	-58.704
2035	22.256	17.645	55.598	-60.210
2036	22.814	18.087	56.991	-61.718
2037	23.357	18.517	58.348	-63.188
2038	23.918	18.962	59.749	-64.704
2039	24.480	19.407	61.153	-66.225
2040	25.044	19.855	62.562	-67.751
2041	25.610	20.304	63.977	-69.283
2042	26.179	20.755	65.398	-70.822
Total	432.243	342.682	1.079.790	-1.169.351

En la Tabla C.8 se presentan los resultados de la categoría de impacto: potencial de toxicidad humana para la alternativa 1.

Tabla C.8: Resultados del potencial de toxicidad humana para la alternativa 1 en el RSLLC. Elaboración propia.

Año	Emisiones relleno total [t 1,4-DCB,eq]	Emisiones Alternativa 1 [t 1,4-DCB,eq]	Emisiones generación de energía (evitadas) [t 1,4-DCB,eq]	Balance energético [t 1,4-DCB,eq]
2022	14.981	11.380	42.879	-31.499
2023	15.549	11.813	44.508	-32.695
2024	16.116	12.243	46.129	-33.886
2025	16.680	12.671	47.744	-35.072
2026	17.242	13.098	49.352	-36.254
2027	17.802	13.524	50.956	-37.432
2028	18.361	13.948	52.555	-38.607
2029	18.919	14.372	54.151	-39.779
2030	19.475	14.795	55.745	-40.950
2031	20.031	15.218	57.337	-42.119
2032	20.587	15.640	58.928	-43.288
2033	21.143	16.062	60.519	-44.457
2034	21.699	16.485	62.111	-45.627
2035	22.256	16.908	63.705	-46.797
2036	22.814	17.331	65.301	-47.970
2037	23.357	17.744	66.856	-49.112
2038	23.918	18.170	68.460	-50.290
2039	24.480	18.597	70.069	-51.472
2040	25.044	19.025	71.684	-52.659
2041	25.610	19.456	73.305	-53.850
2042	26.179	19.888	74.934	-55.046
Total	432.243	328.369	1.237.230	-908.861

C.2.2. Relleno Sanitario Santa Marta

En la Tabla C.9 se presentan los resultados de la categoría de impacto: potencial de toxicidad humana para el caso base.

Tabla C.9: Resultados del potencial de toxicidad humana para el caso base en el RSSM. Elaboración propia.

Año	Emissiones relleno total [t 1,4-DCB,eq]	Emissiones Caso Base [t 1,4-DCB,eq]	Emissiones generación de energía (evitadas) [t 1,4-DCB,eq]	Balance energético [t 1,4-DCB,eq]
2022	10.369	8.221	25.903	-17.683
2023	10.813	8.572	27.011	-18.439
2024	11.249	8.918	28.100	-19.182
2025	11.677	9.258	29.171	-19.913
2026	12.099	9.592	30.224	-20.632
2027	12.514	9.921	31.261	-21.340
2028	12.922	10.245	32.281	-22.036
2029	13.324	10.563	33.285	-22.722
2030	13.720	10.877	34.274	-23.397
2031	14.110	11.186	35.248	-24.062
2032	14.494	11.491	36.209	-24.718
2033	14.874	11.792	37.156	-25.364
2034	15.248	12.088	38.090	-26.002
2035	15.617	12.381	39.012	-26.631
2036	15.981	15.204	47.907	-32.703
2037	15.571	14.814	46.677	-31.864
2038	15.171	14.433	45.479	-31.046
2039	14.782	14.063	44.312	-30.249
2040	14.403	13.702	43.175	-29.473
2041	14.033	13.350	42.067	-28.717
2042	13.673	13.008	40.987	-27.980
Total	286.642	243.679	767.830	-524.152

En la Tabla C.10 se presentan los resultados de la categoría de impacto: potencial de toxicidad humana para la alternativa 1.

Tabla C.10: Resultados del potencial de toxicidad humana para la alternativa 1 en el RSSM. Elaboración propia.

Año	Emisiones relleno total [t 1,4-DCB,eq]	Emisiones Alternativa 1 [t 1,4-DCB,eq]	Emisiones generación de energía (evitadas) [t 1,4-DCB,eq]	Balance energético [t 1,4-DCB,eq]
2022	10.369	7.877	29.680	-21.803
2023	10.813	8.214	30.950	-22.735
2024	11.249	8.545	32.198	-23.652
2025	11.677	8.871	33.425	-24.553
2026	12.099	9.191	34.631	-25.440
2027	12.514	9.507	35.819	-26.312
2028	12.922	9.817	36.987	-27.171
2029	13.324	10.122	38.138	-28.016
2030	13.720	10.423	39.271	-28.848
2031	14.110	10.719	40.388	-29.669
2032	14.494	11.011	41.488	-30.477
2033	14.874	11.299	42.573	-31.274
2034	15.248	11.583	43.644	-32.061
2035	15.617	11.864	44.700	-32.837
2036	15.981	14.569	54.892	-40.323
2037	15.571	14.195	53.483	-39.288
2038	15.171	13.831	52.111	-38.280
2039	14.782	13.476	50.773	-37.298
2040	14.403	13.130	49.470	-36.340
2041	14.033	12.793	48.200	-35.408
2042	13.673	12.464	46.963	-34.499
Total	286.642	233.501	879.785	-646.284

C.2.3. Relleno Sanitario Santiago Poniente

En la Tabla C.11 se presentan los resultados de la categoría de impacto: potencial de toxicidad humana para el caso base.

Tabla C.11: Resultados del potencial de toxicidad humana para el caso base en el RSSP. Elaboración propia.

Año	Emisiones relleno total [t 1,4-DCB,eq]	Emisiones Caso Base [t 1,4-DCB,eq]	Emisiones generación de energía (evitadas) [t 1,4-DCB,eq]	Balance energético [t 1,4-DCB,eq]
2022	1.954	1.549	4.881	-3.332
2023	2.046	1.622	5.112	-3.490
2024	2.138	1.695	5.341	-3.646
2025	2.229	2.120	6.681	-4.561
2026	2.172	2.066	6.510	-4.444
2027	2.116	2.013	6.343	-4.330
2028	2.062	1.961	6.180	-4.219
2029	2.009	1.911	6.021	-4.110
2030	1.957	1.862	5.867	-4.005
2031	1.907	1.814	5.716	-3.902
2032	1.858	1.768	5.569	-3.802
2033	1.810	1.722	5.427	-3.704
2034	1.764	1.678	5.287	-3.609
2035	1.718	1.635	5.152	-3.517
2036	1.674	1.593	5.019	-3.426
2037	1.631	1.552	4.891	-3.338
2038	1.590	1.512	4.765	-3.253
2039	1.549	1.473	4.643	-3.169
2040	1.509	1.436	4.524	-3.088
2041	1.470	1.399	4.407	-3.009
2042	1.433	1.363	4.294	-2.932
Total	38.595	35.744	112.630	-76.885

En la Tabla C.12 se presentan los resultados de la categoría de impacto: potencial de toxicidad humana para la alternativa 1.

Tabla C.12: Resultados del potencial de toxicidad humana para la alternativa 1 en el RSSP. Elaboración propia.

Año	Emisiones relleno total [t 1,4-DCB,eq]	Emisiones Alternativa 1 [t 1,4-DCB,eq]	Emisiones generación de energía (evitadas) [t 1,4-DCB,eq]	Balance energético [t 1,4-DCB,eq]
2022	1.954	1.484	5.592	-4.108
2023	2.046	1.555	5.857	-4.303
2024	2.138	1.624	6.120	-4.496
2025	2.229	2.032	7.655	-5.624
2026	2.172	1.980	7.459	-5.479
2027	2.116	1.929	7.267	-5.339
2028	2.062	1.879	7.081	-5.202
2029	2.009	1.831	6.899	-5.068
2030	1.957	1.784	6.722	-4.938
2031	1.907	1.738	6.550	-4.811
2032	1.858	1.694	6.382	-4.688
2033	1.810	1.650	6.218	-4.568
2034	1.764	1.608	6.058	-4.450
2035	1.718	1.567	5.903	-4.336
2036	1.674	1.526	5.751	-4.225
2037	1.631	1.487	5.604	-4.116
2038	1.590	1.449	5.460	-4.011
2039	1.549	1.412	5.320	-3.908
2040	1.509	1.376	5.183	-3.808
2041	1.470	1.340	5.050	-3.710
2042	1.433	1.306	4.921	-3.615
Total	38.595	34.251	129.052	-94.801

Anexo D

Evaluación Económica

D.1. CAPEX

D.1.1. Caso base

En la Tabla D.1 se presentan los resultados de los costos de inversión para los rellenos sanitarios Loma Los Colorados, Santa Marta y Santiago Poniente.

Tabla D.1: Costos de inversión para el caso base para los tres rellenos sanitarios.

Costo	RSLLC [kUSD]	RSSM [kUSD]	RSSP [kUSD]
Equipos de compresión, tratamiento de biogás y obras civiles	1.100	1.100	1.100
Interconexión eléctrica	250	250	250
Motor de combustión interna	52.572	34.346	4.719
Total	53.922	35.696	6.069

D.1.2. Alternativa 1

En la Tabla D.2 se presentan los resultados de los costos de los equipos para los rellenos sanitarios Loma Los Colorados, Santa Marta y Santiago Poniente. Con estos resultados se calculan los costos directos e indirectos de la inversión (Tabla D.3).

Tabla D.2: Costos de equipos e insumos para la alternativa 1.

Equipo	RSLLC [kUSD]	RSSM [kUSD]	RSSP [kUSD]
PSA I	\$200	\$ 151	\$ 31
Zeolita 5A	\$ 137	\$ 100	\$ 14
Reactor de pirólisis	\$ 1,60	\$ 1,60	\$ 0,10
Antorcha de plasma	\$ 933	\$ 646	\$ 167
PSA II	\$ 24	\$ 24	\$ 12
Carbón activado	\$ 0,68	\$ 0,5	\$ 0,07
Fuel Cells	\$ 30.675	\$ 21.232	\$ 4.001
Total	\$ 31.771	\$ 22.155	\$ 4.224

Tabla D.3: Resultados de los costos directos e indirectos para la alternativa 1. Elaboración propia.

Item	%	RSLLC [kUSD]	RSSM [kUSD]	RSSP [kUSD]
Directos				
Equipos	30 %	31.971	22.155	4.224
Instalación de equipos	6 %	6.394	4.431	845
Instrumentación y control	3 %	3.197	2.216	422
Piping	7 %	7.460	5.170	986
Instalación eléctrica	3 %	3.197	2.216	422
Construcciones	11 %	11.723	8.124	1.549
Mejoras de terreno	2 %	2.131	1.477	282
Instalaciones de servicios	10 %	10.657	7.385	1.408
Terreno	1 %	1.066	739	141
Indirectos				
Ingeniería y supervisión	8 %	8.525	5.908	1.126
Gastos de construcción	10 %	10.657	7.385	1.408
Honorarios de contratistas	2 %	2.131	1.477	282
Contingencia	7 %	7.460	5.170	986
TOTAL	1	106.568	73.851	14.080

D.2. OPEX

D.2.1. Caso base

En la Tabla D.4 se presentan los resultados de los costos de operación para los rellenos sanitarios Loma Los Colorados, Santa Marta y Santiago Poniente.

Tabla D.4: Costos de operación para el caso base para los tres rellenos sanitarios. Elaboración propia

Costo	RSLLC [kUSD]	RSSM [kUSD]	RSSP [kUSD]
Operación y mantenimiento de motores	8.856	5.786	795
Consumo eléctrico compresión y tratamiento	3.719	2.430	334
Total	12.576	8.216	1.129

D.2.2. Alternativa 1

En la Tabla D.5 se presentan los resultados de los costos de electricidad asociados a los equipos del proceso para los rellenos sanitarios Loma Los Colorados, Santa Marta y Santiago Poniente. Con estos resultados se calculan los costos fijos y variables de la operación (Tabla D.6).

Tabla D.5: Resultados de los costos de electricidad para la alternativa 1. Elaboración propia.

Equipo	RSLLC		RSSM		RSSP	
	Consumo total [MWh/año]	Consumo total [USD/año]	Consumo total [MWh/año]	Consumo total [USD/año]	Consumo total [MWh/año]	Consumo total [USD/año]
PSA I	1752	\$ 263	1314	\$ 197	1314	\$ 197
Reactor	1051	\$ 158	1051	\$ 158	1051	\$ 158
Antorcha de plasma	5007	\$ 751	3466	\$ 520	894	\$ 134
PSA II	8760	\$ 1.314	8760	\$ 1.314	4380	\$ 657
Total	16.570	\$ 2.486	14.591	\$ 2.189	7.639	\$ 1.146

Tabla D.6: Resultados de los costos de operación para la alternativa 1. Elaboración propia.

Item	RSLLC [kUSD]	RSSM [kUSD]	RSSP [kUSD]
Costos variables			
Materias primas	0	0	0
Insumos	137	101	14
Servicios	2.486	2.189	1.146
Mano de obra de operaciones	8.244	5.846	1.318
Supervisión directa	2.061	1.461	330
Mantenimiento	10.657	7.385	1.408
Cargos de laboratorio	1.649	1.169	264
Costos fijos			
Depreciación	10.657	7.385	1.408
Impuestos	4.263	2.954	563
Seguros	1.066	739	141
TOTAL	41.218	29.228	6.591