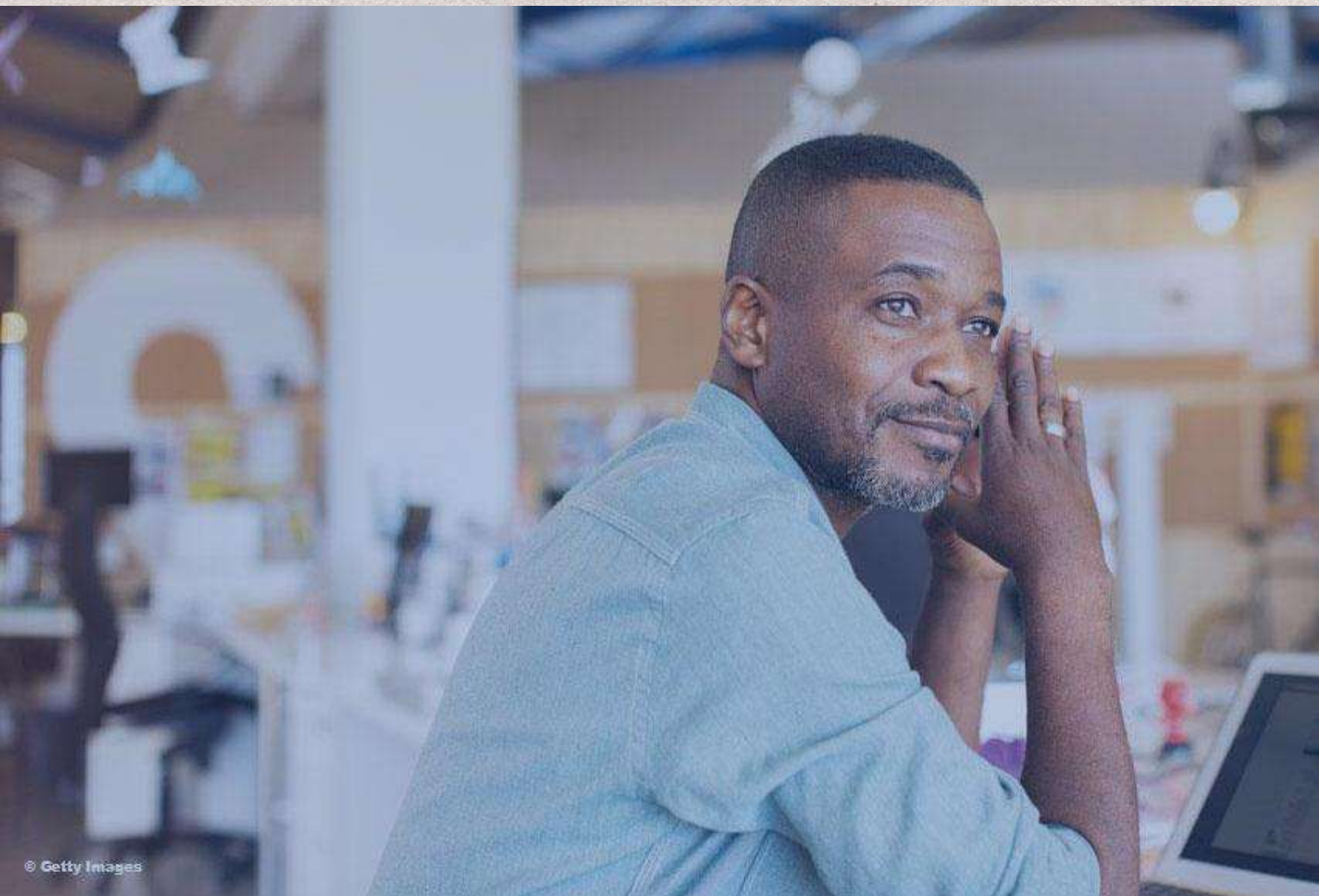


REALIZACIÓN DE UN ANÁLISIS CUANTITATIVO Y CUALITATIVO DEL BIOGÁS DE UNA MUESTRA DE RELLENOS SANITARIOS Y VERTEDEROS DE COSTA RICA Y DEL POTENCIAL DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE ESTE BIOGÁS

Informe Final

8 de noviembre de 2023



© Getty Images

EXPERTISE FRANCOF

REALIZACIÓN DE UN ANÁLISIS CUANTITATIVO Y CUALITATIVO DEL BIOGÁS DE UNA MUESTRA DE RELLENOS SANITARIOS Y VERTEDEROS DE COSTA RICA Y DEL POTENCIAL DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE ESTE BIOGÁS

Informe Final

Fecha del informe	08/11/2023
Aprobado por	Alexia QUIROS Laura ZUMBADO
Revisión	
	Anthony KERIHUEL Alex FLORES Paula PINTO Karen BAUZ Silvia PEÑA Antoine DELORME Joaquín VIQUEZ Quentin BULCOURT Laura MANTILLA

Tabla de contenido

0. INTRODUCCION	17
0.1. Problemática	19
0.2. Justificación	19
0.3. Objetivos	20
0.3.1. Objetivo General	20
0.3.2. Objetivos Específicos	20
1. MARCO DE REFERENCIA PARA LA GESTION Y VALORACION DEL BIOGAS	21
1.1. Gestión Integral de Residuos Sólidos en Costa Rica	21
1.1.1. Situación actual de la Gestión Integral de Residuos Sólidos	21
1.1.2. Ley N° 8839 para la Gestión Integral de Residuos Sólidos	24
1.1.3. Permisos y tramites de rellenos sanitarios de interés para la valoración de biogás	28
1.2. Análisis del enfoque de género en la Gestión Integral de Residuos	30
1.3. Gobernanza para la valoración de biogás	36
1.4. Bonos de Carbono	40
1.4.1. Que es un bono/certificado de carbono	40
1.4.2. Mercados de carbono a nivel internacional	40
1.4.3. Referencias de transacciones de bonos de carbono	42
1.4.4. Bonos de carbono para biogás de sitios de disposición final de Costa Rica	43
1.5. Legislación Internacional para la reducción de GEI	44
1.6. Tarifa de energía eléctrica producida a partir de biogás de rellenos sanitarios	50
2. METODOLOGIAS DEL ESTUDIO	52
2.1. Recopilación de información	53
2.2. Evaluación multicriterio para selección de sitios	54
2.3. Metodología del diagnóstico preliminar del enfoque de género	55
2.4. Caracterización de residuos y biogás en sitios de disposición final	58
2.4.1. Caracterización de residuos	58
2.4.2. Caracterización de biogás	60
2.4.3. Procedimiento de selección de muestra	63
2.5. Proyección teórica de biogás	64
2.5.1. Landfill Gas Emissions Model (LandGEM)	64
2.5.2. IPCC Waste Model	68
2.6. Definición de las propuestas de captura, tratamiento y/o valoración	75
2.7. Desarrollo de modelos financieros	76

2.7.1. Gastos	76
2.7.2. Ingresos	77
2.7.3. Parámetros económicos	78
2.7.4. Indicadores financieros	80
3. ANÁLISIS DE LOS SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL EN COSTA RICA	81
3.1. Sitios contemplados en el estudio – Fase 1	81
3.2. Muestra seleccionada de sitios de disposición final – Fase 2	97
4. DIAGNOSTICO DE VALORACIÓN DE BIOGAS	97
4.1. Caracterización de residuos y biogás en los sitios seleccionados – Fase 3	97
4.1.1. Composición de los residuos sólidos ordinarios	97
4.1.2. Composición del biogás	109
4.2. Proyección teórica de producción de biogás	122
4.2.1. Modelo LandGEM	122
4.2.2. Modelo IPCC	130
4.2.3. Comparación y selección del modelo	140
4.3. Caracterización del enfoque de género en los sitios seleccionados	146
5. PROPUESTAS DE CAPTURA APROVECHAMIENTO Y VALORACION DE BIOGAS	168
5.1. Generalidades de los sistemas propuestos por sitio – Fase 4	168
5.2. Propuesta para R1	177
5.2.1. Sistema de Captura R1	179
5.2.2. Sistema de Extracción y Quema R1	181
5.2.3. Sistema de Tratamiento R1	182
5.2.4. Sistemas de Valorización R1: Generación de energía eléctrica	186
5.2.5. Beneficios Medioambientales de la propuesta para R1	194
5.3. Propuesta para R2:	196
5.3.1. Sistema de Captura R2	199
5.3.2. Sistema de Extracción y Quema R2	203
5.3.3. Sistema de Tratamiento R2	205
5.3.4. Sistemas de Valorización R2: Generación de energía eléctrica	206
5.3.5. Beneficios Medioambientales de la propuesta para R2	213
5.4. Propuesta para R3:	214
5.4.1. Sistema de Valorización R3: Generación de energía eléctrica	215
5.4.2. Sistema de Valorización R3: Producción de biometano	224
5.5. Propuesta para R4	232
5.5.1. Sistema de Extracción y Quema R4	233
5.5.2. Sistema de Tratamiento R4: Generación de energía eléctrica	234
5.5.3. Sistema de Valorización R4: Generación de energía eléctrica	236
5.5.4. Sistema de Tratamiento R4: Producción de biometano	245
5.5.5. Sistema de Valorización R4: Producción de biometano	246
5.6. Propuesta para V1	252
5.6.1. Sistema de Conducción V1	252
5.6.2. Sistema de Extracción y Quema	258
6. ANALISIS FINANCIERO	259
6.1. CAPEX, OPEX e ingresos de las propuestas de valoración de energía eléctrica	260
6.2. Análisis global de la rentabilidad	263
6.2.1. Precio de venta de energía eléctrica fijo	264
6.2.2. TIR Fijo	265

6.2.3. Análisis de sensibilidad sobre el precio de venta de la electricidad.	266
6.2.4. Análisis de rentabilidad incluyendo subvención	269
7. ANALISIS LEGAL	270
7.1. Requerimientos para asociar en futuros proyectos de rellenos sanitarios – Carteles licitatorios.	270
7.2. Incentivos y excepciones para promover la valoración de biogás	275
7.3. Definición de las actualizaciones técnicas requeridas frente al Plan de Descarbonización Nacional	276
8. CONCLUSIONES	278
9. RECOMENDACIONES	285
10. REFERENCIAS	288
11. ANEXOS	290

Índice de Abreviaciones

ARESEP	Autoridad Reguladora de Servicios Públicos
CDN	Contribución Nacionalmente Determinada
CND	Contribución Nacionalmente Determinada
CNFL	Compañía Nacional de Fuerza y Luz
COOPEALFARORUIZ	Cooperativa De Electrificación Rural De Alfaro Ruiz, R.L
COOPEGUANACASTE	Cooperativa De Electrificación Rural De Guanacaste, R.L
COOPELESCA	Cooperativa De Electrificación Rural De San Carlos, R.L.
COV's	Compuestos Orgánicos Volátiles
EIA	Estudio de Impacto Ambiental
ENSRVR	Estrategia Nacional de Separación, Recuperación y Valorización de Residuos
EPM	Empresa Propiedad de Mujer
ESPH	Empresa de Servicios públicos de Heredia.
GAM	Gran Área Metropolitana
GEI	Gases Efecto Invernadero
GIRS	Gestión Integral de Residuos Solidos
JASEC	Junta Administrativa del Servicio Eléctrico de Cartago
LEL	Lower explosive limit
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía
MOP	Obras Públicas de la Nación Argentina
ODS	Objetivos del Desarrollo Sostenible
PGA	Plan de Gestión Ambiental
RSO	Residuos Sólidos Orgánicos
SETENA	Secretaría Técnica Nacional Ambiental
SINIR	Sistema Nacional de Información de Residuos

TIR	Tasa de Rendimiento Interno
TR	Tiempo de Retorno
UCC	Unidades Costarricenses de Carbono
UNOPS	Oficina de las Naciones Unidas de Servicios para Proyectos
VAP	Viabilidad Ambiental Potencial
VPN	Valor Presente Neto

Tabla de cuadros

Cuadro 1. Municipalidades con sitios de disposición final a más de cincuenta kilómetros de distancia, Fuente: Soto, Silvia - Informe Estado de la Nación (2019)	25
Cuadro 2. Actores y organización sectorial para la gobernanza en la valoración de biogás.	38
Cuadro 3. Acciones desarrolladas para gestionar la emisión de GEI/biogás	45
Cuadro 4. Encuentros realizados con actores del sector energético de Costa Rica	50
Cuadro 5. Resumen de entrevistas realizadas a los operadores de relleno sanitarios y vertederos.	56
Cuadro 6. Calendario de muestreos de biogás realizados en los diferentes rellenos sanitarios y vertedero.	60
Cuadro 7. Tamaño de muestra en cada sitio seleccionado.	63
Cuadro 8. Valores predeterminados de k modelo LandGEM	66
Cuadro 9. Valores predeterminados de L ₀ modelo LandGEM	67
Cuadro 10. Datos de composición de residuos regionales depositados por defecto del modelo (IPCC 2019)	70
Cuadro 11. Contenido de carbono orgánico degradable de los diferentes tipos de residuos	71
Cuadro 12. Factor de corrección de metano según el tipo de sitio	73
Cuadro 13. Valores predeterminados de la constante de generación de metano según las condiciones climáticas del sitio y los tipos de residuos	74
Cuadro 14. Factor de oxidación según el tipo de sitio	75
Cuadro 15. Parámetros considerados para el cálculo del Costo Medio Ponderado del Capital WACC	79
Cuadro 16. Parámetros considerados para el cálculo de la rentabilidad esperada.	80
Cuadro 17. Procedencia de las muestras utilizadas en la caracterización de residuos para el relleno R1. Elaboración propia, Cónica 2023.	97
Cuadro 18. Caracterización de residuos para el relleno R1. Fuente: Elaboración propia, Cónica 2023.	98
Cuadro 19. Procedencia de las muestras utilizadas en la caracterización de residuos para el R2. Fuente: Elaboración propia, Cónica 2023.	99
Cuadro 20. Caracterización de residuos para el R2. Fuente: Elaboración propia, Cónica 2023.	99

Cuadro 21. Procedencia de las muestras utilizadas en la caracterización de residuos para el R3. Fuente: Elaboración propia, Cónica 2023.	100
Cuadro 22. Caracterización de residuos para el R3. Fuente: Elaboración propia, Cónica 2023.	101
Cuadro 23. Procedencia de las muestras utilizadas en la caracterización de residuos para el R4. Fuente: Elaboración propia, Cónica 2023.	102
Cuadro 24. Caracterización de residuos para el R4. Fuente: Elaboración propia, Cónica 2023.	103
Cuadro 25. Procedencia de las muestras utilizadas en la caracterización de residuos para el V1. Fuente: Elaboración propia, Cónica 2023.	104
Cuadro 26. Caracterización de residuos para el V1. Fuente: Elaboración propia, Cónica 2023.	104
Cuadro 27. Caracterización de residuos de los 5 sitios muestreados. Valor en porcentaje.	105
Cuadro 28. Recopilación estudios de composición de residuos sólidos municipales, incluye aporte de comercios. Fuente: Informe situación de residuos sólidos para la determinación del NAMA Residuos Costa Rica (Rudin et. al, 2018).	106
Cuadro 29. Datos de la campaña de medición del relleno R1.	110
Cuadro 30. Repartición de los datos de acuerdo con el contenido de metano en el biogás R1	111
Cuadro 31. Repartición de los datos de acuerdo con el contenido de oxígeno en el biogás R1	112
Cuadro 32. Datos de la campaña de medición de R2.	112
Cuadro 33. Repartición de los datos de acuerdo con el contenido de metano en el biogás de R2.	113
Cuadro 34. Repartición de los datos de acuerdo con el contenido de oxígeno en el biogás de R2.	114
Cuadro 35. Datos de la campaña de medición del R3	115
Cuadro 36. Repartición de los datos de acuerdo con el contenido de metano en el biogás R3.	116
Cuadro 37. Repartición de los datos de acuerdo con el contenido de oxígeno en el biogás R3.	116
Cuadro 38. Datos de la campaña de medición en R4.	117
Cuadro 39. Repartición de los datos de acuerdo con el contenido de metano en el biogás de R4.	118
Cuadro 40. Repartición de los datos de acuerdo con el contenido de oxígeno en el biogás de R4.	118
Cuadro 41. Datos de la campaña de medición del V1.	119
Cuadro 42. Comparación de resultados de los rellenos sanitarios.	120
Cuadro 43. Datos de entrada y parámetros modelo LandGEM – R1	122
Cuadro 44. Datos de entrada y parámetros modelo LandGEM R2	124
Cuadro 45. Datos de entrada y parámetros modelo LandGEM R3	125
Cuadro 46. Datos de entrada y parámetros modelo LandGEM R4	127
Cuadro 47. Datos de entrada y parámetros modelo LandGEM para V1	129

Cuadro 48. Datos de entrada y parámetros modelo IPCC R1	130
Cuadro 49. Datos de entrada y parámetros modelo IPCC R2	132
Cuadro 50. Datos de entrada y parámetros modelo IPCC R3	134
Cuadro 51. Datos de entrada y parámetros modelo IPCC de R4	136
Cuadro 52. Datos de entrada y parámetros modelo IPCC V1	138
Cuadro 53. Comparación de los resultados de producción total de biogás teórico y experimental	145
<i>Cuadro 54. Cantones con disposición final en R1 y su IDG 2020- IDG-D 2020</i>	147
<i>Cuadro 55. Índice De Desigualdad De Género Cantonal Y Sus Componentes, Puntarenas - 2020</i>	147
<i>Cuadro 56. Índice De Desarrollo De Genero Cantonal Y Sus Componentes, Puntarenas - 2020</i>	148
<i>Cuadro 57. Cantones con disposición final en R2 R2 y su IDG 2020- IDG-D 2020</i>	151
<i>Cuadro 58. Índice De Desigualdad De Género Cantonal Y Sus Componentes, R2 - 2020</i>	152
<i>Cuadro 59. Cantones con disposición final R3 y su IDG 2020- IDG-D 2020</i>	157
<i>Cuadro 60. Índice De Desigualdad De Género Cantonal Y Sus Componentes, R3 - 2020</i>	157
<i>Cuadro 61. Índice De Desarrollo De Genero Cantonal Y Sus Componentes, San Jose - 2020</i>	158
<i>Cuadro 62. Cantones con disposición final en R4 y su IDG 2020- IDG-D 2020</i>	163
<i>Cuadro 63. Índice De Desigualdad De Genero Cantonal Y Sus Componentes, Aczarri - 2020.</i>	163
<i>Cuadro 64. Cantones con disposición final en V1 y su IDG 2020- IDG-D 2020</i>	165
<i>Cuadro 65. Índice De Desigualdad De Género Cantonal Y Sus Componentes, V1 - 2020</i>	165
<i>Cuadro 66. Parámetros considerados para las propuestas de valorización en los rellenos sanitarios</i>	173
Cuadro 67. Descripción de los componentes P&ID de las diferentes propuestas	173
Cuadro 68. CAPEX del sistema de conducción para R1	180
Cuadro 69. Propuesta de equipos para extracción forzada y quema en R1.	181
Cuadro 70. Especificaciones de la cotización realizada a la empresa C-deg - CAPEX. No Incluye transporte internacional, nacionalización y transporte nacional. No incluye IVA ni Arancel	181
Cuadro 71. Resumen de OPEX del sistema de extracción forzada y quema controlada - Cotización C-deg	182
Cuadro 72. Parámetros exigidos en la composición del biogás a la entrada de los equipos generadores de electricidad (Fuente: Jenbacher data sheet)	185
Cuadro 73. Propuesta de tecnología para limpieza primaria en R1	185
Cuadro 74. Composición del biogás a la entrada del sistema de tratamiento para R1 (Fuente: Data sheet FAKA 6000K2)	185
Cuadro 75. Propiedades físicas del biogás a la entrada del sistema de tratamiento para R1 (Fuente: Data sheet FAKA 6000K2)	186
Cuadro 76. CAPEX y detalle de los equipos del sistema de tratamiento de biogás para la generación eléctrica	186
Cuadro 77. Parámetros generales del proyecto de generación eléctrica en el relleno sanitario R1	187

Cuadro 78. Estimación de la eficiencia de captura para R1, referencia Modelo colombiano.	187
Cuadro 79. Caudales de generación de biogás en el relleno sanitario R1 utilizando el modelo de generación de biogás IPCC 2019 y los caudales de recolección de biogás para una eficiencia de captura de 55%	188
Cuadro 80. Parámetros utilizados para la estimación de la generación de energía eléctrica en R1	191
Cuadro 81. Estimación de la electricidad neta generada y cálculo de la capacidad instalada de la planta de generación para R1	192
Cuadro 82. Presenta el CAPEX relacionado al proyecto de generación eléctrica propuesta para el relleno R1	194
Cuadro 83. Caudales anuales de biogás recolectado, de metano recolectado y destruido en antorcha o planta de generación y reducción de millones de toneladas métricas de CO ₂ equivalente (MTCO ₂ E) totales en R1	195
Cuadro 84. Caudales anuales del consumo real de biogás en la planta de generación, caudales anuales de metano destruidos en los motores y reducción de millones de toneladas métricas de CO ₂ equivalente (MMTCO ₂ E) por el proyecto de generación eléctrica solamente en R1.	195
Cuadro 85. CAPEX sistema de conducción para R2	202
Cuadro 86. Propuesta de equipos para quema en R2	203
Cuadro 87. Resumen del CAPEX del sistema de extracción forzada y quema controlada del biogás para el relleno R2	203
Cuadro 88. Resumen del OPEX del sistema de extracción forzada y quema controlada del biogás para el relleno R2	204
Cuadro 89. Propuesta de tecnología para limpieza primaria en R2	205
Cuadro 90. Resumen del CAPEX del sistema de tratamiento de biogás para R2	206
Cuadro 91. Parámetros generales del proyecto de generación eléctrica en el relleno sanitario R2	207
Cuadro 92. Estimación de la eficiencia de captura para R2, referencia Modelo colombiano.	207
Cuadro 93. Caudales de generación de biogás en el relleno sanitario utilizando el modelo de generación de biogás IPCC 2019 y los caudales de recolección de biogás para una eficiencia de captura de 40% en R2	208
Cuadro 94. Parámetros utilizados para la estimación de la generación de energía eléctrica en R2	211
Cuadro 95. Estimación de la electricidad neta generada y cálculo de la capacidad instalada de la planta de generación para R2	211
Cuadro 96. Resumen CAPEX para el sistema de generación eléctrica en el relleno sanitario R2	212
Cuadro 97. Caudales anuales de biogás recolectado, de metano recolectado y destruido en antorcha o planta de generación y reducción de toneladas métricas de CO ₂ equivalente (MTCO ₂ E) totales en R2	213
Cuadro 98. Caudales anuales del consumo real de biogás en la planta de generación, caudales anuales de metano destruidos en los motores y reducción de toneladas	

métricas de CO ₂ equivalente (MTCO _{2E}) por el proyecto de generación eléctrica solamente en R2.	214
Cuadro 99. Propuesta de tecnología para limpieza primaria en R3	216
Cuadro 100. Resumen de CAPEX del sistema de tratamiento de biogás para el relleno sanitario R3	216
Cuadro 101. Parámetros generales del proyecto de generación eléctrica en el relleno sanitario R3	217
Cuadro 102. Caudales de generación de biogás en el relleno sanitario utilizando el modelo de generación de biogás IPCC 2019 y los caudales de recolección de biogás para una eficiencia de captura de 40% en R3	218
Cuadro 103. Caudal de generación, porcentaje de captura y caudal de biogás valorizable en el relleno R3.	219
Cuadro 104. Parámetros utilizados para la estimación de la generación de energía eléctrica para R3	221
Cuadro 105. Estimación de la electricidad neta generada y cálculo de la capacidad instalada de la planta de generación en R3	221
Cuadro 106. CAPEX relacionado al proyecto de generación eléctrica propuesta para el relleno sanitario R3.	223
Cuadro 107. Caudales anuales del consumo real de biogás en la planta de generación, caudales anuales de metano destruidos en los motores y reducción de millones de toneladas métricas de CO ₂ equivalente (MTCO _{2E}) por el proyecto de generación eléctrica solamente para R3.	223
Cuadro 108. Configuración de filtro de membrana para R3	226
Cuadro 109. Producción anual de biometano R3	226
Cuadro 110. Características del biogás producido después de depuración para R3	227
Cuadro 111. Síntesis de los costos de CAPEX estación GNC R3	229
Cuadro 112. Síntesis de los costos OPEX estación GNC R3	230
Cuadro 113. Características del sistema de almacenamiento de GNC	231
Cuadro 114. CAPEX de la alternativa de aprovechamiento de biometano para producción de GNC en R3	232
Cuadro 115. Propuesta de equipos para extracción forzada y quema en R4	233
Cuadro 116. Resumen de OPEX del sistema de extracción y quema controlada del biogás del relleno R4	234
Cuadro 117. Propuesta de tecnología para limpieza primaria en R4	235
Cuadro 118. CAPEX sistema de tratamiento para R4	236
Cuadro 119. Parámetros generales del proyecto de generación eléctrica en el relleno sanitario R4.	236
Cuadro 120. Caudales de generación de biogás en el relleno sanitario utilizando el modelo de generación de biogás IPCC y los caudales de recolección de biogás para una eficiencia de captura de 80% para R4	237
Cuadro 121. Parámetros utilizados para la estimación de la generación de energía eléctrica en R4	239
Cuadro 122. Estimación de la electricidad neta generada y cálculo de la capacidad instalada de la planta de generación para R4	239

Cuadro 123. CAPEX relacionado al proyecto de generación eléctrica propuesta para el relleno sanitario R4	241
Cuadro 124. Caudales anuales de biogás recolectado, de metano recolectado y destruido en antorcha o planta de generación y reducción de toneladas métricas de CO ₂ equivalente (MTCO ₂ E) totales para R4.	242
Cuadro 125. Caudales anuales del consumo real de biogás en la planta de generación, caudales anuales de metano destruidos en la planta de generación y reducción de toneladas métricas de CO ₂ equivalente (MTCO ₂ E) por el proyecto de generación eléctrica solamente en R4	243
Cuadro 126. Parámetros del biogás requeridos en el ingreso a los equipos de depuración para producción de biometano Fuente (Arol Energy – 2019)	245
Cuadro 127. Parámetros de calidad del biometano Fuente: (Arol Energy -2019)	245
Cuadro 128. Configuración de filtro de membrana para R4	246
Cuadro 129. Producción anual de biometano para R4	246
Cuadro 130. Características del biogás producido después de depuración en R4	247
Cuadro 131. CAPEX sistema de valoración para producción de GNL en R4	251
Cuadro 132. OPEX sistema de valoración para producción de GNL en R4	252
Cuadro 133. CAPEX del sistema de conducción para V1.	258
Cuadro 134. CAPEX sistema de extracción forzada y quema para V1	259
Cuadro 135. Alcance de las propuestas de generación de energía eléctrica en la muestra de rellenos sanitarios.	259
Cuadro 136. Resumen de los CAPEX por relleno sanitario, donde se detalla el alcance (conducción, quema forzada, tratamiento y generación eléctrica)	260
Cuadro 137. Resumen de los costos de operación asociados a cada una de las instalaciones de generación	262
Cuadro 138. Resumen de los ingresos anuales en los proyectos de generación de energía eléctrica en los rellenos sanitarios	262
Cuadro 139. Análisis de rentabilidad de las propuestas de generación.	264
Cuadro 140. Evaluación del precio de electricidad para un TIR=WACC	265
Cuadro 141. Resumen de una simulación en R1, mostrando la evolución de los parámetros financieros según diferentes precios de energía eléctrica	266
Cuadro 142. Resumen de una simulación en R2, mostrando la evolución de los parámetros financieros según diferentes precios de energía eléctrico	267
Cuadro 143. Resumen de una simulación en R3, mostrando la evolución de los parámetros financieros según diferentes precios de energía eléctrica	267
Cuadro 144. Resumen de una simulación en R4, mostrando la evolución de los parámetros financieros según diferentes precios de energía eléctrica	268
Cuadro 145. Análisis de rentabilidad del proyecto de generación en función de la tasa de subvención aplicada al CAPEX.	269

Tabla de ilustraciones

<i>Ilustración 1. Caracterización de género en las diferentes actividades que componen la GIRS</i>	22
Ilustración 2. Posición de Costa Rica en el Índice de Desempeño Ambiental en relación con los países de América Latina y el mundo, por objetivo, según categoría. Fuente: Informe del Estado de la Nación, 2022. (Programa Estado de la Nación 2022).	23
Ilustración 3. Mapa de rellenos sanitarios y estaciones de transferencia activos en Costa Rica. Fuente (Ulate, 2023)	26
Ilustración 4. Disponibilidad de indicadores para el seguimiento del ODS 5, Setiembre 2022 Fuente: INEC, 2022	32
Ilustración 5. Información del Empleo y las Brechas de Salario entre Hombre y mujeres, Contribución Nacionalmente Determinada, Fuente: NDC (Contribución Nacionalmente Determinada), 2020	34
Ilustración 6. Actores y organización por actividades de la gobernanza en la valoración de biogás.	38
Ilustración 7. Herramientas Internacionalmente más usadas para incentivar la valoración de biogás.	46
Ilustración 8. Fases contempladas en el desarrollo de la consultoría.	53
Ilustración 9. Esquema del proceso de depuración para producción de biometano Fuente AROL ENERGY	170
Ilustración 10. Formas de valorización de biogás generado en rellenos sanitarios .	172
Ilustración 11. P&ID de los sistemas de extracción forzada, quema, tratamiento y valorización de R1	178
Ilustración 12. P&ID de los sistemas de extracción forzada, quema, tratamiento y valorización de R1	198
Ilustración 13. P&ID de la alternativa de producción de biometano para R3.	225
Ilustración 14. Representación de un gasoducto virtual según la solución de Edge Energy.	231
Ilustración 15. P&ID de la alternativa de producción de energía eléctrica para R4.	244
Ilustración 16. P&ID de la alternativa de producción de biometano para R4.	249
Ilustración 17. Capacidad de prevenir las emisiones de CO ₂ E para cada uno de los proyectos de generación, horizonte de evaluación 15 años .	280

Tabla de imágenes

Imagen 1. Fotografía satelital del relleno sanitario L1 (Fuente Google Earth)	81
Imagen 2. Fotografía satelital del relleno sanitario L2 (Fuente Google Earth)	84
Imagen 3. Fotografía satelital del relleno sanitario L3 (Fuente Google Earth)	86
Imagen 4. Fotografía satelital del relleno sanitario L4 (Fuente Google Earth)	88
Imagen 5. Fotografía satelital del relleno sanitario L5 (Fuente Google Earth)	89
Imagen 6. Fotografía satelital del relleno sanitario L6 (Fuente Google Earth)	92

Imagen 7. Fotografía satelital del relleno sanitario L7 (Fuente Google Earth)	93
Imagen 8. Fotografía satelital del Vertedero Turrialba (Fuente Google Earth)	95
Imagen 10. R1, julio 2023. Se aprecia el cuarteo de las muestras y la fracción de residuos orgánicos obtenida al final del proceso.	99
<i>Imagen 11. R2, julio 2023. Se aprecia el cuarteo de las muestras y la fracción de residuos orgánicos obtenida al final del proceso.</i>	100
Imagen 12. R3, julio 2023. Se aprecia la recepción y cuarteo de muestras y la fracción residuos orgánicos obtenida al final del proceso.	102
Imagen 13. R4, julio 2023.	103
Imagen 14. Imágenes del V1, julio 2023. Se visualiza la recepción de muestras, cuarteo y separación de tipo de residuos.	105
Imagen 15. Campaña de medición del relleno R1.	109
Imagen 16. Campaña de medición de R2.	112
Imagen 17. campaña de medición del R3.	115
Imagen 18. Campaña de medición en R4.	117
Imagen 19. Campaña de medición V1.	119
Imagen 20. Distribución de chimeneas existentes en R1 (Fuente: DWG proporcionado por el relleno sanitario)	179
Imagen 21. Chimeneas seleccionadas para la conexión directa a los manifolds en R1	179
Imagen 22. Configuración de la red de conducción para R1	180
Imagen 23. Ubicación de la subestación Garabito y de R1, y trazado referencial de la línea de conexión desde la planta de generación a la subestación.	193
Imagen 24. Propuesta del sistema de chimeneas para la captura de biogás en R2	199
Imagen 25. Pozos existentes y área cubierta en R2	200
Imagen 26. Pozos sugeridos y área adicional cubierta para R2	200
Imagen 27. Colector o Manifolds en R2	201
Imagen 28. Sistema de captura y conducción R2	202
Imagen 29. Subestación de Guanacaste y trazado preliminar de línea eléctrica hasta el relleno sanitario R2	212
Imagen 30. Sistemas de captura, quema controlada y generación eléctrica en R3. (Fuente: EBI)	215
Imagen 31. Subestación y alimentador más cercanos a R3(Fuente: CNFL)	222
Imagen 32. Implantación posible de la estación de GNC en R3	228
Imagen 33. Subestación y alimentador más cercanos a R4 (Fuente: CNFL)	241
Imagen 34. Instalación de licuefacción de Cryo Pur en la planta de Valenton, Francia	251
Imagen 35. Estación de servicio de GNL y GNC en Sorigny, Francia	251
Imagen 36. Condiciones de conformación del vertedero V1	253
Imagen 37. Levantamiento topográfico del V1	254
Imagen 38. Propuesta 1 para el sistema de captura en V1	255
Imagen 39. Configuración del sistema de conducción de la propuesta 1 para V1	257
Imagen 40. Configuración del sistema de conducción de la propuesta 2 en V1.	257

Tabla de gráficas

Gráfica 1. Porcentaje de emisiones de gases de efecto de invernadero, por sector. CO ₂ eq Fuente: Informe del Estado de la Nación, 2022. (Programa Estado de la Nación 2022).	21
Gráfica 2. Precio de bonos de carbono a nivel internacional (International Bank for Reconstruction and Development, 2023)	43
Gráfica 3. Interfaz hoja de cálculo modelo LandGEM	65
Gráfica 4. Variación del potencial de generación de biogás en función de k	66
Gráfica 5. Captura de pantalla sobre información requerida modelo LandGEM	68
Gráfica 6. Proyección no condicional de inflación Fuente: (IPC)	78
Gráfica 7. Valor de la electricidad en el tiempo Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP)	79
Gráfica 8. Historial de disposición en L1. 2023*: Toneladas dispuestas hasta marzo (Fuente: Encuesta realizada al operador del relleno)	82
Gráfica 9. Caracterización de residuos urbanos y comerciales en L1. (Fuente: Encuesta realizada al operador del relleno)	82
Gráfica 10. Historial de disposición en el L2	85
Gráfica 11. Caracterización de residuos del L2 (Fuente: Caracterización realizada por el equipo de consultoría)	85
Gráfica 12. Historial de disposición en el L3	87
Gráfica 13. Caracterización de residuos del L3 (Fuente: Caracterización realizada por el equipo de consultoría)	87
Gráfica 14. Historial de disposición en L4	89
Gráfica 15. Historial de disposición en L5	90
Gráfica 16. Caracterización de residuos de L5(Fuente: Encuesta realizada al operador del relleno)	91
Gráfica 17. Historial de disposición en L6	93
Gráfica 18. Historial de disposición en L7	94
Gráfica 19. Historial de disposición en V1	96
Gráfica 20. Caracterización de residuos de V1 (Fuente: Sumando Vida GIR , 2021 - 2026)	96
Gráfica 21. Comparación de los resultados de composición de residuos de este estudio con la recopilación de estudios de composición de la NAMA residuos Costa Rica (Rudin et. al, 2018)	108
Gráfica 22. Producción de biogás modelo LandGEM para R1	123
Gráfica 23. Producción de biogás modelo LandGEM para R2	125
Gráfica 24. Cantidad de residuos sólidos depositados en R3	126
Gráfica 25. Producción de biogás modelo LandGEM para R3	127
Gráfica 26. Producción de biogás modelo LandGEM para R4	128
Gráfica 27. Producción de biogás modelo LandGEM para V1	130
Gráfica 28. Producción de biogás modelo IPCC para R1	132
Gráfica 29. Producción de biogás modelo IPCC R2	134
Gráfica 30. Producción de biogás modelo IPCC R3	136
Gráfica 31. Producción de biogás modelo IPCC de R4	138
Gráfica 32. Producción de biogás modelo IPCC V1	140

Gráfica 33. Comparación de los resultados de producción potencial de biogás para los diferentes sitios de disposición	143
Gráfica 34. Comparación de los resultados obtenidos por modelo con respecto al valor experimental	144
Gráfica 35. Distribución de cargos no administrativos (operativos, técnicos) por género del Grupo RABSA en Costa Rica-2023	151
Gráfica 36. Distribución de cargos en R2 -2023	156
Gráfica 37. Distribución de cargos no administrativos por género. R3 y R4, EBI Costa Rica - 2023	162
Gráfica 38. Proyección de biogás generado y capturado en el relleno sanitario	189
Gráfica 39. Proyección de la estimación de la recolección de biogás en el relleno sanitario y representación del consumo real de biogás para 3 diferentes caudales de diseño (mínimo, máximo y promedio)	190
Gráfica 40. Caudales de generación, recolección (55% captura) y consumo real de biogás para R1.	191
Gráfica 41. Proyección de biogás generado y capturado en el relleno sanitario R2	209
Gráfica 42. Proyección de la estimación de la recolección de biogás en R2 y representación del consumo real de biogás para caudal de diseño máximo y promedio	210
Gráfica 43. (a) Estimación de la generación, recolección y consumo real de biogás en R2. (b) Integración de la generación de biogás en las celdas futuras al proyecto de generación de energía eléctrica.	210
Gráfica 44. Proyección de biogás generado y capturado en el relleno sanitario R3	219
Gráfica 45. Proyección de la estimación de la recolección de biogás en el relleno sanitario R3 y representación del consumo real de biogás para caudal de diseño máximo y promedio	220
Gráfica 46. Proyección de biogás generado y capturado en el relleno sanitario R4	238
Gráfica 47. Proyección de la estimación de la recolección de biogás en el relleno sanitario R4 y representación del consumo real de biogás para caudal de diseño máximo y promedio	239
Gráfica 48. Representación comparativa de los costos de inversión de las propuestas por relleno sanitario	261
Gráfica 49. Resumen de los ingresos totales, durante los 15 años del modelo financiero, por relleno sanitario.	263
Gráfica 50. Análisis de la TIR y del tiempo de amortización según las propuestas de generación en los rellenos sanitario	265
Gráfica 51. Precio de electricidad determinado para WACC=TIR	266
Gráfica 52. Análisis de la TIR y del tiempo de amortización para diferentes precios de electricidad	267
Gráfica 53. Análisis de la TIR y del tiempo de amortización para diferentes precios de electricidad	267
Gráfica 54. Análisis de la TIR y del tiempo de amortización para diferentes precios de electricidad	268

Gráfica 55. Análisis de la TIR y del tiempo de amortización para diferentes precios de electricidad	269
Gráfica 56. Variación del precio de venta de electricidad producida a partir de biogás del relleno sanitario R2, considerando subvenciones.	270
Gráfica 57. Contribución a la generación de biogás en el 2023 por relleno	282

0.

INTRODUCCION

El presente estudio tiene como objetivo la caracterización de los residuos dispuestos y la cuantificación de generación de biogás en una muestra de rellenos sanitarios y vertederos en

Costa Rica. La finalidad es analizar y proponer alternativas de valorización energéticas del biogás.

La muestra de rellenos sanitarios y vertederos seleccionados, a través de una matriz multicriterio, corresponde a 5 sitios de disposición final denominados como: R1, R2, R3, R4 (rellenos sanitarios) y V1 (vertederos).

De manera general, los resultados de la caracterización de cada sitio presentan en su mayoría un porcentaje bastante elevado de plásticos, entre 13.8 y 31.8 %, el cual no favorece en absoluto la producción de biogás. Por el contrario, dificultan la degradación de los residuos biodegradables. Adicionalmente, el contenido biodegradable (Papel, cartón y residuos orgánicos) son los de mayor presencia en la caracterización entre 34.7% y 62.10% y que en su mayoría corresponde a residuos de degradación rápida, residuos orgánicos, cuya composición varía entre 26,3% y 62,10%.

Con información proporcionada por los operadores de los sitios, los resultados de la caracterización de residuos y biogás se cuantificó la producción de biogás a través del modelo el IPCC Waste Model del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (2019) para un horizonte de 30 años. Actualmente (2023), los rellenos sanitarios y vertederos tienen una producción de biogás de 47.000.000 m³/año de biogás, donde la contribución de los sitios estudiados es R1: 24%, R2: 3%, R3: 23%, R4: 49% y el V1: 1%.

Como alternativas de valorización se ha evaluado la factibilidad financiera de la producción de energía eléctrica en los 4 rellenos sanitarios. El análisis de la producción de biometano a partir del biogás en rellenos sanitarios en el contexto de Costa Rica es complejo, ya que no cuenta con una red de gas para la inyección del biometano, sin embargo, se ha explorado la posibilidad y se presenta el CAPEX y OPEX para exportación bio-GNL y consumo para la movilidad de bio-GNC.

En cuanto al vertedero seleccionado se ha establecido en función de las condiciones de cierre, la baja producción de biogás y las diferentes obras y sistemas requeridos para realizar valorización que representan una alta inversión frente al bajo potencial de aprovechamiento; un sistema de adecuación y quema del biogás con el objetivo de tratar las emisiones volátiles generados actualmente y que continuarán produciéndose en los años siguientes al cierre.

El escenario de generación de energía eléctrica se ha evaluado para cada uno de los rellenos, las capacidades instaladas determinadas para las plantas de generación son R1: 2.2MW, R2: 250kW, R3: 1.6MW y R4: 6.0 MW, las cuales fueron determinadas con los siguientes porcentajes de recolección/captura de biogás: R1: 55%, R2: 40%, R3: 80% y R4: 80%.

En la evaluación financiera de los proyectos de generación eléctrica propuestos, se ha evaluado los proyectos contemplando ingresos por venta de electricidad y venta de bonos de carbono. El precio de venta de certificado de bonos de carbono se estableció en 3 \$/MTCO_{2e}, mientras que la venta de electricidad referencial ha sido 95.82 \$/MWh, conforme la metodología tarifaria basada en la estructura de costos típicos de una planta modelo de generación de electricidad con bagazo de caña).

Con respecto a la rentabilidad financiera, el indicador establecido como referente fue el costo promedio ponderado del capital WACC, igual a 10.64%, que se ha utilizado como tasa de

oportunidad para la evaluación de los proyectos. Los resultados indican que las propuestas de proyectos de generación eléctrica en los rellenos sanitarios R1 (2.2MW), R3 (1.6 MW) y R4 (6.0 MW) son financieramente rentables.

El análisis de tarifas de venta de energía estableciendo la tasa interna de retorno igual a la tasa de oportunidad igual 10,64% permite concluir que los proyectos de generación que brindan una tarifa competitiva son R1 97,48 \$/MWh, R3 78,20\$/MWh y R4 70.10 \$/MWh

En el caso de la propuesta en el R2, se valuó el comportamiento de la tarifa eléctrica en el proyecto de generación en el R2, se analizó la simulación de un escenario donde el CAPEX es subvencionado parcialmente, esta subvención se simula en forma de donación sobre el CAPEX y considerando un TIR = WACC. Los escenarios son 0%, 10%, 20% y 30%, se concluye, que el proyecto de generación en R2 con diferentes valores de subvención no logran producir electricidad a una tarifa de venta competitiva.

Por último, todas las propuestas de generación de energía eléctrica a partir de biogás de rellenos sanitarios se alinean de manera efectiva con el Plan Nacional de Descarbonización de Costa Rica al reducir las emisiones de GEI. Se ha calculado que, en un horizonte de 15 años, las propuestas de generación eléctrica tienen la capacidad de prevenir la emisión de 6.1 millones de TCO_{2e}. La contribución de cada propuesta es la siguiente (R1: 1.324.717 MTCO_{2e}, R2: 170.509 MTCO_{2e}, R3: 675.162 MTCO_{2e} y R4: 3.929.087 MTCO_{2e}).

0.1. Problemática

El biogás resultante de la degradación de la parte orgánica de los residuos está compuesto mayoritariamente de metano, cuyo poder de contaminación es 30 veces superior al de dióxido de carbono, contribuyendo así fuertemente al cambio climático y se vuelve aún más relevante cuando a nivel nacional el sector de residuos representa el tercer sector de generación de emisiones (14.8%) según el Inventario Nacional de emisiones por fuentes y absorción por sumideros de Gases de Efecto Invernadero Costa Rica 1990-2017. La importancia de empezar a implementar acciones sobre las emisiones asociadas a los residuos se ve plasmada en el Plan Nacional de Descarbonización y en la actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada 2020 de Costa Rica (NDC 2020) donde se contemplan objetivos de reducción para este sector.

Este gas de efecto invernadero es producido principalmente por la descomposición de la materia orgánica en los rellenos sanitarios que contribuye al cambio climático. En función de la cantidad producida y de su calidad, es posible recuperar y utilizar el gas de los rellenos sanitarios y vertederos para generar electricidad y proporcionar combustible a la industria. La recuperación y valorización del biogás tiene dos grandes ventajas. En primer lugar, la captura y quema de gases evita la disipación de metano a la atmósfera. En segundo lugar, el uso de energía procedente del gas puede sustituir a fuentes de energía no renovables como el petróleo.

Finalmente, la generación de gases de efecto invernadero asociadas al sector de residuos - considerando su transporte, reciclaje y disposición final- cuenta con proyecciones de incremento, estimándose en 1501 mil toneladas de CO₂ para el 2030). Estas emisiones tienen

un aporte mayoritario de los rellenos sanitarios, dónde la mayoría cuenta con quemadores pasivos de gas, por lo que el efecto del metano en el cambio climático continúa en ascenso

0.2. Justificación

Los resultados del presente estudio permitirán tener insumos orientados a apoyar la trayectoria de la descarbonización y resiliencia del país en los ejes de planeación sostenible, gestión integral de residuos, transición justa con igualdad de género como eje transversal. Estos insumos son la cuantificación de generación de biogás a partir de la caracterización de residuos y de biogás realizada en la muestra de rellenos sanitarios y vertederos. Otro insumo es el resultado del análisis de viabilidad técnico financiero de las propuestas de valorización/aprovechamiento del biogás generados en los rellenos sanitarios y vertederos.

Paralelamente se busca potenciar los esfuerzos nacionales y municipales de diferentes actores públicos y privados para implementar el tratamiento de los residuos orgánicos, transformar el sector residuos hacia uno menos contaminante, procurando por medio de un ciclo de talleres formativos familiarizar a los asistentes con las tecnologías de captura, quema y/o aprovechamiento, metodologías para caracterización de residuos y biogás al igual que su proyección teórica para la toma de decisiones sobre la producción de biogás en los sitios de disposición, todo bajo una concepción de economía circular.

Puntalmente en el alcance del estudio se busca desarrollar y fortalecer la gobernanza, las políticas públicas, los instrumentos técnicos, los productos y los servicios con un enfoque de igualdad de género en materia de residuos y economía circular. Lo anterior se logra por medio de pertinente revisión de regulaciones y condiciones técnicas entorno a la valoración de biogás vinculadas a una serie de propuestas para 5 sitios de disposición final analizados para plantear sistemas que gestionen el biogás producido. Este componente también promueve la reducción de los gases de efecto invernadero mediante la reducción de las emisiones de metano procedentes de los rellenos sanitarios y vertederos.

0.3. Objetivos

0.3.1. Objetivo General

Analizar el potencial de producción y de valorización energética del biogás de una muestra de rellenos sanitarios y vertederos en Costa Rica

0.3.2. Objetivos Específicos

- ✓ Caracterizar los residuos dispuestos y biogás producidos en rellenos sanitarios y vertederos de Costa Rica.
- ✓ Determinar las condiciones requeridas para fortalecer y desarrollar las políticas públicas, programas, servicios relacionados a la gestión de residuos y economía circular con enfoque de igualdad de género.

- ✓ Desarrollar estudio técnico, económico, social y financiero entorno a la reducción de emisiones de GEI a través de la captura, tratamiento y valorización de biogás destacando la participación y contribución de las mujeres a esas alternativas.
- ✓ Realizar formaciones dirigidos al Ministerio de Salud y entidades gubernamentales responsables del funcionamiento de los sitios en estudios y actores relacionados en la gestión de los residuos. Abordando temas desde la presentación de los resultados de los estudios, recomendaciones, condiciones internacionales y nacionales para la viabilizarían del biogás en el territorio, hasta discutir las diferentes herramientas que desde la valoración pueden implementarse para la reducción de la brecha de desigualdad de género.

1.

ARCO DE REFERENCIA PARA LA GESTION Y VALORACION DEL BIOGAS

1.1.

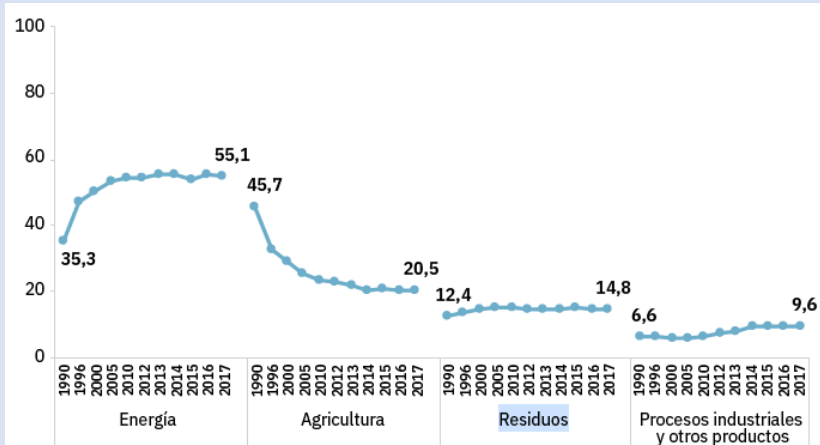
M

G
e
s
t
i
ó
n
i
n
t
e
g
r
a
l
i
d
e
R
e
s
i
d
u
o
s

1.1.1. Situación actual de la Gestión Integral de Residuos Solidos

El sector de residuos en Costa Rica tiene un gran impacto en la salud pública y en los costos económicos, sociales y ambientales del país. De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones, **el sector Residuos es el tercer generador de gases de efecto invernadero en el país** como se puede ver en la Gráfica 1, después de los sectores Energía y Agricultura (Programa Estado de la Nación, 2022). Con respecto al Índice de Desempeño Ambiental en materia de gestión de residuos Costa Rica se posiciona como el quinto país con mejor desempeño para América Latina y el Caribe, y ocupa la posición número 48 a nivel mundial (Programa Estado de la Nación 2022).

Gráfica 1. Porcentaje de emisiones de gases de efecto de invernadero, por sector. CO₂ eq
Fuente: Informe del Estado de la Nación, 2022. (Programa Estado de la Nación 2022).



De acuerdo con datos del informe sobre los indicadores de generación de residuos realizado por la Dirección de Protección Radiológica y Salud Ambiental del Ministerio de Salud (2022) , para el 2021 en el país se generan alrededor de 1,6 millones de toneladas de residuos sólidos ordinarios (RSO) por año (4434 t/d o 0,86 kg por persona y día), siendo la mayor parte depositada en cuatro grandes rellenos sanitarios que son operados por empresas privadas en el Gran Área Metropolitana (GAM). Otra parte significativa de los RSO es depositada en vertederos sin control ambiental adecuado, principalmente fuera de la GAM.

En Costa Rica persiste el modelo de manejo de residuos sólidos imperante desde los años 70's, el cual consiste en recolectar en forma indiscriminada los materiales, transportarlos y disponerlos en rellenos sanitarios en el mejor de los casos, o ilegalmente en botaderos o vertederos. El modelo actual para la gestión de los residuos sólidos del país según el PGIRS se orienta a evitar y reducir residuos, separación y recolección selectiva y la valorización y disposición final. Estos objetivos se enmarcan en las siguientes actividades:

- ✓ Recolección y Transporte
- ✓ Aprovechamiento y Tratamiento
- ✓ Disposición final

El género en las actividades que conforman la gestión de residuos en Costa Rica presenta roles identificados que denotan la brecha de género que existe en el sector como se puede observar en la siguiente ilustración.

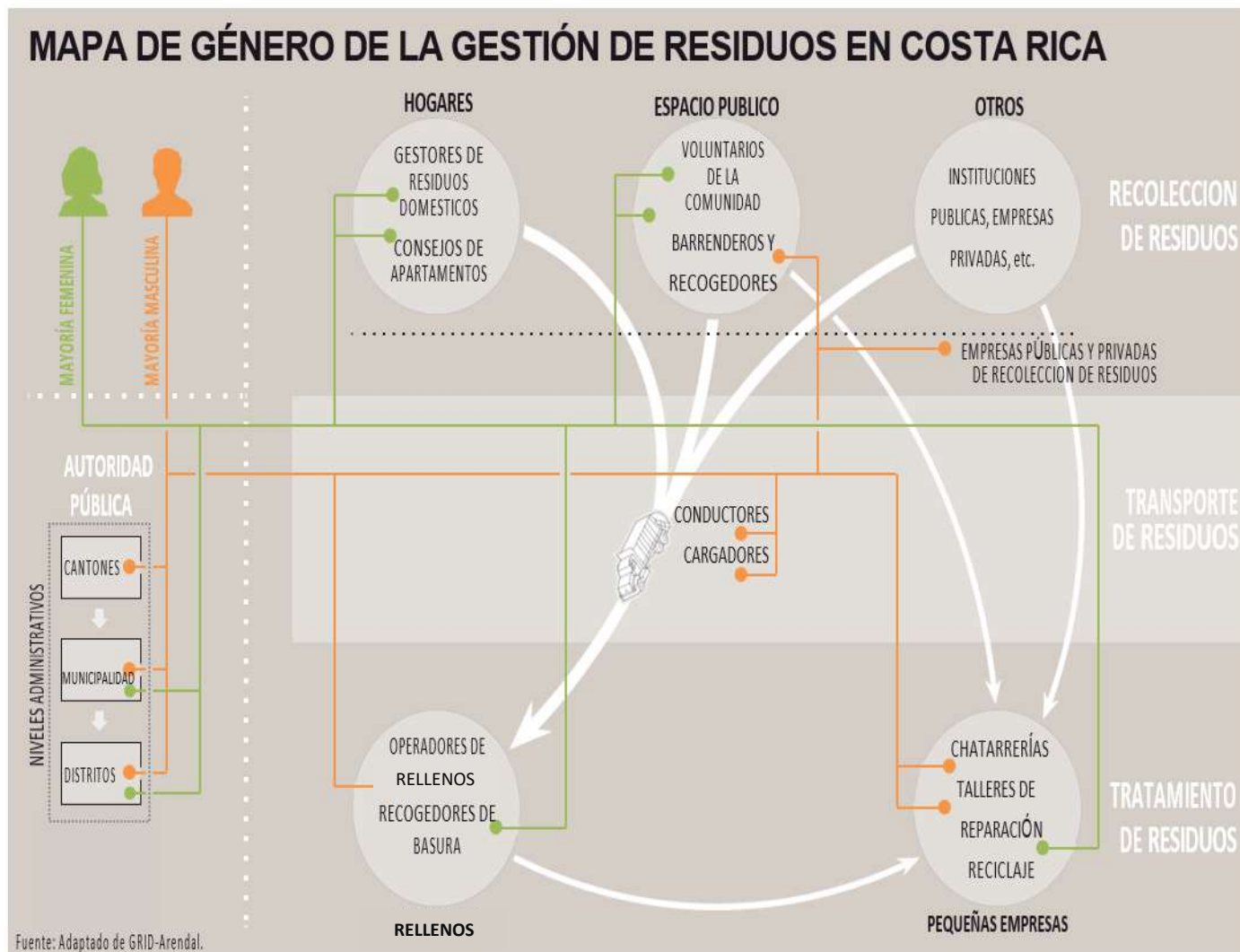


Ilustración 1. Caracterización de género en las diferentes actividades que componen la GIRS

En cuanto a los indicadores del Ministerio de Salud (2021), se realiza el envío del 79.2 % de los residuos a un relleno sanitario, para que sean enterrados; perdiendo así la posibilidad de valorizar la fracción que por su naturaleza lo permite, la cual representa alrededor de un 60% de residuos orgánicos y un 35% de reciclables lo cual refleja deficiencias en el logro de los objetivos planteados en el PGIRS.

Con respecto al Índice de Desempeño Ambiental (Ilustración 2), en materia de gestión de residuos Costa Rica se posiciona como el quinto país con mejor desempeño para América Latina y el Caribe, y ocupa la posición número 48 a nivel mundial (Programa Estado de la Nación 2022).

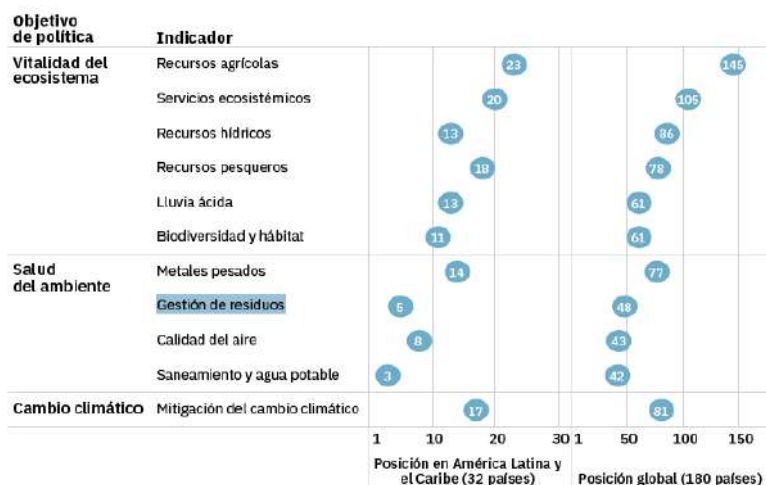


Ilustración 2. Posición de Costa Rica en el Índice de Desempeño Ambiental en relación con los países de América Latina y el mundo, por objetivo, según categoría. Fuente: Informe del Estado de la Nación, 2022. (Programa Estado de la Nación 2022).

Según datos del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), obtenidos a partir del Censo Nacional 2011, solo el 84% de las viviendas del país cuenta con servicio de recolección de residuos por medio de camión recolector, el 10% los queman, un 5% los entierran o disponen en huecos y el porcentaje restante, los tiran a los cuerpos de agua, prácticas que generan impactos negativos en el ambiente. En cuanto a la separación de residuos a nivel nacional, es decir el total de la población, un 41% indica separar el plástico, vidrio y aluminio, un 35,8% de la población manifiesta separar el papel; mientras que un 39% indica separar los restos orgánicos. Según datos del Ministerio de Salud para el año 2021, de las aproximadamente 4.434 toneladas de residuos sólidos generadas diariamente en el país, 3.175 toneladas (79.2%) fueron depositadas en rellenos sanitarios, quedando aproximadamente 833 (11.2%) toneladas de residuos depositados en sitios no controlados, recolectados por gestores privados y las municipalidades que se llevan a la quema o se procede al enterramiento en las casas de habitación y comercios resultado arrojados en lotes baldíos, ríos, quebradas, bordes de carreteras, entre otros. Por último, se tiene que el restante 9.6% de residuos se desconoce su manejo.

A continuación, se aborda **la normativa en materia de Gestión Integral de Residuos relacionada a la valoración de biogás de rellenos sanitarios, vertederos o las diferentes actividades vinculadas** para su posterior análisis sobre oportunidades, desafíos, deficiencias y recomendaciones.

1.1.2. Ley N° 8839 para la Gestión Integral de Residuos Sólidos

Desde la implementación de la Ley para la Gestión Integral de Residuos N° 8839 en 2010, se ha desarrollado una serie de regulaciones con el propósito de garantizar su cumplimiento. Entre las herramientas regulatorias se tiene:

- A. La creación del **Plan de Acción Nacional Para la Gestión Integral de Residuos 2019-2025** orienta las acciones para la gestión integral de los residuos sólidos en Costa Rica, permitiendo el fortalecimiento de las capacidades del sector público, privado y sociedad civil.
- B. La actualización de **reglamentos relacionados con residuos** específicos como rellenos sanitarios, residuos de manejo especial, residuos peligrosos y centros de recuperación, entre otros.
- C. En 2016, se oficializó la **Estrategia Nacional de Separación, Recuperación y Valorización de Residuos** donde uno de los objetivos corresponde a crear una herramienta que pueda valorizar el ciclo de vida de los residuos (MINSA, 2016)
- D. **Estrategia para la Sustitución de Plásticos de un Solo Uso por Alternativas Compostables**. Introducida en el 2017.
- E. Asimismo, en el año 2018 **se oficializa el Plan Nacional de Descarbonización**, que plantea en su Eje 7 el “Desarrollo de un sistema de gestión integrada de residuos basado en la separación, reutilización, revalorización y disposición final de máxima eficiencia y **bajas emisiones de gases de efecto invernadero**” (Gobierno de la República de Costa Rica, 2019). En donde se podrá relacionar con los GEI emitidos por actividades de enterramiento de residuos que, por medio de su valorización, se apoya el alcance del objetivo del eje mencionado.

Con respecto a la gestión integral de residuos, según informe de la Contraloría General de la República (2023) sobre los índices de gestión de servicios de las municipalidades se reportó que, de los 486 distritos, el servicio de recolección, depósito y tratamiento de residuos se realiza en el 74% del total de distritos. Por lo que el porcentaje restante de los distritos en ese momento no tienen acceso a dicho servicio. En consecuencia, en las comunidades donde no existe el servicio, sus habitantes por lo general, recurren a utilizar métodos o prácticas no controladas, tales como enterrarlos, quemarlos o disponerlos en un lote baldío.

A continuación, se establecerá para las actividades que hacen parte del PGIRS, el contexto y la reglamentación relacionada a la valoración de biogás de sitios de disposición final.

1.1.2.1. **Recolección y Transporte**

La recolección de residuos selectiva sigue siendo limitada, ya que en la mayoría de los gobiernos locales no se realiza, se carecen de datos para demostrar el avance, solo ofrecen campañas de recolección ocasionales o los porcentajes de recuperación de residuos son poco significativos (Gobierno de la República de Costa Rica, 2019).

En general, las municipalidades **no logran recobrar los costos por la gestión de los desechos**, y las tarifas son calculadas de manera inadecuada y, aunque se cuenta con algunos datos sobre la localización y la composición de los residuos generados, no se cuenta con la infraestructura necesaria para el aprovechamiento de desechos y estos acaban en sitios de disposición final sin ser previamente procesados. Las tarifas no contemplan el costo de aprovechamiento de biogás, tal es así, solo existe un relleno sanitario en el país que realiza captura activa, quema controlada y generación de energía eléctrica a partir del 6 - 8 % del biogás generado.

De igual modo, los rellenos existentes no solo tienen dificultades para procesar los desechos, ya que algunos de los mismos se encuentran a gran distancia de las localidades, habiendo

más de veinte localidades cuyos sitios de disposición final se encuentran a más de cincuenta kilómetros de distancia, lo que agrava la situación de los desechos, siendo las zonas rurales las que se ven altamente afectadas al ser las más negligidas, dando lugar a focos de contaminación y riesgos para la salud como se presenta en el siguiente cuadro.

Cuadro 1. Municipalidades con sitios de disposición final a más de cincuenta kilómetros de distancia, Fuente: Soto, Silvia - Informe Estado de la Nación (2019)

Provincia, Canton, Distrito	Lugar de Disposicion	Distancia (km)
Puntarenas, Coto Brus	Manejo Integral Tecnoambiente Miramar	366
Puntarenas, Golfito		307
San José , Perez Zeledon		223
Puntarenas, Parrita		191
San José, Leon Cortes		173
Alajuela, Upala		143
Puntarenas, Garabito	WPP Los Pinos	132
Guanacaste, Liberia	Manejo Integral Tecnoambiente Miramar	122
Heredia, Heredia		110
Limon, Talamanca	Berthier EBI Parque tecnología Ambiental Limon	104
Heredia, Barva	Manejo Integral Tecnoambiente Miramar	97.4
Guanacaste, Tilaran		97
Alajuela, Poas		96.7
Alajuela, Grecia		78.30
Guanacaste, Cañas		75
Guanacaste, Carrillo	Relleno Sanitario Santa Cruz	70.9
Guanacaste,Nandayure		60.7
Limón, Siquirres	Berthier EBI Parque tecnología Ambiental Limon	59
San José , Turrubares	Berthier EBI Parque tecnología Ambiental URUKA	58.4
Puntarenas, Buenos Aires	Manejo Integral Tecnoambiente Miramar	58
Heredia, Santa Barbara	WPP Los Pinos	55
Alajuela, Palmares	Manejo Integral Tecnoambiente Miramar	53.8
San José , Mora	Berthier EBI Parque tecnología Ambiental URUKA	53
Guanacaste, Abangares	Manejo Integral Tecnoambiente Miramar	50

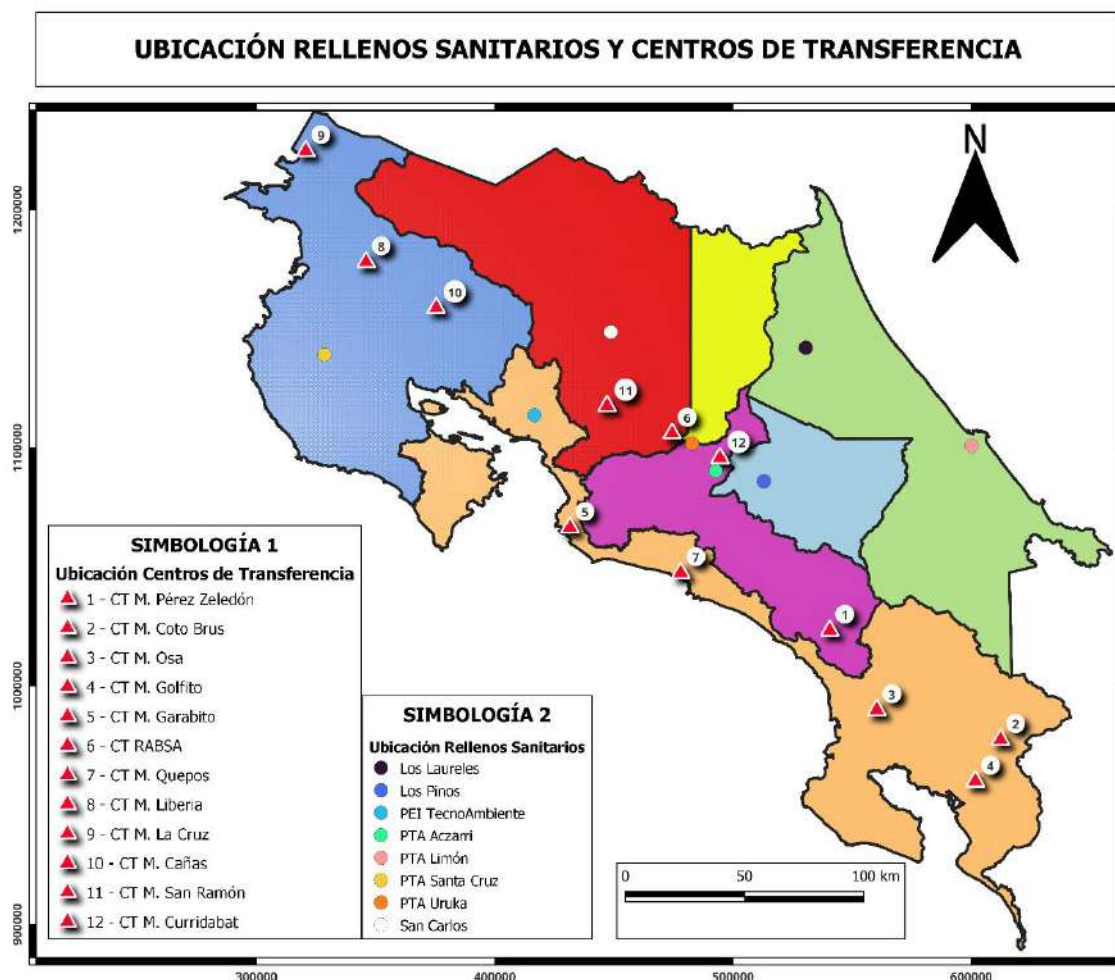


Ilustración 3. Mapa de rellenos sanitarios y estaciones de transferencia activos en Costa Rica. Fuente (Ulate, 2023)

En la Ilustración 3 se muestra la ubicación de los rellenos sanitarios y centros de transferencias distribuidos en los 6 cantones del país. Como se observa, la mayor densidad de rellenos sanitarios en la GAMT de Costa Rica.

1.1.2.2. Aprovechamiento y Tratamiento

En el área metropolitana se produce el 58% del total residuos, los cuales se disponen principalmente en los rellenos sanitarios de los cantones de Santa Cruz, Aserrí, Limón, San José, Montes de Oro y Paraíso.

En consecuencia, el **Plan Nacional de Descarbonización (PND)** y la **Contribución Nacionalmente Determinada de Costa Rica de 2020 (NDC 2020)** buscan implementar políticas para la gestión de residuos sólidos y la economía circular, incluyendo la promoción de la segregación en fuente, el compostaje y la biodigestión para tratar los residuos orgánicos. Así mismo, se promueve la captura y quema de gases para reducir las emisiones de metano y la utilización de gas para generar energía renovable y combustibles.

1.1.2.3. **Disposición final**

En los rellenos sanitarios y vertederos del país ocurre la degradación biológica del 58% de los residuos generados en Costa Rica (fracción orgánica), lo cual produce biogás que está compuesto principalmente de metano que es considerado un GEI. Este gas al no ser capturado, tratado y valorizado impacta en la calidad del aire.

Uno de los enfoques orientadores del Plan nacional para la gestión integral de residuos 2016-2021 es el enfoque **Igualdad y Equidad de Género**. Este establece que las mujeres y los hombres tienen por igual el derecho a disfrutar de un ambiente saludable, libre de contaminación y donde se promueva la salud general de las personas.

El instrumento más importante para la determinación de impactos ambientales en el país es el **Estudio de impacto Ambiental**. Sin embargo, el Plan nacional para la gestión integral de residuos 2016-2021, establece que hay costos ambientales de los residuos que suelen ser muy altos y difíciles de calcular o estimar para la población en general, pero que pueden ser asociados a implicaciones diferenciadas por género, entre ellos están:

- ✓ Los costos ambientales, como la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas y superficiales producto de la percolación y escorrentía superficial, respectivamente. También se contribuye con el calentamiento global, principalmente a través de la descomposición anaeróbica que genera emisiones de gases de efecto invernadero como el metano y el dióxido de carbono.
Las mujeres desempeñan un papel fundamental en el manejo de los recursos naturales a nivel familiar y comunitario y son las más afectadas por la degradación ambiental. En comunidades de todo el mundo, las mujeres manejan agua, fuentes de combustible y alimentos, así como bosques y terrenos agrícolas. Así mismo, las mujeres producen del 60 al 80 por ciento de los alimentos en los países en desarrollo.
- ✓ Los costos de salud, originados por epidemias y enfermedades derivadas de una mala gestión de residuos como la proliferación de mosquitos que transmiten enfermedades, moscas, aves de carroña, entre otros.

Las mujeres ejercen tareas reproductivas y productivas, sin embargo, las tareas reproductivas continúan siendo mayoritariamente responsabilidad de las mujeres en el sur global. A pesar de los avances en materia de igualdad, todavía hay una inequidad en la distribución de las tareas de cuidado¹. Dentro de esas tareas también aparecen las del cuidado de la salud. Este impacto aumenta las cargas ligadas a esta responsabilidad que asumen las mujeres en su mayoría.

¹ Las mujeres quienes dedican una mayor cantidad de tiempo efectivo por semana, con 32:04 horas (treinta y dos horas y cuatro minutos), entretanto los hombres destinan 15:44 horas, lo que significa que las mujeres dedican en promedio el doble del tiempo que los hombres al trabajo doméstico no remunerado (TDRN) que incluye el cuidado y apoyo a integrantes del hogar, INEC -Costa Rica, Encuesta nacional de uso del tiempo, 2022.

- ✓ Los costos relacionados con la pérdida de valor del patrimonio paisajístico y su impacto negativo en actividades inmobiliarias, comerciales, de ocio y de turismo.

El indicador 5.a del **Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS No.5** (Lograr la igualdad de género y empoderar a todas las mujeres y las niñas) se refiere a las reformas que pueda hacer el país para otorgar a las mujeres los mismos derechos a los recursos económicos, así como el acceso a la propiedad y el control de la tierra y otras formas de propiedad, los servicios financieros, la herencia y los recursos naturales, de conformidad con la legislación nacional.

Esto debido a que las mujeres tienen en todo el mundo menos acceso a la propiedad y control de la tierra lo que impide el desarrollo de una completa autonomía económica. Según el documento "Sistema de indicadores ODS 2021: Informe de capacidades estadísticas" del Instituto Nacional de Estadística y Censos de Costa Rica el indicador 5.a.1² de los ODS no puede ser medido debido a la insuficiencia de datos.

Este costo ambiental podría aumentar esta brecha de género si adicional al limitado acceso y control de la tierra y la propiedad se agrega un impacto de pérdida de valor de propiedades pertenecientes a mujeres.

Por lo anterior, el componente 2 del **"Programa de apoyo presupuestario basado en políticas para implementar la trayectoria sostenible e inclusiva de Costa Rica"** tiene como objetivo desarrollar la gobernanza, políticas públicas, instrumentos técnicos y sociales de igualdad de género para la gestión de residuos y la economía circular, reduciendo las emisiones de metano procedentes de los vertederos y rellenos.

Lo anterior, enmarca el contexto de política pública por el que se desarrolla el **Programa de apoyo presupuestario basado en políticas para implementar la trayectoria sostenible e inclusiva de Costa Rica** que a su vez permite la ejecución de la consultoría para la **"Realización de un análisis cuantitativo y cualitativo del biogás de una muestra de rellenos sanitarios y vertederos de Costa Rica y del potencial de valorización energética de este biogás"**

La Ley 8839 y el Decreto 38928 son pilares fundamentales de esta regulación, y las autoridades a nivel nacional y local desempeñan un papel en su implementación y supervisión. Sin embargo, en el caso del manejo del biogás en Rellenos Sanitarios no se encuentra detallados los límites de emisión de biogás al igual que no se detalla las medidas de mitigación en función a las emisiones o al tamaño de la instalación.

² 5.a.1 a) Proporción de la población agrícola total con derechos de propiedad o derechos garantizados sobre tierras agrícolas, por sexo; b) proporción de mujeres entre los titulares de derechos de propiedad o derechos garantizados sobre tierras agrícolas, por tipo de derecho. ODS

1.1.3. **Permisos y tramites de rellenos sanitarios de interés para la valoración de biogás**

Todo proyecto de relleno sanitario nuevo o de reconversión del vertedero a relleno sanitario deberá cumplir con los siguientes trámites ante el Ministerio de Salud: el *Permiso de ubicación*, el *Trámite y revisión de planos constructivos*, y el *Permiso sanitario de funcionamiento*.

Dentro del *Permiso de ubicación* se exige la *Viabilidad ambiental* otorgada por la Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA).

De conformidad con la Ley Orgánica del Ambiente, todas las actividades humanas que alteren o destruyan elementos del ambiente requerirán una evaluación de impacto ambiental por parte de la Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA).

La **obtención de la viabilidad ambiental está regulada por el Reglamento general sobre los Procedimientos de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA)**. El reglamento tiene por objeto definir los **requisitos y procedimientos generales** por los cuales se determinará la viabilidad (licencia) ambiental y los registros (permisos) ambientales de las actividades, obras o proyectos nuevos, que por ley o reglamento, se han determinado que pueden alterar o destruir elementos del ambiente o generar residuos, materiales tóxicos o peligrosos; así como, las **medidas de prevención, mitigación y compensación** que, dependiendo de su impacto en el ambiente, deben ser implementadas por el desarrollador (MINAE).

Los rellenos sanitarios tienen que cumplir con este reglamento para obtener la viabilidad ambiental de SETENA. **Según los instrumentos de valoración de impactos** utilizados en Costa Rica, los rellenos sanitarios son considerados proyectos de la subcategoría B1: Moderado - Alto Impacto Ambiental Potencial (IAP). Esta categoría general, establecida en el reglamento general sobre los Procedimientos de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), es posteriormente reevaluada mediante el Documento de Evaluación Ambiental (D1 para los proyectos de categoría de alto y moderado IAP). El resultado de esta reevaluación realizada con el D1 es el nivel de Significancia de Impacto Ambiental (SIA) y el desarrollador del relleno tiene que cumplir con trámites ante SETENA que deriven de esta clasificación final. **Los rellenos sanitarios obtienen generalmente una clasificación de Alta SIA y están en la obligación de realizar un Estudio de Impacto Ambiental (EIA)**. Como parte del estudio de impacto ambiental se debe producir un Plan de Gestión Ambiental (PGA) con las medidas de prevención, mitigación y compensación a los impactos generados.

De otro lado los rellenos sanitarios también se encuentran sujetos a otros reglamentos de carácter ambiental. Los lixiviados generados deben ser tratados de acuerdo con los Reglamentos de Vertido y Reúso, en una planta de tratamiento de aguas residuales aprobada por medio el Reglamento de Aprobación de plantas de tratamiento. El efluente tratado, en case de ser vertido, debe cumplir con el Reglamento de Canon de Vertido.

Una vez aprobado y en operación, el Relleno Sanitario debe seguir una serie de recomendaciones de operación, como mantener personal en el sitio, **garantizar el acceso a los pozos de monitoreo de aguas, mantener un inventario de suelo de cobertura y llevar a cabo un tratamiento adecuado de los lixiviados**. Según el Decreto de Vertido y Reúso, los lixiviados se consideran aguas residuales de tipo especial. Para verificar su tratamiento, se deben medir parámetros como el caudal, la DBO, la DQO, el pH, los sólidos sedimentables, los sólidos suspendidos totales, las sustancias activas al azul de metileno, la temperatura, los

coliformes fecales y los nematodos intestinales. Además, debido a su clasificación como residuos de tipo especial según el CIU (9000), también se deben analizar metales pesados como el mercurio, aluminio, arsénico, bario, boro, cadmio, cloro residual, color y material flotante. Todos estos datos deben ser incluidos en los informes operacionales mensuales o semestrales, dependiendo del caudal de producción en metros cúbicos por día, y deben ser preparados por un regente autorizado.

Igualmente hay otros controles y seguimientos:

- ✓ Informes ambientales que los desarrolladores tienen que presentar a la SETENA de acuerdo con los términos y en los plazos indicados en la respectiva resolución administrativa.
- ✓ Inspecciones Ambientales de Cumplimiento programados por la SETENA de manera aleatorio o cuando se requieran.
- ✓ En el caso de que los lineamientos de otorgamiento de la viabilidad (licencia) ambiental de las actividades, obras o proyectos de categoría A, calificados durante el proceso de revisión de la EIA, incluyan la realización de auditorías ambientales.

Como resultado de este proceso de control y seguimiento ambiental hay un procedimiento de calificación de la calidad ambiental de dichas actividades, obras o proyectos.

Cabe resaltar que esta **viabilidad ambiental está dirigida a las actividades que el relleno sanitario estableció en el momento de su creación** por lo que no se contemplan en esta viabilidad ambiental proyectos de valorización que se desarrollen posteriormente.

1.2. Análisis del enfoque de género en la Gestión Integral de Residuos

Dentro del marco normativo y regulatorio sobre la gestión integral de residuos en Costa Rica se encuentra el **Plan nacional para la gestión integral de residuos 2016-2021**. Uno de los enfoques de orientación del plan es el **enfoque de igualdad y equidad de género** que resalta, entre otros, la igualdad que tienen los hombres y mujeres de disfrutar de un ambiente saludable, libre de contaminación y donde se promueva la salud general. Así mismo, procura la eliminación de las desigualdades entre hombres y mujeres desde la visión de un tratamiento equitativo e igualitario de su condición humana, social, económica, productiva y educativa (Ministerio de Salud de Costa Rica, Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos, 2011).

El plan nacional establece también un **enfoque de orientación de diversidad**, que resalta la importancia de la contribución que hacen todas las personas de diferentes etnias y sexos, con diferencias de condición socioeconómica o educativa al mantenimiento de este ambiente saludable.

Por otro lado, en el **enfoque de cohesión social** establece que la visión actual del **tratamiento de los residuos debe favorecer una cohesión de la sociedad en condiciones igualitarias**, justas y solidarias, pues la valorización de los residuos debe, a su vez, permitir el acceso a nuevas formas de **acceso a mejores ingresos económicos para aquellas personas que tradicionalmente han estado en desventaja de índole socioeconómica**.

Estos enfoques de orientación reflejan que el plan nacional reconoce que la producción y la gestión de los residuos es responsabilidad de toda la ciudadanía y que tiene implicaciones diferentes para hombres y mujeres. Sin embargo, **el plan no tiene en cuenta de manera explícita que los roles de las mujeres y los hombres varían en la producción y gestión de residuos en el hogar, así como en la gestión comunitaria de dichos residuos.** Estas diferencias de roles están mediadas por las relaciones de género y la división sexual del trabajo, pues las mujeres y los hombres no tienen el mismo control y/o acceso a los recursos o el mismo control y/o acceso a las oportunidades laborales que ofrece potencialmente la gestión y la valorización de residuos.

Ahora bien, **estos enfoques de orientación no se traducen explícitamente en las estrategias propuestas en los 6 ámbitos de acción.** Por ejemplo, en el ámbito de educación, formación, capacitación y comunicación social, hay una estrategia de promoción de valorización de residuos en conjunto con los actores relevantes en el sector, que no menciona la importancia de tener en cuenta las diferencias y/o desigualdades de estos actores relevantes. La mayoría de las estrategias corresponden, sin embargo, a posibles puertas de entrada que puedan favorecer la reducción de desigualdades de género en la gestión integral de residuos si estas se traducen a nivel municipal en acciones concretas que tengan en cuenta los enfoques de orientación.

Otro de los documentos que orientan la GIRS en Costa Rica es el **Plan de acción para la gestión integral de residuos sólidos 2019 -2025.** Este instrumento cumple la función de orientar y desarrollar un conjunto de acciones intersectoriales que coadyuven a la consecución de las metas planteadas en materia de gestión integral de residuos. Sin embargo, **hay una ausencia completa del enfoque de género que había sido planteado en la política nacional.** Ninguna de las líneas de acción o de los indicadores establece la importancia de acciones diferenciadas e inclusivas. La mayoría de las acciones, sin embargo, podrían tener en cuenta un enfoque de género en su aplicación, determinando las necesidades específicas de hombres y mujeres en materia por ejemplo de inclusión económica o dentro de las acciones de educación.

Por su lado la **Estrategia Nacional de Separación, Recuperación y Valorización de Residuos (ENSRVR), 2016-2021,** menciona, desarrolla y amplía los enfoques orientadores de la Política Nacional resaltando que la equidad de género es indispensable para la consecución de la igualdad, ya que esta propone un tratamiento diferenciado a mujeres y hombres según las desigualdades que enfrentan. Así mismo, resalta el principio de igualdad y no discriminación recordando que este establece que (i) para generar igualdad deben respetarse las diferencias y que donde haya diferencias las acciones del Estado deben abordar las situaciones precisamente atendiendo a ello y que (ii) existe la necesidad de una atención particular a aquellos grupos y personas que se encuentran en una situación de especial vulnerabilidad o desventaja y que están afectados por una mayor discriminación (Ministerio de Salud de Costa Rica, 2016).

Pero además de **hacer un desarrollo de estos enfoques de orientación, la ENSRVR integra dentro de sus componentes y ejes algunas acciones concretas con enfoque de género.** El componente 3 de la estrategia es la Formalización y fortalecimiento del sector de recuperadores y recuperadoras de residuos valorizables. En este se reconoce la importancia y la diversidad de este actor clave en la cadena de recuperación y separación de los residuos sólidos valorizables. Este componente plantea las estrategias para conversión de los y las

recuperadores que hoy actúan en la informalidad a la economía formal, considerando los requisitos legales, protección social y laboral, el mercado y la estructura organizativa. Así mismo, **este componente cuenta con acciones específicas e indicadores sexos específicos**, por ejemplo, el desarrollo de un programa de capacitación para los y las recuperadores que les permita la diversificación de su oferta de valor y de mejorar su calidad de vida.

El sistema de monitoreo y evaluación de la ENSRVR hace algunas recomendaciones sobre la importancia de los indicadores de impacto para otros usos, pero **no hay una recomendación general de desagregar todos los datos por sexo**. Esta es una medida que debería ser incorporada en todos los sistemas de monitoreo y evaluación ya que los datos desagregados por sexo son necesarios para un análisis de género eficaz.



Ilustración 4. Disponibilidad de indicadores para el seguimiento del ODS 5, Setiembre 2022 Fuente: INEC, 2022

Una de las conclusiones del documento “Sistema de indicadores ODS 2021: Informe de capacidades estadísticas” es que, **pese a los esfuerzos realizados, como la incorporación de perspectiva de género y etnia en la elaboración de procesos estadísticos, aún hay retos importantes en la desagregación de la información** (INEC, 2022). La carencia de esta información limita el seguimiento, análisis y la definición de la política pública inclusiva.

La información desagregada por sexo sigue siendo un desafío en el país para poder identificar roles, situaciones reales y condiciones generales en cada aspecto de la sociedad, incluido la gestión integral de residuos sólidos. Cuando los datos no están desagregados por sexo, es más difícil identificar las desigualdades reales y potenciales.

Por otro lado, **El Plan Nacional de Compostaje** se enmarca como una de las actividades planteadas en el Plan de Acción para la Gestión Integral de Residuos 2019-2022, sin embargo, **no hay alusión alguna al enfoque de género ni se hace un análisis diferenciado del potencial de económico del sector**. Así mismo, en la metodología de consultación, los conservatorios reunieron actores de diversos sectores de relevancia, que compartieron su perspectiva del estado de situación y las expectativas de la creación e implementación de un Plan Nacional de Compostaje, pero no se hace alusión a específicamente asociaciones de mujeres o de hacer un análisis de necesidades y expectativas teniendo en cuenta las diferencias de género.

Sin embargo, en el proceso de construcción del plan, **las personas que participaron identificaron dentro de los potenciales incentivos un “apoyo a mini- centros de**

recuperación que puedan provenir de emprendimientos sociales como grupos de mujeres (ejemplo favorecer grupos pequeños a través de transporte, equipo y que luego ellas puedan “procesar el residuo”), disminución de cuotas o pagos diferenciados en CCSS (por ejemplo) para grupos que administren centros de recuperación de RSB pues se sabe que afecta enormemente” (SecretaríaConsejoNacionalAmbiental, 2020).

Por otro lado, en la tercera sección de la **Contribución Nacionalmente Determinada 2020** se expone la visión de transición justa y de justicia social y climática del país. Costa Rica reconoce que las condiciones sociales, económicas e históricas de algunas poblaciones aumentan su vulnerabilidad ante los impactos del cambio climático. **Entre los grupos más vulnerabilizados se encuentran** las personas con discapacidad, las personas transgénero, las personas adultas mayores, **las mujeres** y la juventud y niñez, los Pueblos Indígenas y las comunidades Afrodescendientes.

En el área temática de transparencia y mejora continua Costa Rica ofrece las siguientes contribuciones en materia de igualdad de género y cambio climático:

- ✓ Para el año 2030, **el país dará seguimiento a los indicadores requeridos para garantizar la igualdad de género** y el empoderamiento de la comunidad Afrodescendiente, los grupos organizados de mujeres, las juventudes, la comunidad transexual, los Pueblos Indígenas, las personas con discapacidad y las personas adultas mayores en la agenda climática en los sectores de acción.
- ✓ Para el año 2030 el país contará con **datos diferenciados sobre la realidad de los grupos históricamente excluidos** y más vulnerabilizados ante los efectos del cambio climático incluyendo como mínimo a la comunidad Afrodescendiente, **grupos organizados de mujeres**, juventudes, comunidad transexual, Pueblos Indígenas, personas con discapacidad y personas adultas mayores.

Así mismo, en el área temática de políticas, estrategias y planes de cambio climático, existen las siguientes contribuciones en materia de igualdad de género y cambio climático:

- ✓ Costa Rica **en el 2022 iniciará la implementación de su Plan de Acción de Igualdad de Género y Cambio Climático** bajo el marco de la Política Nacional para la Igualdad Efectiva entre Mujeres y Hombres, el Plan Nacional de Adaptación y el Plan Nacional de Descarbonización y la Estrategia Nacional REDD+, **incluyendo capacitación y fortalecimiento de capacidades respecto a la afectación diferenciada del cambio climático por condición de género a mujeres** y población sexualmente diversa, en especial de poblaciones históricamente excluidas **desde una perspectiva interseccional**, a las instituciones que trabajan con cambio climático y particularmente para las personas tomadoras de decisiones y que trabajan directamente con la población.
- ✓ Al 2022 se habrán establecido los lineamientos y se pondrá en operación el Fondo Inclusivo de Desarrollo Sostenible con un capital semilla de 1,2 millones de dólares

estadounidenses para **promover el reconocimiento financiero de los espacios productivos de las mujeres rurales** y su contribución a la mitigación y adaptación al cambio climático.

Las prioridades de adaptación al cambio climático de Costa Rica se encuentran alineadas con las metas y lineamientos de la Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2018-2030. Dentro de las metas que el país se propone en términos de género y cambio climático se encuentran dos:

- ✓ Lineamiento 2: Al 2030, se ha promovido la investigación científica, la recolección sistemática de datos, y el análisis actual y prospectivo de información sobre riesgos, impactos pérdidas y daños por amenazas hidrometeorológicas.

*Meta: Al 2022, se contará con al menos un **estudio sobre los riesgos e impactos del cambio climático en poblaciones vulnerables, con especial atención a impactos diferenciados por género.***

- ✓ Lineamiento 5: Al 2030, se cuentan con los planes y políticas necesarios para impulsar la adaptación al cambio climático en el país, además de incorporar criterios y lineamientos de adaptación en los instrumentos de planificación sectorial, regional y de ordenamiento territorial, marino y costero, a distintas escalas.

*Meta: Al 2022, el país contará con un **Plan de Acción de Género y Cambio Climático.***

La CND además presenta indicadores de las condiciones nacionales bajo las cuales se trabaja la agenda climática de Costa Rica que evidencian brechas de género importantes.

Empleo:

Población desempleada
(Julio 2020): 20.1%
mujeres 26% y hombres 16.3%

Subempleo
(Julio 2020): 17.6%
mujeres 17.7% y hombres 17.5%

Fuente: (INEC, 2020b)

Brecha de salario:

Mujeres percibieron 12% menos salario que los hombres en 2016

Fuente: (INAMU, 2019)

Ilustración 5. Información del Empleo y las Brechas de Salario entre Hombre y mujeres, Contribución Nacionalmente Determinada, Fuente: NDC (Contribución Nacionalmente Determinada), 2020

Estos compromisos incorporan la perspectiva interseccional de género³, pues buscan la inclusión efectiva no sólo de las mujeres, sino de las mujeres en su diversidad. El documento hace referencia a una perspectiva más amplia que incorpora las desigualdades multidimensionales proporcionando un marco más robusto en el reconocimiento de la complejidad de la discriminación y, por tanto, puede favorecer a que se aborden de la misma manera en las acciones que deriven de la CND (Contribución Nacionalmente Determinada).

Una muestra de este avance sobre los compromisos establecidos en la de CND es la **reciente publicación del Plan de Acción de Género y cambio climático** (PNUD_Costa_Rica_INAMU_MINAE, 2023), que fue cumplida este año y donde se describen acciones claras que comienzan a materializar los compromisos del país en materia de equidad de género. En el plan también se hace un análisis de brechas donde se menciona que **la brecha más aguda de género está en el sector de energía**, donde la carencia de datos hace imposible conocer la realidad de las mujeres en este sector.

Finalmente, el Plan de Descarbonización (Gobierno_de_Costa_Rica, 2018) se incluye en la sección 6 sobre los requerimientos institucionales e implicaciones para la transformación, se incluye la inclusión derechos humanos y promoción de la igualdad de género. El documento no está realmente orientado hacia políticas diferenciales pues integra la igualdad de género como estrategia transversal y no desarrolla las implicaciones diferenciales por género de las acciones de descarbonización. Aun así, el Plan establece al menos algunas acciones inmediatas:

- ✓ Fomentar la representatividad y la paridad de género en las estructuras actuales de gobernanza del sistema de cambio climático.
- ✓ Incluir al INAMU en las estructuras interinstitucionales de gobernanza del sistema climático.
- ✓ Lanzar estrategia internacional para la promoción del tema de derechos humanos y género en la agenda internacional.
- ✓ Consolidar procesos de formulación de nuevas políticas climáticas con enfoque de derechos humanos y género.

Las acciones propuestas siguen siendo de nivel estratégico y no reflejan necesariamente las implicaciones diferenciadas en la vida de hombre y mujeres o el rol

³ La Recomendación General Nº 25 de la CEDAW reconoce lo siguiente: "Las mujeres pertenecientes a algunos grupos, además de sufrir discriminación por el hecho de ser mujeres, pueden ser objeto de múltiples formas de discriminación por otras razones, como la raza, el origen étnico, la religión, la incapacidad, la edad, la clase, la casta u otros factores. Esa discriminación puede afectar a estos grupos de mujeres principalmente, o en diferente medida o en distinta forma que a los hombres. Quizás sea necesario que los Estados adopten determinadas medidas especiales de carácter temporal para eliminar esas formas múltiples de discriminación contra la mujer y las consecuencias negativas y complejas que tiene." Recomendación general No. 25, sobre el párrafo 1 del artículo 4 de la Convención sobre la Eliminación de Todas las Formas de Discriminación contra la Mujer, referente a medidas especiales de carácter temporal.

que estos deben jugar en el proceso de descarbonización o que oportunidades tiene este proceso para disminuir las desigualdades de género.

Como última consideración del marco normativo, debe reconocerse lo establecido por el **Informe de la auditoría operativa sobre la eficacia de las acciones de política pública llevadas a cabo por el Gobierno de Costa Rica en la preparación para la implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) con énfasis en Objetivo 5 (Igualdad de Género) de la Agenda 2030** de la Contraloría General de la República (2018) pues determinó que un **74% de servicios públicos no están contemplando el enfoque diferenciado de género**, frente a un 26% que sí lo considera, es decir en una mayoría de servicios de las instituciones del país **no se visualiza la necesidad de contar con un servicio diferenciado para mujeres, y se desconoce la inversión que requieren para la atención de los asuntos de igualdad de género**. Como efecto de esto, no les es posible dimensionar los recursos económicos requeridos, ni determinar las capacidades que se requieren para alcanzar el ODS 5 y sus metas asociadas (MINAE_BIOFIN_PNUD, 2023).

Finalmente, aún hay brechas en la representatividad de las mujeres en los puestos de elección popular. Que **las personas a cargo de los asuntos públicos sean mujeres, es positivo dado que las mujeres suelen tener más sensibilidad a las problemáticas medioambientales**. Un estudio de la GIZ (GIZ, 2011) demostró que los municipios dirigidos por mujeres tenían una mayor preocupación por el medio ambiente y hacían más hincapié en el reciclaje y la clasificación de residuos en origen que aquellos dirigidos por hombres. Otro estudio demuestra que los países con una mayor proporción de mujeres en los órganos legislativos nacionales tienen más probabilidades de aprobar acuerdos medioambientales (Norgaard, 2005).

1.3. Gobernanza para la valoración de biogás

La gobernanza entorno la valoración de biogás producido en sitios de disposición final de residuos busca identificar los actores que de manera directa o indirecta pueden generar acciones regulatorias, operativas, financieras, administrativas, educativas, de planificación, monitoreo y evaluación para establecer, desarrollar e impulsar su aprovechamiento al igual que la reducción de la brecha de género presente en estas actividades.

A. Ministerio de Salud - MINSA

De acuerdo con la Ley N° 8839 para la Gestión Integral de Residuos Sólidos, el ente rector en materia de gestión integral de residuos, con potestades de dirección, monitoreo, evaluación y control desde su generación hasta la disposición final de residuos, es el **Ministerio de Salud**.

La correlación de regular, controlar y hacer seguimientos de las actividades desde la generación y disposición final de residuos con la producción y aprovechamiento de biogás, conduce a tener mejores condiciones de producción y calidades de biogás, por tanto, el **Ministerio de Salud** al ser el rector en materia de gestión integral de residuos, podrá propender por la valoración del biogás en los diferentes sitios de disposición actuales y en futuros proyectos de GIRS, donde de manera transversal podrá desarrollar acciones para reducción de brechas de género e incentivos para impulsar estas iniciativas.

B. Ministerio de Ambiente y Energía - MINAE

La valoración de biogás cuenta con ámbitos ambientales desde las actividades principales de captura, tratamiento y aprovechamiento, y desde las actividades paralelas como los reportes operacionales de los sitios de disposición, EIA, evaluación de viabilidad ambiental, entre otras actividades que serán coordinadas por el **Ministerio de Ambiente y Energía**.

Actualmente el Ministerio de Ambiente y Energía formula y ejecuta política nacional conjuntamente con el Ministerio de Salud evaluando y actualizando regulaciones. Por otro lado, el MINAE lleva a cabo procesos de audiencia pública para el desarrollo de rellenos sanitarios donde podrá supervisarse desde esta fase de los proyectos de disposición final condiciones, diseños, obras y otras actividades para promover la valoración de biogás en estos sitios junto a la implementación de medidas para apoyar la reducción de la brecha de género.

C. Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA)

Dentro de sus responsabilidades otorga la viabilidad ambiental a los sitios de disposición final por lo que podrá ser garante en materia de requerimientos, controles y monitoreos de las actividades directamente relacionadas con la valoración de biogás y las indirectas que se relacionan desde la generación de residuos hasta su disposición final.

D. Municipalidades

Cada municipalidad gestiona la generación de los residuos en su cantón por lo que el desarrollo de los planes de municipales de gestión integral de sus residuos es la primera herramienta de regulación y control que, orientado a la valoración de biogás, se podrá asociar e implementar acciones dentro del plan que mejoren condiciones en la producción y calidad del biogás producido en los sitios de disposición final que se encuentren en su jurisdicción.

Adicionalmente a lo mencionado, las **Municipalidades** al tener la facultad para desarrollar tecnologías alternativas en el tratamiento de residuos, siempre que sean menos contaminantes como lo es el aprovechamiento del biogás, se podrá incentivar el desarrollo por parte de los operadores de estos sistemas de valoración que traen consigo mejoramiento en las condiciones de conformación de los sitios de disposición final y beneficios ambientales asociados al Plan de Descarbonización Nacional y el eje 7 de los Objetivos de Desarrollo Sostenibles Nacionales. (Madrigal & Alpízar, 2023)

También se les permite establecer tasas diferenciadas u otro incentivo fiscal para aquellos que separen los residuos desde la fuente lo que traería consigo el desarrollo de tecnologías como la biometanización, donde se requieren de dicha separación en la fuente para producir biogás a partir de la fracción de RSO.

E. Comisión Multinivel para la Gestión Integral de Residuos

Los diferentes grupos técnicos de instituciones públicas que conforman la comisión en áreas específicas de Normativa, Propuestas Técnicas y Comunicación tienen la misión de orientar y desarrollar múltiples acciones interinstitucionales e intersectoriales entre el Estado, industrias, municipios, comunidades y familias para completar las metas y normativas en materia de GIR.

Por lo anterior, y con el propósito de establecer la valoración de biogás en Costa Rica, **la comisión** permitirá tener un compendio de actores donde se promueva el cambio de las dinámicas actuales de enterramiento de residuos y la migración a otras alternativas tecnológicas de gestión de RSO según las tendencias internacionales donde se fomenta la producción y valoración de biogás. Por otro lado, la comisión podrá relacionar y fortalecer la calidad de vida de la población por medio de la comunicación y formación sobre la valoración del biogás como alternativa de gestión de los GEI producidos en los rellenos sanitarios.

Finalmente, podrán discutir con los actores medidas y acciones en diferentes escalas que propiciarían la disminución de la desigualdad de género desde el aprovechamiento de biogás.

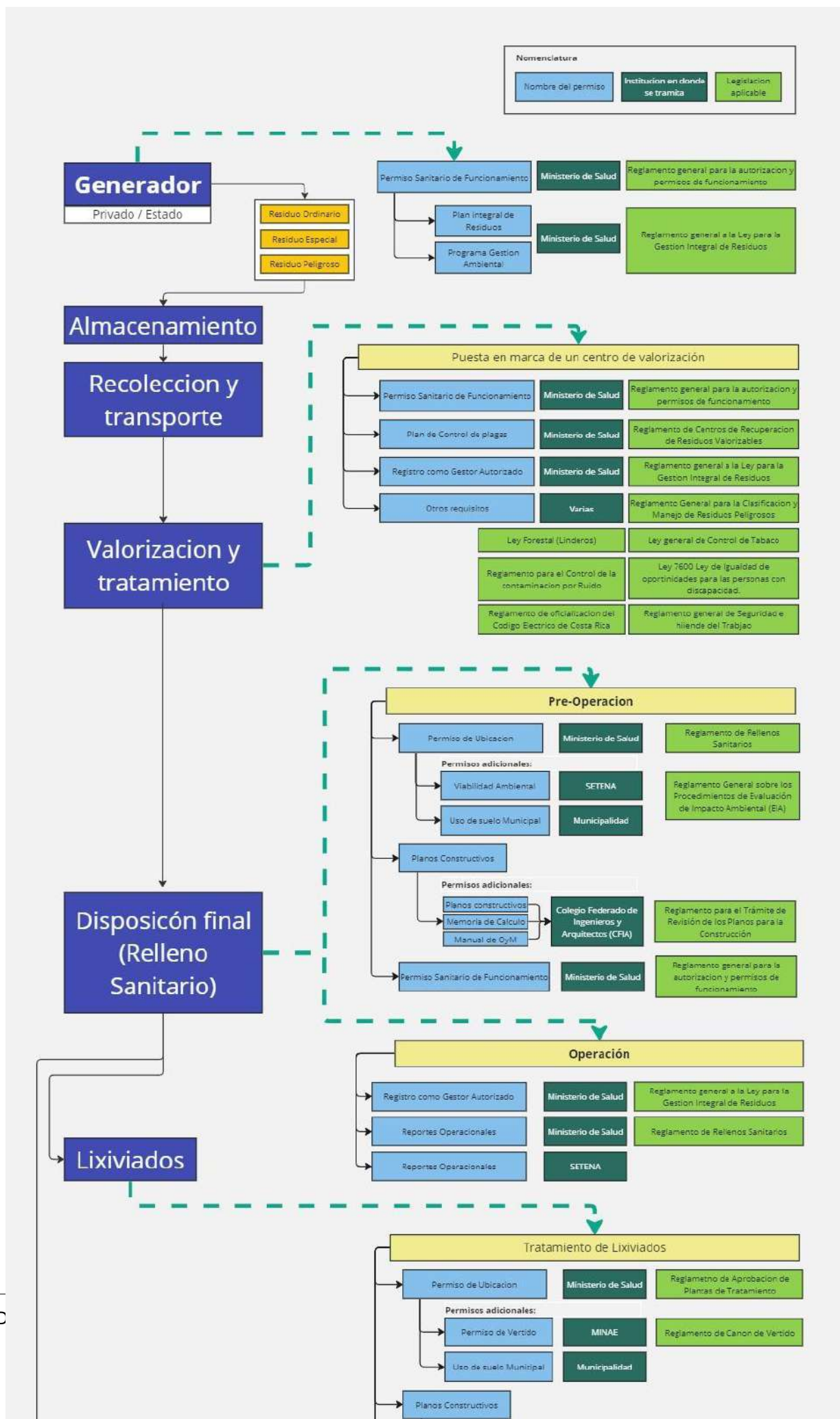
Como se ha mencionado, la gobernanza sobre la valoración de biogás es multisectorial y se han logrado detallar los más relevantes para la implementación, desarrollo e impulso de esta actividad dentro de la GIRS. A continuación, se presenta los ámbitos y actores que serían las autoridades pertinentes para responder ante los desafíos y retos que conlleva esta actividad conforme a la organización e integrantes establecidos en el 2016 por el MINSA en el PNGIRS.

Cuadro 2. Actores y organización sectorial para la gobernanza en la valoración de biogás.

Legal	Educación	Económico
<p>MINSa</p> <p>MUNICIPALIDADES</p> <p>IFAM</p>	<p>MINSa</p> <p>MINAE</p> <p>IFAM</p> <p>MUNICIPALIDADES</p> <p>UNIVERSIDADES</p> <p>SECTOR PRIVADO</p>	<p>MINSa</p> <p>ICE</p> <p>SECTOR PRIVADO</p> <p>MUNICIPALIDADES</p> <p>MINISTERIO DE HACIENDA</p>
Fortalecimiento Institucional y organizacional	Hábitat Humano	Investigación y desarrollo tecnológico
<p>MINSa</p> <p>IFAM</p>	<p>MINSa</p> <p>MINAE</p> <p>MUNICIPALIDADES</p> <p>SETENA</p> <p>ICE</p> <p>CNFL</p> <p>ESPH</p>	<p>MINSa</p> <p>MINAE</p> <p>UNIVERSIDADES</p> <p>SECTOR PRIVADO</p>

A continuación, se precisa por actividades relacionadas a la valoración directa o indirecta del biogás de sitios de disposición final las autoridades pertinentes que se asociarían y tendrían responsabilidades.

Ilustración 6. Actores y organización por actividades de la gobernanza en la valoración de biogás.



1.4. Bonos de Carbono

Ante las implicaciones ambientales generadas por la acumulación de GEI en la atmósfera y los acuerdos internacionales para combatir el cambio climático, se ha establecido que las industrias o sectores con mayores emisiones las reduzcan por medio de cambios directos en sus actividades y cuando no puedan hacerlo, contribuyan a proyectos que pueden reducir las emisiones en varios sectores. Lo anterior se denomina principio de neutralidad climática que busca una relación entre las fuentes y los proyectos que lo reducen.

El mercado de carbono es el sistema de comercio a través del cual los gobiernos, empresas o individuos pueden vender o adquirir unidades de reducción de emisiones de GEI. Estos mercados operan igual que cualquier otro mercado de un servicio o producto, donde hay un generador del servicio y un comprador. En este mercado hay dos tipos principales de transacciones: ventas/compras directas entre el generador y el comprador, y también cuando hay intermediarios.

Entre los sectores que están en el mercado del carbono como generadores del servicio ambiental se encuentran:

- ✓ Energía renovable /no renovables
- ✓ Distribución de energía
- ✓ Demanda de energía
- ✓ Industrias manufactureras
- ✓ Industrias químicas
- ✓ Construcción
- ✓ Transporte
- ✓ Minería/producción de minerales
- ✓ Producción de metales
- ✓ Emisiones fugitivas de combustibles
- ✓ Emisiones fugitivas de gases industriales
- ✓ Uso de solventes
- ✓ Manejo y eliminación de residuos
- ✓ Agricultura, sector forestal y cambio de suelo
- ✓ Ganadería y gestión de residuos agropecuarios

1.4.1. Que es un bono/certificado de carbono

Los certificados de carbono o bonos representan la reducción de una (1) tonelada de CO_{2e} o que ha sido removida de la atmósfera, es decir que por cada tonelada de CO_{2e} evitada o reducida se emite un bono o certificado de carbono.

1.4.2. Mercados de carbono a nivel internacional

Hay dos mercados de carbono establecidos globalmente: mercado regulado y el mercado voluntario.

1.4.2.1. Mercado Regulado

Se origina a partir de los acuerdos del protocolo de Kyoto, cumpliendo con el objetivo de reducción de emisiones regulados por las Naciones Unidas. Se asoció este mercado con los

proyectos denominados MDL (mecanismo de desarrollo limpio) que también surgieron de los acuerdos de Kyoto.

Los MDL no se siguieron formulando ya que había un tiempo límite para postular los proyectos y registrarse ante las Naciones Unidas. Las iniciativas registradas están operando actualmente y se está esperando a que este mercado regulado entre en los acuerdos de París en las actuales negociaciones que se están realizando.

Este mercado también es implementado por los gobiernos rendir cuentas de las emisiones de sus gases de efecto invernadero, ya que se basan en regímenes de reducción de emisiones impuestas en los siguientes niveles:

- ✓ Internacional: los pactados en el protocolo Kioto y el acuerdo de París.
- ✓ Regional: Sistema de Comercio de Emisiones (SCE) de la Unión Europea. Los Sistemas de Comercio de Emisiones son mecanismos dentro del mercado para poder comercializar unidades de reducción.
- ✓ Nacional y subnacional: Como lo es la SCE de México y el SCE de California, en el caso de EEUU y Colombia se dispone del Programa Nacional de Cupos Transables de Emisión

En este mercado los gobiernos establecen un límite emisiones para ciertos sectores donde progresivamente se reduce el límite para alcanzar las metas a mediano y largo plazo. Los gobiernos expiden derechos de emisión conforme a esos límites establecidos y los agentes regulados los compran para respaldar las emisiones de CO_{2eq}, donde cada derecho de emisión autoriza a emitir una tonelada de CO_{2eq}.

Según lo anterior, quienes adquieran estos derechos podrán emitir dentro de su actividad, las toneladas de CO_{2eq} equivalente al número de derechos de emisión haya adquirido. Para quienes no lo hayan adquirido deberán reducir sus emisiones o pagar las sanciones correspondientes.

En Colombia se le denominó Sistema de Reducción de Emisiones se caracteriza por:

- ✓ Los grandes emisores de GEI deben gestionar sus emisiones ya que deberán pagar por ellas
- ✓ Hay un tope de emisiones de GEI que pueden generar las empresas de los sectores regulados
- ✓ El tope irá disminuyendo año a año
- ✓ Promueve el desarrollo e innovación de nuevos productos e industrias sostenibles que reducen emisiones

1.4.2.2. **Mercado Voluntario**

Como su nombre lo indica, en este mercado las iniciativas de reducción tanto de los desarrolladores como de los compradores es de manera voluntaria donde estos últimos buscan compensar su huella de carbono asociado a la responsabilidad social corporativa o por temas reputacionales. (Ministerio de Ambiente, 2023)

La estructuración de los proyectos para reducción o remoción de GEI son postuladas bajo el objetivo de MITIGAR y su estructuración se hace bajo estándares de carbono y metodologías voluntarias

1.4.2.3. **Mercado Asociado al Impuesto al Carbono**

Este es un mercado que nace al establecerse una ley que restringe a un sector e impone el pago de impuestos por la generación de GEI. En el caso de Colombia, se aplica a los grandes consumidores de combustibles fósiles donde la Ley 1819 busca recaudar un impuesto donde el 70% se destinaria a un fondo, el 25% al ministerio de ambiente y el 5% para fortalecer el Sistema Nacional de Áreas Protegidas.

Posteriormente en el decreto 926 del 2017 se les permitió a los grandes consumidores de combustibles fósiles, no estar obligados a pagar impuestos si lograban resarcir sus emisiones por acciones propias o por la compra de bonos de carbono.

1.4.2.4. **Estándares de Carbono**

Para garantizar que las iniciativas o proyectos generen la reducción o captación de GEI cumpliendo las condiciones de adicionalidad, existen programas de certificación que relacionan metodologías para validar los resultados de los proyectos.

Estas metodologías o esquemas se aplican tanto al mercado voluntario como el regulado, aplicables a nivel nacional o internacional, y se exigen un conjunto de principios y requisitos para formular, desarrollar, validar y verificar los resultados de mitigación frente al diseño y puesta en marcha del proyecto.

El estándar que se elija para cuantificar la reducción o remoción de GEI también a las exigencias del comprador y mercado en el que se transe los bonos.

En Colombia se cuantifican los resultados por medio de una metodología normalizada por Norma ISO 14064 - 3:2006 o su respectiva actualización que certifica los bonos emitidos. Adicionalmente la gobernación colombiana exige a las metodologías contar con plataformas públicas para registrar todas las transacciones de los bonos de carbono, es decir, los registros transaccionales donde además se publican las cancelaciones de los bonos por parte de los compradores de los certificados según las negociaciones entre privados.

Entre los estándares más conocidos se tiene:

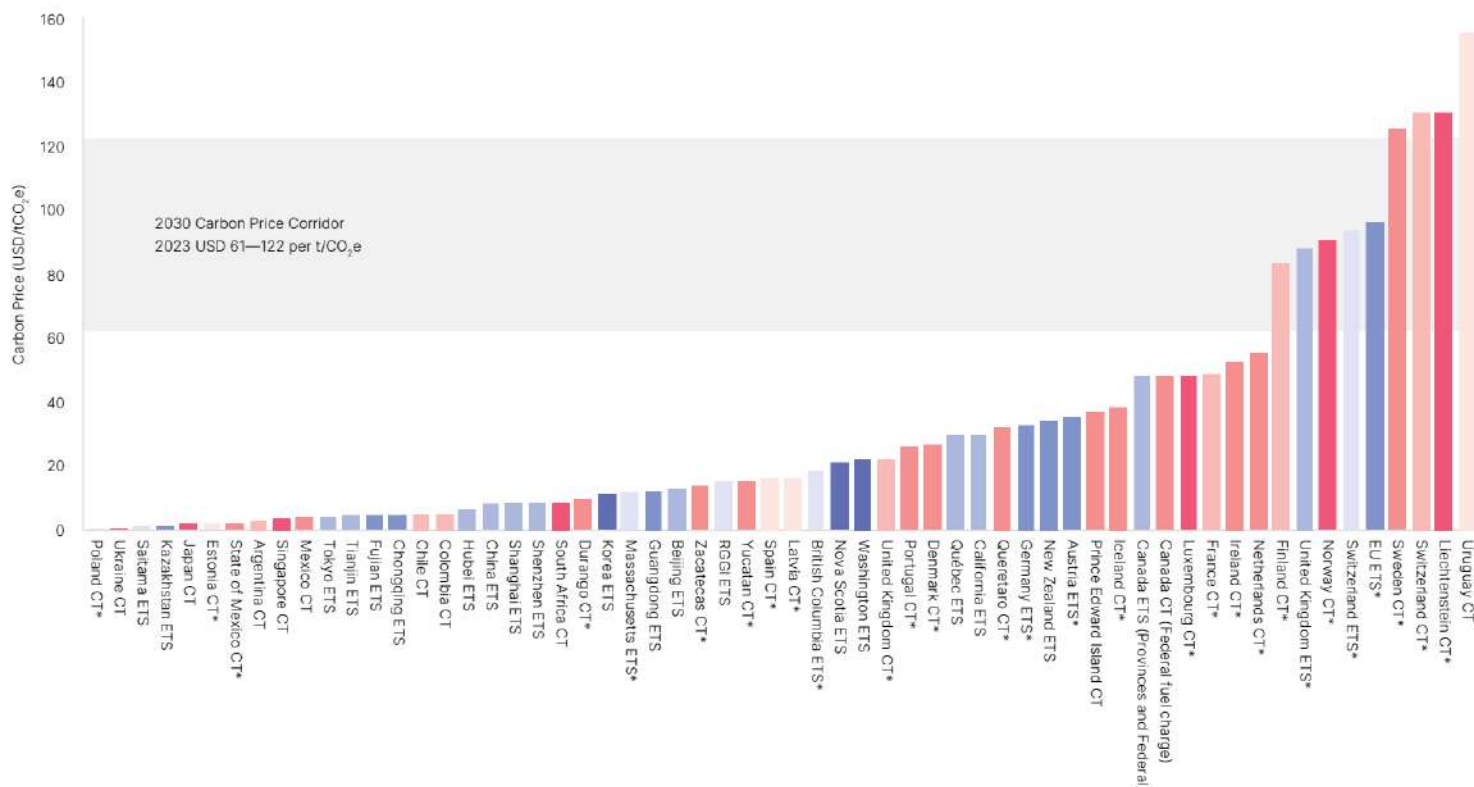
- ✓ Gold Standard for the Global Goals (GS4GG)
- ✓ Verified Carbon Standard (VCS) – VERRA
- ✓ Proclima
- ✓ Cercarbono
- ✓ ColCX

1.4.3. **Referencias de transacciones de bonos de carbono**

El valor de venta/compra de bonos de carbono dependerá del tipo de mercado, si es a nivel nacional o internacional, si se transan de forma directa o por medio de un intermediario, según el tipo de estándar de carbono que se use, el tipo de proyecto o iniciativa y su respectivo impacto socioambiental.

En el mercado internacional hay una variabilidad importante de los valores que pueden llegar a tener, y esto responde a las condiciones que existan de cantidades y volúmenes transados, si se utilizan para responder a una imposición del mercado o si es por un tema de

responsabilidad empresarial. No hay un precio fijo a nivel internacional, pero a continuación se presenta los valores de transacciones realizadas en el 2023 en diferentes países especificando el tipo de herramienta implementada para desarrollo del mercado de carbono.



Gráfica 2. Precio de bonos de carbono a nivel internacional (International Bank for Reconstruction and Development, 2023)

Como se puede observar de la gráfica anterior el rango de precios para certificados de carbono en países de Latinoamérica esta entre 6 a 10 USD/ Ton CO₂e

Si bien en el mercado regulado se puede prever un valor para los bonos debido al tope establecido, no asegura un valor constante de los créditos de carbono, ya que esto también se liga a la oferta y demanda que exista. A nivel internacional no hay un techo para asignar el valor de los certificados, pero en el caso de Colombia el techo es el impuesto al carbono donde ningún comprador va a pagar más un certificado de carbono que por lo que pagaría por el impuesto.

1.4.4. Bonos de carbono para biogás de sitios de disposición final de Costa Rica

Un proyecto destinado a la captura forzada quema controlada y aprovechamiento de biogás proveniente de rellenos sanitarios tiene el potencial de ser elegible para la obtención de créditos de carbono. La estimación del número de certificados de carbono se basa en el

cálculo del biogás destruido y su conversión en términos de toneladas de CO₂ equivalente. Es decir, que cada certificado emitido representa una tonelada de CO_{2eq} producida en los sitios de disposición final que dejará de emitirse a la atmósfera, luego de la implementación del proyecto de captura, quema y aprovechamiento energético del biogás.

Es esencial destacar la importancia de la adicionalidad en cada caso. La adicionalidad se refiere al hecho de que un proyecto tenga la capacidad efectivamente de logra eliminar GEI de la atmósfera. El proceso de generación de créditos implica un riguroso proceso de validación y verificación antes de que los créditos puedan ser emitidos y utilizados. Este proceso incluye selección de una metodología (e.g. Gold Standard), que implica el registro del proyecto y una auditoria, que puede rondar un aproximado de \$30.000 a 40.000 USD (asumiendo 1 metodología y 1 sitio) para un mínimo de 10.000 toneladas de bonos de carbono (Carbon, 2023)

En el contexto de Costa Rica, el mercado voluntario de carbono nacional está regulado por el Decreto N° 37926-MINAE, conocido como el "Reglamento de regulación y operación del mercado doméstico de carbono". Este reglamento se basa en la norma nacional de carbono neutralidad INTE 12-01-06:2011 "MDC de Gestión para Demostrar la C-neutralidad. Requisitos". Los proyectos deben seguir las directrices nacionales y ser verificados por un experto en carbono. Posteriormente, dichos proyectos pueden generar Unidades Costarricenses de Carbono (UCC) que podrían ser comercializadas en la Bolsa Nacional de Valores o a través de acuerdos bilaterales. (Ministerio de Ambiente y Energía, 2013).

En conclusión, los proyectos que involucran la captura forzada, quema controlada y utilización del gas proveniente de rellenos sanitarios para el aprovechamiento tienen el potencial de generar créditos de carbono, siempre y cuando cumplan con los requisitos de adicionalidad. El principio de adicionalidad establece que un proyecto debe demostrar que las reducciones de emisiones son adicionales a lo que habría ocurrido sin su implementación, asegurando así un impacto real y cuantificable en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Dado el carácter volátil y voluntario del mercado de carbono, es complicado prever con exactitud el precio del carbono. No obstante, a partir de datos recopilados de consultas a corredores de carbono a nivel regional e internacional, es posible realizar estimaciones. De acuerdo con conversaciones con expertos de la industria, como Anaconda Carbón ubicada en Honduras y South Pole, una de las comercializadoras más grandes de carbono, se sugiere que, considerando la naturaleza, ubicación y escala de los proyectos, un valor estimado podría oscilar entre \$3 y \$6 USD por tonelada de CO_{2e} (Carbon, 2023).

El anterior rango será usado para el desarrollo del modelo financiero de todas las propuestas de valoración y podrá usarse como referencia para otros proyectos de valoración de biogás en rellenos sanitarios.

1.5. **Legislación Internacional para la reducción de GEI**

Entre los principales desafíos asociado al sistema de gestión integral de residuos en Costa Rica se encuentran (1) disponer de un sistema de gestión de residuos que tenga cobertura de recolección del cien por ciento de los residuos (2) El manejo eficiente y sostenible (reciclaje, procesamiento o compostaje) de los residuos recolectados, ya que aún se sigue disponiendo alto porcentaje de residuos sólidos ordinarios en los rellenos sanitarios del país (3) la gestión de los GEI generados en los sitios de disposición (4) La subvaloración de los precios de servicios de residuos incluye la recolección, el transporte y los costos de disposición, dejando

por fuera los costos de valorización de biogás. Esta subvaloración no promueve la minimización de residuos y ni la segregación en la fuente. El panorama general en Costa Rica es el siguiente:

- ✓ **Generación:** En el 2021, se generó 1.618.533 toneladas de residuos sólidos ordinarios RSO (82% en hogares y 18% en comercios y otros)
- ✓ **Recolección:** Según datos del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), obtenidos a partir del Censo Nacional 2011, solo el 84% de las viviendas del país cuenta con servicio de recolección
- ✓ **Tratamiento y reciclaje:** En el 2021 se alcanzó el 10% de reciclaje y tratamiento de los RSO generado.
- ✓ **Disposición final:** En el 2021, 79 % de 1.618.533 toneladas RSO generados fueron enterrados en los rellenos sanitarios del país, donde en promedio se está enterrando 33% de residuos valorizables (plástico, aluminio, papel, cartón, vidrio) y en promedio 53% de orgánicos que podrían ser aprovechados en la etapa de tratamiento y reciclaje
- ✓ **Gestión de los GEI en sitios de disposición:** En cuanto a la gestión del biogás generado en rellenos sanitarios el panorama indica que solo un relleno realiza captura forzada, quema controlada y valorización de biogás.

Cuadro 3. Acciones desarrolladas para gestionar la emisión de GEI/biogás

Nombre del relleno sanitario	Gestión de GEI/biogás
L1	Quema pasiva de biogás
L2	Captura forzada, quema controlada y valorización energética del 10% del biogás
L3	Quema pasiva de biogás, pero cuenta con proyecto para captura forzada y quema controlada del biogás
L4	Quema pasiva de biogás
L5	Quema pasiva de biogás
L6	Quema pasiva de biogás
L7	Quema pasiva de biogás

Actualmente, existen diferentes instrumentos fiscales utilizados dentro de políticas nacionales que se han puesto en marcha alrededor del mundo con la finalidad de gestionar de manera más adecuada los residuos.

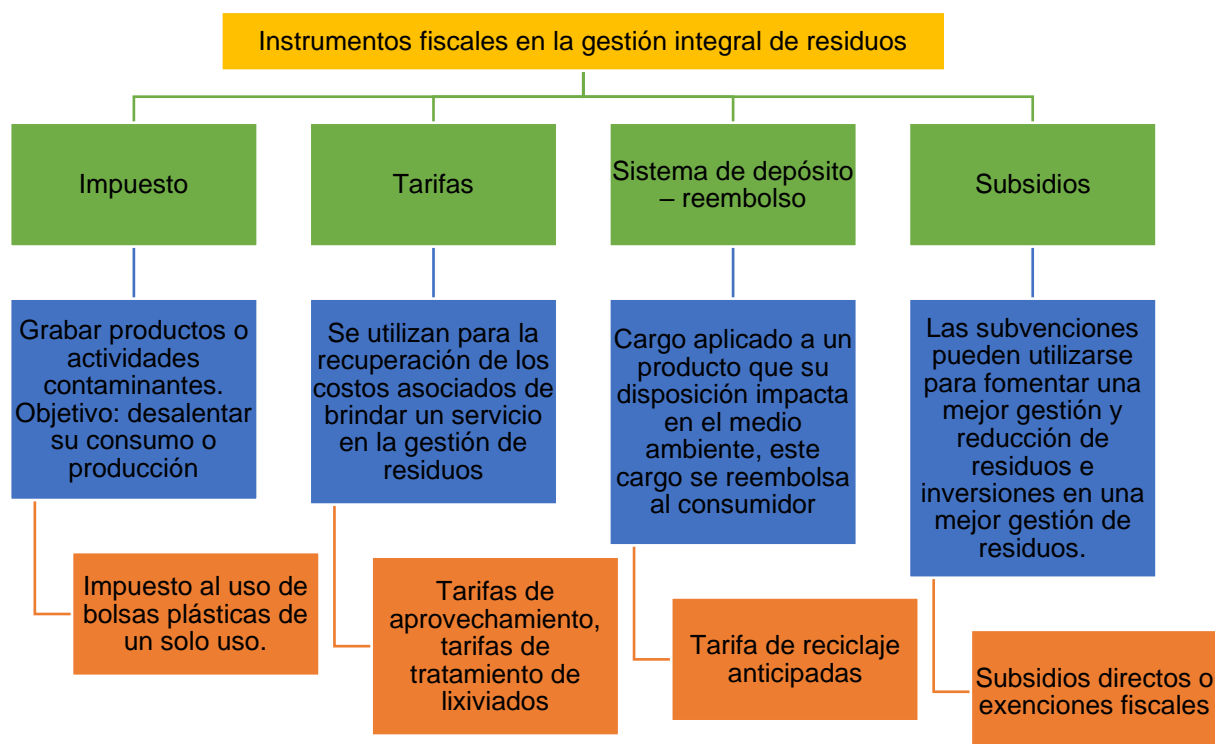
Cada una de esas herramientas, dependiendo del nivel de aplicación en las diferentes etapas de gestión de residuos, tienen como objetivos principales desalentar o promover ciertas prácticas dentro de la cadena gestión de residuos. Estas herramientas fiscales permiten generar ingresos para impulsar las políticas nacionales de gestión de residuos. Los instrumentos fiscales comúnmente usados a nivel internacional se clasifican en 4 enfoques principales

- ✓ Impuestos
- ✓ Tarifas
- ✓ Sistemas de depósitos – reembolsos

✓ Subsidios

Cada una de esas herramientas buscara incentivar proyectos de valoración de biogás abordándola con enfoques restrictivos, compensatorios y de beneficios económicos como se describe en la siguiente ilustración. También se podrá visualizar ejemplos por cada herramienta de las medidas más comunes.

Ilustración 7. Herramientas Internacionalmente más usadas para incentivar la valoración de biogás.



Los instrumentos fiscales se pueden aplicar a la recolección, transporte, valoración, tratamiento y disposición final de los RSO. En el contexto de la valorización del biogás en sitios de disposición final y su aplicación en Costa Rica, es importante analizar la legislación de otros países que podrían servir como ejemplos o referencias para mejorar las regulaciones y promover proyectos similares en Costa Rica. A continuación, se mencionan algunas consideraciones de legislación internacional y ejemplos de países que han tenido éxito en el desarrollo de la valoración del biogás en las etapas de disposición final.

✓ Instrumento fiscal: Exenciones fiscales / Nivel de aplicación: Gestión de GEI en rellenos sanitarios

Determinación de la tasa de flujo de producción de gas en rellenos sanitarios – Colombia

Cuenta con normatividad para monitorear y controlar la calidad del aire, con niveles máximos permisibles de ciertos contaminantes atmosféricos, **aún no se cuenta con criterios**

específicos definidos para el monitoreo de los gases de efecto invernadero generados en rellenos sanitarios

Resolución 760 de 2010 y ajustado por la Resolución 2153 de 2010, establece el Método 2E - Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Generada por Fuentes Fijas.

Si bien ya se tiene definido un método para la medición de los caudales de producción de biogás, no se han establecido los parámetros para la medición de los caudales de CH₄ y CO₂, ni se han definido niveles permisibles de emisión de dichas sustancias en rellenos sanitarios.

Ley de promoción – Colombia:

Por medio de este mecanismo se busca impulsar la realización de proyectos que generan beneficios ambientales como la reducción de emisión de gases efecto invernadero, mejorar la calidad de las emisiones generadas en el sitio de disposición final y el uso de energías no convencionales en tres fases de los proyectos, al otorgar reducciones de impuestos a la renta de inversionistas que financien estas iniciativas.

Art 255. Ley 1819 del 2016 - Descuento para inversiones realizadas en control, conservación y mejoramiento del medio ambiente

Las personas jurídicas que realicen directamente inversiones en control, conservación y mejoramiento del medio ambiente, tendrán derecho a descontar de su impuesto sobre la renta a cargo el 25% de las inversiones que hayan realizado en el respectivo año gravable, previa acreditación que efectúe la autoridad ambiental respectiva, en la cual deberá tenerse en cuenta los beneficios ambientales directos asociados a dicha inversión.

Beneficios Tributarios – Colombia:

Esta medida posibilita incrementar inversiones en proyectos de generación de energía eléctrica otorgando descuentos en el total de la inversión como una deducción especial

Art 11. Ley 1715 del 2014 - Descuento en la inversión inicial de proyecto de generación de energía de Fuentes No Convencionales de Energía

Como fomento a la investigación, desarrollo e inversión en el ámbito de la producción y utilización de energía a partir de FNCE, que los declarantes del Impuesto a la Renta pueden deducir anualmente el 50% del total de la inversión realizada en los 5 años siguientes al año en que se ejecutó la inversión.

Cero Aranceles – Colombia:

Beneficia a los desarrolladores de proyectos de FNCE al no pagar los derechos y/o gravámenes arancelarios al importar maquinas, equipos, insumos y materiales que se vayan

a utilizar exclusivamente en las etapas de pre-inversión e inversión dentro de los proyectos de FNCE

Art 13. Ley 1715 del 2014 – Instrumentos para la promoción de las energías renovables. Incentivo arancelario

Las personas naturales o jurídicas que a partir de la vigencia de la presente ley sean titulares de nuevas inversiones en nuevos proyectos de FNCE gozarán de exención del pago de los Derechos Arancelarios de Importación de maquinaria, equipos, materiales e insumos destinados exclusivamente para labores de preinversión y de inversión de proyectos con dichas fuentes. Este beneficio arancelario será aplicable y recaerá sobre maquinaria, equipos, materiales e insumos que no sean producidos por la industria nacional y su único medio de adquisición esté sujeto a la importación de estos.

Depreciación Acelerada – Colombia:

Al igual que el anterior incentivo, este se aplicará a las maquinarias, equipos y obras civiles necesarias para la preinversión, inversión y operación de la generación con FNCE hasta una tasa anual global del veinte por ciento (20%).

Art 14. Ley 1715 del 2014 - Incentivo contable depreciación acelerada de activos.

La depreciación acelerada será aplicable a las maquinarias, equipos y obras civiles necesarias para la preinversión, inversión y operación de la generación con FNCE, que sean adquiridos y/o construidos, exclusivamente para ese fin, a partir de la vigencia de la presente ley. Para estos efectos, la tasa anual de depreciación será no mayor de veinte por ciento (20%) como tasa global anual. La tasa podrá ser variada anualmente por el titular del proyecto, previa comunicación a la DIAN, sin exceder el límite señalado en este artículo, excepto en los casos en que la ley autorice porcentajes globales mayores.

Exclusión del IVA – Colombia:

Por medio de esta herramienta se permite Exclusión del impuesto sobre las ventas (IVA) en la adquisición de bienes y servicios para el desarrollo de proyectos de generación con FNCE y gestión eficiente de la energía.

Art 12. Ley 1715 del 2014 - Exclusión del IVA en la adquisición de bienes y servicios

Aplica a la compra de equipos, elementos y maquinaria, nacionales o importados, o la adquisición de servicios dentro o fuera del territorio nacional que se destinen a nuevas inversiones y pre inversiones para la producción y utilización de energía a partir FNCE, así como aquellos destinados a la medición y evaluación de los potenciales recursos. Todo lo anterior de conformidad con la certificación emitida por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales sobre los equipos y servicios excluidos del impuesto, para lo cual se basará en el listado elaborado por la UPME y sus actualizaciones. Este

listado se encuentra anexo a la Resolución 045 de 2015 y se puede acceder al mismo por medio del siguiente link

http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/Anexos_Res045_Lista_de_bienes_y_servicios.pdf.

- ✓ Instrumento fiscal: Impuesto / Nivel de aplicación: Rellenos sanitarios

Impuestos al depósito de residuos– España:

Cataluña introdujo un impuesto a los RS en el año 2004, con los objetivos de desviar residuos de los rellenos sanitarios, reforzar la jerarquía de residuos según las directrices de la UE, alentar una recolección separada de desechos y la recuperación de residuos específicos. Si bien esta medida se relaciona indirectamente con la valoración de biogás, procurar buenas prácticas desde todas las etapas de gestión de residuos, permitirá tener mejores escenarios de producción de biogás disponible para valorizar.

Esta medida trajo consigo la reducción en la cantidad de residuos que son incinerados, una disminución de residuos sólidos urbanos, un incremento en los desechos que reciben un tratamiento mecánico biológico, y un aumento en las municipalidades que implementan una recolección separada de desechos.

Se implemento creando una agencia que gestiona el impuesto y lo recaudado va a un Fondo para financiar proyectos de manejo de residuos. Esta agencia visualiza el proceso de forma integral: prevención, reutilización, reciclaje, valoración energética y eliminación. En valoración energética se miden los residuos y se cobra a quien contamine.

Ley 7 /2022 - Tributo indirecto que grava la entrega de residuos en vertederos, instalaciones de incineración o de coincineración para su eliminación o valorización energética

El impuesto imponible es triple y se exige cuando se realiza alguna de las siguientes operaciones:

- ✓ *La entrega de residuos en rellenos sanitarios autorizados*
- ✓ *La entrega de residuos para su eliminación o valoración energética en instalaciones de incineración de residuos*
- ✓ *La entrega de residuos para su eliminación o valoración energética en las instalaciones de coincineración de residuos*

Existen exenciones contempladas en la misma ley y corresponden a:

- ✓ *Entrega de residuos ordenada por las autoridades en situaciones de fuerza mayor o cuando se destruyan bienes decomisados.*
- ✓ *Entrega de residuos que procedan de operaciones por las que ya se ha pagado este impuesto.*

- ✓ *Entrega de residuos que, por obligación legal, se deban eliminar en rellenos sanitarios o instalaciones de incineración o de coincineración de residuos.*
- ✓ *Ciertas entregas en rellenos sanitarios de residuos por parte de las administraciones.*
- ✓ *Entrega en rellenos sanitarios de residuos inertes adecuados para obras de restauración, acondicionamiento o relleno realizadas en el mismo y con fines de construcción.*
- ✓ *Entrega de residuos resultantes de operaciones de tratamiento distinto de los rechazos de residuos municipales, procedentes de instalaciones que realizan operaciones de valorización que no sean operaciones de tratamiento intermedio.*

A continuación, se presenta una recopilación de otros casos con medidas especiales directa e indirectamente relacionadas al control y valoración de biogás

- ✓ Estados Unidos: Cuentan con **regulaciones federales y estatales** que abordan la gestión de residuos sólidos y la valorización del biogás en rellenos sanitarios. **La Ley de Aire Limpio (Clean Air Act) y la Ley de Agua Limpia (Clean Water Act)** son ejemplos de legislación federal que impacta la gestión de residuos. A nivel estatal, California ha implementado **regulaciones e incentivos** sólidos para la generación de electricidad a partir del biogás en rellenos sanitarios.
- ✓ Alemania: Ha sido líder en la generación de energía a partir de biogás, incluyendo la valorización del biogás en rellenos sanitarios. Han **establecido tarifas de alimentación (feed-in tariffs) para proyectos de energía renovable**, lo que ha impulsado el desarrollo de instalaciones de biogás en rellenos sanitarios. El sistema de tarifas **garantiza una inversión rentable** para los proyectos de generación de biogás.
- ✓ Reino Unido: Ha implementado un **programa de Obligación de Energía Renovable (Renewable Obligation)**, que **exige** a las compañías de suministro eléctrico obtengan una proporción de su electricidad de fuentes renovables, incluyendo el biogás. También tienen **esquemas de tarifas** de alimentación que incentivan la generación de energía a partir del biogás.

1.6. Tarifa de energía eléctrica producida a partir de biogás de rellenos sanitarios

En el contexto costarricense, el marco regulatorio que rige la valorización del biogás en la generación eléctrica es fundamental para comprender cómo se pueden llevar a cabo estos proyectos. En Costa Rica, la generación eléctrica está bajo el control centralizado del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), que ostenta la autoridad exclusiva para la generación y distribución de electricidad en el país. Sin embargo, el ICE tiene la facultad de otorgar concesiones de distribución, y en este sentido, ha establecido acuerdos con siete organizaciones nacionales, como ESPH, Jasec, Coopelesca, Coopeguanacaste, Coope Alfaro Ruiz, CNFL, entre otras.

Estas organizaciones, además de distribuir electricidad, tienen la capacidad de invertir en proyectos de generación de energía. Estas concesionarias están incentivadas a invertir en

proyectos energéticos y necesitan aumentar su capacidad de generación anualmente, especialmente en vista del crecimiento de la movilidad eléctrica, como los vehículos eléctricos.

Por lo anterior y basados en el importante rol que estos actores desempeñan, se realizaron entrevistas para conocer sus perspectivas sobre la producción de energía a partir de biogás. A continuación, una breve descripción de las conclusiones obtenidas de los encuentros.

Cuadro 4. Encuentros realizados con actores del sector energético de Costa Rica

Organizaciones o empresas distribuidoras de energía	Conclusión u objeto de la reunión
ICE	Tienen interés en comprar directamente el biogás de rellenos sanitarios
CNFL	Se están desarrollando iniciativas para la transición energética del transporte público donde la competencia legal es del ministerio de obras públicas y transporte en el consejo de transporte público, pero la CNFL sería el encargado de implementar las estaciones de recarga.
ESPH	Es importante evaluar herramientas que permitan lograr una tarifa competitiva para impulsar estos proyectos.

En Costa Rica, los rellenos sanitarios tienen un potencial significativo para la generación de energía eléctrica a través del biogás. El biogás continúa produciéndose incluso después del cierre del relleno sanitario. Durante este período post-cierre, se observan picos de generación de biogás, momentos en los cuales la producción experimenta aumentos significativos. Estos picos están directamente correlacionados con la composición de los residuos depositados en el relleno sanitario. En particular, se ha identificado que ciertos tipos de residuos, como los materiales orgánicos biodegradables, tienen una relevancia mayor en la generación de biogás.

A pesar de la promoción a nivel nacional del uso de biogás, realizada tanto por el ICE como por organizaciones privadas como la Asociación Costarricense de Biogás, solo se ha implementado un proyecto de generación eléctrica con biogás en el Relleno Sanitario de Río Azul décadas atrás. Este proyecto, liderado por el grupo corporativo Saret, contaba con una capacidad de 3.5 MW y una inversión de \$4.5 millones de dólares. A pesar de haberse estimado un costo aproximado de \$0.6/kWh, la generación de electricidad se vio afectada por problemas de gestión técnica en el Relleno, lo que redujo la captura de biogás. Debido a diversas circunstancias, como el cierre y reapertura del relleno sanitario, se presentaron daños en tuberías, chimeneas y sellos, lo que eventualmente llevó al cierre del proyecto de generación eléctrica.

La Ley 7200 de Costa Rica relacionada con la generación autónoma o paralela permite la integración de estas fuentes en la red nacional, aunque está sujeta a ciertas restricciones. Esta generación está limitada a 20 MW y 20 años, o en casos superiores a 20 MW, requiere la aprobación del ICE, garantizando que no exceda el 15% de la capacidad eléctrica nacional. Además, las tarifas de compra por parte del ICE están sujetas a la regulación de la Autoridad Reguladora de Servicios Públicos (ARESEP). Sin embargo, en la actualidad, no existe una metodología específica para la generación de electricidad con biogás en esta regulación. Las metodologías más cercanas se encuentran en la resolución RJD 004 2010, donde la ARESEP aprobó la metodología tarifaria basada en la estructura de costos típicos de una planta modelo

de generación de electricidad con bagazo de caña, y la RJD-162-2011, similar pero aplicable a la biomasa distinta al bagazo.

Ambas metodologías presentan los costos y fórmulas aprobadas para realizar la estimación de la tarifa eléctrica, basándose en el principio de servicio al costo para el consumidor. Ambas metodologías reconocen la importancia de incrementar la producción de energía a nivel nacional, lo que podría resultar en un menor costo en comparación con la generación térmica convencional. A modo de referencia, el costo en la Planta Térmica de Garabito oscila entre los \$240 y \$300 por MWh.

En esencia, ambas metodologías buscan combinar diversos componentes de costos para determinar la tarifa eléctrica. Estos componentes incluyen costos variables (materia prima, combustible, transporte e impuestos) y costos fijos (mano de obra, seguros, costos indirectos de fabricación, gastos financieros y depreciación), además de considerar el nivel de rentabilidad. El cálculo de la rentabilidad se basa en el Modelo de Variación de Capital, que busca estimar el rendimiento necesario para recuperar la inversión requerida en el proyecto (equipos, maquinaria, ingeniería, mobiliario de oficina, herramientas, vehículos, terrenos, interconexión, generadores, entre otros), considerando el nivel de riesgo asociado. Para esto, se utilizan indicadores como la prima por riesgo, riesgo país y la beta apalancada. La suma total de los costos fijos, variables y rentabilidad se divide por la cantidad total de energía que la planta puede generar. La cantidad de energía debe determinarse a través de un análisis de flujo de masa y energía, que tiene en cuenta las eficiencias de los equipos y estudios técnicos.

Además de estas regulaciones, existe la posibilidad técnica de que los rellenos sanitarios generen electricidad a través del biogás según el Decreto 39220 de Generación Distribuida para Autoconsumo. Sin embargo, bajo este régimen solo se permite una medición neta sencilla, lo que implica que el generador puede inyectar electricidad no consumida a la red y consumir el 49% de esa cantidad en los meses siguientes. Esta opción no permite la comercialización de la energía a terceros y no es económicamente viable a menos que el relleno tenga un consumo considerable de energía. Además, se deben pagar mensualmente los costos de acceso a la red de distribución según la tarifa establecida por la ARESEP.

A pesar de que se han acumulado experiencias en la generación eléctrica para autoconsumo, la falta de una legislación y metodología específicas ha obstaculizado, hasta la fecha, la realización de proyectos de generación eléctrica con biogás destinados a la venta en Costa Rica. Sin embargo, el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), a través de su programa de biogás, ha dado pasos significativos al llevar a cabo pruebas piloto. Actualmente, el precio de referencia más cercano es el de la energía generada a partir del bagazo de caña, que se sitúa en alrededor de \$95.82/MWh.

Estas pruebas piloto han explorado la posibilidad de que, en lugar de que los Rellenos Sanitarios se involucren directamente en un proceso contractual con el ICE o cualquiera de sus concesionarios, opten por comercializar el biogás a uno de estos actores, permitiendo así que sean ellos quienes aprovechen y generen electricidad a partir del biogás. Hasta la fecha, no existe regulación alguna que prohíba esta práctica en el país, lo que representa una oportunidad para valorizar el biogás en la generación eléctrica a gran escala.

Esta iniciativa podría marcar un avance significativo en la promoción de la generación eléctrica a partir del biogás en Costa Rica, al brindar mayor flexibilidad en la gestión de estos proyectos y fomentar la colaboración entre el sector de los rellenos sanitarios y las entidades eléctricas. Además, podría contribuir a la expansión de la generación de energía renovable en el país y

a la diversificación de fuentes energéticas más sostenibles. No obstante, es fundamental seguir supervisando el desarrollo de esta iniciativa y abogar por la creación de una regulación específica que respalde y promueva aún más esta práctica en beneficio del medio ambiente y la economía costarricense.

2.

ETODOLOGÍAS DEL ESTUDIO

La consultoría se desarrolló en **4 Fases** (

Ilustración 8). En la **primera fase** se realizó el **estudio preliminar de todos los rellenos y vertederos de Costa Rica** con base en fuentes secundarias de información como los documentos emitidos por los administradores (públicos y privados) de los centros de disposición final de residuos y otros documentos oficiales.

Durante la **segunda fase se recopiló información multiparamétrica para alimentar la matriz de evaluación y escoger 5 sitios de disposición final**. Estos sitios fueron seleccionados con base en las características más relevantes e interesantes que determinan las **posibilidades de valoración de biogás**. Igualmente fueron evaluadas sus condiciones e impactos ambientales y sociales, particularmente **aspectos que pueden tener incidencias sobre las desigualdades de género**.

La información fue recolectada mediante un cuestionario enviado a los administradores de los rellenos sanitarios y vertederos estudiados. Aunque no se obtuvo una respuesta de todos los responsables u operadores de los centros de disposición final de residuos en Costa Rica, se logró obtener información suficiente de las fuentes primarias y secundarias para realizar la selección de los 5 sitios.

Para **conocer el potencial y las posibilidades de valoración de esta muestra de 5 sitios seleccionados** se desarrolló en la **tercera fase la caracterización in situ del biogás** producido y los residuos que son dispuestos en los lugares seleccionados. Así mismo, se entrevistaron personas a cargo de la gestión ambiental y social de los sitios con la finalidad de **establecer un diagnóstico preliminar** de los aspectos sociales y ambientales, **focalizado en las problemáticas de género asociadas a la gestión integral de residuos desde el sector formal**.

En función de los resultados de las muestras tomadas in situ y junto a la experiencia técnica de la consultoría, **se establecieron propuestas de captura, tratamiento y valorización del biogás**. Así como un análisis de las **posibles puertas de entradas para la disminución de brechas en género** identificadas en el diagnóstico.

1 2 3 4

Ilustración 8. Fases contempladas en el desarrollo de la consultoría.

2.1. Recopilación de información

La recopilación de datos e información en la primera fase se hizo para los 9 lugares de disposición final: L1 a L7 (rellenos sanitarios), V1 y V2 (vertederos)

Inicialmente se había incluido en el estudio un relleno sanitario, el cual se encuentra clausurado y, por lo tanto, fue reemplazado por otro sitio de disposición final que se encuentra en operación o está próximo a terminar su vida útil.

En cuanto a los vertederos, se entregó una lista de 16 sitios donde según las discusiones con el Ministerio, la experiencia técnica del equipo y actores relacionados se descartaron todos los sitios que estuvieran clausurados, con el propósito de dar prioridad a aquellos vertederos que estén próximos al cierre, ya que se pueden tener más oportunidades de aprovechamiento de la producción de biogás. Esta condición se establece ya que el pico de producción de biogás se genera en el momento del cierre del sitio de disposición como se explicará detalladamente más adelante.

Las fuentes secundarias consultadas durante todas las fases del estudio corresponden a las bases de datos del SETENA, reportes e informes de operación de los sitios de disposición, datos actualizados de la GIRS, documentación suministrada por EF, documentación legal y de fuentes oficiales del Ministerio de Salud.

Durante la segunda fase, para sintetizar la información de los sitios y alimentar la matriz multicriterio, se elaboraron fichas técnicas de los rellenos sanitarios y vertederos. Estas fichas técnicas consolidan la información que se ha obtenido. Para mayor detalle de la información solicitada a las empresas operadoras se adjunta el formato de la encuesta en el Anexo 1

En cuanto a las fuentes primarias, en la tercera fase del estudio, se establecieron entrevistas directas con los responsables u operadores de los sitios de disposición final y se recopilaban datos por medio de encuestas que contienen información técnica, ambiental y social, con especial énfasis en información sobre impactos diferenciados por género y brechas de género de la gestión de los operadores privados o las municipalidades en la GIR.

2.2. Evaluación multicriterio para selección de sitios

El objetivo de evaluar los sitios es identificar una muestra de la población de sitios contemplados en el estudio (5 lugares de disposición final) que, por los diferentes parámetros contemplados en la matriz, cuenten con condiciones de relevancia e interés para plantear alternativas de captura, tratamiento y valoración.

Adicionalmente, en los sitios seleccionados se realizarán los siguientes estudios:

- ✓ El estudio de caracterización de residuos y biogás.
- ✓ El estudio de generación de biogás
- ✓ El estudio técnico y financiero de propuestas de captura, tratamiento y aprovechamiento del biogás.
- ✓ El estudio ambiental y social para el establecimiento de un diagnóstico preliminar de género

Los criterios tomados en cuenta para la evaluación son las condiciones operacionales, ambientales, sociales, técnicas y administrativas. Particularmente se intentó recolectar información social que pueda ayudar a determinar las brechas de género en el sector. Los pesos de ponderaciones han sido asignados con el objetivo de promover el desarrollo de proyectos de captura, quema o aprovechamiento del biogás.

La principal dificultad de esta fase del proyecto fue la validación de la información encontrada en internet. Por otro lado, los registros operacionales de los rellenos sanitarios en SETENA no se encuentran en formato digital, por lo que la búsqueda de datos puntuales es difícil y al no tener un formato específico para los reportes operacionales, no se tenía la misma información para todos los sitios de disposición dificultando la validación de información.

Los criterios de evaluación se encuentran clasificados en 5 ejes principales:

Eje	Peso en la evaluación
Meteorología	10%
Viabilidad de valoración	40%
Ambiental	20%
Institucional	5%
Social	25%

Como se puede observar el mayor peso se le ha asignado a la categoría “Viabilidad de valoración” que corresponde a indagar desde esta atapa del estudio las posibilidades para la implementación de proyectos de captura, quema y/o aprovechamiento.

En cuanto a las categorías ambiental y social tienen el 20% y el 25% respectivamente lo cual se alinea a los objetivos del estudio, abarcando un análisis de las implicaciones ambientales por la disposición de los residuos con relación a la salud pública, así como los impactos diferenciados de género. Por otro lado, se contempla las condiciones de género relevantes o aspectos significativos relacionados a la estructura organizacional y a la gestión de los rellenos y vertederos.

Cada eje comprende una serie de criterios que se evalúan cualitativamente y/o cuantitativamente, con pesos asignados dentro del porcentaje.

La valoración se orientará a dar mayor puntuación a aquel que presente las condiciones más favorables para el desarrollo del estudio, por lo que, los 5 primeros lugares que obtengan las mayores puntuaciones serán contemplados en la campaña de muestro.

La puntuación total de cada sitio de disposición es definida por la suma de todos los puntajes de cada criterio donde dicho valor corresponde a la calificación dada por el peso asignado. A continuación, el rango de la calificación con su contraparte numérica.

Calificación	Valor Numérico
Bajo	1
Intermedio	2
Alto	3

La descripción del proceso de evaluación, los criterios específicos calificados, la información con la que fue construida la matriz para cada sitio, la calificación otorgada por parámetro y el puntaje según los pesos asignados en la matriz global se encuentran en el Anexo 2

La calificación de los parámetros fue realizada con la información de cada relleno. Posteriormente se compartieron los resultados con los ministerios y las principales partes interesadas a quienes se les expuso el proceso de evaluación, pesos y conclusiones para su respectiva aprobación.

2.3. Metodología del diagnóstico preliminar del enfoque de género

Los procesos de valorización de biogás requieren una inversión en infraestructura, adecuaciones para la ubicación de esta infraestructura y un personal para el funcionamiento de las plantas de tratamiento propuestas.

Si bien hay una **inversión económica importante en la etapa de estudios y montaje en los procesos de acondicionamiento del biogás**, estos **no tienen una demanda de mano de obra elevada**. En promedio 5 personas son necesarias para el mantenimiento y buen funcionamiento de los sistemas de extracción.

Es por este motivo que el análisis de género para **establecer posibles puertas de entrada para la contribución activa de las mujeres a los procesos de valorización de biogás se hizo enfocándose en todas las actividades realizadas por las entidades administradoras de los rellenos /vertederos en el sector formal de la recolección y disposición final de residuos** de los 5 sitios seleccionados. En primer lugar, se establecieron las brechas que inciden en las desigualdades de género en el sector y posteriormente la identificación de esas puertas de entrada para disminuir las desigualdades y permitir una contribución activa de las mujeres en un sector altamente masculinizado.

Por otro lado, y como se mencionó anteriormente, las inversiones para la inclusión de estos procesos en los rellenos sanitarios son altas, por lo que también se establecen

recomendaciones de género en los procesos de licitación pública que puedan eventualmente existir en la integración y puesta en marcha de dichas tecnologías.

Para determinar la contribución a las mujeres en los procesos de valorización energética del biogás y las posibles brechas de género donde esta contribución es invisibilizada, se **analizaron las capacidades en acciones de equidad de género de las empresas y las municipalidades que gestionan los rellenos y vertederos seleccionados**. Se identificaron igualmente **los conocimientos en materia de género y los procesos o procedimientos** en la gestión de los recursos humanos que pueden contribuir potencialmente a disminuir estas brechas.

Aunque varias entidades intervienen en la gestión de los residuos y en todas es posible identificar capacidades que permitan la igualdad efectiva de género y el empoderamiento de las mujeres en su diversidad este análisis se centra en las entidades que gestionan los sitios de disposición final.

Para ello se recolectó la información en dos fases. En la primera fase se realizó una **revisión de documentos oficiales** producidos por las entidades gestoras de los rellenos y vertederos y documentos producidos por instituciones oficiales **que proporcionan información sobre acciones y procedimientos en los aspectos sociales, ambientales, la gestión del recurso humano y las políticas de responsabilidad social empresarial**. Igualmente se utilizó la información de las encuestas, realizadas para la identificación de los criterios ambientales y sociales en la etapa de elaboración de la matriz multicriterio, que fueron respondidas por dos de los rellenos y el vertedero seleccionados.

En una segunda fase se realizaron entrevistas semiestructuradas con los responsables de la gestión ambiental y social y/o las personas a cargo de las áreas de recursos humanos.

Cuadro 5. Resumen de entrevistas realizadas a los operadores de relleno sanitarios y vertederos.

RELLENO / VERTEDERO	OPERADOR	CARGO	ENTREVISTA
R1	RABSA	Coordinadora General Gestora CASS*	07/07/2023
R2	Municipalidad de Santa Cruz	Sin entrevista	Sin entrevista
R3	Grupo EBI	- Coordinadora de Gestión Ambiental - Coordinadora de Responsabilidad Social Directora de RRHH	16/08/2023 28/08/2023
R4	Grupo EBI	- Coordinadora de Gestión Ambiental - Coordinadora de Responsabilidad Social Directora de RRHH	16/08/2023 28/08/2023

V1	Municipalidad de Turrialba	Gestora de Residuos	26/07/2023
----	----------------------------	---------------------	------------

* Calidad, Ambiental Seguridad y Salud

La metodología de recolección de información se guió por criterios sensibles al género. Esto quiere decir que se solicitaron **datos desagregados por sexo**, se utilizó **la información cuantitativa y cualitativa disponible** y se intentó hacer una **recolección de información de la parte de hombres y mujeres que trabajan en la gestión de los temas sociales y ambientales de los sitios de disposición final**. En el caso de las entrevistas realizadas, **todas las entrevistas realizadas fueron respondidas por las mujeres** encargadas de los temas sociales y ambientales en las instituciones tanto públicas como privadas, esta mayoría femenina no es trivial y hará parte de las hipótesis presentadas en el análisis.

Los cuatro rellenos y el vertedero seleccionado tienen diferentes procesos de gobernabilidad pues algunos son administrados por entidades privadas y otros por entidades públicas. El análisis tiene en cuenta esta diferencia de gestión y la presentación de los resultados se hará agrupando los dos rellenos administrados por la misma empresa operadora.

Las entrevistas se concentraron en **tres componentes que posteriormente fueron utilizados como categorías de análisis**, a saber:

- ✓ La **gestión ambiental y social**, que comprende entre otros, la viabilidad ambiental, los principales impactos identificados, la existencia de planes de gestión ambiental y social y las relaciones con las comunidades aledañas en este marco de gestión de impactos;
- ✓ las **relaciones con la comunidad** fuera del marco de compromisos ambientales y sociales adquiridos en el plan de gestión avalado por las autoridades ambientales. En el caso de las municipalidades, comprende los programas sociales u otros que tienen relación con la gestión de los residuos que llegan al sitio de disposición final y en el caso de las empresas privadas se trata de los programas o políticas de responsabilidad social empresarial.
- ✓ La **gestión de recursos humanos**, distribución de cargos por nivel jerárquico y sexo, políticas internas en términos de género, tales que las medidas implantadas para mejorar la compatibilidad de la vida personal y laboral o la participación e implicación de la empresa o de la municipalidad en el desarrollo de acciones a favor de la igualdad de oportunidades.

Finalmente se realizó un análisis que permitió identificar algunas de las puertas de entrada para la integración del enfoque de género en la gestión de los residuos para la valorización energética.

2.4. Caracterización de residuos y biogás en sitios de disposición final

Una vez seleccionados los 5 lugares con mejores condiciones para proponer alternativas de captura, tratamiento y/o valoración, se desarrolló en cada sitio una campaña de muestreo donde se caracterizó la composición general de residuos depositados y biogás generado.

2.4.1. **Caracterización de residuos**

El objetivo es comprender la composición de los residuos para tomar decisiones informadas sobre su manejo, tratamiento y disposición final. Esto implica identificar los tipos de residuos presentes, su cantidad, propiedades, características y potencial para la degradación. La información obtenida ayuda a optimizar las prácticas de gestión de residuos y a diseñar estrategias más efectivas de reciclaje, compostaje o eliminación, así como ayuda a determinar qué gases, como el metano, se generan durante la descomposición y en qué cantidades. Los parámetros descritos son esenciales para diseñar sistemas de captura, tratamiento y/o aprovechamiento del biogás.

Se estableció en la campaña, que para la caracterización de los residuos y biogás se destinara un día para cada sitio donde se obtendrán 3 muestras. La ruta de caracterización trazada se planificó estratégicamente con el objetivo de mejorar la eficiencia en los desplazamientos, especialmente durante la semana de receso estudiantil, cuando el tráfico suele ser intenso. Esto garantiza una obtención de datos más rápida y precisa. Para realizar los muestreos se utilizó un equipo de 4 a 5 personas, según la disponibilidad de personal. En cada lugar de muestreo se aseguró que se empacaran y recogieran todos los residuos de manera que se previniera la contaminación del área designada para realizar el trabajo de mezcla y cuarteo de las muestras de residuos.

En la clasificación de residuos se separaron los plásticos en dos categorías: plásticos valorizables, que incluye los plásticos tipo 1 (PET) y tipo 2 (HDPE); y plásticos no valorizables, que incluyen los tipos de plástico del 3 al 7. Esta categorización se realiza según la posibilidad de valorización de estos materiales en Costa Rica. Además, se separaron los polilaminados en su propia categoría, ya que los mismos a veces son incluidos dentro de los plásticos.

Para mejorar la resolución de la información, se clasificó el papel por separado del cartón. Esta diferenciación no siempre se realiza en los estudios de caracterización de residuos. En nuestra categorización, la categoría de “Otros” incluye textiles, residuos electrónicos, residuos peligrosos, y residuos de construcción.

Como se menciona previamente, se realizaron 3 muestreos en cada uno de los 5 sitios seleccionados. Los residuos sólidos comunes se cuantificaron siguiendo el protocolo de acuerdo a la norma ASTM D5231-92 de 2008, como se menciona a continuación:

1. Se realiza un tipo de muestreo aleatorio simple para la elección de los vehículos que disponen en el Relleno.
2. Se toma una muestra directamente de cada uno de los vehículos o rutas seleccionadas (los muestreos se realizaron en la hora de la mañana con el fin de evitar las lluvias).
3. Una vez los residuos sólidos son depositados en la zona habilitada para realizar la caracterización, se procede a la ruptura de todas las bolsas y a la mezcla de estos, con el fin de homogenizar.
4. Con la ayuda de palas se procede a realizar un primer cuarteo. Una vez dividida la muestra, se seleccionan dos cuartos opuestos y se desechan. Las otras dos se mezclan y homogenizan para realizar nuevamente un segundo cuarteo. El cuarteo finalizó una vez obtenida una cantidad aproximada de 50 kg de residuos sólidos.
5. Una vez se finaliza el cuarteo, se dispone la muestra homogeneizada en canastillas plásticas, para posteriormente pesarlos en la báscula y de esta forma obtener el peso de los residuos caracterizar, 50 kg aproximadamente por muestra.

6. Una vez pesados los 50 kg de residuos sólidos domiciliarios, se inicia la caracterización, la cual consiste en separar, clasificar y pesar los residuos en las siguientes categorías:

- A. Papel
- B. Cartón
- C. Residuos orgánicos
- D. Plásticos valorizables (Tipo 1 y Tipo 2)
- E. Plásticos no Valorizables (Tipo 3 al 7)
- F. Metales ferrosos y no ferrosos
- G. Vidrio
- H. Otros Materiales (caucho, sintéticos, textiles, tierra, etc.)
- I. Polilaminados

Cada uno de los pasos mencionados anteriormente se llevó a cabo con cada vehículo seleccionado. El peso de cada categoría de residuos es documentado y la composición corresponde al peso individual de cada subcategoría de residuos, dividido por el peso total de la muestra.

Como puntos de especial atención se encuentran las siguientes actividades realizadas:

- ✓ Cada una de las muestras utilizadas presentó un peso inicial de mínimo 200 kg.
- ✓ Se realizó la clasificación de los residuos de acuerdo a la norma ASTM D5231-92 de 2008 (Ver Anexo 3 de la metodología con los ajustes realizados para el desarrollo de este estudio)
- ✓ los residuos orgánicos son una sola fracción que incluye residuos de alimentos y podas. La madera se incluyó en la categoría de "otros residuos"
- ✓ Al realizar la homogenización y cuarteo de los contenidos de las bolsas de residuos, estas mismas bolsas se incluyeron dentro de los residuos a analizar, ya que forman parte de los materiales cuyo destino final son los rellenos sanitarios y vertederos.
- ✓ La medición de los pesos para cada categoría de residuo se realizó con una Romana Electrónica marca Skantroniks modelo Basix, que cuenta con una certificación ISO-9001, y con capacidad máxima de pesaje de 300 kg, y una división mínima de 20 g. El certificado de peso exacto de este equipo se incluye en el Anexo 3

La descripción de la metodología desarrollada por sitio caracterizado se detalla en el Anexo 3. La información y datos recolectados son utilizados en la posterior proyección de biogás en un horizonte de 30 años por medio de modelos. Dichos datos también permiten la validación del modelo que refleje las condiciones reales de los sitios de disposición.

2.4.2. **Caracterización de biogás**

La caracterización de biogás en rellenos sanitarios se hace para aprovechar la energía del gas, reducir emisiones dañinas, cumplir regulaciones, planificar mejor el manejo de residuos y monitorear el impacto ambiental. En la caracterización de biogás se miden principalmente el metano (CH_4), el dióxido de carbono (CO_2), el oxígeno (O_2) y el ácido sulfhídrico (H_2S). El metano es valioso debido a su potencial como fuente de energía renovable, pero también es un gas de efecto invernadero potente. La medición del oxígeno ayuda a entender cómo se

están desarrollando los procesos de descomposición y puede guiar las estrategias de manejo de residuos. El sulfuro de hidrógeno (H_2S) puede tener una influencia significativa en la valorización del biogás en procesos de generación de energía. El H_2S es corrosivo y puede causar daño a los equipos y sistemas de captura y utilización de biogás. Puede corroer las superficies metálicas y causar desgaste prematuro en los componentes de las instalaciones, lo que resulta en costos de mantenimiento más altos y una vida útil más corta de los equipos.

Al igual que la caracterización de residuos la ruta de caracterización trazada se planificó estratégicamente con el objetivo de mejorar la eficiencia en los desplazamientos. Para realizar los muestreos se utilizó un equipo de 2 personas.

Para el muestreo de biogás se considera el muestreo por censo y aleatorio. El enfoque de censo es factible cuando se tiene acceso a toda la población o cuando el tamaño de la población es pequeño. Este método será aplicado a los rellenos sanitarios con población pequeña y acceso a todas las chimeneas.

En los sitios seleccionados en los que no se tiene acceso y la disponibilidad de todas las chimeneas se deberá tomar una muestra de las que se puedan medir. Una muestra representativa es el equivalente de un 20 o 30 % del total de la población. Se utiliza un método de muestreo aleatorio, donde se selecciona aleatoriamente un subconjunto de las chimeneas totales para medir el biogás, asegurando de que la selección sea aleatoria y no sesgada, para obtener resultados más representativos; es decir, abarcar todas las celdas de disposición.

El estudio se realizó entre el 5 y el 13 de julio de 2023. El calendario de muestreos se presenta en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Calendario de muestreos de biogás realizados en los diferentes rellenos sanitarios y vertedero.

Relleno Sanitario o Vertedero	Localización	Coordenadas	Fecha del Muestreo de biogás
R1	Provincia de Puntarenas	Latitud: 10° 4'0.40"N Longitud: 84°45'49.07"O	10 de julio, 2023
R2	Provincia de Guanacaste	Latitud: 10°17'50.30" N Longitud 85°33'58.98" O	11 de julio, 2023
R3	Provincia de San José	Latitud 9°57'57.82"N Longitud 84° 9'24.11"O	13 de julio, 2023
R4	Provincia de San José	Latitud: 9°51'33.05"N Longitud: 84° 3'43.33"O	12 de julio, 2023
V1	Provincia de Cartago	Latitud: 9°52'57.99"N Longitud: 83°41'1.40"O	6 de julio, 2023

En cada uno de los rellenos sanitarios y vertedero se realizaron los muestreos siguiendo una metodología específica respectivamente. Por otra parte, el personal de apoyo involucrado en cada uno de los sitios y las condiciones climáticas se especifican en las correspondientes bitácoras.

El proceso de caracterización de biogás tuvo una duración de 8 horas en cada sitio y el tiempo de medición por chimenea y/o punto de muestreo es de 5 minutos, tiempo estimado para que

el analizador estabilice antes de obtener una medición precisa. El muestreo se llevó a cabo en una campaña de medición de:

- %CH₄
- %CO₂
- %O₂
- ppm H₂S
- velocidad (m/s)
- flujo instantáneo (Nm³/h)

La campaña de medición se realizó de manera puntual en los diferentes puntos de medición con un dispositivo portátil de medición manual de biogás (OPTIMA 7 BIOGAS MRU, previamente calibrado (ver certificado en el Anexo 4) con una combinación de sonda que permite el muestreo de gas y la medición de velocidad y flujo.

A continuación, se hace la descripción de la metodología de caracterización de biogás para rellenos sanitarios y para vertederos.

2.4.2.1. Metodología para la toma de muestras en rellenos sanitarios

1. Se hace un recorrido general del relleno para ubicar las chimeneas e identificar las condiciones de acceso a ellas.
2. Dentro de las chimeneas accesibles, se selecciona una muestra aleatoria de acuerdo al procedimiento descrito en el Anexo 6.
3. Se acondicionan los puntos de muestreo para toma de muestra dependiendo de las condiciones técnicas de las chimeneas. En caso de contar con “fittings” (puntos de muestreo permanentes en la salida de las chimeneas), se puede acoplar la manguera del analizador directamente al “fitting”. De la misma forma se puede insertar la sonda de medición de velocidad y flujo. En caso de no contar con los “fittings”, se usa un accesorio especial (unión o “niple” perforado) que se instala a la salida de la chimenea para poder conectar el analizador de biogás y/o insertar la sonda de velocidad y caudal.
4. Se realiza el muestreo para toma de composición, velocidad y caudal en cada una de las chimeneas seleccionadas.
Los parámetros de composición de biogás medidos son:
 - CH₄ en %
 - CO₂ en %
 - O₂ en %
 - H₂S en ppm(vol)

Los parámetros de cantidad:

- Velocidad en m/s

Flujo (caudal) en m^3/s y m^3/h (para determinar el flujo, es necesario ingresar en el analizador el diámetro de la tubería donde se inserta la sonda de velocidad. El analizador mide la velocidad en m/s y la multiplica por la sección libre o área de la tubería en m^2 para obtener el flujo o caudal en m^3/s y en m^3/h).

2.4.2.2. **Metodología para la toma de muestras en vertederos**

En el vertedero, por no contar con una red de captación de biogás activa dentro de la celda, es necesario tener un procedimiento diferente que se resume a continuación:

1. Se realiza 1 sondeo de baja profundidad (aprox. 2,5 m) dentro de la masa de residuos con una maquinaria especial (retroexcavadora de llantas).
2. Se instala una tubería perforada en PVC de 1,5", previamente rellena con un material poroso (espuma) para evitar taponamiento de la tubería con residuos durante la instalación y extracción del biogás.
3. Se rellena y compacta el espacio excavado con precaución para no dañar la tubería.
4. Se limpia el área superficial circundante al punto de muestreo instalado.
5. Se impermeabiliza con un material plástico (membrana de polietileno) la superficie de la zona de trabajo en un área de aproximadamente 4 m^2 alrededor del punto de muestreo para evitar filtraciones de aire ambiente dentro de la chimenea de muestreo.
6. Se conecta una reducción de 1,5" a 1" a la salida de la chimenea de muestreo y se instala una manguera transparente de 1" para conectar a la entrada del soplador extractor de gas.
7. Se instala a la salida del extractor un medidor de flujo instantáneo de gas y una válvula de regulación para poder regular el flujo de extracción.
8. Se energiza eléctricamente y se enciende el extractor.
9. Se realizan varios muestreos, variando el flujo de extracción mediante la válvula de regulación.
10. En cada muestreo se toma composición, velocidad y caudal del biogás extraído.

2.4.3. **Procedimiento de selección de muestra**

El enfoque de censo es factible cuando se tiene acceso a toda la población o cuando el tamaño de la población es pequeño. Este método fue aplicado a los rellenos sanitarios R2 en donde se cuenta con tan solo 20 chimeneas, y R3 en donde existe extracción activa de biogás con todas las chimeneas interconectadas a 13 puntos de muestreo existentes.

En los sitios seleccionados con mayor población y sin acceso a todas las chimeneas se tomó una muestra considerando aspectos como el acceso técnico, la seguridad del personal de medición y la ubicación, con el fin de abarcar todas las celdas de disposición. Se utilizó un método de muestreo aleatorio, donde se seleccionó un subconjunto de las chimeneas totales

para medir el biogás, asegurando que la selección fue aleatoria y no sesgada, para obtener resultados más representativos. El tamaño de la muestra, es decir, la cantidad de chimeneas a inspeccionar se calculó de la siguiente manera:

$$n = \frac{Z^2 \sigma^2 N}{e^2 (N - 1) + Z^2 \sigma^2}$$

N = cantidad de chimeneas

Nivel de confianza = 95%

Z = 1,96 (nivel de confianza = 95%)

$\sigma = 15\% \text{ CH}_4, \text{ CO}_2$ ⁴

e = error máximo tolerable = 5%

El tipo de muestreo y el tamaño de la muestra calculada para cada uno de rellenos sanitarios se muestra en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Tamaño de muestra en cada sitio seleccionado.

Relleno sanitario/ Vertedero	Tipo de muestreo	Puntos de muestreo	Tamaño de la población	Tamaño mínimo de muestra	Tamaño real de muestra
R1	Aleatorio	Chimeneas	189	29	42
R2	Censo	Chimeneas	20	20	20
R3	Censo	Puntos de muestreo	13	13	13
R4	Aleatorio	Chimeneas	80	24	25
V1	Aleatorio	No existen puntos de muestreo	-	-	1

2.5. Proyección teórica de biogás

Los datos obtenidos en la campaña de muestreo se relacionaron en la proyección de biogás haciendo uso de dos modelos de generación: El Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (2005) y el IPCC Waste Model del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (2019).

A continuación, se hace la descripción de cada modelo y el proceso requerido para hacer la proyección de producción de biogás.

⁴ Fuente: Novatio. Obtenidos de estudios propios en diferentes rellenos sanitarios.

2.5.1. Landfill Gas Emissions Model (LandGEM)

El LandGEM de la EPA se basa en una ecuación de descomposición de primer orden para cuantificar las emisiones procedentes de la descomposición de residuos depositados en los SDFR. LandGEM es el modelo estándar, más utilizado para aplicaciones reglamentarias y no reglamentarias en Estados Unidos⁵. Dicho modelo proporciona un enfoque relativamente sencillo para estimar las emisiones de biogás del sitio de disposición.

LandGEM puede utilizar datos específicos del sitio para estimar las emisiones o parámetros predeterminados si no hay datos específicos del sitio disponibles. LandGEM contiene dos conjuntos de parámetros predeterminados:

- **Valores predeterminados de CAA:** se basan en los requisitos para los sitios de disposición establecidos por la Ley de Aire Limpio (CAA), incluidos NSPS/EG⁶ y NESHAP⁷ del Código de Regulaciones Federales Estadounidense (40 CFR).
- **Valores predeterminados del inventario:** se basan en los factores de emisión de la Compilación de factores de emisión de contaminantes del aire (AP-42) de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Este conjunto de valores predeterminados produce emisiones promedio y puede usarse para generar estimaciones de emisiones para su uso en inventarios de emisiones y permisos de aire en ausencia de datos de prueba específicos del sitio.

Los valores por defecto del modelo se basan en datos empíricos de sitios de disposición estadounidenses, por lo cual cuanto mejores sean los datos de entrada, mejores serán las estimaciones. A menudo, los datos disponibles presentan limitaciones en cuanto a la cantidad y composición de los residuos, la variación de las prácticas de diseño y funcionamiento a lo largo del tiempo y los cambios que se producen con el tiempo y que afectan al potencial de emisiones.

LandGEM utiliza la siguiente ecuación de descomposición de primer orden para estimar las emisiones anuales a lo largo de un periodo de tiempo determinado:

Ecuación 1. Reacción de primer orden modelo LandGEM

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k L_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{i,j}}$$

Donde,

Q_{CH_4} = Caudal estimado de generación de metano (m³/año)

i = Incremento temporal de 1 año

n = (año de cálculo) – (año inicial de eliminación de los residuos)

j = Incremento temporal de 0.1 años

k = Constante de generación de metano (año⁻¹)

L_0 = Capacidad potencial de generación de metano (m³/Mg)

⁵ U.S.EPA (2005). Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide. United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, EPA-600/R-05/047

⁶ New Source Performance Standards (NSPS) y Emission Guidelines (EG)

⁷ National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants (NESHAP)

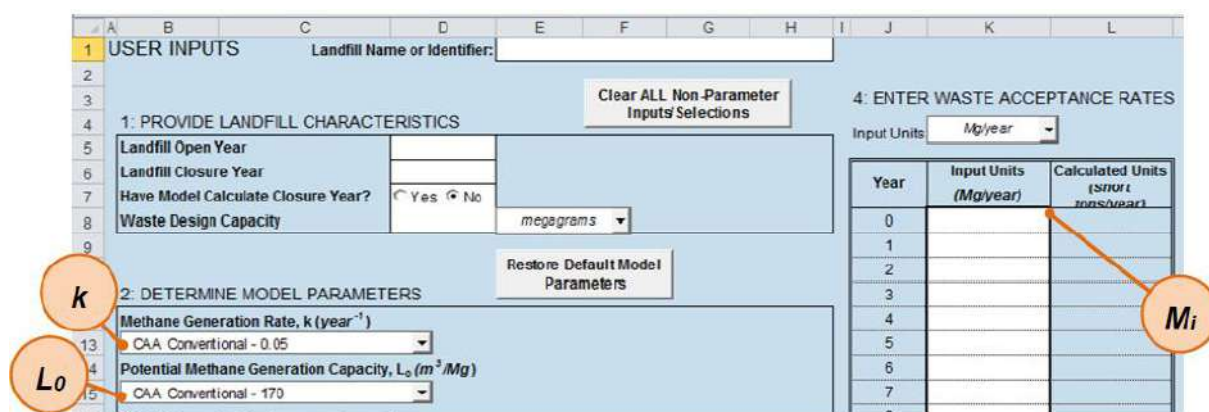
M_i = Masa de residuos sólidos eliminados en el i-ésimo año (Mg o tonelada)

$t_{i,j}$ = Edad de la sección j de la masa de residuos eliminada en el año i (años decimales)

LandGEM supone que la generación de metano alcanza su punto máximo poco después de la disposición inicial de los residuos (tras un breve lapso mientras se establecen las condiciones anaeróbicas en el SEDS). El modelo también supone que la tasa de generación de metano en el sitio disminuye exponencialmente a medida que la materia orgánica es consumida por las bacterias.

2.5.1.1. Parámetros del modelo

Sólo tres de las variables de la ecuación de descomposición de primer orden requieren entradas por parte de la persona usuaria (M_i , L_0 y k), tal como se muestra en la siguiente figura:



The screenshot shows the LandGEM model input sheet. It is divided into several sections: '1: PROVIDE LANDFILL CHARACTERISTICS', '2: DETERMINE MODEL PARAMETERS', and '4: ENTER WASTE ACCEPTANCE RATES'. In section 2, the 'Methane Generation Rate, k (year⁻¹)' is highlighted with a callout 'k'. In section 1, the 'Waste Design Capacity' is highlighted with a callout 'L₀'. In section 4, the 'Calculated Units (short tons/year)' column is highlighted with a callout 'M_i'.

Gráfica 3. Interfaz hoja de cálculo modelo LandGEM

✓ Constante de generación de metano (k)

La constante de generación de metano describe la velocidad a la que los residuos depositados en un sitio de disposición se descomponen y producen biogás. A valores más altos de k , la generación de metano en un vertedero aumenta más rápidamente (mientras el vertedero siga recibiendo residuos), y luego disminuye más rápidamente tras el cierre del vertedero.

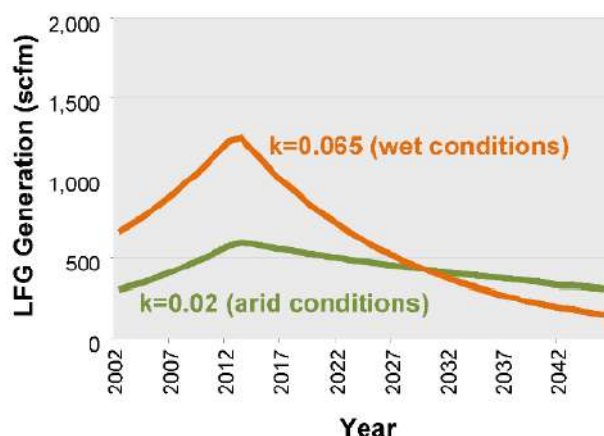
El valor de k depende de:

- ✓ El contenido de humedad de los residuos
- ✓ La disponibilidad de nutrientes para las bacterias generadoras de metano
- ✓ El pH
- ✓ La temperatura

Las tasas de descomposición de residuos y los valores k son muy bajos en sitios de disposición en condiciones climáticas desérticas y tienden a ser más altos en climas húmedos y alcanzan niveles máximos en condiciones de mayor humedad. La precipitación anual se utiliza a menudo como sustituto de la humedad de los residuos debido a la falta de información sobre las condiciones de humedad al interior del relleno sanitario/vertedero. La temperatura del aire también puede afectar a los valores de k , pero en menor medida. Las temperaturas internas de los sitios de disposición son relativamente independientes de las temperaturas

exteriores y suelen oscilar aproximadamente entre 30 y 60°C, excepto en los sitios poco profundos y no gestionados situados en climas muy fríos, donde las tasas de descomposición de los residuos y los valores de k tienden a ser más bajos⁸.

La Gráfica 4 Gráfica muestra un ejemplo de curva de generación de gas para un sitio de disposición final de residuos. El potencial de generación se modeló para dos escenarios diferentes, utilizando los mismos parámetros, pero variando la constante de generación de metano entre un valor para condiciones áridas (0,02 año⁻¹) y un valor para condiciones húmedas (0,065 año⁻¹). El gráfico demuestra la importante diferencia en la generación de gas que puede producirse en función de las condiciones de humedad del sitio.



Gráfica 4. Variación del potencial de generación de biogás en función de k

El Cuadro 8 presenta los valores predeterminados del modelo LandGEM. Para hacer la diferenciación entre las condiciones meteorológicas del sitio, el EPA establece que para que un sitio sea considerado como de zona árida este debe recibir menos de 25 pulgadas de lluvia por año (equivalente a 635 mm de lluvia por año), en caso contrario este es considerado como convencional.

Cuadro 8. Valores predeterminados de k modelo LandGEM

Tipos predeterminados	Tipo de relleno	Valor de k /año
CAA	Convencional	0,05 (predeterminado)
CAA	Área arida	0,02
Inventario	Convencional	0,04
Inventario	Área arida	0,02
Inventario	Húmedo (Bioreactor)	0,7

✓ Capacidad potencial de generación de metano (L_0)

La capacidad potencial de generación de metano describe la cantidad total de gas metano potencialmente producido por una tonelada métrica de residuos al descomponerse. La EPA

⁸ U.S.EPA (2021). LFG Energy Project Development Handbook. Solid Waste Management and Greenhouse Gases, Landfill Methane Outreach Program, United States Environmental Protection Agency

determinó que los valores adecuados de L_0 oscilan entre 56,6 y 198,2 m³ por tonelada métrica o Mg de residuos, excepto en climas secos, donde la falta de humedad puede limitar la generación de metano.

El valor de L_0 depende únicamente del tipo y la composición de los residuos depositados en el sitio, cuanto mayor sea el contenido orgánico de los residuos, mayor será el valor de L_0 . El Cuadro 9 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** presenta los valores predeterminados de capacidad de potencial de generación de metano según el modelo LandGEM:

Cuadro 9. Valores predeterminados de L_0 modelo LandGEM

Tipos de emisión	Tipo de relleno	Valor de L_0 m ³ /Mg
CAA	Convencional	170 (predeterminado)
CAA	Área arida	170
Inventario	Convencional	100
Inventario	Área arida	100
Inventario	Húmedo (Bioreactor)	96

✓ Tasas anuales de disposición de residuos (M_i)

Las tasas estimadas de disposición de residuos son el principal determinante de la generación de biogás en cualquier modelo basado en la descomposición de primer orden. Para que el modelo estime correctamente las emisiones es necesario ingresar las tasas anuales de disposición desde el año de apertura hasta el año de clausura del sitio.

2.5.1.2. Información requerida

La modelización del potencial de generación de biogás necesita ser alimentada con información respecto a las características y el tamaño del sitio estudiado tal como se muestra a continuación:

- ✓ Año de apertura del sitio o año en el que el sitio empezó a disponer residuos
- ✓ Año de cierre del sitio que puede ser el último año en que el vertedero dispuso residuos, o bien el año en que se espera que el sitio alcance su vida útil
- ✓ Capacidad de diseño en el caso que el sitio no haya alcanzado aun su vida útil y/o se desconozca el año de clausura

Gráfica 5. Captura de pantalla sobre información requerida modelo LandGEM

2.5.2. IPCC Waste Model

Las directrices del IPCC (2019) para los inventarios nacionales de GEI, describen dos métodos para estimar las emisiones de metano procedentes de los sitios de disposición de residuos sólidos:

- ✓ El método por defecto u omisión (nivel 1), con el supuesto de que la totalidad del CH₄ potencial se libera durante el año en el que se produce la disposición de los residuos,
- ✓ El método de descomposición de primer orden (nivel 2), el cual produce un perfil de emisión que depende del tiempo transcurrido y que refleja mejor las verdaderas pautas del proceso de degradación a lo largo del tiempo.

Las directrices del IPCC desaconsejan fuertemente el uso del método por defecto (nivel 1) pues produce resultados que no son comparables con los del método de descomposición de primer orden que permite obtener estimaciones más exactas de las emisiones anuales.

Así pues, la metodología del IPCC elegida para estimar las emisiones de CH₄ provenientes de los sitios de disposición se basa en el método de descomposición de primer orden (FOD). Este método supone que el carbono orgánico degradable (DOC) se descompone lentamente a lo largo de unas décadas, durante las cuáles se forman CH₄ y CO₂. Si las condiciones permanecen constantes, la tasa de producción de CH₄ depende únicamente de la cantidad de carbono restante en los residuos. En consecuencia, las emisiones de CH₄ procedentes de los residuos depositados en un sitio de disposición son más elevadas durante los primeros años posteriores al depósito y, a continuación, disminuyen gradualmente a medida que el carbono degradable de los residuos es consumido por las bacterias responsables de la descomposición.

La base de una reacción de descomposición de primer orden (FOD) es que la velocidad de reacción es siempre proporcional a la cantidad de reactivo restante, tal como se describe mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 2 Método de descomposición de primer orden

$$DDOC_m = DDOC_{m(0)}e^{-kt}$$

Donde,

$DDOC_m$ = masa de DOC descomponible en condiciones anaeróbicas en el momento t (Gg)

$DDOC_{m(0)}$ = masa de DOC descomponible al inicio de la reacción t=0 (Gg)

k = Constante de reacción (año⁻¹)

t = tiempo (año)

El potencial de CH_4 que se genera a lo largo de los años puede estimarse a partir de las cantidades y la composición de los residuos dispuestos anualmente y de las prácticas de gestión de residuos en los sitios de disposición. La base para el cálculo es la cantidad de carbono orgánico degradable descomponible ($DDOC_m$), que es la parte del carbono orgánico que se degradará en condiciones anaeróbicas. Este parámetro puede ser expresado también a partir de la relación siguiente:

Ecuación 3. DOC descomponible a partir de datos de disposición de residuos

$$DDOC_m = W * DOC * DOC_f * MCF$$

Donde,

$DDOC_m$ =masa de DOC descomponible depositada (Gg)

W = masa de residuos depositada (Gg)

DOC = fracción de carbono orgánico degradable en los residuos (-)

DOC_f = fracción de DOC que puede descomponerse (-)

k = Constante de reacción (año^{-1})

Finalmente, las ecuaciones que permiten el modelamiento de la generación de CH_4 provenientes de los sitios de disposición con el tiempo según el IPCC Waste Model son las siguientes:

Ecuación 4. $DDOC_m$ acumulado en los sitios de disposición al final del año T

$$DDOC_{ma_T} = DDOC_{md_T} + (DDOC_{ma_{T-1}} e^{-k})$$

Ecuación 5. $DDOC_m$ descompuesto al final del año T

$$DDOC_{m\text{ decomp}_T} = DDOC_{ma_{T-1}} (1 - e^{-k})$$

Donde,

T = año de inventario

$DDOC_{ma_T}$ = $DDOC_m$ acumulado al final del año T (Gg)

$DDOC_{ma_{T-1}}$ = $DDOC_m$ acumulado al final del año (T-1) (Gg)

$DDOC_{md_T}$ = $DDOC_m$ depositado en el año T (Gg)

$DDOC_{m\text{ decomp}_T}$ = $DDOC_m$ descompuesto en el año T (Gg)

k = Constante de reacción (año^{-1})

El IPCC Waste Model lleva un total acumulado de la cantidad de DOC descomponible en el sitio de disposición, teniendo en cuenta la cantidad depositada cada año y la cantidad remanente de años anteriores. Esto se usa para calcular la cantidad de DOC que se descompone en CH_4 y CO_2 cada año.

Esto significa que el año en que los residuos se depositaron en el sitio es irrelevante para la cantidad de CH_4 generada cada año. Lo único que importa es la masa total de material en descomposición que se encuentra actualmente en el emplazamiento. Esto también significa

que cuando conocemos la cantidad de material en descomposición en el sitio al comienzo del año, cada año puede considerarse como el año número 1 en el método de estimación, y los cálculos básicos de primer orden pueden realizarse mediante las ecuaciones 4 y 5, con la reacción de descomposición comenzando el inicio del año siguiente a la deposición.

2.5.2.1. **Parámetros del modelo**

A continuación, se describen los factores que determinan la cantidad de metano producido en los sitios de disposición según las directrices del IPCC de 2019 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero:

✓ **Cantidad y composición de los residuos depositados**

La composición de los residuos es uno de los principales factores que influyen sobre las emisiones provenientes del tratamiento de los residuos sólidos, pues los diferentes tipos de residuos contienen diferentes cantidades de carbono orgánico degradable (DOC) y de carbono fósil.

La siguiente tabla presenta los datos predeterminados regionales específicos (basados en el peso de los residuos húmedos) de la composición de los residuos dispuestos en los sitios de disposición final de residuos, para los siguientes tipos de residuos:

- a) Materia orgánica o residuos alimentarios
- b) Restos de poda y jardinería
- c) Papel y cartón
- d) Madera
- e) Textiles
- f) Residuos higiénico-sanitarios (pañales)
- g) Caucho y cuero
- h) plásticos
- i) Metal
- j) Vidrio (incluyendo cerámica y porcelana)
- k) Otros (por ejemplo, cenizas, suciedad, polvo, tierra, residuos electrónicos)

Cuadro 10. Datos de composición de residuos regionales depositados por defecto del modelo (IPCC 2019)

TABLE 2.3 (UPDATED) (CONTINUED)											
MSW COMPOSITION DATA BY PERCENT – REGIONAL DEFAULTS											
Region	Food waste	Garden waste	Paper/ cardboard	Wood	Textiles	Nappies	Rubber/ Leather	Plastic	Metal	Glass	Other
Europe											
Eastern Europe	31.8	2.4	17.1	2.5	3.1	0.1	0.5	4.6	0.7	1.8	35.3
Northern Europe	30.3	5.2	13.8	1.8	3.2	1.2	0.0	4.9	1.4	4.3	34.0
Southern Europe	35.8	1.4	21.4	1.2	2.8	1.1	0.2	14.1	2.0	3.5	16.7
Western Europe	33.2	2.7	17.2	2.3	5.9	3.0	0.0	20.5	1.5	1.4	12.3
America											
Central America	62.7	0.0	12.6	0.3	2.2	0.0	0.0	10.3	2.7	3.3	6.0
South America	54.1	3.3	12.4	0.0	1.7	1.9	0.6	13.7	2.0	3.0	7.2
Northern America	20.2	6.8	23.3	4.1	3.9	0	1.6	15.8	6.4	4.2	14.0
Oceania											
Australia and New Zealand	25.9	12.2	12.0	6.5	2.9	3.5	0.0	8.3	1.8	2.8	24.1
<p>Note 1: Data are based on weight of wet waste of MSW without industrial waste at generation around year 2010.</p> <p>Note 2: The region-specific values are calculated from national, partly incomplete composition data. The percentages given may therefore not add up to 100percent. Some regions may not have data for some waste types - blanks in the table represent missing data.</p> <p>Note 3: Data of rest of Oceania and Caribbean are not refined</p>											

Los tipos de residuos de la a) a la f) contienen la mayor parte del DOC. Las cenizas, el polvo, el caucho y el cuero también contienen ciertas cantidades de carbono no fósil, pero difícilmente degradable. Por otro lado, algunos textiles, plásticos, el caucho y los residuos electrónicos contienen la mayor parte del carbono fósil. El papel (con recubrimientos) y el cuero (sintético) también pueden incluir pequeñas cantidades de carbono fósil.

✓ Fracción de carbono orgánico degradable en los residuos (DOC)

El carbono orgánico total de los residuos que puede acceder a la descomposición bioquímica se estima sobre la base de la composición de los residuos y puede calcularse a partir del promedio ponderado del contenido de carbono degradable de los distintos componentes (tipos de residuos/materiales) de la masa de residuos depositados.

Los valores de DOC predeterminados del IPCC Waste Model son como se muestran a continuación:

Cuadro 11. Contenido de carbono orgánico degradable de los diferentes tipos de residuos

TABLE 2.4 DEFAULT DRY MATTER CONTENT, DOC CONTENT, TOTAL CARBON CONTENT AND FOSSIL CARBON FRACTION OF DIFFERENT MSW COMPONENTS									
MSW component	Dry matter content in % of wet weight ¹	DOC content in % of wet waste		DOC content in % of dry waste		Total carbon content in % of dry weight		Fossil carbon fraction in % of total carbon	
	Default	Default	Range	Default	Range ²	Default	Range	Default	Range
Paper/cardboard	90	40	36 - 45	44	40 - 50	46	42 - 50	1	0 - 5
Textiles ³	80	24	20 - 40	30	25 - 50	50	25 - 50	20	0 - 50
Food waste	40	15	8 - 20	38	20 - 50	38	20 - 50	-	-
Wood	85 ⁴	43	39 - 46	50	46 - 54	50	46 - 54	-	-
Garden and Park waste	40	20	18 - 22	49	45 - 55	49	45 - 55	0	0
Nappies	40	24	18 - 32	60	44 - 80	70	54 - 90	10	10
Rubber and Leather	84	(39) ⁵	(39) ⁵	(47) ⁵	(47) ⁵	67	67	20	20
Plastics	100	-	-	-	-	75	67 - 85	100	95 - 100
Metal ⁶	100	-	-	-	-	NA	NA	NA	NA
Glass ⁶	100	-	-	-	-	NA	NA	NA	NA
Other, inert waste	90	-	-	-	-	3	0 - 5	100	50 - 100

¹ The moisture content given here applies to the specific waste types before they enter the collection and treatment. In samples taken from collected waste or from e.g., SWDS the moisture content of each waste type will vary by moisture of co-existing waste and weather during handling.

² The range refers to the minimum and maximum data reported by Dehoust *et al.*, 2002; Gangdonggu, 1997; Guendehou, 2004; JESC, 2001; Jager and Blok, 1993; Würdinger *et al.*, 1997; and Zeschmar-Lahl, 2002.

³ 40 percent of textile are assumed to be synthetic (default). Expert judgement by the authors.

⁴ This value is for wood products at the end of life. Typical dry matter content of wood at the time of harvest (that is for garden and park waste) is 40 percent. Expert judgement by the authors.

⁵ Natural rubbers would likely not degrade under anaerobic condition at SWDS (Tsuchii *et al.*, 1985; Rose and Steimbüchel, 2005).

⁶ Metal and glass contain some carbon of fossil origin. Combustion of significant amounts of glass or metal is not common.

✓ Fracción de carbono orgánico degradable que puede descomponerse (DOC_f)

La fracción de carbono orgánico degradable que se descompone (DOC_f) es una estimación de la fracción de carbono que finalmente se degrada y se libera de los sitios de disposición, y refleja el hecho de que parte del carbono orgánico degradable no se degrada, o se degrada muy lentamente, en condiciones anaeróbicas.

El valor por defecto recomendado para DOC_f es 0,5 (bajo el supuesto de que el ambiente de los sitios de disposición es anaeróbico y los valores de DOC incluyen la lignina). Este valor depende de muchos factores tales como la temperatura, la humedad, el pH, la composición de los residuos, etc.

La cantidad de DOC lixiviado no se tiene en cuenta en la estimación del DOC_f . Por lo general, las cantidades de DOC que se pierden con el lixiviado son inferiores al 1% y por lo tanto pueden despreciarse.

✓ Factor de corrección de metano (MCF)

Las prácticas de disposición de residuos varían en el control, la ubicación de los residuos y la gestión del sitio. El MCF da cuenta del hecho de que, a partir de una cantidad dada de residuos, los sitios no gestionados producen menos CH_4 que los sitios anaeróbicos gestionados.

En los sitios de disposición no gestionados, una fracción mayor de residuos se descompone aeróbicamente en la capa superior. Por otro lado, en los sitios no gestionados con disposición profunda y/o con un alto nivel de lixiviados, la fracción de residuos que se degrada aeróbicamente debe ser más pequeña que en sitio de poca profundidad. Los sitios semi-aeróbicos gestionados lo son de manera pasiva por introducción de aire en la capa de residuos para crear un entorno semi-aeróbico dentro del sitio⁹.

Cuadro 12. Factor de corrección de metano según el tipo de sitio

TABLE 3.1 SWDS CLASSIFICATION AND METHANE CORRECTION FACTORS (MCF)	
Type of Site	Methane Correction Factor (MCF) Default Values
Managed – anaerobic ¹	1.0
Managed – semi-aerobic ²	0.5
Unmanaged ³ – deep (>5 m waste) and/or high water table	0.8
Unmanaged ⁴ – shallow (<5 m waste)	0.4
Uncategorised SWDS ⁵	0.6
<p>¹ Anaerobic managed solid waste disposal sites: These must have controlled placement of waste (i.e., waste directed to specific deposition areas, a degree of control of scavenging and a degree of control of fires) and will include at least one of the following: (i) cover material; (ii) mechanical compacting; or (iii) levelling of the waste.</p> <p>² Semi-aerobic managed solid waste disposal sites: These must have controlled placement of waste and will include all of the following structures for introducing air to waste layer: (i) permeable cover material; (ii) leachate drainage system; (iii) regulating pondage; and (iv) gas ventilation system.</p> <p>³ Unmanaged solid waste disposal sites – deep and/or with high water table: All SWDS not meeting the criteria of managed SWDS and which have depths of greater than or equal to 5 metres and/or high water table at near ground level. Latter situation corresponds to filling inland water, such as pond, river or wetland, by waste.</p> <p>⁴ Unmanaged shallow solid waste disposal sites: All SWDS not meeting the criteria of managed SWDS and which have depths of less than 5 metres.</p> <p>⁵ Uncategorised solid waste disposal sites: Only if countries cannot categorise their SWDS into above four categories of managed and unmanaged SWDS, the MCF for this category can be used.</p> <p>Sources: IPCC (2000); Matsufuji <i>et al.</i> (1996)</p>	

✓ Constante de generación de metano (k)

La constante de generación de metano se ve afectada por una amplia variedad de factores relacionados con la composición de los residuos y las condiciones climáticas del sitio. Las tasas más rápidas ($k=0,2$) se asocian a condiciones de humedad elevada y a un material rápidamente degradable, tal como los residuos alimentarios. Por otro lado, las tasas de descomposición más lentas ($k=0,02$) se asocian a condiciones de sequedad del lugar y a residuos de degradación lenta, como lo son la madera o el papel.

⁹ IPCC (2019). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Pipatti, R., Svardal, P., Silva, J., Qingxian, Q., López, C., Mareckova, K., Oonk, H., Scheehle, E., Sharma, C., Smith, A. and Masato Yamada, M. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC/OECD/IEA/IGES

Cuadro 13. Valores predeterminados de la constante de generación de metano según las condiciones climáticas del sitio y los tipos de residuos

TABLE 3.3 RECOMMENDED DEFAULT METHANE GENERATION RATE (<i>k</i>) VALUES UNDER TIER 1 (Derived from <i>k</i> values obtained in experimental measurements, calculated by models, or used in greenhouse gas inventories and other studies)									
Type of Waste		Climate Zone*							
		Boreal and Temperate (MAT ≤ 20°C)				Tropical ¹ (MAT > 20°C)			
		Dry (MAP/PET < 1)		Wet (MAP/PET > 1)		Dry (MAP < 1000 mm)		Moist and Wet (MAP ≥ 1000 mm)	
		Default	Range ²	Default	Range ²	Default	Range ²	Default	Range ²
Slowly degrading waste	Paper/textiles waste	0.04	0.03 ^{3,5} – 0.05 ^{3,4}	0.06	0.05 – 0.07 ^{3,5}	0.045	0.04 – 0.06	0.07	0.06 – 0.085
	Wood/ straw waste	0.02	0.01 ^{3,4} – 0.03 ^{6,7}	0.03	0.02 – 0.04	0.025	0.02 – 0.04	0.035	0.03 – 0.05
Moderately degrading waste	Other (non – food) organic putrescible/ Garden and park waste	0.05	0.04 – 0.06	0.1	0.06 – 0.1 ⁸	0.065	0.05 – 0.08	0.17	0.15 – 0.2
Rapidly degrading waste	Food waste/Sewage sludge	0.06	0.05 – 0.08	0.185 ⁴	0.1 ^{3,4} – 0.2 ⁹	0.085	0.07 – 0.1	0.4	0.17 – 0.7 ¹⁰
Bulk Waste		0.05	0.04 – 0.06	0.09	0.08 ⁸ – 0.1	0.065	0.05 – 0.08	0.17	0.15 ¹¹ – 0.2
¹ The available information on the determination of <i>k</i> and half-lives in tropical conditions is quite limited. The values included in the table, for those conditions, are indicative and mostly have been derived from the assumptions described in the text and values obtained for temperate conditions. ² The range refers to the minimum and maximum data reported in literature or estimated by the authors of the chapter. It is included, basically, to describe the uncertainty associated with the default value. ³ Oonk and Boom (1995). ⁴ IPCC (2000). ⁵ Brown <i>et al.</i> (1999). A near value (16 yr) was used, for slow degradability, in the GasSim model verification (Attenborough <i>et al.</i> , 2002). ⁶ Environment Canada (2003). ⁷ In this range are reported longer half-lives values (up to 231 years) that were not included in the table since are derived from extremely low <i>k</i> values used in sites with mean daily temperature < 0°C (Levelton, 1991). ⁸ Estimated from RIVM (2004). ⁹ Value used for rapid degradability, in the GasSim model verification (Attenborough <i>et al.</i> , 2002). ¹⁰ Estimated from Jensen and Pipatti (2003). ¹¹ Considering t _{1/2} = 4 - 7 yr as characteristic values for most developing countries in a tropical climate. High moisture conditions and highly degradable waste. *Adapted from: Chapter 3 in <i>GPG-LULUCF</i> (IPCC, 2003). MAT – Mean annual temperature; MAP – Mean annual precipitation; PET – Potential evapotranspiration. MAP/PET is the ratio of MAP to PET. The average annual MAT, MAP and PET during the time series should be selected to estimate emissions and indicated by the nearest representative meteorological station.									

Las principales consideraciones realizadas para la estimación de *k* son las siguientes:

- La composición de los residuos (especialmente el componente orgánico) es uno de los principales factores que influyen tanto en la cantidad como en el momento de la producción de CH₄.
- El contenido de humedad de un SEDS es un elemento esencial para la descomposición anaeróbica y la generación de CH₄. Un método simplificado supone que el contenido de humedad de un sitio de disposición es proporcional a la

precipitación media anual (MAP) o a la relación entre la MAP y la evapotranspiración potencial (MAP/PET).

✓ Factor de oxidación (OX)

El factor de oxidación (OX) refleja la cantidad de CH₄ que se oxida en el suelo u otro material que cubra los residuos. La siguiente tabla presenta los valores tipo del factor de oxidación según el tipo de sitio y la gestión de este.

Cuadro 14. Factor de oxidación según el tipo de sitio

TABLE 3.2 OXIDATION FACTOR (OX) FOR SWDS	
Type of Site	Oxidation Factor (OX) Default Values
Managed ¹ , unmanaged and uncategorised SWDS	0
Managed covered with CH ₄ oxidising material ²	0.1
¹ Managed but not covered with aerated material	
² Examples: soil, compost	

El espesor, las propiedades físicas y el contenido de humedad de los suelos de cobertura afectan directamente a la oxidación del CH₄. Estudios demuestran que los sitios de disposición bien gestionados tienden a tener mayores tasas de oxidación que los SEDS no gestionados

2.5.2.2. Información requerida

De acuerdo con los parámetros del modelo descritos anteriormente, el punto de partida para la estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes del tratamiento y la disposición de residuos es la recopilación de datos de la actividad relativos a la generación, la composición y la gestión de los residuos en los sitios de disposición. Siendo así la modelización de los diferentes sitios retenidos requiere de:

- ✓ El año de apertura del sitio
- ✓ El año de clausura del sitio que puede ser el último año en que el vertedero dispuso residuos, o bien el año en que se espera que el SEDS alcance su vida útil
- ✓ La capacidad de diseño en el caso que el sitio no haya alcanzado aun su vida útil y/o se desconozca el año de clausura
- ✓ Temperatura promedio anual del sitio
- ✓ Precipitación promedio anual del sitio
- ✓ Tipo de residuos depositados
- ✓ Composición de los residuos
- ✓ Disposición anual de los residuos
- ✓ Tipo de gestión de los residuos
- ✓ Clasificación del sitio
- ✓ Profundidad del sitio

2.6. Definición de las propuestas de captura, tratamiento y/o valoración

Dentro del desarrollo del estudio técnico se propone sistemas de captura para los rellenos sanitarios que actualmente solo cuentan con venteo o quema pasiva del biogás. En el caso particular del vertedero seleccionado solo se propone el sistema de chimeneas/pozos que permitirán descargar el biogás generado en el sitio.

En cuanto a alternativas de aprovechamiento se ha contemplado la producción de energía eléctrica y producción de biometano. Los proyectos de exportación energía eléctrica proponen la utilización de generadores de motores reciprocantes de combustión interna y microturbinas. Mientras que el biometano obtenido de la depuración de biogás se propone utilizarlos en producción de GNV, GNL en los 2 rellenos más grandes de costa rica, ubicados en la GAMT.

El análisis financiero se centrará en las tecnologías ya desarrollada en Costa Rica, la generación de energía. Este análisis comprende un análisis de sensibilidad del precio de producción de energía eléctrica en función a los indicadores económicos

2.7. Desarrollo de modelos financieros

Los modelos financieros para los rellenos sanitarios seleccionados se constituyen por medio de insumos denominados gastos e ingresos. Entre los parámetros considerados como gastos vinculados al modelo se tienen los costos de CAPEX y OPEX de las propuestas de aprovechamiento establecidas como viables técnicamente para cada sitio de disposición final. En cuanto a los ingresos se relaciona la venta de electricidad y venta de bonos de carbono.

El objetivo del modelo financiero es definir las condiciones por las que se logra un balance entre los gastos e ingresos de manera que se genere una rentabilidad interesante para establecer su viabilidad financiera. Dicho balance y resultados de rentabilidad se analizan por medio de parámetros económicos transversales a los gastos e ingresos que resultan en la cuantificación de indicadores financieros. Estos indicadores permiten relacionar condiciones de inversión, de rentabilidad y del tiempo en que se iniciara a percibir dicha rentabilidad. El periodo de evaluación es un horizonte de 15 años, donde la inversión se realiza en el 2024.

A continuación, se presentan los gastos, ingresos, parámetros e indicadores a usarse en la modelación financiera de cada propuesta.

2.7.1. Gastos

2.7.1.1. CAPEX

Corresponde a la estimación del valor de la inversión requerido para la construcción de las propuestas orientadas a la valoración del biogás para producción de energía eléctrica. Dichas cantidades se han determinado por sistemas según las condiciones específicas de las propuestas de cada sitio de disposición final. Los valores totales no incluyen transporte nacional e internacional, nacionalización, impuestos nacionales o aranceles.

2.7.1.2. OPEX

Se relacionan los costos de operación y mantenimiento de los sistemas que componen cada propuesta y de manera global la operación de todos sus componentes. Los OPEX de las diferentes propuestas contemplan valores globales que describen las siguientes actividades:

Para el sistema de extracción forzada y quema controlada:

- ✓ Materiales para reposición.
- ✓ Repuestos para el sistema de extracción forzada, tratamiento y/o valoración:
- ✓ Consumo de energía eléctrica
- ✓ Gastos de calibración de equipos
- ✓ Personal
- ✓ Vehículos

Para el sistema de valorización energética se contempla:

- ✓ Operación de los generadores (repuestos, consumibles y mano de obra del mantenimiento)
- ✓ OPEX de generadores es aproximadamente 2,5 a 3,0 centavos de dólar por kWh generado. Esto incluye aceite, consumibles (aceite, filtros, lubricante) y repuestos para mantenimiento menor y mayor. Tiempo antes de overhaul mayor (se considera 3,0 cts/kWh), se puede llegar hasta 100.000 - 120.000 h.
- ✓ Personal de planta: se considera 3 operadores/as (1.200/pers*1,5 prestaciones sociales) + 1 supervisor (a) de turno (1.400 \$/pers)*1,5 prestaciones sociales Los costos operacionales asociados a los seguros en cuanto a costos totales en pólizas de seguros: póliza de cumplimiento de contrato, calidad, no pago de empleados, responsabilidad civil extracontractual además pólizas todo riesgo para maquinarias y equipos, deberán incluirse en etapas posteriores al estudio cuando se tengan diseños a detalle de ingeniería.
- ✓ Mantenimiento de equipos electromecánicos.
- ✓ Cambio de carbón activado del sistema de extracción

Los costos operacionales asociados a los seguros en cuanto a costos totales en pólizas de seguros: póliza de cumplimiento de contrato, calidad, no pago de empleados, responsabilidad civil extracontractual además pólizas todo riesgo para maquinarias y equipos, deberán incluirse en etapas posteriores al estudio cuando se tengan diseños a detalle de ingeniería.

Los costos asociados a las eventualidades que se puedan presentar están incluidos en los materiales para reposición y repuestos. Los OPEX conformados estarán en función de la unidad generación por lo que los valores son proporcionales a la producción. Por ello los gastos siguientes son proporcionales al kWh.

2.7.1.3. **Depreciación de los equipos**

Los valores de depreciación de los activos pueden utilizarse para reducir la base sobre la cual una empresa puede liquidar el impuesto de renta reconociendo unos valores razonables originados por el desgaste de los bienes usados. La metodología de depreciación considerada en el modelo financiero es una depreciación lineal sin valor residual.

Dentro del modelo financiero de los diferentes proyectos se contempla la depreciación de la maquinaria, equipos y obra civil. El periodo de depreciación de los equipos de generación de energía eléctrica se contempló 10 años y de las estructuras civil 15 años.

2.7.2. Ingresos

2.7.2.1. Venta de electricidad

La estimación de una tarifa de venta de electricidad se establece por medio de la tasa interna de retorno para cada una de las propuestas donde al proponer un valor de tarifa y compararla con la tasa de descuento, se podrá evaluar para esa relación la rentabilidad de la propuesta.

2.7.2.2. Venta de certificados de carbono

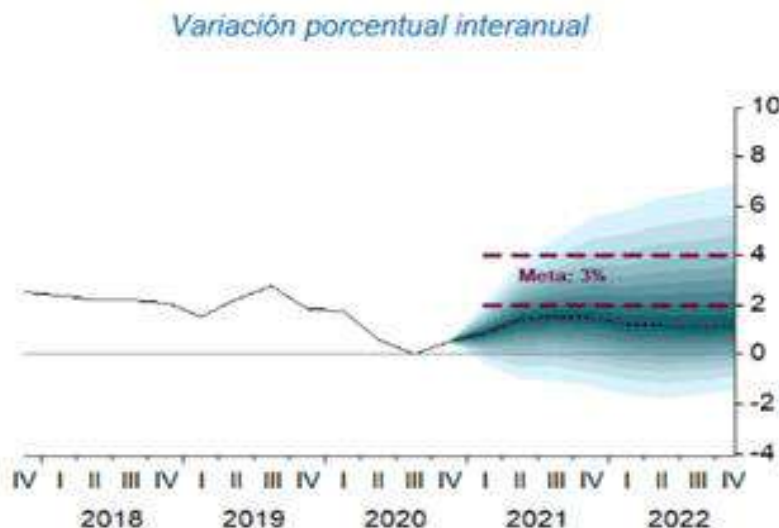
Los proyectos que involucran la captura y valorización del biogás proveniente de rellenos sanitarios para la generación de energía eléctrica permiten rentabilizar los certificados de carbono.

Según las condiciones encontradas en el análisis del mercado de bonos de carbono vinculados a la generación de energía eléctrica, se relacionará en el modelo financiero para las diferentes alternativas de valoración energética, el valor mínimo del rango en el que se pueden transar estos certificados correspondiente a 3 USD/MTCO_{2e}. Lo anterior se hace con el propósito de someter el modelo financiero a las condiciones más restrictivas. A continuación, se presentan los parámetros e indicadores a usarse en la modelación financiera de cada propuesta.

2.7.3. Parámetros económicos

2.7.3.1. Inflación

El modelo financiero para cada una de la propuesta contempla una tasa de inflación anual global de 5 % para el periodo de evaluación de 15 años. Esta hipótesis se apoya en las proyecciones del programa macroeconómico del Banco Central de Costa Rica 2021-2022.



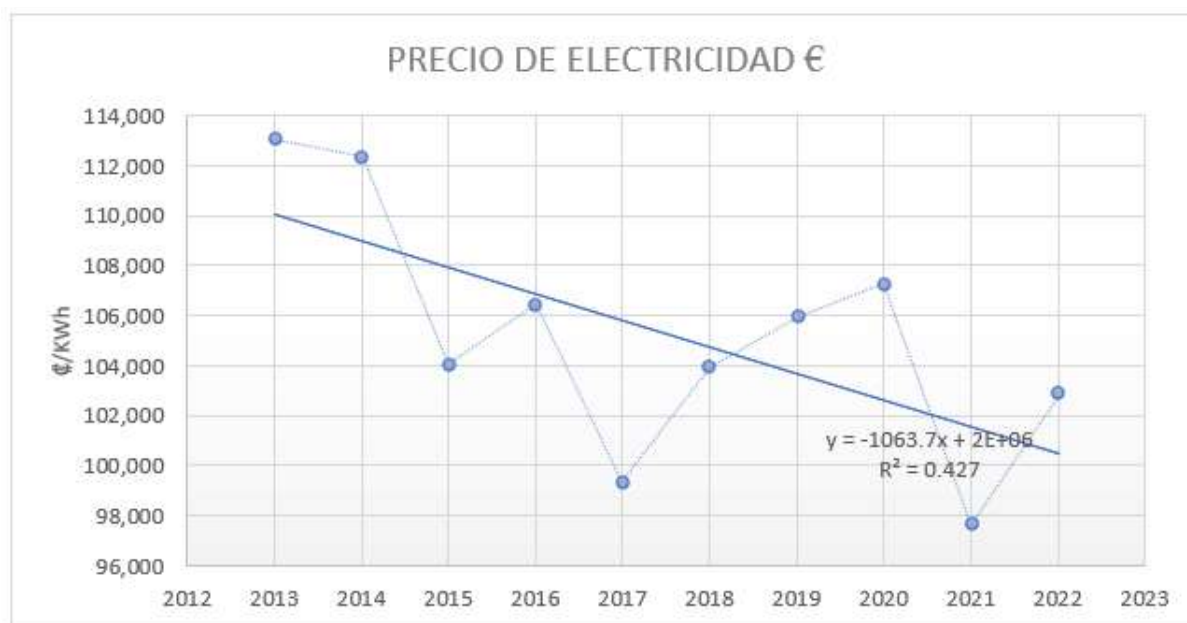
Gráfica 6. Proyección no condicional de inflación Fuente: (IPC)

Nota: Los gráficos muestran las bandas de predicción de la inflación subyacente y la inflación según el IPC a lo largo del horizonte de proyección. Se trata de proyecciones no condicionales; es decir, que no toman en consideración las posibles reacciones de política monetaria. La banda más oscura alrededor del valor central concentra el 10% de probabilidad de ocurrencia.

Cada par de bandas con tonalidades cada vez más claras va acumulando un 10% adicional, hasta alcanzar el 90% de probabilidad. (Fuente: banco Central de Costa Rica).

2.7.3.2. Inflación de electricidad

La inflación anual de los precios reales aplicada a la electricidad comprada se considera en el modelo financiero como 0%, ya que los datos de la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP) no permite concluir que existe una inflación real frente al valor de la electricidad en los 10 últimos años. Ni tampoco establece un pronóstico de los precios de la electricidad comercial e industrial. Ver grafica.



Gráfica 7. Valor de la electricidad en el tiempo Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP)

2.7.3.3. Resultado de explotación y utilidad neta:

El resultado de la explotación se calcula sustrayendo anualmente los OPEX y la depreciación de los equipos de los Ingresos. Sustrayendo anualmente el impuesto sobre la renta de **30%**, en acuerdo con la Ley del Impuesto de la Renta (7092), se obtiene anualmente el Resultado Neto.

2.7.3.4. WACC (costo medio ponderado del capital)

Para realizar el análisis financiero de los proyectos se empleó como tasa de descuento el WACC. El Costo Medio Ponderado del Capital WACC es el costo de los dos recursos de capital que tiene una empresa; la deuda financiera y los fondos propios, que toma en cuenta su participación y las características del sector económico. El WACC es ampliamente utilizado como tasa de descuento para valorar empresas o proyectos de inversión mediante la metodología de descuento de flujos de caja esperados.

El valor de WACC utilizado como referencia para establecer la tarifa de producción eléctrica y evaluar la viabilidad de los proyectos es 10,64%. Lo que significa que proyectos con rentabilidad a mayor o igual a 10,64% serán los proyectos viables en el análisis financiero.

El Costo Medio Ponderado del Capital WACC considerado se calcula con la siguiente formula:

Ecuación 6. Fórmula de cálculo del Costo Medio Ponderado del Capital (WACC)

$$WACC = (W_d * k_d)(1 - t) + W_e * k_e$$

Cuadro 15. Parámetros considerados para el cálculo del Costo Medio Ponderado del Capital WACC

Parámetros	Definición	Valor
W_d	Participación de la Deuda: Según la experiencia de S3D en estos tipos de proyecto, y tras discusiones con el equipo de proyecto en Costa Rica, se considera la proporción entre deuda y capital propio siguiente: 20 % Capital propio, 80 % financiado	20%
k_d	Costo de Deuda: Según los datos del banco central de Costa Rica y según la experiencia de S3D en proyectos similares, se consideró en el modelo financiero una tasa de interés de 8%	8%
t	Tasa de Impuesto de renta	30%
W_e	Participación del Capital Propio	80%
k_e	Rentabilidad esperada	11,90%

Donde la Rentabilidad Esperada k_e se estima:

Actualmente el modelo propuesto a nivel nacional para calcular la tarifa de generación eléctrica, a partir de la biomasa bagazo de azúcar, corresponde a la suma de la rentabilidad y los costos anuales del proyecto dividido por la producción de energía eléctrica anual.

La rentabilidad se usa el modelo de valoración de activos CAPM (Capital Asset Pricing Model), el cual básicamente se calcula:

Ecuación 7. Cálculo de la rentabilidad esperado, según el modelo de valoración de activos CAPM

$$k_e = k_l + B * P_r + R_p$$

Cuadro 16. Parámetros considerados para el cálculo de la rentabilidad esperada.

Parámetros	Definición	Valor
k_l	Tasa libre de riesgo	2,02%
B	Beta apalancada: (asume relación deuda capital de 80/20 y tasa de impuesto de renta 30%)	0,9885
P_r	Prima por riesgo	5,33%
R_p	Riesgo país	4,61%.
k_e	Rentabilidad esperada	11,90%

2.7.3.5. Flujo de caja:

Se calcula anualmente un flujo de caja con impuestos, basado sobre el resultado de explotación y el impuesto de la renta de 30 %.

2.7.4. Indicadores financieros

Una vez alimentados los modelos financieros con los parámetros económicos descritos previamente, se procede con el cálculo de los siguientes indicadores financieros:

- ✓ **VPN** (Valor presente neto) = SUMA (flujo de caja descontado anual con impuestos teniendo en cuenta que la inversión se realiza en el primer año)
- ✓ **TIR** (Tasa de rendimiento interna del proyecto) = Tasa de descuento que permitiría tener un VPN a cero.
- ✓ **TR** (Tiempo de retorno de la inversión) = Inversión inicial / Flujo de caja después del vencimiento de los préstamos y después de impuestos

3.

NÁLISIS DE LOS SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL EN COSTA RICA

3.1. Sitios contemplados en el estudio – Fase 1

A partir de la información y datos recopilados, se consolidaron fichas de cada sitio de disposición con información condensada y evaluada en la matriz multicriterio. A continuación, se presentan los aspectos relevantes de los 9 rellenos sanitarios y 2 vertederos (población de rellenos sanitario y vertederos).

Sitio de disposición – L1



Imagen 1. Fotografía satelital del relleno sanitario L1 (Fuente Google Earth)

Generalidades del cantón:

Montes de Oro es el cantón número 4 de la Provincia de Puntarenas, en la costa pacífica de Costa Rica. Ubicado en el norte de la provincia, es uno de los cuatro cantones de la provincia de Puntarenas que no tiene límites con el océano Pacífico. Posee una extensión territorial de 244,76 km² y está dividido en 3 distritos. La cabecera del cantón es Miramar. Para el año

2022, se estima que el cantón de Montes de Oro cuenta con una población de 14.587 habitantes, y para el último censo efectuado, en 2011, contaba con una población de 12.950 habitantes (Municipalidad de Montes de Oro, 2023).

Aspectos Institucionales:

El relleno sanitario es administrado y operado por el Grupo Empresarial RABSA, una empresa perteneciente al Corporativo Promotora Ambiental (PASA). El sitio se encuentra bajo la jurisdicción de la Dirección Regional de Rectoría de la Salud (DRRS) pertenece al Pacífico Central, en el Distrito San Isidro.

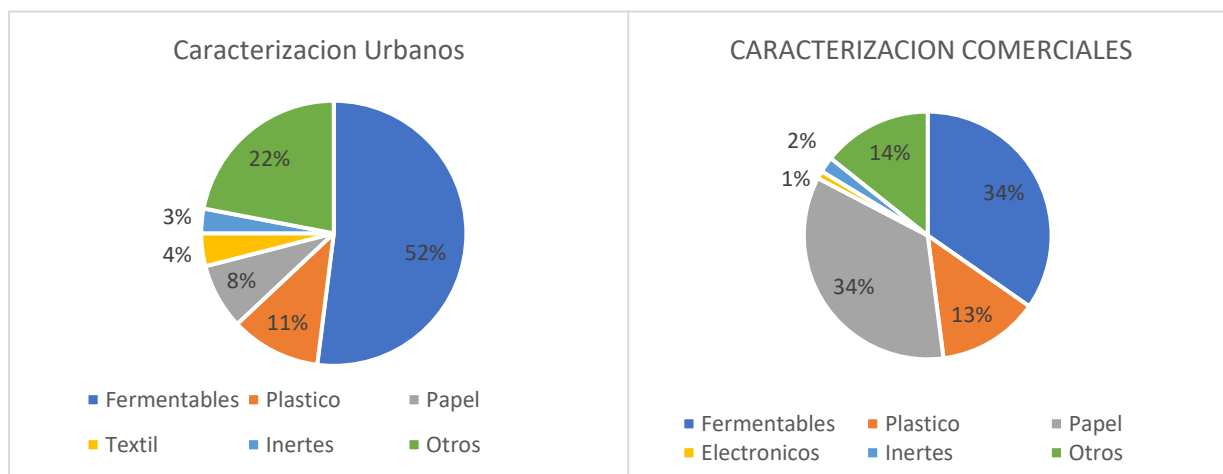
Aspectos Técnicos:

Es un relleno mecanizado con una vida útil de 11 años aprobados. Este relleno cuenta con una capacidad de disposición diseñada para 7 075 552 m³ de residuo y según la información del operador, actualmente la capacidad disponible al 2023 es de 4 759 338 m³. Es por ello por lo que el operador tiene una solicitud de ampliación en trámite. El sitio atiende actualmente a 49 Cantones con un número aproximado de 805.036 personas usuarias. A continuación, se presenta el historial de las toneladas dispuestas por año.



Gráfica 8. Historial de disposición en L1. 2023*: Toneladas dispuestas hasta marzo (Fuente: Encuesta realizada al operador del relleno)

Dentro de los residuos que se gestionan en el relleno L1, se presentan aquellos de origen urbano y de origen comercial con su respectiva caracterización realizada entre el 2019 - 2020.



Gráfica 9. Caracterización de residuos urbanos y comerciales en L1. (Fuente: Encuesta realizada al operador del relleno)

Actualmente, los residuos urbanos y comerciales son dispuestos en 6 celdas que han sido concebidas desde el diseño del relleno. Adicionalmente, el operador tiene proyectado la construcción de 7 celdas.

El relleno no cuenta con cobertura final en las áreas de disposición por lo que se realiza cobertura diaria e intermedia en el 99.8 % del área con residuos depositados a la fecha. Dicha cobertura se compone de tierra de la zona y cal.

En cuanto al sistema de captura, en las diferentes celdas se ha instalado un sistema pasivo de biogás constituido por 186 chimeneas que queman el gas in situ. La empresa operadora tiene interés en el desarrollo de alternativas de captura activa y aprovechamiento de biogás, por lo que ha desarrollado un estudio de factibilidad de captura y valorización para la producción de energía eléctrica.

Aspectos Ambientales:

El sistema de tratamiento de lixiviados cuenta con diferentes procesos: filtros con diferentes granulometrías, lagunas de aireación con tratamiento biológico, sedimentadores, humedales artificiales y tratamientos de oxidación avanzada Fenton.

Se realiza un reúso de los lodos deshidratados producto del proceso de tratamiento de los lixiviados y la parte tratada se dispone en la quebrada Matamoros, vertimiento autorizado por el MINAE. El sistema de tratamiento por sedimentadores primarios presenta una capacidad limitada en época de lluvias y adicionalmente tienen dificultades para realizar labores de limpieza y mantenimiento en los reactores anaeróbicos.

El relleno cuenta con Viabilidad ambiental. Por medio de la resolución N° 2972-2009-SETENA del día 16 de diciembre de 2009 se aprobó el Estudio de Impacto Ambiental, presentándose a su vez los documentos solicitados, como son: la bitácora ambiental, el documento de nombramiento de responsable ambiental y el depósito de garantía ambiental. La Garantía Ambiental actual se encuentra vigente.

Aspectos Sociales:

A nivel institucional la empresa operadora reporta, durante la primera fase de recolección de información, **17 mujeres** que trabajan en las actividades administrativas y operacionales del relleno y **180 cargos en la recolección de residuos ocupados en su totalidad por hombres**.

A nivel comunitario la empresa **no trabaja con organizaciones en favor de la igualdad de género o de empoderamiento de las mujeres y no tiene ninguna relación con líderes o líderes comunitarias**.

La empresa tampoco reporto actividades económicas en la zona (agropecuarias u otras) que son o que podrían ser eventualmente impactadas por el funcionamiento del relleno.

Sin embargo, la empresa cuenta con un plan de responsabilidad ambiental y social que incluye actividades como la limpieza de ríos o playas en coordinación con municipalidades y fuerzas vivas. Así mismo, otorgan apoyo financiero al centro acopio del cantón de Montes de Oro y participan en charlas y/o, capacitaciones para enseñar y promover el reciclaje.

Sitio de disposición – L2



Imagen 2. Fotografía satelital del relleno sanitario L2 (Fuente Google Earth)

Se encuentra localizado en el cantón de San José de la provincia del mismo nombre sobre la avenida 63 del área urbanizada.

Generalidades del cantón:

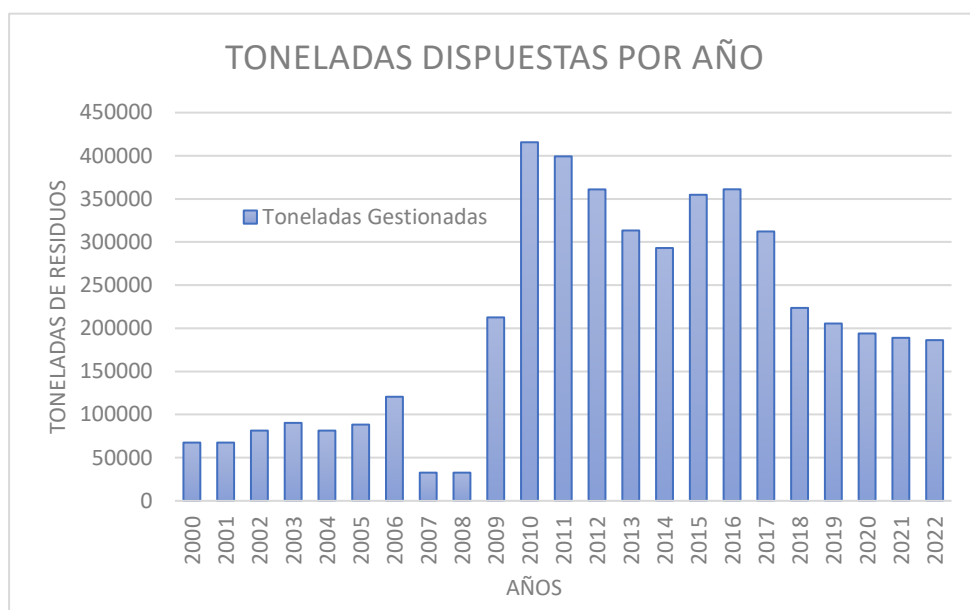
La provincia de San José está dividida en 20 cantones y 123 distritos. Por su parte, el cantón San José está conformado por 11 distritos, con un área de 44,62 km² y aproximadamente 349.678 habitantes. El cantón contiene a la capital costarricense, y se ubica en el norte de la provincia, limitando al norte con los cantones de Belén, Heredia y Santo Domingo (de la provincia de Heredia), así como con los cantones josefinos de Tibás y Goicoechea; con Montes de Oca y Curridabat al este; y con Desamparados, Alajuelita y Escazú al sur. (Municipalidad de San José, 2023).

Aspectos Institucionales:

El relleno sanitario es administrado y operado por la Empresa Berthier EBI de Costa Rica S.A (EBI).

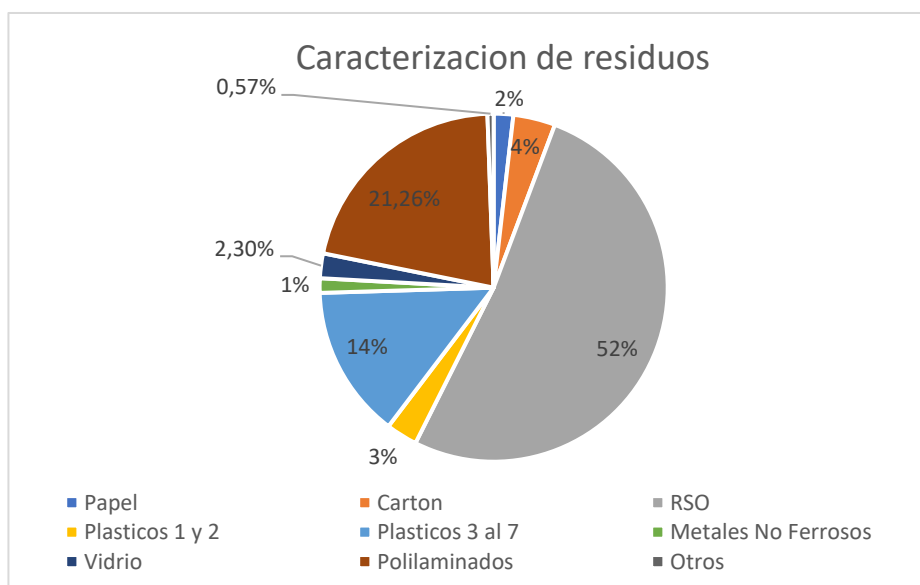
Aspectos Técnicos:

El relleno inicio operaciones en el año 2000 donde se destinó un área total de 18 ha de las cuales se encuentran 16 ha en uso por 7 celdas en las que se ha realizado la disposición de residuos hasta la fecha. El sitio recibe los residuos producidos por 10 cantones pertenecientes a las provincias de San José y Heredia con un número aproximado de 630.616 personas usuarias. A continuación, se presenta el historial de residuos anuales atendidos en el periodo 2001 al 2006 y 2018 al 2022.



Gráfica 10. Historial de disposición en el L2

La disposición de residuos se ha realizado por medio de un enterramiento mecánico con un ingreso promedio de 600 ton/día con la siguiente caracterización



Gráfica 11. Caracterización de residuos del L2 (Fuente: Caracterización realizada por el equipo de consultoría)

En el sitio de disposición han desarrollado un sistema de valorización orientado a la producción de electricidad del orden de 10kW del cual han generado certificados de reducción voluntaria.

Dicha producción se da a partir de la captación del 10 % de la producción de biogás y cuenta con una capacidad de generación de 100kW - 200kW para autoconsumo y 100 KW inyectados a la red eléctrica.

Aspectos Ambientales:

Mediante resolución No. 149-2001-SETENA se otorgó la Viabilidad Ambiental al proyecto. La garantía ambiental se encuentra vigente.

Aspectos Sociales:

No se recibió respuesta a la encuesta frente a los aspectos sociales de género.

Sitio de disposición – L3



Imagen 3. Fotografía satelital del relleno sanitario L3 (Fuente Google Earth)

Se ubica en el cantón de Aserri, distrito Salitrillos en la comunidad del Huazo. Limita al este con el distrito del llano de Desamparados, al oeste con partes de bosque de la loma Salitrillos de Aserri, al sur con el río Guatuso y al norte con la comunidad del Huazo.

Generalidades del cantón:

El cantón de Aserri se encuentra situado en la región del Valle Central de Costa Rica, y corresponde al cantón número 6 de la provincia de San José. Se subdivide en 7 distritos y su cabecera es la ciudad de Aserri, situada a 11 kilómetros de San José. La extensión total del cantón de Aserri es de 168 km². Para el año 2022, Cantón de Aserri cuenta con una población estimada de 64.480 habitantes, y para el último censo efectuado, en 2011, Cantón de Aserri contaba con una población de 57.892 habitantes (Municipalidad de Aserri, 2023).

Aspectos Institucionales:

El relleno sanitario es administrado y operado por la Empresa Berthier EBI de Costa Rica S.A (EBI).

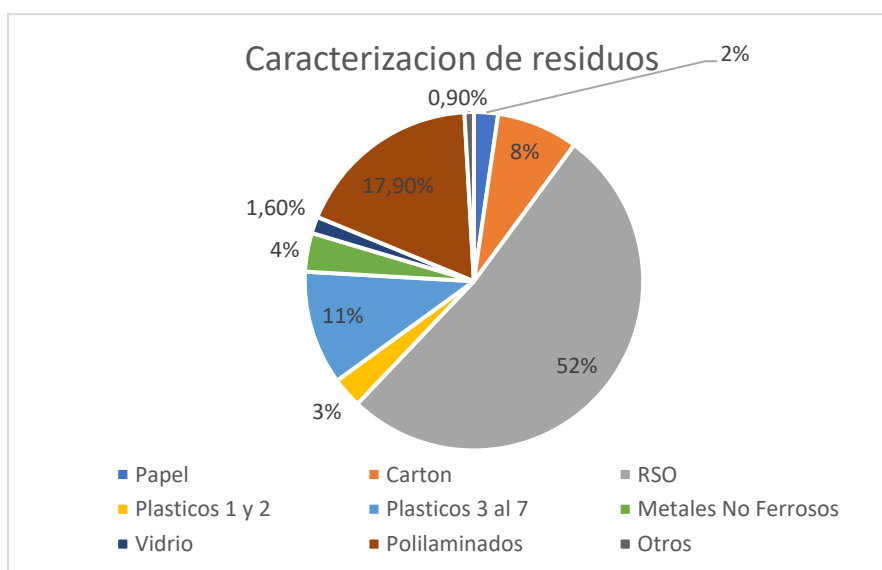
Aspectos Técnicos:

El relleno fue constituido en el 2007 con 42 ha y una vida útil de 20 años el cual se le ha otorgado una ampliación de las operaciones hasta el 2030. El sitio de disposición atiende aproximadamente 40 de las 82 municipalidades del país con cerca de 2.365.719 personas usuarias con el siguiente historial anual de disposición de residuos.



Gráfica 12. Historial de disposición en el L3

El promedio de ingreso de residuos al relleno se encuentra entre 2100 a 3000 ton/día donde han sido depositados en dos celdas de 4.5 y 10 ha con una operación mecánica según la siguiente caracterización.



Gráfica 13. Caracterización de residuos del L3 (Fuente: Caracterización realizada por el equipo de consultoría)

En las medidas desarrolladas para el manejo de gas han implementado una red de alrededor de 80 chimeneas interconectadas para la recolección y combustión de biogás.

Aspectos Ambientales:

El proyecto cuenta con su expediente: N° 459-2002, el documento cuenta con la aprobación del SETENA y cuenta con la aprobación de las municipalidades de Desamparados y Aserrí.

Aspectos Sociales:

No se recibió respuesta a la encuesta frente a los aspectos sociales de género.

Sitio de disposición – L4



Imagen 4. Fotografía satelital del relleno sanitario L4 (Fuente Google Earth)

Ubicado en la Finca el Tomatal del área rural de la comunidad Santa Rosa, Cantón de Limón.

Generalidades del cantón:

El cantón de Limón se encuentra situado en el distrito del mismo nombre el cual tiene una extensión de 1.765,79 km² y 105.000 habitantes para el 2055. El sistema fluvial del cantón de Limón corresponde a la subvertiente Caribe de la vertiente del mismo nombre el cual pertenece a las cuencas de los ríos Estrella, Matina, Banano, Moín y Bananito. Por su amplia extensión presenta características urbanas en la ciudad de Limón a lo que se le agrega su función de puerto internacional y al interior del cantón) existe una importante actividad agrícola y rural. (Municipalidad del Cantón Central de Limón, 2023).

Aspectos Institucionales

Relleno operado por la Empresa Berthier EBI de Costa Rica S.A (EBI)

Aspectos Técnicos:

El relleno inicia sus operaciones en el 2009 con una vida útil de 43 años y un área de 19 ha donde se constituyeron dos celdas.

El sitio es el receptor de los residuos de la provincia de Limón en los cantones de Limón, Matina y Talamanca con cerca de 253.835 personas usuarias y un ingreso promedio de residuos de 125,46 ton/día el cual se vincula al historial de disposición que se presenta a continuación.



Gráfica 14. Historial de disposición en L4

Aspectos Ambientales:

El relleno realizó el Estudio de Impacto Ambiental y la Viabilidad Ambiental fue otorgada por SETENA en la Resolución No. 914-2008.

Aspectos Sociales:

No se recibió respuesta a la encuesta frente a los aspectos sociales de género.

Sitio de disposición final – L5

Imagen 5. Fotografía satelital del relleno sanitario L5 (Fuente Google Earth)



Localizado a 300 metros este del Bar El Taurino Cacao en el cantón Santa Cruz de la provincia del mismo nombre 5 km del centro urbano del cantón.

Generalidades del cantón:

Santa Cruz es el cantón número 3 de la provincia de Guanacaste. En la actualidad se encuentra integrado por nueve distritos: Santa Cruz (Cabecera del cantón), Bolsón, Veintisiete de Abril, Tempate, Cartagena, Cuajiniquil, Dirí, Cabo Velas y Tamarindo. Su territorio es de 1,312. Para el año 2022, Cantón de Santa Cruz cuenta con una población estimada de 71,284 habitantes, y para el último censo efectuado, en 2011, Cantón de Santa Cruz contaba con una población de 55,104 habitantes (Municipalidad de Santa Cruz, 2023).

Aspectos Institucionales

Se encuentra operado por la municipalidad de Santa Cruz bajo la Dirección Regional de Rectoría de la Salud (DRRS) de Chorotega – Provincia de Guanacaste.

Aspectos Técnicos:

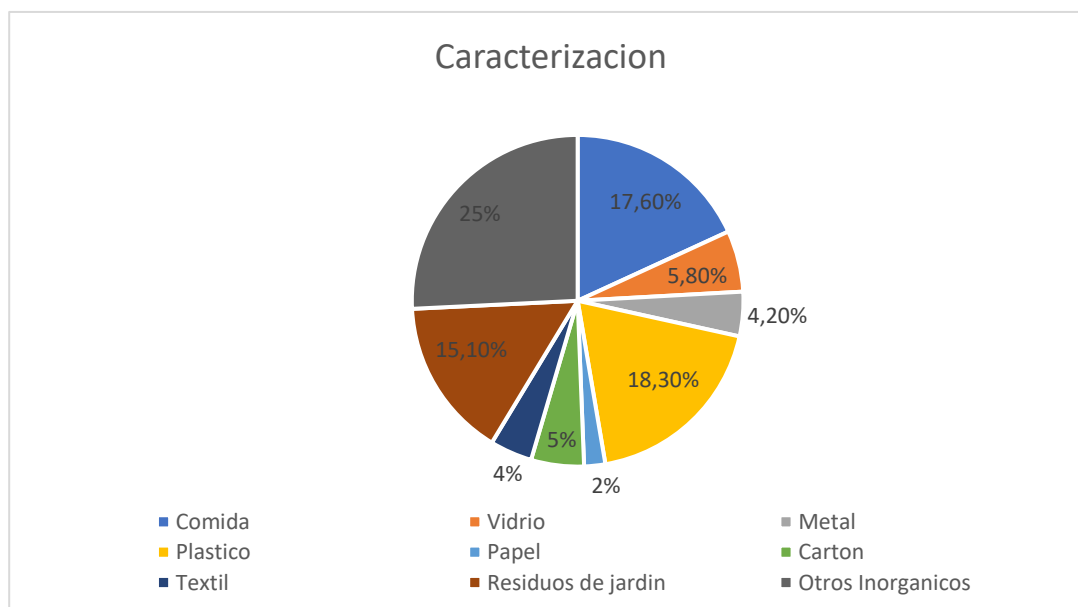
Es un relleno que inicio a operar con una celda en el 2017 y una vida útil de 5 años. Actualmente se encuentra en operación la celda 1 y 2 prolongando la vida útil a 22 años con la autorización de la conformación de 7 futuras celdas para un total de 12 ha.

Este sitio atiende 9 cantones directamente y soporta las actividades de gestión de dos estaciones de transferencia donde se estima la atención 142.552 personas usuarias con el siguiente historial de disposición.



Gráfica 15. Historial de disposición en L5

El promedio de ingreso de residuos al relleno es de 231.1 ton/día depositados en las dos celdas por medio de una operación mecánica y con la siguiente caracterización realizada por el operador en el 2021



Gráfica 16. Caracterización de residuos de L5(Fuente: Encuesta realizada al operador del relleno)

Actualmente realizan captura pasiva del biogás con 6 chimeneas dispuestas en la celda 1 y 16 en la celda 2 con su respectiva quema pasiva in situ.

En los planes que se buscan implementar se tiene una compostera semi industrial, un centro de reciclaje y un mariposario. Actualmente no han desarrollado iniciativas para la captura activa y aprovechamiento del biogás, pero en el predio colindante perteneciente a

Coopeguanacaste existe un proyecto de generación de energía eólica llamado Parque Eólico Cacao.

Aspectos Ambientales:

La disposición final de aguas residuales se realizaba en el Río San Ramon, pero debido a las condiciones de precipitación durante el año y los bajos caudales que se presentan, el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) deshabilitó el vertimiento, por lo que dicho lixiviado tratado se está rociando en la zona de bosque del propio parque. Dentro del relleno esporádicamente y por fuerte condiciones de precipitación se han presentado brotes de lixiviado.

Aspectos Sociales:

El PTA trabaja juntamente con organizaciones que se enfocan en la limpieza de espacios naturales, la recolección de reciclaje, el desarrollo de proyectos de compostaje comunal, entre otros. Adicionalmente hace parte de la Dirección de Gestión Ambiental, desde donde se incentiva acciones de protección y educación ambiental compuesto por 3 departamentos en donde Servicio Urbanos Ambientales y Protección Ambiental son liderados por mujeres.

Sitio de disposición – L6



Imagen 6. Fotografía satelital del relleno sanitario L6 (Fuente Google Earth)

Geográficamente el relleno se localiza en la hoja cartográfica Aguas Zarcas. La propiedad corresponde con el plano catastrado No.A-723204-88 de San Luis de Florencia a 2 km al norte del Centro Educativo de San Luis de Florencia en la Provincia de Alajuela, Quebrada Azul.

Generalidades del cantón:

La anchura del cantón es de ochenta y dos kilómetros, en dirección norte a sur, en la margen oeste del río San Juan, frontera con la República de Nicaragua, hasta la ladera norte del cerro Pelón, próximo a la naciente del río Aguas Zarcas. El cantón de San Carlos presenta dos unidades geomórficas, denominadas forma de sedimentación aluvial y de origen volcánico. La diferencia entre el nivel del río o quebrada y la parte alta del terreno no pasa de 20 metros. Las elevaciones en metros sobre el nivel medio del mar, del centro urbano de los distritos del cantón están entre 650 msnm a los 110 msnm. (Municipalidad de San Carlos, 2023)

Aspectos Institucionales:

Es operado por la Municipalidad de San Carlos bajo la dirección regional de la rectoría de la salud (DRRS) de la Huerta Norte

Aspectos Técnicos:

El relleno sanitario inicio su operación en 1995 como un vertedero el cual fue reconvertido en el 2020 con un área total de 28 ha y una vida útil hasta el 2027 amparada por el Permiso Sanitario de Funcionamiento (PSF). Atiende dos cantones con un total de 42.254 personas usuarias a los cuales se les relaciona el siguiente historial de disposición



Gráfica 17. Historial de disposición en L6

El promedio de ingreso de residuos al relleno es de 115 ton/días depositados por medio de una operación mecánica en las 2 celdas que se encuentran actualmente en operación de las 8 diseñadas.

Sitio de disposición – L7



Imagen 7. Fotografía satelital del relleno sanitario L7 (Fuente Google Earth)

El relleno está localizado a 1 km sureste del Campo Ayala, Las Concovas en el Distrito Dulce Nombre, del cantón Cartago

Generalidades del cantón:

El Cantón de Cartago es el cantón número 1 y central de la provincia del mismo nombre. Tiene un área de 287,77 km² y una población de 155.402 habitantes aproximadamente. El Cantón de Cartago consta de 11 distritos (Municipalidad de Cartago, 2023).

Cartago se ubica en el extremo oriental de la región central de Costa Rica, definiendo el clima como tropical húmedo, modificado por la altura y por la presencia de las montañas. En general, el clima se le cataloga como templado. Se caracteriza por lluvias moderadas y temperaturas frescas. Mantiene precipitaciones cercanas a los 2000 mm por año, con 128 días con lluvia y un solo mes seco. La temperatura máxima promedio es de 26 grados centígrados y la mínima promedio de 15 grados. El bosque asociado es el húmedo subtropical (Municipalidad de Cartago, 2023).

Aspectos Institucionales:

El operador del sitio es WPP – Coriclean quienes cuentan con el Permiso Sanitario de Funcionamiento N° 3212-2018 que les otorga el permiso de operación.

Aspectos Técnicos:

El relleno fue constituido inicialmente como un vertedero en 1999 llamado Vertedero Navarro y en el 2003 fue reconvertido a relleno sanitario con un área de 20 ha. La vida útil se ha actualizado según los reportes realizados y en marzo del 2023 se determinó una vida útil de 4.06 años según las condiciones actuales pese a que el permiso sanitario autoriza su funcionamiento hasta mayo del 2023.

El relleno atiende los residuos producidos de los cantones de Paraíso y Guarco con 171.430 usuarios asociados al siguiente historial de disposición



Gráfica 18. Historial de disposición en L7

El relleno atiende un promedio de 120 ton/día que son dispuestas en 3 de las 12 celdas que conformas el relleno. Las 9 celdas restantes ya han sido cerradas.

Sitio de disposición – V1



Imagen 8. Fotografía satelital del Vertedero Turrialba (Fuente Google Earth)

Se encuentra localizado sobre una vía terciaria escarpada que comunica la ruralidad de San Juan Sur con la vía terciaria nacional 411.

Generalidades del cantón:

Turrialba es el cantón número 5 de la provincia de Cartago. La ciudad de Turrialba es la cabecera cantonal y se encuentra a una altitud de 646 m.s.n.m., en el valle que conforma el río del mismo nombre y se encuentra a 64 kilómetros de San José, la capital costarricense. El cantón de Turrialba cuenta con un área de 1642,67 km² y una altitud media de 1020 m.s.n.m. Su área equivale a alrededor del 52% de la superficie total de la provincia de Cartago. . Para el año 2022, Cantón de Turrialba cuenta con una población estimada de 73.546 habitantes, y para el último censo efectuado, en 2011, Cantón de Turrialba contaba con una población de 69.616 habitantes. El 57,4% de sus habitantes vivían en áreas urbanas (Municipalidad de Turrialba, 2023).

Aspectos Institucionales:

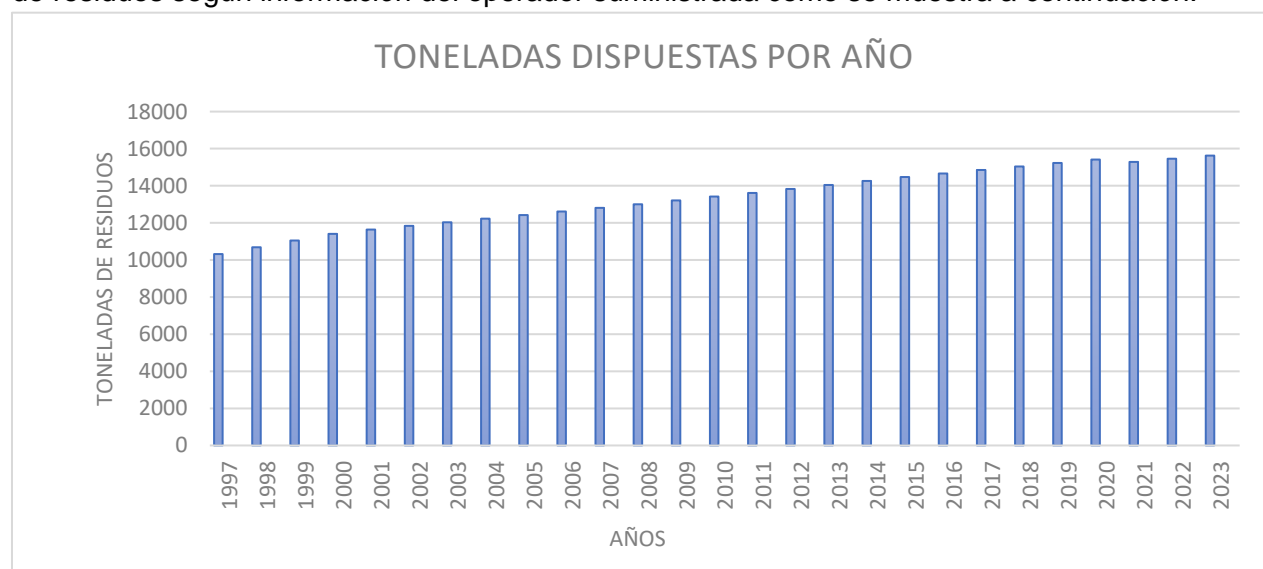
El vertedero es operado por la municipalidad de Turrialba con orden de cierre para febrero del 2024 pese a que cuenta con capacidad volumétrica para 5 años más de operación. Dicha orden de cierre procede a partir de la regulación de los rellenos que, el vertedero al no cumplir se concluye el término de las operaciones en dicho lugar, aunque continúa abierto por Orden de Sala Constitucional.

Aspectos Técnicos:

El sitio de disposición se encuentra abierto desde 1994. Posteriormente se orientó a reconvertirse con una disponibilidad de 28 ha y la conformación de 4 celdas con un periodo de operación permitido hasta febrero del 2024.

Se disponen en este lugar los residuos que provienen de Turrialba y Jiménez en la única celda que se encuentra activa, aunque se tiene proyectado otra celda en dado el caso, se prolongue las actividades de disposición.

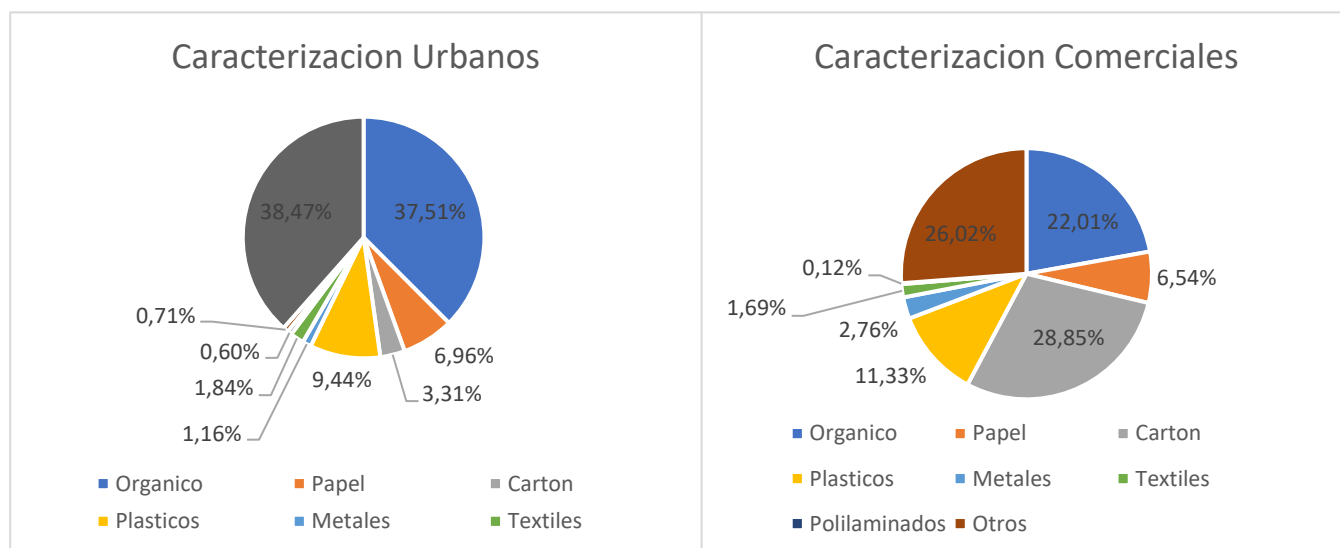
En las actividades de disposición no se realizaron pesajes del material que ingresaba al vertedero antes del 2021, por lo que se han realizado proyecciones sobre los ingresos anuales de residuos según información del operador suministrada como se muestra a continuación.



Gráfica 19. Historial de disposición en V1

En la celda activa no se realiza cobertura diaria pero cada 3 meses se ejecuta una cobertura con suelos limo arcillosos en el 50% del área sobre los residuos previamente compactados.

No se cuenta con una caracterización de residuos directa del volumen que llega al vertedero hasta la actualidad por lo que se toma el Plan Municipal de Gestión Integral de Residuos Sólidos del Cantón de Turrialba (Sumando Vida GIR, 2021 - 2026) donde se presenta la revisión de la composición de los residuos hecha en el 2013 con la siguiente caracterización:



Gráfica 20. Caracterización de residuos de V1 (Fuente: Sumando Vida GIR, 2021 - 2026)

Debido al cierre programado para el 2024, actualmente el operador se encuentra desarrollando el Plan de Cierre Técnico con el propósito de mitigar los impactos que el vertedero seguirá generando post cierre.

El vertedero no cuenta con sistemas de conducción y tratamiento de lixiviados o sistemas de captura pasiva o activa de biogás actualmente y debido a los impactos que genera, dentro del plan mencionado se han contemplado obras para el control sobre la generación y migración de lixiviados, manejo de gases, diseño paisajístico entre otras acciones.

Posteriormente al cierre técnico se han contemplado proyectos para implementar una planta de compostaje (cuenta con diseños) y la estación de transferencia de residuos (hay diseños y obras para el desarrollo de las estructuras que la conforman). Se tiene previsto adicionalmente el desarrollo de un vivero y una planta de transformación de plásticos que aún no han sido concretados.

3.2. Muestra seleccionada de sitios de disposición final – Fase 2

Los términos de la prestación indican que dentro de los 5 sitios a seleccionar deberá considerarse 3 rellenos sanitarios y 2 vertederos. Dicha condición fue modificada posteriormente en común acuerdo con las instituciones estatales al establecerse que hay mayor interés en involucra prioritariamente a los rellenos que están en operación frente a verederos que ya se encuentran cerrados, por tanto, la configuración final de la muestra seleccionada corresponde a 4 rellenos sanitarios y 1 vertedero.

Producto de la evaluación multicriterio se escogieron los 4 rellenos con puntuaciones más altas denominados como R1, R2, R3, R4 y V1:

En cuanto al vertedero, se seleccionó el sitio que estuviese próximo a ser cerrado o con cierre de operaciones reciente ya que se conoce que el pico de producción de biogás se da en estas etapas y es donde se podrá hacer el máximo aprovechamiento en un vertedero.

Relacionado a lo anterior, se seleccionó el vertedero que actualmente se encuentra en operación y está próximo a desarrollar sus actividades de cierre.

4.

DIAGNOSTICO DE VALORACION DE BIOGAS

4.1. Caracterización de residuos y biogás en los sitios seleccionados – Fase 3

4.1.1. Composición de los residuos sólidos ordinarios

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los rellenos sanitarios y el vertedero incluidos en el estudio.

Relleno Sanitario – R1

El muestreo se realizó el día 11 de julio. La procedencia de las muestras utilizadas para la caracterización de los residuos en el relleno R1 se presenta en el Cuadro 18.

Cuadro 17. Procedencia de las muestras utilizadas en la caracterización de residuos para el relleno R1. Elaboración propia, Cónica 2023.

Número de Muestra	Procedencia	Características
1	Ruta de recolección de la Municipalidad de Alajuela	Zona urbana, con alta cantidad de viviendas, comercios, oficinas, sedes de instituciones del gobierno central, y centros educativos
2	Ruta de recolección de la Municipalidad de Esparza	Zona semi-rural con alta visitación de turismo, con alta cantidad de comercios, oficinas y viviendas
3	Ruta de recolección de la Municipalidad de Garabito, zona de Jacó	Zona costera con alta cantidad de comercios, oficinas y negocios dedicados a la atención de turistas

Cuadro 18. Caracterización de residuos para el relleno R1. Fuente: Elaboración propia, Cónica 2023.

Categoría de Residuo	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3		Peso (kg)		Porcentaje	
	Peso (kg)	%	Peso (kg)	%	Peso (kg)	%	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.
Papel	1,66	2,89	0,28	0,61	0	0,00	0,65	0,89	1,17	1,52

Cartón	0,59	1,03	3,76	8,24	5,16	9,67	3,17	2,34	6,31	4,63
Residuos Orgánicos	22,91	39,93	12,62	27,66	23,34	43,76	19,62	6,07	37,12	8,41
Plásticos 1 y 2	1,32	2,30	1,88	4,12	2,22	4,16	1,81	0,45	3,53	1,06
Plásticos 3 al 7	11,66	20,32	9,26	20,30	6,58	12,34	9,17	2,54	17,65	4,60
Metales No Ferrosos	1,88	3,28	0,56	1,23	1,44	2,70	1,29	0,67	2,40	1,06
Vidrio	0,13	0,23	0,82	1,80	1,68	3,15	0,88	0,78	1,72	1,46
Otros	16,5	28,76	16,3	35,73	11,66	21,86	14,82	2,74	28,78	6,94
Polilaminados	0,72	1,26	0,14	0,31	1,26	2,36	0,71	0,56	1,31	1,03
Total (kg)	57,37	100,00	45,62	100,00	53,34	100,00	52,11	5,97		



Imagen 9. R1, julio 2023. Se aprecia el cuarteo de las muestras y la fracción de residuos orgánicos obtenida al final del proceso.

Relleno Sanitario – R2

El muestreo se realizó el día 10 de julio. La procedencia de las muestras utilizadas para la caracterización de los residuos en el R2 se presenta en el Cuadro 20

Cuadro 19. Procedencia de las muestras utilizadas en la caracterización de residuos para el R2. Fuente: Elaboración propia, Cónica 2023.

Número de Muestra	Procedencia	Características
-------------------	-------------	-----------------

1	Distrito Central de Santa Cruz	Zona urbana, con alta cantidad de comercios, oficinas, sedes de instituciones del gobierno central, centros educativos y negocios dedicados a la atención de turistas
2	Ruta de recolección de Playas del Coco, perteneciente a la Municipalidad de Carrillo	Zona costera de alta visitación de turismo, con alta cantidad de comercios, oficinas y negocios dedicados a la atención de turistas
3	Distrito Central de Nicoya	Zona urbana, con alta cantidad de comercios, oficinas, sedes de instituciones del gobierno central, centros educativos y negocios dedicados a la atención de turistas

Cuadro 20. Caracterización de residuos para el R2. Fuente: Elaboración propia, Cónica 2023.

Categoría de Residuo	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3		Peso (kg)		Porcentaje	
	Peso (kg)	%	Peso (kg)	%	Peso (kg)	%	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.
Papel	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,28	0,07	0,12	0,09	0,16
Cartón	6,76	10,23	10,82	11,68	2,24	3,11	6,61	4,29	8,34	4,59
Residuos Orgánicos	18,68	28,27	20,30	21,92	20,70	28,72	19,89	1,07	26,30	3,80
Plásticos 1 y 2	6,06	9,17	4,70	5,07	4,10	5,69	4,95	1,00	6,64	2,21
Plásticos 3 al 7	14,60	22,09	30,98	33,45	14,38	19,95	19,99	9,52	25,16	7,25
Metales No Ferrosos	2,00	3,03	1,20	1,30	2,76	3,83	1,99	0,78	2,72	1,29
Vidrio	4,20	6,36	2,60	2,81	3,12	4,33	3,31	0,82	4,50	1,78
Otros	13,00	19,67	21,42	23,13	24,18	33,55	19,53	5,82	25,45	7,22
Polilaminados	0,78	1,18	0,60	0,65	0,40	0,55	0,59	0,19	0,79	0,34
Total (kg)	66,08	100,00	92,62	100,00	72,08	100,00	76,93	13,92		





Imagen 10. R2, julio 2023. Se aprecia el cuarteo de las muestras y la fracción de residuos orgánicos obtenida al final del proceso.

Relleno Sanitario – R3

El muestreo se realizó el día 12 de julio. La procedencia de las muestras utilizadas para la caracterización de los residuos en el R3 se presenta en el Cuadro 22.

Cuadro 21. Procedencia de las muestras utilizadas en la caracterización de residuos para el R3. Fuente: Elaboración propia, Cónica 2023.

Número de Muestra	Procedencia	Características
1	Ruta de recolección de la Municipalidad de Santa Ana: Dos Calles y PALI del Centro, Alto Las Palomas, B ^a Los Fonseca, calle Pilas, calle Lyon, Valle Soleado, calle Chinchillas, calle Chinchas, calle Gallera, calle Macho Madrigal	Zona urbana, con alta cantidad de viviendas, comercios, oficinas, sedes de instituciones del gobierno central, centros educativos y centros de atención de salud
2	Ruta de recolección de la Municipalidad de Santa Ana: DUCATY, CONDOPARK, calle Cajetas en Brasil, Bo Los Ángeles, bajo Los Vargas, calle Las Mesa Brasil, radial a Ciudad Colón, calle Copey	Zona urbana, con alta cantidad de viviendas, comercios, oficinas, sedes de instituciones del gobierno central, centros educativos y centros de atención de salud
3	Ruta de recolección de la Municipalidad de San José	Zona urbana, con un muy alto tráfico de población en tránsito, comercios, oficinas, sedes de instituciones del gobierno central, centros educativos y centros de atención de salud

Cuadro 22. Caracterización de residuos para el R3. Fuente: Elaboración propia, Cónica 2023

Categoría de Residuo	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Peso (kg)	Porcentaje
----------------------	-----------	-----------	-----------	-----------	------------

	Peso (kg)	%	Peso (kg)	%	Peso (kg)	%	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.
Papel	1,22	1,64	1,3	2,03	1,26	1,80	1,26	0,04	1,82	0,20
Cartón	2,9	3,89	1,44	2,25	3,9	5,58	2,75	1,24	3,91	1,67
Residuos Orgánicos	33,76	45,33	37,34	58,27	35,94	51,46	35,68	1,80	51,69	6,47
Plásticos 1 y 2	3,34	4,48	0,92	1,44	1,96	2,81	2,07	1,21	2,91	1,53
Plásticos 3 al 7	10,54	14,15	8,38	13,08	10,72	15,35	9,88	1,30	14,19	1,14
Metales No Ferrosos	0,94	1,26	1,1	1,72	0,74	1,06	0,93	0,18	1,35	0,34
Vidrio	3,24	4,35	0,88	1,37	0,82	1,17	1,65	1,38	2,30	1,78
Otros	18,22	24,46	12,26	19,13	14,1	20,19	14,86	3,05	21,26	2,82
Polilaminados	0,32	0,43	0,46	0,72	0,4	0,57	0,39	0,07	0,57	0,14
Total (kg)	74,48	100,00	64,08	100,00	69,84	100,00	69,47	5,21		

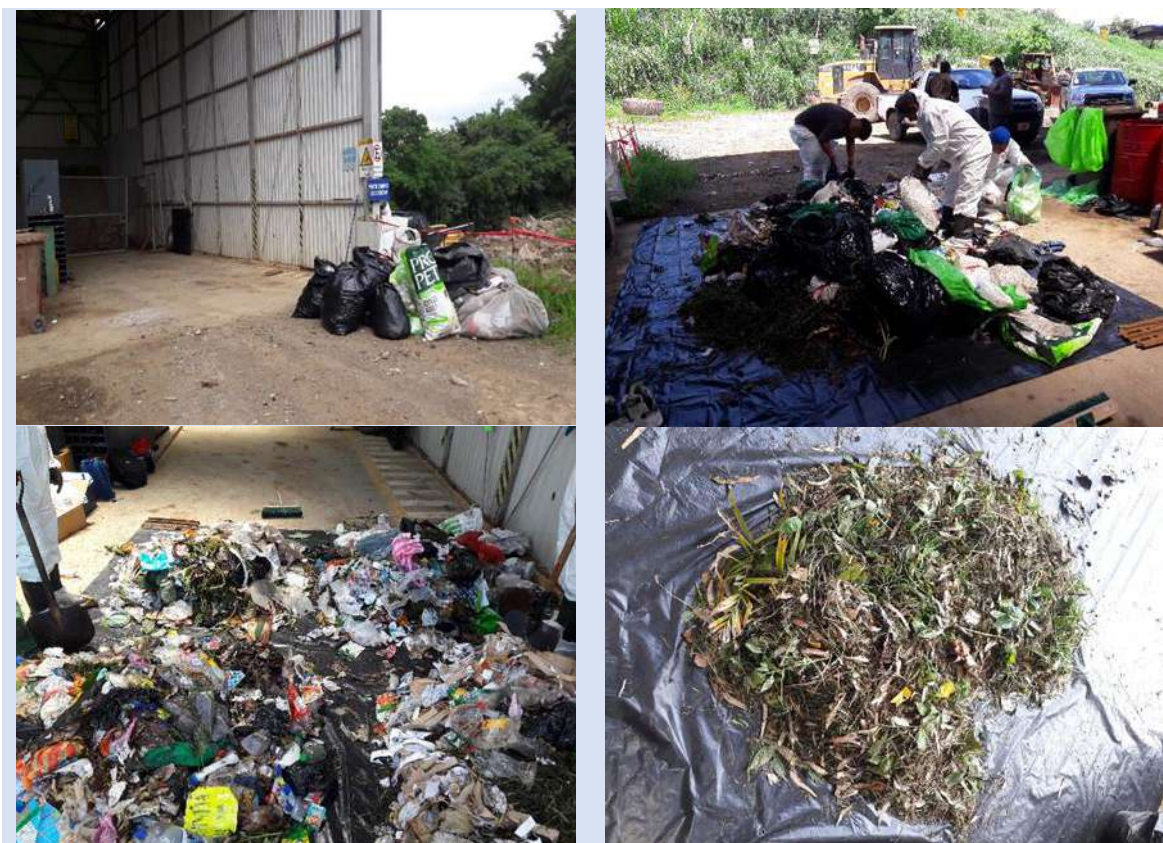


Imagen 11. R3, julio 2023. Se aprecia la recepción y cuarteo de muestras y la fracción residuos orgánicos obtenida al final del proceso.

Relleno Sanitario – R4

El muestreo se realizó el día 13 de julio. La procedencia de las muestras utilizadas para la caracterización de los residuos en el R4 se presenta en el Cuadro 24.

Cuadro 23. Procedencia de las muestras utilizadas en la caracterización de residuos para el R4. Fuente: Elaboración propia, Cónica 2023.

Número de Muestra	Procedencia	Características
1	Ruta de recolección de la Municipalidad de Desamparados, Ruta Los Guido y Grupo La Villa	Zona urbana, con alta densidad de viviendas, comercios, oficinas, centros educativos y centros de atención de salud, en la zona se da concentración de viviendas de bajos recursos
2	Ruta de recolección de la Municipalidad de Desamparados, Sector de Dos Cercas y Quince Calles	Zona urbana, con alta cantidad de viviendas, comercios, oficinas, centros educativos y centros de atención de salud
3	Ruta de recolección de la Municipalidad de Tibás	Zona urbana, con alta cantidad de viviendas, comercios, oficinas, sedes de instituciones del gobierno central, centros educativos y centros de atención de salud

Cuadro 24. Caracterización de residuos para el R4. Fuente: Elaboración propia, Cónica 2023.

Categoría de Residuo	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3		Peso (kg)		Porcentaje	
	Peso (kg)	%	Peso (kg)	%	Peso (kg)	%	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.
Papel	1,02	1,42	0,66	0,96	3,74	4,60	1,81	1,68	2,33	1,98
Cartón	5,68	7,92	9,14	13,26	1,82	2,24	5,55	3,66	7,80	5,51
Residuos Orgánicos	31,00	43,22	32,36	46,93	53,53	65,85	38,96	12,63	52,00	12,14
Plásticos 1 y 2	2,90	4,04	1,54	2,23	1,94	2,39	2,13	0,70	2,89	1,00
Plásticos 3 al 7	8,78	12,24	9,56	13,87	5,46	6,72	7,93	2,18	10,94	3,75
Metales No Ferrosos	5,44	7,59	1,63	2,36	0,82	1,01	2,63	2,47	3,65	3,47
Vidrio	0,68	0,95	1,06	1,54	1,88	2,31	1,21	0,61	1,60	0,68
Otros	15,32	21,36	12,54	18,19	11,52	14,17	13,13	1,97	17,91	3,60
Polilaminados	0,90	1,25	0,46	0,67	0,58	0,71	0,65	0,23	0,88	0,33
Total (kg)	71,72	100,00	68,95	100,00	81,29	100,00	73,99	6,47		





Imagen 12. R4, julio 2023.

Vertedero – V1

El muestreo se realizó el día 5 de julio. La procedencia de las muestras utilizadas para la caracterización de los residuos en el V1 se presenta en el Cuadro 26.

Cuadro 25. Procedencia de las muestras utilizadas en la caracterización de residuos para el V1. Fuente: Elaboración propia, Cónica 2023.

Número de Muestra	Procedencia	Características
1	Zona de Aquiares- Colorado	Zona rural
2	Distrito Central del Cantón de Turrialba	Zona urbana, con alta cantidad de comercios, oficinas, sedes de instituciones del gobierno central y centros educativos
3	Distrito de La Suiza de Turrialba	Zona rural

Cuadro 26. Caracterización de residuos para el V1. Fuente: Elaboración propia, Cónica 2023.

Categoría de Residuo	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3		Peso (kg)		Porcentaje	
	Peso (kg)	%	Peso (kg)	%	Peso (kg)	%	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.
Papel	1,6	3,61	0,4	0,58	0,6	1,81	0,87	0,64	2,00	1,52
Cartón	1,2	2,71	1,02	1,48	0,66	1,99	0,96	0,27	2,06	0,62
Residuos Orgánicos	17,86	40,33	34,9	50,79	4,32	13,04	19,03	15,32	34,72	19,49
Plásticos 1 y 2	1,57	3,54	2	2,91	1	3,02	1,52	0,50	3,16	0,34
Plásticos 3 al 7	7,66	17,30	14,22	20,70	6,04	18,24	9,31	4,33	18,74	1,76
Metales No Ferrosos	1,48	3,34	1,52	2,21	0,86	2,60	1,29	0,37	2,72	0,57
Vidrio	0	0,00	0,75	1,09	0,5	1,51	0,42	0,38	0,87	0,78
Otros	12,2	27,55	12,98	18,89	18,66	56,34	14,61	3,53	34,26	19,61
Polilaminados	0,72	1,63	0,92	1,34	0,48	1,45	0,71	0,22	1,47	0,14
Total (kg)	44,29	100,00	68,71	100,00	33,12	100,00	48,71	18,20		



Imagen 13. Imágenes del V1, julio 2023. Se visualiza la recepción de muestras, cuarteo y separación de tipo de residuos.

En el siguiente cuadro se muestra un resumen del promedio de la composición de los residuos de los 5 sitios de disposición final.

Cuadro 27. Caracterización de residuos de los 5 sitios muestreados. Valor en porcentaje.

Categoría de Residuo	Relleno Sanitario o Vertedero				
	R1	R2	R3	R4	V1
Papel	1,20%	0,10%	1,80%	2,30%	2,00%
Cartón	6,30%	8,30%	3,90%	7,80%	2,10%
Residuos Orgánicos	37,10%	26,30%	51,70%	52,00%	34,70%
Plásticos 1 y 2	3,50%	6,60%	2,90%	2,90%	3,20%
Plásticos 3 al 7	17,70%	25,20%	14,20%	10,90%	18,70%
Metales No Ferrosos	2,40%	2,70%	1,30%	3,70%	2,70%
Vidrio	1,70%	4,50%	2,30%	1,60%	0,90%
Otros Residuos	28,80%	25,40%	21,30%	17,90%	34,30%
Polilaminados	1,30%	0,80%	0,60%	0,90%	1,50%

De los residuos descritos en el Cuadro 27, los que son valiosos para la generación de biogás corresponden al Papel, Cartón y Residuos Orgánicos, principalmente. Los residuos

polilaminados contienen un porcentaje bajo de cartón, y corresponden a una fracción muy pequeña de los residuos encontrados en los rellenos sanitarios en este estudio, por lo que, aunque posible, su eventual contribución a la producción de biogás sería muy limitada. En la fracción de Otros Residuos se encuentran materiales como madera y textiles, que podrían aportar a la generación de biogás. Al ser esta una fracción tan importante en todos los sitios de estudio es importante tomar este tipo de residuos en cuenta a la hora de realizar cálculos o modelaciones de producción de biogás, tomando en cuenta el ajuste correcto de parámetros como la proporcionalidad de estos materiales en la mezcla de residuos, la naturaleza de estos materiales y su velocidad de degradación.

Los datos que aporta el **Plan Maestro de Gestión Integral de Residuos en Costa Rica (Ministerio de Salud, 2015)**, pueden ser contrastados en términos de los resultados obtenidos para los residuos orgánicos principalmente. En el estudio del Ministerio de Salud se compara la generación de residuos entre los cantones de San José, Desamparados y Aserrí, con la intención de realizar comparaciones en un gradiente de urbanidad de estos cantones, donde San José es en su mayor parte un cantón urbano, Aserrí es un cantón principalmente rural, y Desamparados presenta un panorama intermedio entre los otros dos cantones.

En este estudio se realizó una categorización distinta de las diferentes fracciones de residuos, lo que dificulta la comparación con el presente estudio. En ambos estudios las dos fracciones más importantes son los residuos orgánicos y los “otros” residuos, sin embargo, la composición de estas categorías de “otros” no es la misma en ambos estudios. Para los residuos orgánicos, el estudio del Ministerio de Salud segrega los residuos orgánicos de los residuos de jardinería, y presenta por aparte los resultados obtenidos en muestreos realizados en la época lluviosa y la época seca.

Para poder realizar una comparación con el presente estudio, se suman los porcentajes representados por estas dos fracciones. Para San José se obtuvo que los residuos orgánicos representan un 35% de los residuos generados en la estación lluviosa y 32,5% en la estación seca. En Desamparados se obtienen porcentajes similares (36% en estación seca versus 27,5% en estación lluviosa), y en Aserrí los porcentajes son un poco más bajos (27% en estación seca versus 28,7% en estación lluviosa). Estas proporciones son menores a las obtenidas en este estudio para los rellenos de R3 y R4, que son los que atienden a los cantones en cuestión, para los cuales los valores de la fracción de residuos orgánicos se encuentran por encima del 50%.

En el estudio realizado por Rudin y colaboradores (2018) sobre la situación de residuos sólidos para la determinación del NAMA residuos Costa Rica, se indica que en el país se han realizado múltiples estudios de composición en diversos municipios ubicados en el Gran Área Metropolitana y también en algunas de las provincias más lejanas (que corresponde a Guanacaste, Puntarenas y Limón, que son los territorios del país que incluyen zonas costeras). Para estos autores es importante aclarar que la ruralidad en Costa Rica no se comporta de manera similar a otros países del área, debido al acceso prácticamente universal de la electrificación y prestación de servicios básicos, por lo que prácticamente, todos los estudios realizados en denominadas zonas rurales más bien corresponden a zonas periurbanas, por lo que no se observan diferencias significativas entre los diferentes estudios analizados. En este estudio se presenta una muestra de 10 municipalidades que contaban con estudios de composición, para escogerla se consideraron aquellos resultados que mantuvieran una menor varianza en cuanto a los sistemas de clasificación de materiales (Cuadro 28).

Cuadro 28. Recopilación estudios de composición de residuos sólidos municipales, incluye aporte de comercios. Fuente: Informe situación de residuos sólidos para la determinación del NAMA Residuos Costa Rica (Rudin et. al, 2018).

Municipalidad	Biodegradable	Papel y cartón	Plásticos (Incluye polilaminados)	Vidrio	Metales	Textiles	Peligrosos	Electrónicos	Otros
Desamparados	51,30%	9,37%	14,95%	0,28%	1,76%	8,21%	0,79%	0,31%	11,56%
San Pablo de Heredia	48,00%	23,00%	12,00%	3,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	10,00%
Alajuela	51,10%	7,85%	13,60%	0,00%	1,10%	4,20%	0,40%	2,40%	18,80%
Nandayure	58,00%	2,00%	3,00%	0,00%	0,20%	0,00%	0,00%	0,00%	33,00%
Coronado	49,79%	20,62%	17,70%	2,29%	2,11%	4,20%	0,00%	0,00%	0,00%
Esparza	63,20%	6,96%	8,85%	3,00%	0,00%	0,29%	11,50%	0,00%	6,00%
San Carlos	46,50%	15,60%	10,60%	1,30%	1,60%	0,00%	0,80%	1,20%	20,90%
San José	48,79%	20,62%	17,70%	2,90%	2,11%	4,12%	0,00%	0,00%	3,76%
Tibas	48,87%	7,50%	13,60%	0,90%	1,10%	4,20%	0,40%	2,40%	18,80%
Alajuela	51,10%	11,29%	11,28%	1,71%	1,61%	4,40%	1,51%	0,41%	18,53%
Promedio	51,67%	12,48%	12,33%	1,54%	1,16%	2,96%	1,54%	0,67%	14,14%
Incertidumbre	5,1	7,06	4,36	1,2	0,83	2,8	3,53	0,1	1

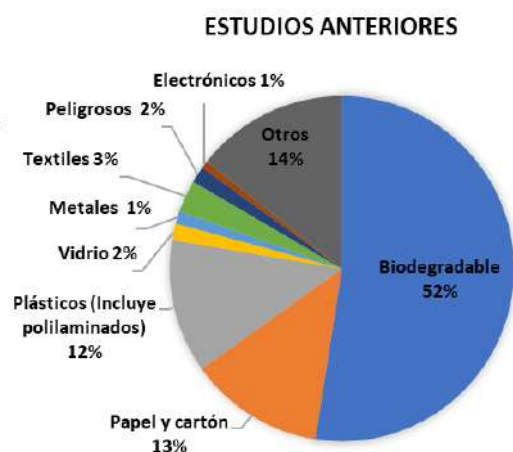
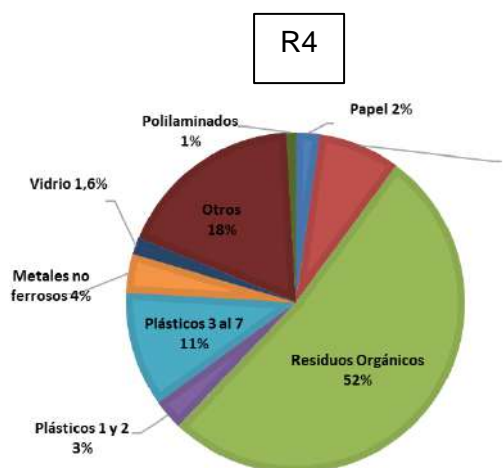
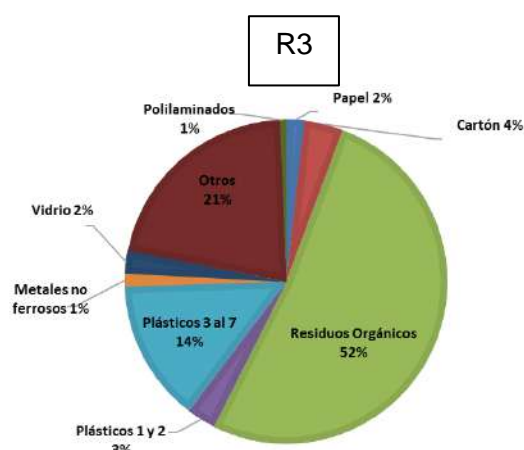
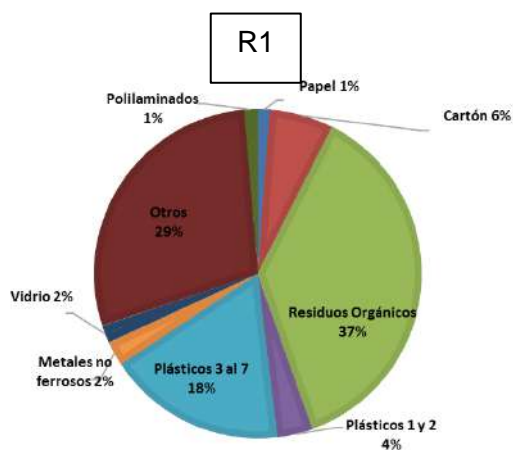
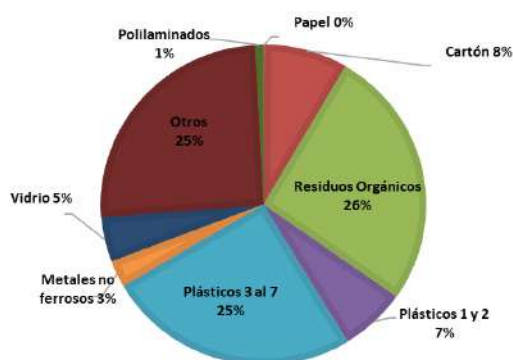
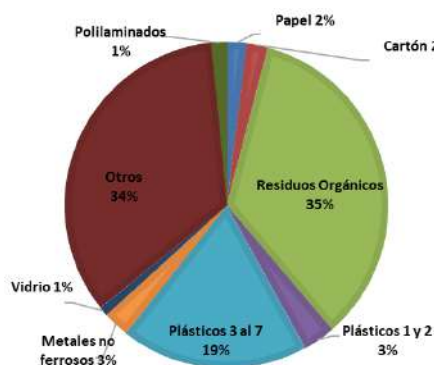
En los resultados obtenidos en este estudio, consistentemente la fracción de residuos orgánicos fue la de mayor importancia en todos los sitios (desde 26.3% hasta 52%), seguida de la fracción de “otros residuos” (desde 17.9% hasta 34.3%), y el tercer lugar de importancia lo ocuparon los plásticos del 1 al 7, que corresponden a los plásticos valorizables y no valorizables en el país (desde 13.8% hasta 31.8%). Este efecto lo observó los estudios de Rudin y colaboradores (2018), donde también la fracción de residuos orgánicos es generalmente la que representa la mayor proporción de los residuos generados, seguida por la fracción de “otros residuos”.

Existen algunas discrepancias generales. Por ejemplo “papel y cartón”, en donde para Rudin y colaboradores (2018) esta es la tercera fracción con mayor importancia, con un porcentaje promedio de 12,52% mientras que este estudio fue de 7.2%. Esta menor proporcionalidad se puede deber a un aparente incremento en el uso de plásticos. En el estudio de Rudin el promedio de plásticos y polilaminados es de 12.33%, mientras que para este estudio fue de 22.2%.

Finalmente, la mayor discrepancia se puede observar en los resultados obtenidos para el V1, los cuales existe un mayor porcentaje de Otros Residuos (34.7%), reduciendo así las otras categorías; esto en comparación con los demás sitios de muestreo y los estudios realizados a nivel nacional. La muestra aportada por el vertedero contenía muchos pañales y bolsas de papel higiénico, las cuales fueron descartadas durante el procedimiento de apertura de bolsas para evitar la contaminación de la muestra.

V1

R2



Gráfica 21. Comparación de los resultados de composición de residuos de este estudio con la recopilación de estudios de composición de la NAMA residuos Costa Rica (Rudin et. al, 2018)

Los resultados resumidos en el Cuadro 27 y la Gráfica 21 indican comportamientos distintos en los rellenos sanitarios y vertederos que atienden zonas rurales en contraste con aquellos que atienden zonas urbanas, en especial para las fracciones más significativas, los Residuos Orgánicos y la fracción de Otros Residuos. En las zonas más rurales (V1, R2 y R1) la producción de residuos orgánicos es menor en comparación con los rellenos R3 y R4, que atienden poblaciones más urbanas. De la misma manera, las proporciones de Otros Residuos son mayores en las zonas rurales que en las urbanas.

El hecho de que las zonas rurales dispongan de una menor proporción de residuos orgánicos es esperable, ya que en estas zonas son más comunes las prácticas de tratamiento propio de los residuos orgánicos, ya sea utilizándolos como alimento para animales domésticos o de cría, el uso de materiales vegetales en procesos de compostaje o para fines agropecuarios. En estas zonas es más común que este tipo de residuos no se disponga a través de los servicios municipales. En las zonas más urbanas la tendencia se revierte, especialmente en el caso de residuos de podas, que son más comúnmente retirados de las propiedades que los generan y dispuestos para recolección a través de los servicios municipales. Esto coincide con los resultados presentados en el documento del Plan Maestro de Gestión Integral de Residuos en Costa Rica (Ministerio de Salud, 2015), que indica que “grandes ciudades generan mayor cantidad de residuos, menor area urbana genera menor residuo per cápita”.

Para este estudio, las condiciones de muestreo se trataron de mantener lo más homogéneas posible, y se trabajó en coordinación con las personas responsables de los rellenos sanitarios para recibir bolsas que no hubieran sido sometidas a los procesos de compactación de los camiones recolectores, para evitar variaciones en el contenido de estas. Este es un factor que fue estrictamente controlado en todos los sitios y no se considera que haya introducido sesgos en los muestreos.

Con respecto a las condiciones del tiempo y su influencia en los muestreos, para todos los sitios, excepto en el caso de R4, se trabajó en condiciones soleadas y días sin precipitación. Los muestreos realizados en R4 se realizaron en un día que presentó condiciones de llovizna leve, y se tomaron las precauciones del caso, como uso de toldos, para proteger las muestras y evitar que las mismas se mojaran. En caso de existir algún sesgo introducido en estas muestras por el factor de humedad, el mismo debería ser constante a lo largo de las distintas fracciones de residuos que se presentan en el Cuadro 27, por lo que este factor no debería afectar las comparaciones porcentuales que se presentan en el mismo.

4.1.2. Composición del biogás

Relleno Sanitario – R1

La jornada de medición de composición de biogás se realizó en 42 chimeneas ubicadas en todas las celdas anteriormente listadas.



Imagen 14. Campaña de medición del relleno R1.

Cuadro 29. Datos de la campaña de medición del relleno R1.

Medición	Coordenadas		CH ₄ %	H ₂ S ppm	CO ₂ %	O ₂ %	Temp . °C	Presión hPa	Flujo instantáneo (m³/h)	Observaciones y hallazgos
	Norte	Oeste								
1	10°04'18.9264"	84°45'33.0516"	51,66 %	277	48,68 %	0,06 %	41,0	998	8,8	Celda 3
2	10°04'17.9544"	84°45'33.7932"	31,73 %	2	30,11 %	1,77 %	41,0	998	8,0	
3	10°04'17.2956"	84°45'35.0388"	0,08%	1	0,06%	20,07%	-	-	0,0	Celda 4 - sin flujo
4	10°04'17.4252"	84°45'33.5736"	42,38 %	1	35,63 %	2,56 %	40,0	998	8,8	Celda 3
5	10°04'22.6596"	84°45'38.8296"	57,03 %	373	43,21 %	0,16 %	45,0	997	30,6	Celda 5
6	10°04'22.0944"	84°45'39.78"	56,79 %	84	43,45 %	0,16 %	47,8	997	93,4	
7	10°04'12.3554"	84°45'39.0744"	56,87 %	530	43,43 %	0,10 %	51,0	998	84,6	Celda 2
8	10°04'16.896"	84°45'32.1588"	43,89 %	4	41,85 %	0,62 %	41,0	998	7,3	Celda 1
9	10°04'15.4812"	84°45'38.9844"	55,90 %	371	44,31 %	0,19 %	40,0	1.000	8,0	Celda 2 - inactivas, sin flujo
10	10°04'15.2004"	84°45'40.2912"	0,01%	3	0,12%	20,75%	-	-	0,0	

11	10°04'15.1716"	84°45'40.4676"	0,00%	3	0,11%	20,75%	-	-	0,0	
12	10°04'22.404"	84°45'37.0944"	4,12%	14	3,29%	19,09%	38,0	998	7,3	Celda 5 - arrastre leve de lixiviado, fuga e ingreso de aire
13	10°04'23.3184"	84°45'37.7676"	56,70%	116	43,49%	0,14%	41,0	998	16,1	Celda 5 - arrastre lixiviado
14	10°04'23.8944"	84°45'39.7476"	51,55%	65	41,79%	2,19%	38,3	997	84,6	Celda 5
15	10°04'24.8448"	84°45'38.7792"	57,16%	44	43,12%	0,12%	40,5	996	24,8	
16	10°04'25.2876"	84°45'38.8836"	56,95%	205	43,33%	0,12%	41,5	996	29,2	
17	10°04'25.8312"	84°45'36.3852"	55,35%	157	44,10%	0,81%	41,2	996	24,8	Celda 6
18	10°04'25.3308"	84°45'33.714"	53,56%	165	46,56%	0,28%	41,2	996	113,8	
19	10°04'24.3084"	84°45'39.0132"	0,10%	1	0,08%	20,70%	-	-	0,0	Celda 5 - sin flujo
20	10°04'23.2392"	84°45'36.936"	0,08%	1	0,06%	20,07%	-	-	0,0	Celda 5 - arrastre de lixiviado
21	10°04'24.654"	84°45'39.5892"	36,70%	43	29,72%	8,12%	40,0	998	8,8	Celda 5 - fuga e ingreso de aire
22	10°04'25.7232"	84°45'39.636"	0,06%	0	0,05%	20,75%	-	-	0,0	Celda 5 - arrastre de lixiviado y espuma
23	10°04'25.8636"	84°45'38.2284"	33,79%	39	29,38%	7,76%	40,0	998	13,9	Celda 6- leve fuga e ingreso de aire
24	10°04'25.2228"	84°45'34.1316"	56,38%	562	43,89%	0,13%	47,7	995	23,3	Celda 6
25	10°04'24.3984"	84°45'32.9868"	48,19%	195	52,07%	0,13%	48,8	995	21,9	
26	10°04'23.538"	84°45'34.11"	14,55%	50	22,84%	15,23%	39,0	995	23,3	Celda 6 - fuga e ingreso de aire
27	10°04'23.8656"	84°45'34.6536"	41,58%	220	54,91%	3,91%	40,8	995	23,3	Celda 6
28	10°04'24.474"	84°45'34.5348"	34,34%	17	40,31%	4,10%	38,5	995	8,8	
29	10°04'24.2184"	84°45'33.534"	30,04%	68	45,31%	4,90%	39,0	995	13,9	
30	10°04'26.4756"	84°45'28.962"	53,27%	230	47,06%	0,08%	48,3	997	29,9	
31	10°04'26.4396"	84°45'29.25	52,34%	244	47,96%	0,10%	45,0	997	28,5	
32	10°04'26.6196"	84°45'30.9744"	54,43%	265	45,84%	0,12%	46,0	997	24,8	
33	10°04'27.03"	84°45'28.908"	0,02%	1	0,01%	20,75%	-	-	0,0	Celda 6 - sin flujo

34	10°04'27.5376"	84°45'28.908"	58,28 %	75	42,02 %	0,10 %	36,0	997	43,8	Celda 6
35	10°04'27.2892"	84°45'31.4964"	57,27 %	158	43,01 %	0,12 %	50,1	997	40,1	
36	10°04'26.5728"	84°45'32.796"	0,02%	3	0,01%	20,71 %	-	-	0,0	Celda 6 - taponamiento
37	10°04'26.9364"	84°45'35.672"	56,77 %	243	43,49 %	0,15 %	49,6	997	151,8	Celda 6
38	10°04'27.0408"	84°45'37.062"	53,08 %	255	45,31 %	0,82 %	32,2	997	23,3	Celda 5
39	10°04'26.12"	84°45'37.9296"	0,00%	1	0,11%	20,75 %	-	-	0,0	Celda 5 - reporta fallas, sin flujo
40	10°04'27.1164"	84°45'38.8116"	56,75 %	66	43,54 %	0,11 %	41,3	998	113,8	Celda 5
41	10°04'26.1912"	84°45'40.4208"	55,47 %	236	44,77 %	0,16 %	32,1	998	28,5	
42	10°04'24.4488"	84°45'41.3208"	55,70 %	21	44,45 %	0,25 %	39,8	998	30,6	

De las 42 chimeneas analizadas se obtiene que el 62% tiene un %CH₄ superior o igual al 40% y el 52% muestra un %CH₄ mayor o igual al 50% (Cuadro 30). Por otra parte, las chimeneas con arrastre lixiviado, fuga e ingreso de aire asciende al 31% (

Cuadro 31).

Cuadro 30. Repartición de los datos de acuerdo con el contenido de metano en el biogás R1

RANGO	# CHIMENEAS	%	%
0 < %CH ₄ < 15	11	26%	38%
15 ≤ %CH ₄ < 30	0	0%	
30 ≤ %CH ₄ < 40	5	12%	
40 ≤ %CH ₄ < 50	4	10%	62%
50 ≤ %CH ₄	22	52%	

Cuadro 31. Repartición de los datos de acuerdo con el contenido de oxígeno en el biogás R1

RANGO	# CHIMENEAS	%	%
0 < %O ₂ < 1	23	54,7%	69%
1 ≤ %O ₂ < 2,5	2	4,8%	
2,5 ≤ %O ₂ < 5	4	9,5%	

$5 \leq \%O_2 < 10$	2	4,8%	31
$10 \leq \%O_2 < 21$	11	26,2%	

Relleno Sanitario – R2



Imagen 15. Campaña de medición de R2.

Cuadro 32. Datos de la campaña de medición de R2.

Medición	Coordenadas		CH ₄ %	H ₂ S ppm	CO ₂ %	O ₂ %	Temp. °C	Presión hPa	Flujo instantáneo (m ³ /h)	Observaciones y hallazgos
	Norte	Oeste								
1	10°17'58.416"	85°33'55.1086"	44,00 %	118	38,20 %	4,51%	46,8	1.004	37,9	Celda 2
2	10°17'56.9328"	85°33'54.3996"	52,65 %	422	46,23 %	0,97%	39,5	1.004	93,4	
3	10°17'59.1936"	85°33'54.6048"	21,36 %	25	19,62 %	11,29 %	37,9	1.004	72,2	
4	10°17'57.9552"	85°33'53.54"	56,19 %	139	43,98 %	0,23%	46,2	1.004	113,8	Celda 2 – ingreso al relleno
5	10°17'56.1048"	85°33'55,0224"	55,20 %	97	45,05 %	0,15%	46,2	1.004	99,2	Celda 2
6	10°17'55,5"	85°33'55.5912"	49,43 %	54	42,97 %	1,93%	38,4	1.004	111,6	
7	10°17'55.3422"	85°33'54.9252	56,02 %	75	44,17 %	0,21%	47,0	1.004	113,8	

8	10°17'54.978"	85°33'53.3772"	55,46 %	269	44,61 %	0,33%	48,7	1.00 4	64,2	
9	10°17'55.014"	85°33'52.4088"	55,38 %	89	44,90 %	0,12%	48,0	1.00 4	131,3	
10	10°17'55.7268"	85°33'52.7004"	56,79 %	834	43,48 %	0,13%	41,7	1.00 4	113,8	
11	10°17'56.1912"	85°33'53.5824"	54,70 %	314	45,60 %	0,10%	46,7	1.00 4	70,0	
12	10°17'56.382"	85°33'52.1388"	54,62 %	312	45,51 %	0,27%	49,7	1.00 4	64,2	
13	10°17'56.2668"	85°33'51.282"	47,33 %	345	47,80 %	0,61%	52,8	1.00 4	32,1	
14	10°17'57.12"	85°33'50.6664"	26,84 %	370	34,32 %	7,42%	40,5	1.00 4	52,5	
15	10°17'57.5664"	85°33'51.4008"	53,63 %	44	46,38 %	0,39%	51,5	1.00 4	32,1	
16	10°17'57.4765"	85°33'52.1064"	47,52 %	284	38,81 %	1,22%	40,5	1.00 4	14,6	Celda 2 - Taponada con piedra
17	10°17'53.8116"	85°33'54.0828"	56,33 %	44	43,88 %	0,19%	47,2	1.00 4	31,2	Celda 1 - Con quemador
18	10°17'53.736"	85°33'52.7975"	55,43 %	57	44,90 %	0,29%	51,5	1.00 4	36,1	Celda 1 - Con quemador inactivo
19	10°17'52.8072"	85°33'53.6436"	38,39 %	30	32,17 %	6,64%	50,5	1.00 4	8,2	
20	10°17'54.5448"	85°33'55.7316"	55,81 %	46	44,39 %	0,20%	42,8	1.00 4	52,5	Celda 1

De las 20 chimeneas analizadas se obtiene que el 85% tiene un %CH₄ superior o igual al 40% y un %O₂ inferior al 5%. Incluso, el 65% de los datos muestra un %CH₄ mayor o igual al 50% (Cuadro 33). Por otra parte, el 15% de las chimeneas tiene un %O₂ entre el 5 y el 21%, consecuente con los hallazgos visuales de chimeneas con fuga e ingreso de aire por falta de hermeticidad (Cuadro 34).

Cuadro 33. Repartición de los datos de acuerdo con el contenido de metano en el biogás de R2.

RANGO	# CHIMENEAS	%	%
0 < %CH ₄ < 15	0	0%	15%
15 ≤ %CH ₄ < 30	2	10%	
30 ≤ %CH ₄ < 40	1	5%	
40 ≤ %CH ₄ < 50	4	20%	85%
50 ≤ %CH ₄	13	65%	

Cuadro 34. Repartición de los datos de acuerdo con el contenido de oxígeno en el biogás de R2.

RANGO	# CHIMENEAS	%	%
$0 < \%O_2 < 1$	14	70%	85%
$1 \leq \%O_2 < 2,5$	2	10%	
$2,5 \leq \%O_2 < 5$	1	5%	
$5 \leq \%O_2 < 10$	2	10%	15%
$10 \leq \%O_2 < 21$	1	5%	

Relleno Sanitario – R3

En la jornada de medición de composición de biogás se caracterizaron 13 puntos de muestreo los cuales se encuentran interconectados a las chimeneas existentes. Por otra parte, se caracterizó el punto de muestreo ubicado en la planta de generación.



Imagen 16. campaña de medición del R3.

Cuadro 35. Datos de la campaña de medición del R3

Medición	Número de punto de muestreo	Coordenadas		CH ₄ %	H ₂ S ppm	CO ₂ %	O ₂ %	Tem p. °C	Presión hPa	Flujo instantáneo (m ³ /h)
		Norte	Oeste							
1	Punto de acopio	9°58'05.7"	84°09'19.4652"	42,34%	229	37,40%	3,14%	-	-	2.276
2	Sp #8	9°58'03.7776"	84°09'19.8396"	51,67%	353	43,82%	1,10%	27,6	72,2	288,9
3	Sp #4	9°58'03.8892"	84°09'21.6288"	50,19%	34	43,05%	1,48%	25,4	144,5	577,9
4	Sp #5	9°58'03.5256"	84°09'23.958"	55,43%	119	44,79%	0,18%	25,4	216,7	866,8
5	Sp #6	9°58'03"	84°09'24.858"	49,40%	13	44,66%	1,64%	23,0	203,6	814,3
6	Sp #7	9°58'02.2404"	84°09'26.2908"	53,45%	189	46,64%	0,31%	22,8	164,2	656,7
7	Sp #9	9°58'01.1604"	84°09'28.962"	52,85%	1320	44,99%	0,93%	22,8	177,3	709,2
8	Sp #11	9°57'58.4676"	84°09'32.31"	50,59%	443	44,82%	1,34%	23,0	203,6	814,3
9	Sp #10	9°57'55.4364"	84°09'36.0612"	45,82%	172	41,34%	1,99%	33,0	269,2	1077,0
10	Sp #12	9°57'53.3484"	84°09'31.7556"	32,63%	6	36,11%	1,02%	30,6	269,2	1077,0
11	Sp #13	9°57'53.7516"	84°09'26.2368"	55,44%	511	44,51%	0,45%	33,0	256,1	1024,4
12	Sp #14	9°57'53.694"	84°09'25.146"	53,55%	10	46,18%	0,66%	32,0	256,1	1024,4
13	Sp #16	9°57'53.0928"	84°09'23.688"	54,60%	365	45,63%	0,17%	36,2	110,9	443,6
14	Sp #15	9°58'00.4152"	84°09'17.5716"	47,52%	579	35,04%	2,50%	33,2	262,7	1050,7

En el relleno sanitario R3 que cuenta con extracción activa de biogás tiene un mayor monitoreo de los puntos de muestreo y sus chimeneas interconectadas. De los 13 puntos analizados el 92% reportan un %CH₄ superior o igual al 50% (Cuadro 36) y el 100% un %O₂ inferior al 2,5% lo que evidencia una correcta operación del proceso de generación de energía (Cuadro 37).

Cuadro 36. Repartición de los datos de acuerdo con el contenido de metano en el biogás R3.

Rango	# Chimeneas	%	%
0 < %CH ₄ < 15	0	0%	8%
15 ≤ %CH ₄ < 30	0	0%	
30 ≤ %CH ₄ < 40	1	8%	
40 ≤ %CH ₄ < 50	3	23%	92%
50 ≤ %CH ₄	9	69%	

Cuadro 37. Repartición de los datos de acuerdo con el contenido de oxígeno en el biogás R3.

Rango	# CHIMENEAS	%	%
$0 < \%O_2 < 1$	6	46%	100%
$1 \leq \%O_2 < 2,5$	7	54%	
$2,5 \leq \%O_2 < 5$	0	0%	
$5 \leq \%O_2 < 10$	0	0%	0%
$10 \leq \%O_2 < 21$	0	0%	

Relleno Sanitario – R4

La celda 1 y 2 son las de mayor antigüedad. La celda 3 llamada “única” es la celda joven donde se ubica la meseta de disposición actual. La jornada de medición de composición de biogás se realizó en 25 chimeneas ubicadas entre las celdas 1, 2 y 3.



Imagen 17. Campaña de medición en R4.

Cuadro 38. Datos de la campaña de medición en R4.

Medición	Coordenadas		CH ₄ %	H ₂ S ppm	CO ₂ %	O ₂ %	Tem p. °C	Presión hPa	Flujo instantáneo (m³/h)	Observaciones y hallazgos
	Norte	Oeste								
1	9°51'43.6824"	84°03'58.2732"	56,57%	319	43,67%	0,17%	40,0	877	46,0	Celda única - celda joven
2	9°51'42.6888"	84°03'56.9124"	35,13%	45	29,08%	8,27%	38,0	877	5,8	
3	9°51'40.8852"	84°03'53.1324"	35,50%	345	27,22%	7,00%	40,0	878	28,5	Celda única - interconectadas a chimeneas 44, 58, 37 y 42 - Quemador con fuga e ingreso de aire
4	9°51'41.112"	84°03'53.1894"	58,29%	602	42,06%	0,05%	40,0	878		
5	9°51'40.968"	84°03'52.8618"	56,29%	602	41,06%	2,50%	40,0	878		
6	9°51'41.115"	84°03'53.0352"	58,29%	602	42,06%	0,05%	40,0	878		
7	9°51'40.896"	84°03'53.1828"	58,29%	602	42,06%	0,05%	40,0	878		
8	9°51'36.99"	84°03'48.9168"	56,20%	436	44,11%	0,09%	33,4	880	7,3	Celda 1 y 2 - interconectadas a quemador y chimeneas 26 y 5
9	9°51'37.0578"	84°03'48.8268"	56,20%	436	44,11%	0,09%	33,4	880		
10	9°51'36.9504"	84°03'48.9198"	55,20%	436	44,41%	0,09%	33,4	880		
11	9°51'40.2768"	84°03'50.944	55,04%	144	45,27%	0,10%	43,3	880	16,8	Celda 2
12	9°51'40.0356"	84°03'51.426"	56,26%	200	44,06%	0,09%	32,4	879	5,8	
13	9°51'38.7144"	84°03'52.6716"	58,56%	316	41,63%	0,21%	37,8	877	35,0	
14	9°51'39.5424"	84°03'54.2232"	56,25%	244	42,48%	0,67%	40,1	877	64,2	
15	9°51'40.5072"	84°03'56.7108"	56,03%	629	43,28%	0,09%	41,2	876	224,7	Meseta, chimenea con quemador
16	9°51'37.0224"	84°03'56.9196"	56,60%	338	43,31%	0,48%	37,8	876	32,1	
17	9°51'38.7612"	84°03'58.4604"	57,76%	284	41,45%	0,19%	40,8	876	67,1	
18	9°51'36.7128"	84°04'00.5016"	56,53%	286	43,72%	0,15%	42,6	876	67,1	
19	9°51'35.1756"	84°03'55.4256"	58,62%	204	41,42%	0,37%	35,1	877	33,6	Celda 2 - conectada a quemador y chimeneas 63 y sin número.
20	9°51'35.1786"	84°03'55.3746"	58,62%	204	41,42%	0,37%	35,1	877		
21	9°51'35.208"	84°03'55.5042"	56,62%	204	41,12%	2,37%	35,1	877		
22	9°51'33.3468"	84°03'49.482"	26,31%	4	21,82%	10,33%	42,0	877	3,6	Celda 1 - Chimeneas conectadas 31 y 27
23	9°52'32.3352"	84°03'50.8896"	47,82%	2	38,39%	1,92%	30,4	880	6,6	Celda 1
24	9°51'32.5656"	84°03'53.1432"	54,93%	241	45,24%	0,23%	37,5	880	5,8	

25	9°51'32.5692"	84°03'53.946"	0,28 %	6	1,12%	19,24 %	-	-	0,0	
----	---------------	---------------	--------	---	-------	---------	---	---	-----	--

En este caso se obtiene que el 80% de los 25 puntos medidos tiene un %CH₄ superior o igual al 50% (Cuadro 40). En cuanto a las chimeneas con fuga e ingreso de aire con %CO₂ entre el 5 y el 21% corresponde al 16% (Cuadro 40).

Cuadro 39. Repartición de los datos de acuerdo con el contenido de metano en el biogás de R4.

RANGO	# CHIMENEAS	%	%
0 < %CH ₄ < 15	1	4%	16%
15 ≤ %CH ₄ < 30	1	4%	
30 ≤ %CH ₄ < 40	2	8%	
40 ≤ %CH ₄ < 50	1	4%	84%
50 ≤ %CH ₄	20	80%	

Cuadro 40. Repartición de los datos de acuerdo con el contenido de oxígeno en el biogás de R4.

RANGO	# CHIMENEAS	%	%
0 < %O ₂ < 1	19	76%	84%
1 ≤ %O ₂ < 2,5	2	8%	
2,5 ≤ %O ₂ < 5	0	0%	
5 ≤ %O ₂ < 10	2	8%	16%
10 ≤ %O ₂ < 21	2	8%	

Vertedero – V1

Debido a que no existen puntos de extracción para el muestreo de biogás en este vertedero se hizo un sondeo de baja profundidad (aprox. 2,5 m), y de 70 cm de ancho x 70 cm de largo para facilitar la instalación de la chimenea de muestreo. Se procedió excavando con ayuda de maquinaria especial para instalar tubería perforada y realizar una extracción forzada con un soplador (marca RESUN - modelo GF120) regulando el flujo de extracción, lo anterior, buscando optimizar la cantidad y calidad del biogás extraído (ver detalle en el Anexo 3) Por la compactación de los residuos que llevan entre 1 y 5 años de haber sido depositados en esta zona, así como por la alta presencia de plásticos y cauchos, la excavación del punto de muestreo resulta ser una tarea bastante difícil y dispendiosa, aún con la ayuda de la retroexcavadora. Por esas condiciones solo fue posible acondicionar un punto de muestreo.

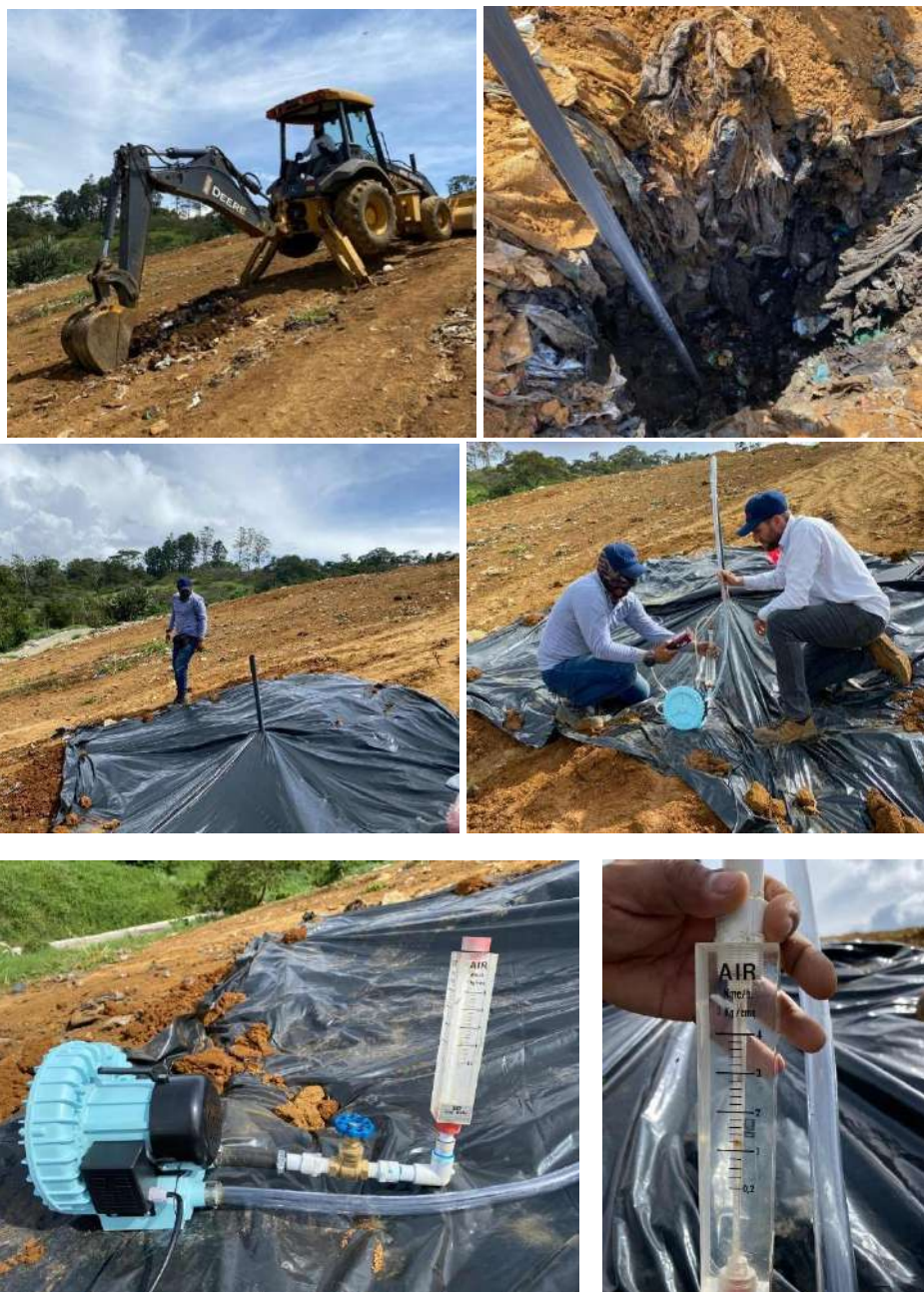


Imagen 18. Campaña de medición V1.

Cuadro 41. Datos de la campaña de medición del V1.

Medición	Coordenadas		CH ₄ %	H ₂ S ppm	CO ₂ %	O ₂ %	Flujo (m ³ /h)	Observaciones y hallazgos
	Norte	Oeste						
1	09°52'57"	83°40'59"	15,40 %	3	12,21 %	12,55 %	0,3	Gas casi inodoro por el bajo contenido de H ₂ S y alta contenido de aire. T° entre 25-30°C.
2			13,79 %	3	12,02 %	12,59 %	0,6	
3			12,61 %	3	11,47 %	13,08 %	0,9	

4			12,21 %	2	11,29 %	13,29 %	2,3	Zona compactada con cobertura final de tierra arcillosa extraída en el predio del vertedero. Zona de muestreo < 5 años de uso
5			11,78 %	3	11,11 %	13,57 %	2,9	

Como se puede evidenciar, el biogás muestreado tiene muy poca concentración de CH₄ (10 a 15%) y una alta concentración de O₂% (12,5 a 13,5%), correspondiendo a un contenido de aire ~ 65%. La ausencia de una red de captación de biogás, así como de drenaje de lixiviados desde la base del vertedero vuelve muy compleja la extracción de un biogás de calidad adecuada para ser aprovechable. Es muy probable que la inversión y complejidad técnica para la adecuación del sitio a las condiciones requeridas para una correcta operación (drenajes lixiviados, captación activa de biogás) vuelva este tipo de sitios inviable técnica y económicamente para el desarrollo de un proyecto de captación y valorización de biogás.

A continuación, se presenta un compilado de los valores de los diferentes parámetros caracterizados en los rellenos sanitarios seleccionados

Cuadro 42. Comparación de resultados de los rellenos sanitarios.

Parámetro	R1	R2	R3	R4
%CH ₄	46,49 ± 15,32	49,65 ± 10,03	49,68 ± 6,20	51,29 ± 13,54
%CO ₂	38,93 ± 13,30	41,85 ± 6,61	42,78 ± 3,83	39,02 ± 9,81
%O ₂	6,19 ± 8,56	1,86 ± 3,12	1,21 ± 0,89	2,21 ± 4,52
H ₂ S ppm	158,71 ± 146,65	198,40 ± 200,15	310,21 ± 348,51	309,24 ± 196,58
Temperatura (°C)	41,90 ± 4,71	45,71 ± 4,64	28,31 ± 4,86	37,89 ± 3,55
Flujo (m ³ /h) *	28,63 ± 35,62	67,26 ± 37,44	200,49 ± 64,07	33,83 ± 44,46

* Flujo por chimenea y/o punto de muestreo

La composición recomendada de CH₄ (metano), CO₂ (dióxido de carbono), O₂ (oxígeno) y H₂S (sulfuro de hidrógeno) en el biogás puede variar según la tecnología de valorización utilizada y los estándares regulatorios locales. Sin embargo, a continuación, se explican los rangos generalmente aceptados para la valorización eficiente del biogás:

1. CH₄ (metano): El metano es el componente más valioso del biogás para la generación de energía. Se recomienda que el contenido de metano sea al menos del 50% en volumen, aunque valores más altos (alrededor del 60-70% o más) son ideales para maximizar la eficiencia energética.

2. CO₂ (dióxido de carbono): El contenido de CO₂ es importante ya que el exceso de CO₂ reduce el valor energético del biogás. Un rango típico para el contenido de CO₂ es del 30-40% en volumen, aunque una cantidad menor es preferible para un biogás de mayor calidad.
3. O₂ (oxígeno): La presencia de oxígeno en el biogás puede ser perjudicial ya que afecta el poder calorífico y la eficiencia de la combustión. Se recomienda que el contenido de oxígeno sea lo más bajo posible, generalmente inferior al 2% en volumen.
4. H₂S (sulfuro de hidrógeno): La concentración de H₂S debe ser lo más baja posible debido a sus efectos corrosivos, tóxicos y perjudiciales para la calidad del biogás. Se suele establecer un límite máximo de alrededor de 100 - 200 ppm(vol) (partes por millón en volumen) de H₂S en el biogás para la mayoría de las aplicaciones.

Se considera que dichos resultados (Cuadro 42) son evidencia del buen estado de los rellenos en cuanto a la degradación de los residuos. Típicamente, un relleno sanitario comienza a producir biogás de 6 a 12 meses después de depositados los residuos, cuando las condiciones anaeróbicas ya están establecidas y el consorcio de microorganismos productores de metano comienzan a descomponer los residuos y a generar biogás. Es importante resaltar que de las 87 chimeneas analizadas en este estudio el 21% reportaron fallas, fugas, taponamientos y arrastre de lixiviados, de las cuales, 14 pertenecientes al relleno R1 y 2 al relleno R2

Finalmente, la falta de puntos de extracción de biogás en el vertedero puede afectar la precisión de la medición. Pueden existir factores como ingreso de aire y dilución del biogás, debido a la poca profundidad del punto colector instalado. Un punto de extracción de biogás en un vertedero o relleno sanitario debe ser lo suficientemente profundo (rango de profundidad ideal según literatura) para capturar el biogás generado por la descomposición de los residuos orgánicos.

Para la correcta operación de esta extracción, durante la operación del relleno estos puntos deben ser instalados previo a la disposición y extendidos a medida que aumenta la altura de los residuos todo en pertinencia con los planos de diseño.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede concluir de forma preliminar que tanto la composición como la cantidad de biogás producido en los 4 rellenos analizados es positiva y posibilitaría el desarrollo de proyectos de valorización en estos sitios. En efecto, el CH₄ se encuentra cerca de un 50% en promedio, con margen de mejora implementando sistemas de monitoreo y operación más finos para optimizar la captura de una mezcla más rica en CH₄. El H₂S se encuentra en cantidades ya muy bajas (160 a 310 ppm(v)) por lo cual un sistema sencillo de remoción por carbón activado sería suficiente para cumplir con los requerimientos de calidad de los equipos de valorización energética (< 100 – 200 ppm(v)). En R1 se observa que el CH₄ es < 50% y que el aire está alrededor del 30% (6% O₂ + ~24% N₂), por lo cual se evidencia la necesidad de mejorar la hermeticidad del sistema de captación y de cobertura final para limitar al máximo las entradas de aire y poder así mejorar el contenido de CH₄.

4.2. Proyección teórica de producción de biogás

Una vez recolectada la información solicitada a los diferentes sitios de disposición final de residuos de Costa Rica seleccionados, se procedió a modelar la producción de biogás teórica para cada sitio usando los dos modelos: LandGEM e IPCC. Usar los dos modelos tiene como propósito comparar los resultados y seleccionar aquel que se ajuste mejor a las condiciones reales de los sitios.

4.2.1. Modelo LandGEM

Tomando en cuenta que los sitios de Costa Rica no cumplen con los requisitos del CAA o con las regulaciones federales estadounidenses, de manera general se utilizan los valores predeterminados del inventario para los parámetros del modelo (k y L_0).

A continuación, se presenta para cada sitio los datos de entradas usados para la modelación y el respecto resultado.

Relleno Sanitario – R1

Los datos de entrada suministrados al modelo son los siguientes:

Cuadro 43. Datos de entrada y parámetros modelo LandGEM – R1

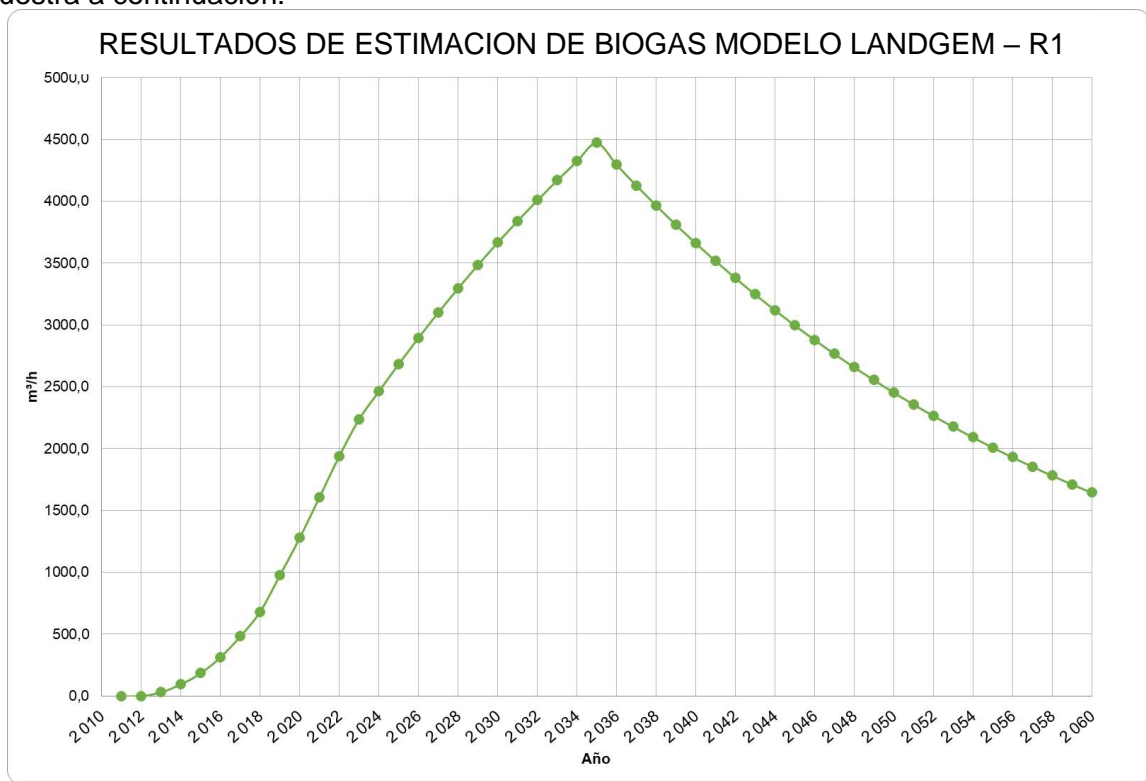
Características de R1		
Año de apertura	2011	
Año de clausura	2034	
Precipitación promedio anual	2 699 mm/año	
Capacidad de diseño (al cierre del año 2023)	6 580 263,36 T	
Parámetros del modelo LandGEM		
Constante de generación de metano (k)	0,04 año ⁻¹	
Capacidad potencial de generación de metano (L_0)	100 m³/T	
Contenido de metano (%vol)	46,5%	
Residuos depositados (T/año)	2011	1 136,88
	2012	32 187,29
	2013	67 951,31
	2014	96 552,19
	2015	141 496,08
	2016	187 052,71
	2017	225 540,21
	2018	332 657,00
	2019	354 139,86
	2020	393 001,83
	2021	410 256,31
	2022	387 785,57
	2023	324 882,86
	2024	329 602,14
	2025	329 602,14
2026	329 602,14	
2027	329 602,14	

	2028	329 602,14
	2029	329 602,14
	2030	329 602,14
	2031	329 602,14
	2032	329 602,14
	2033	329 602,14
	2034	329 602,14

Considerando una precipitación promedio anual superior a la establecida para zonas áridas, se toman los valores de los parámetros predeterminados del inventario para un sitio de disposición convencional.

Las tasas de disposición anual de residuos son proporcionadas mediante la encuesta para los años 2011 – 2023 (a mayo). Los valores de disposición restante hasta el año de clausura son entonces estimados a partir de la capacidad de diseño del relleno sanitario proporcionada para los años 2024 – 2034 considerando un valor constante anual.

Los valores introducidos permiten estimar la cantidad de biogás producido tal y como se muestra a continuación:



Gráfica 22. Producción de biogás modelo LandGEM para R1

Relleno Sanitario – R2

Los datos de entrada suministrados al modelo son los siguientes:

Cuadro 44. Datos de entrada y parámetros modelo LandGEM R2

Características de R2

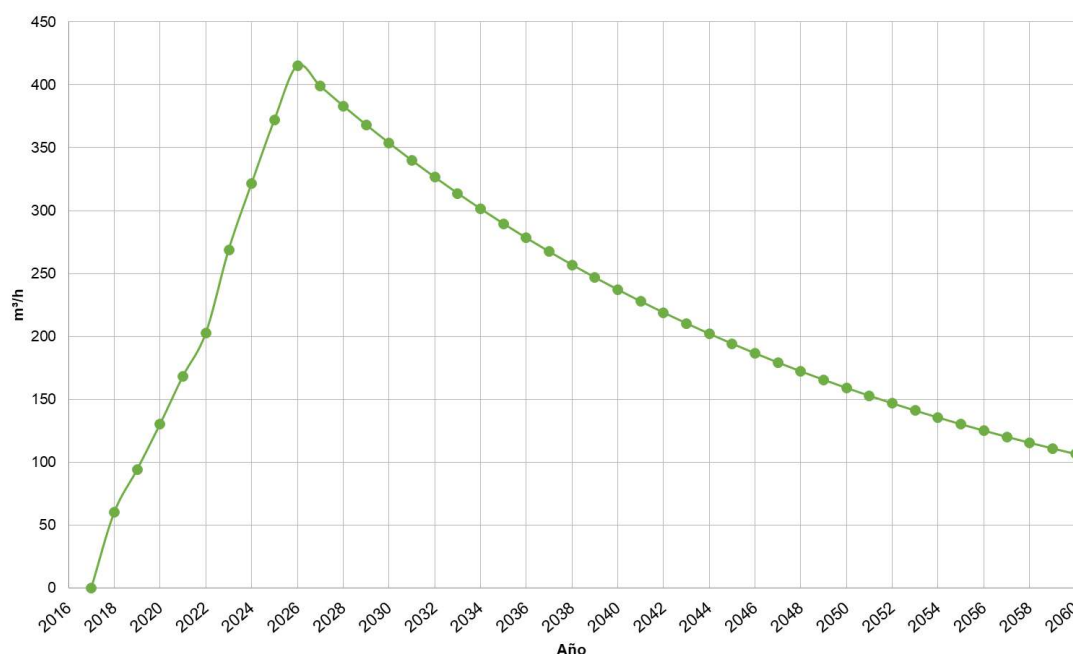
Año de apertura	2017	
Año de clausura	2025	
Precipitación promedio anual	2 007 mm/año	
Capacidad de diseño (al cierre del año 2022)	302 710,88 T	
Parámetros del modelo LandGEM		
Constante de generación de metano (k)	0,04 año ⁻¹	
Capacidad potencial de generación de metano (L_0)	100 m³/T	
Contenido de metano (%vol)	49,7%	
Residuos depositados (T/año)	2017	66 475,00
	2018	40 410,00
	2019	44 010,00
	2020	47 884,00
	2021	45 248,00
	2022	82 100,00
	2023	70 146,00
	2024	70 146,00
	2025	63 796,00

Considerando una precipitación promedio anual superior a la establecida para zonas áridas, se toman los valores de los parámetros predeterminados del inventario para un sitio de disposición convencional.

Las tasas de disposición anual de residuos son proporcionadas mediante la encuesta para los años 2011 – 2022. Los valores de disposición restante hasta el año de clausura son entonces estimados a partir de la capacidad de diseño de la celda 2 de R2, la cual permite según las estimaciones realizadas una operación hasta el año 2025.

Los valores introducidos permiten estimar la cantidad de biogás producido tal y como se muestra a continuación

RESULTADOS DE ESTIMACION DE BIOGAS MODELO LANDGEM – R2



Gráfica 23. Producción de biogás modelo LandGEM para R2

Relleno Sanitario – R3

Los datos de entrada suministrados al modelo son los siguientes:

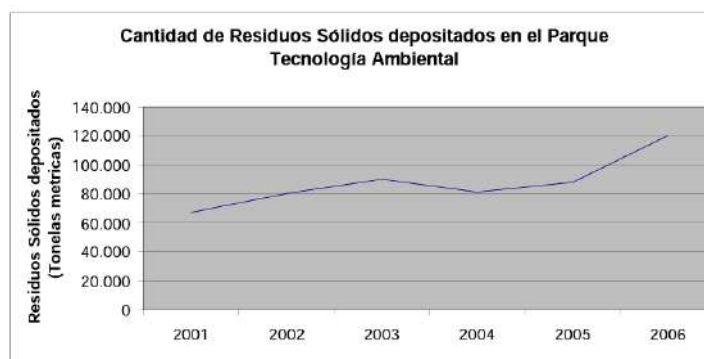
Cuadro 45. Datos de entrada y parámetros modelo LandGEM R3

Características de R3		
Año de apertura	2000	
Año de clausura	2027	
Precipitación promedio anual	2 639 mm/año	
Parámetros del modelo LandGEM		
Constante de generación de metano (k)	0,04 año ⁻¹	
Capacidad potencial de generación de metano (L_0)	100 m³/T	
Contenido de metano (%vol)	49,7%	
Residuos depositados (T/año)	2000	67 520,00
	2001	67 520,00
	2002	81 418,00
	2003	90 354,00
	2004	81 418,00
	2005	88 368,00
	2006	120 638,00
	2007	32 670,66
	2008	32 670,66
	2009	212 627,84

	2010	415 622,61
	2011	399 245,60
	2012	360 998,89
	2013	313 385,17
	2014	293 044,58
	2015	354 739,71
	2016	361 108,60
	2017	312 243,94
	2018	223 613,91
	2019	205 542,18
	2020	193 992,64
	2021	188 944,82
	2022	186 280,76
	2023	186 280,76
	2024	186 280,76
	2025	186 280,76
	2026	186 280,76
	2027	186 280,76

Se escogen los valores de los parámetros para sitios de disposición convencionales, puesto que el sitio de R3 presenta un valor de precipitación promedio anual superior al establecido para áreas áridas.

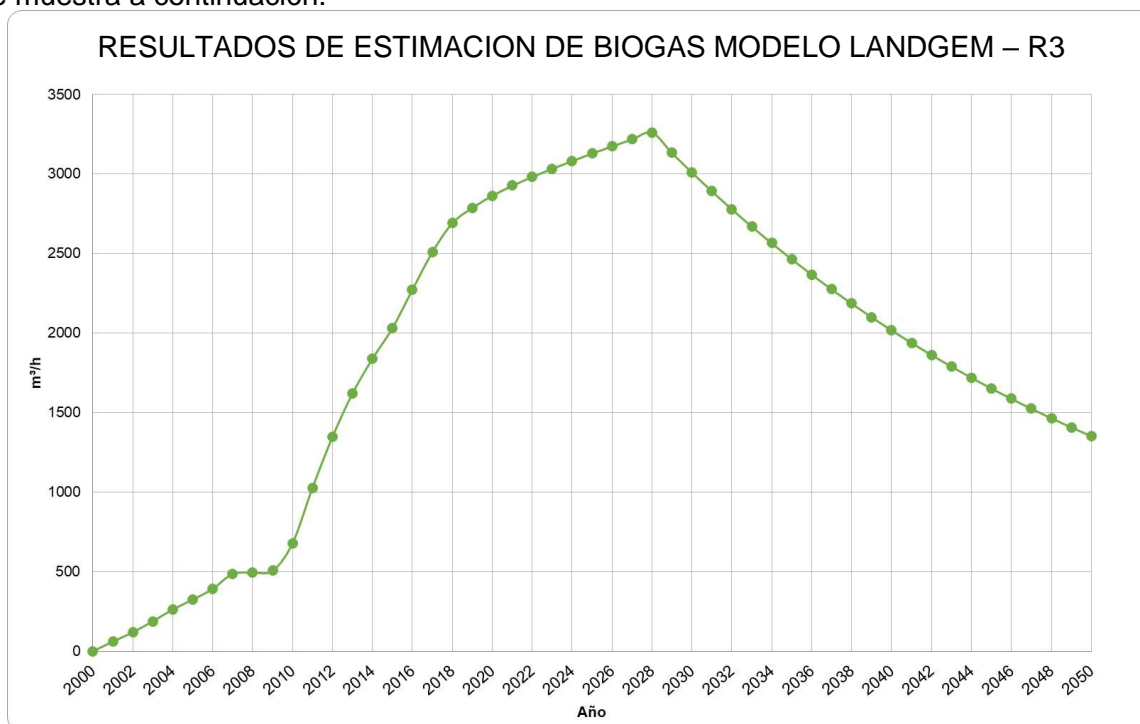
Con el apoyo de Cónica y su relación con EBI, se lograron conseguir los datos de disposición de los últimos 15 años (2008 – 2022). Adicionalmente, con base en un reporte de Estado De la Nación con datos de disposición de residuos se obtuvieron las tasas anuales de disposición para los años 2001 – 2006.



Gráfica 24. Cantidad de residuos sólidos depositados en R3

Considerando que el historial de disposición de residuos anuales en el relleno sanitario proporcionado por la entidad competente no contiene la información para todos los años de operación del relleno sanitario ni la capacidad de diseño del sitio, los valores faltantes serán los valores del primer año reportado (2001 y 2008) para los años anteriores (2000 y 2007) y los del último año reportado (2022) para los años posteriores a este hasta su clausura (2023 – 2027).

Los valores introducidos permiten estimar la cantidad de biogás teórica producida tal y como se muestra a continuación:



Gráfica 25. Producción de biogás modelo LandGEM para R3

Relleno Sanitario – R4

Los datos de entrada suministrados al modelo son los siguientes:

Cuadro 46. Datos de entrada y parámetros modelo LandGEM R4

Características de R4		
Año de apertura	2007	
Año de clausura	2030	
Capacidad de diseño (a octubre del 2014)	7 700 000 T	
Precipitación promedio anual	3 378 mm/año	
Parámetros del modelo LandGEM		
Constante de generación de metano (k)	0,04 año ⁻¹	
Capacidad potencial de generación de metano (L_0)	100 m³/T	
Contenido de metano (%vol)	50%	
Residuos depositados (T/año)	2007	14 047,75
	2008	14 047,75
	2009	98 685,23
	2010	169 880,83
	2011	228 230,41
	2012	289 844,96
	2013	317 512,10
	2014	322 559,82

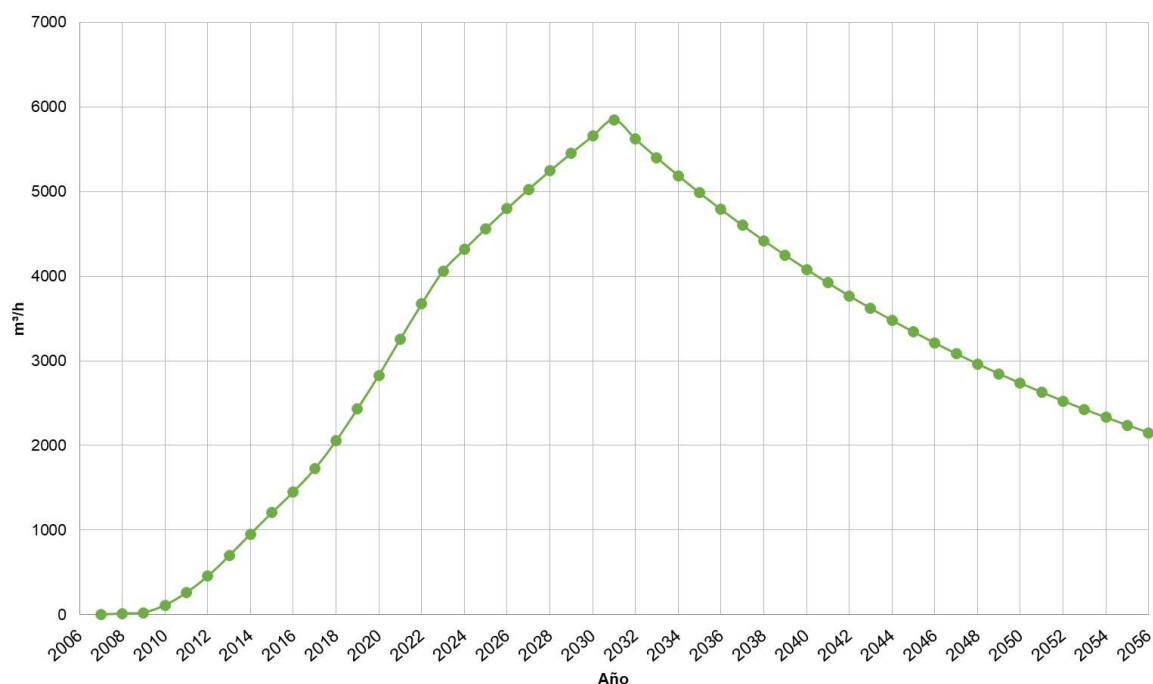
	2015	325 040,50
	2016	367 135,77
	2017	445 060,89
	2018	510 771,27
	2019	550 598,81
	2020	596 577,39
	2021	607 375,12
	2022	593 221,28
	2023	463 027,37
	2024	463 027,37
	2025	463 027,37
	2026	463 027,37
	2027	463 027,37
	2028	463 027,37
	2029	463 027,37
	2030	463 027,37

Se escogen los valores de los parámetros para sitios de disposición convencionales, puesto que el sitio de R4 presenta un valor de precipitación promedio anual superior al establecido para áreas áridas.

Con el apoyo de Cónica y su relación con EBI, se lograron conseguir los datos de disposición de los últimos 15 años (2008 – 2022). Los valores de disposición restante hasta el año de clausura son entonces estimados a partir de la capacidad de diseño del relleno sanitario proporcionada al 2014 considerando un valor constante anual.

Los valores introducidos permiten estimar la cantidad de biogás teórica producida tal y como se muestra a continuación:

RESULTADOS DE ESTIMACION DE BIOGAS MODELO LANDGEM – R4



Gráfica 26. Producción de biogás modelo LandGEM para R4

Vertedero – V1

Los datos de entrada suministrados al modelo son los siguientes:

Cuadro 47. Datos de entrada y parámetros modelo LandGEM para V1

Características de V1		
Año de apertura	1997	
Año de clausura	2023	
Precipitación promedio anual	3 600 mm/año	
Parámetros del modelo LandGEM		
Constante de generación de metano (k)	0,04 año ⁻¹	
Capacidad potencial de generación de metano (L_0)	100 m³/T	
Contenido de metano (%vol)	45%	
Residuos depositados (T/año)	1997	8 671,00
	1998	8 979,00
	1999	9 285,00
	2000	9 586,00
	2001	9 780,00
	2002	9 947,00
	2003	10 106,00
	2004	10 270,00
	2005	10 431,00
	2006	10 591,00

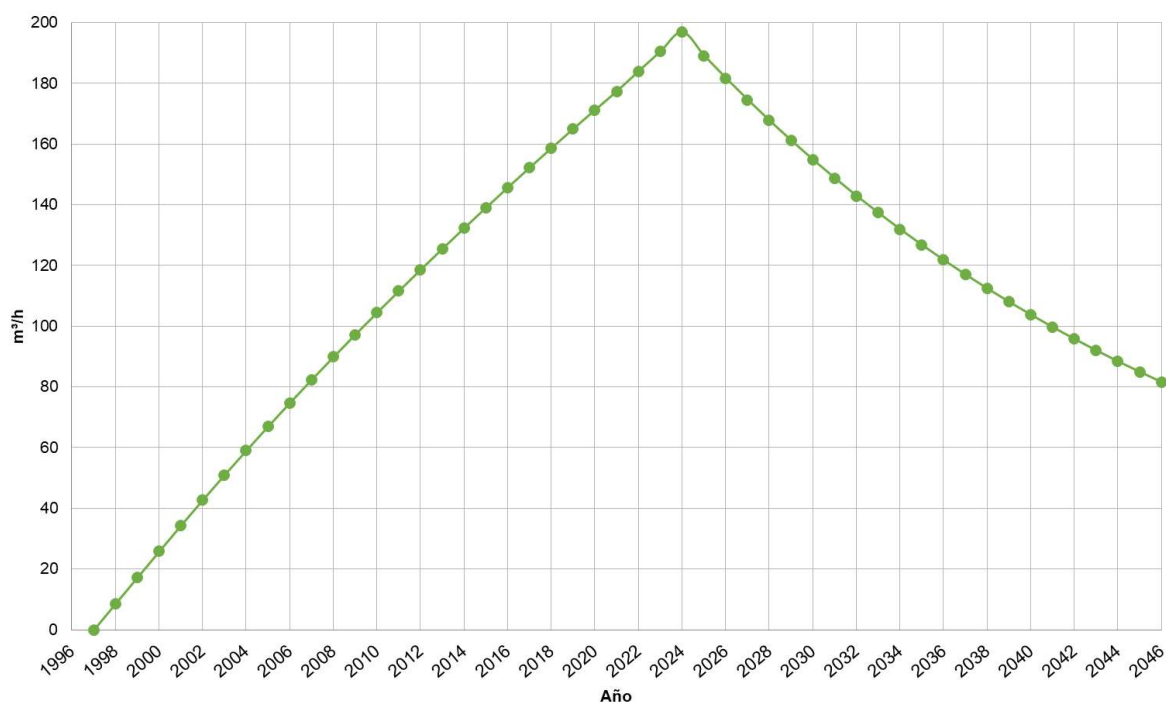
	2007	10 754,00
	2008	10 915,00
	2009	11 088,00
	2010	11 263,00
	2011	11 422,00
	2012	11 597,00
	2013	11 771,00
	2014	11 949,00
	2015	12 122,00
	2016	12 279,00
	2017	12 435,00
	2018	12 591,00
	2019	12 749,00
	2020	12 903,00
	2021	13 610,00
	2022	13 763,00
	2023	13 909,00

Considerando una precipitación promedio anual superior a la establecida para zonas áridas, se toman los valores de los parámetros predeterminados del inventario para un sitio de disposición convencional.

El V1 presenta una orden de cierre a febrero 2024, razón por la cual se considera el 2023 como el año de clausura. Las tasas de disposición anual de residuos son proporcionadas por la Municipalidad mediante las proyecciones de los residuos ingresados al vertedero municipal desde el año 1997 hasta el 2023 para el plan de cierre técnico.

Los valores introducidos permiten estimar la cantidad de biogás teórica producida tal y como se muestra a continuación:

RESULTADOS DE ESTIMACION DE BIOGAS MODELO LANDGEM – V1



Gráfica 27. Producción de biogás modelo LandGEM para V1

4.2.2. Modelo IPCC

Tomando en cuenta que algunas características de los sitios no fueron detalladas y que **los valores de los parámetros del modelo IPCC son diferentes a los del modelo LandGEM**, los datos de entrada de cada sitio serán detallados nuevamente

Los valores de composición de los residuos y el contenido de metano del biogás producido provienen de la caracterización realizada en cada uno de los sitios y descrita en las secciones 4.1.1. y 4.1.2 respectivamente.

Relleno Sanitario – R1

Los datos de entrada suministrados según el modelo IPCC son los siguientes:

Cuadro 48. Datos de entrada y parámetros modelo IPCC R1

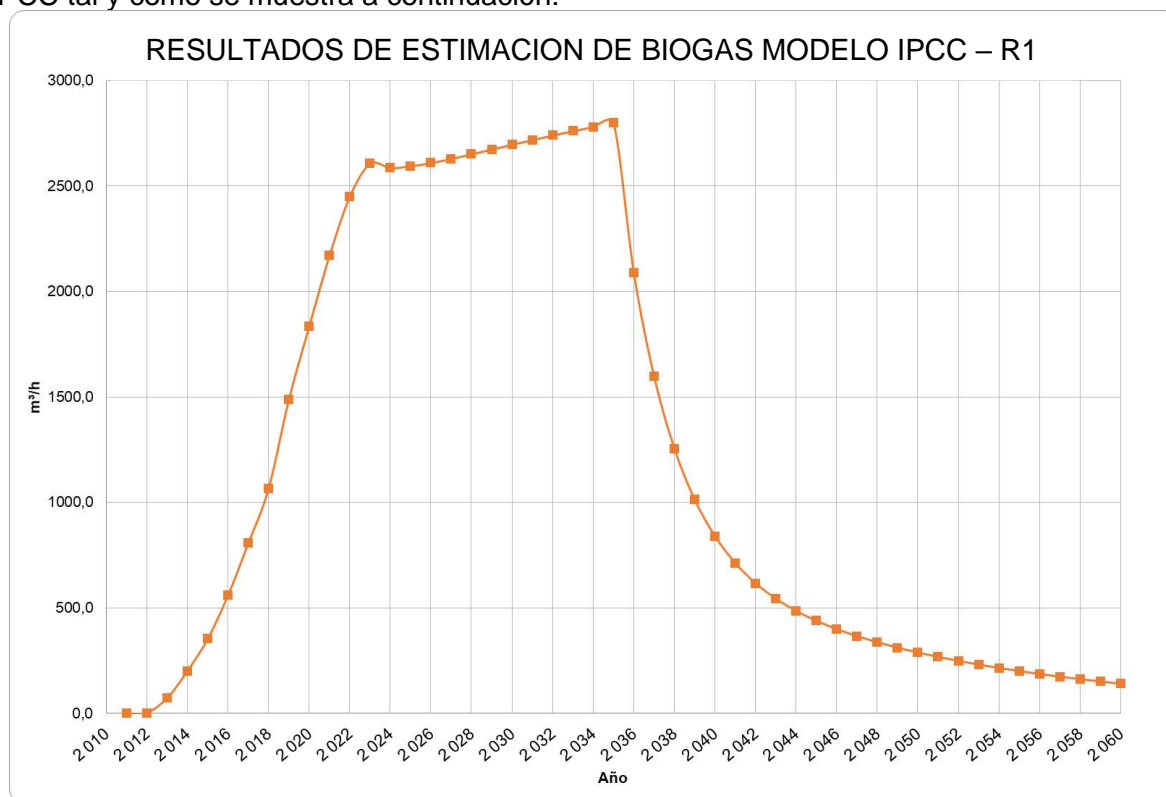
Características de R1	
Año de apertura	2011
Año de clausura	2034
Temperatura promedio anual (MAT)	21°C
Precipitación promedio anual (MAP)	2 699 mm/año
Evapotranspiración potencial (PET)	1 205 mm/año
MAP/PET	2,2
Capacidad de diseño (al cierre del año 2023)	6 580 263,36 T
Parámetros del modelo IPCC	

Composición de los residuos, Carbono orgánico degradable (DOC) y Constante de generación de metano (k)	Tipo de residuo	w_i (%)	DOC (%)	k (año ⁻¹)
	Residuos orgánicos	37,1%	0,15	0,4
	Residuos de poda	0,0%	0,2	0,17
	Papel/cartón	7,5%	0,4	0,07
	Madera	0,0%	0,43	0,035
	Textiles	0,0%	0,24	0,07
	Pañales	0,0%	0,24	0,17
	Plásticos, vidrio, inertes y otros	55,4%	-	-
carbono orgánico degradable que se descompone (DOC_f)	0,5			
Factor de corrección de metano (MCF)	1			
Fracción de metano (F)	46,5 %			
Factor de oxidación (OX)	0			
Residuos depositados (T/año)	2011	1 136,88		
	2012	32 187,29		
	2013	67 951,31		
	2014	96 552,19		
	2015	141 496,08		
	2016	187 052,71		
	2017	225 540,21		
	2018	332 657,00		
	2019	354 139,86		
	2020	393 001,83		
	2021	410 256,31		
	2022	387 785,57		
	2023	324 882,86		
	2024	329 602,14		
	2025	329 602,14		
	2026	329 602,14		
	2027	329 602,14		
	2028	329 602,14		
	2029	329 602,14		
	2030	329 602,14		
	2031	329 602,14		
	2032	329 602,14		
	2033	329 602,14		
	2034	329 602,14		

Considerando la temperatura y la precipitación promedio anual del sitio, R1 puede ser clasificado como sitio tropical húmedo y mojado. Considerando esta clasificación y dependiendo el tipo de residuo, los valores de la constante de generación de metano son cómo se muestran en el Cuadro 48.

Adicionalmente, teniendo en cuenta el manejo que se le da al sitio (relleno sanitario) se asignan los valores a los factores de corrección y oxidación respectivamente.

Los valores introducidos permiten estimar la cantidad de biogás producido según el modelo IPCC tal y como se muestra a continuación:



Gráfica 28. Producción de biogás modelo IPCC para R1

Relleno Sanitario – R2

Los datos de entrada según el modelo IPCC son los siguientes:

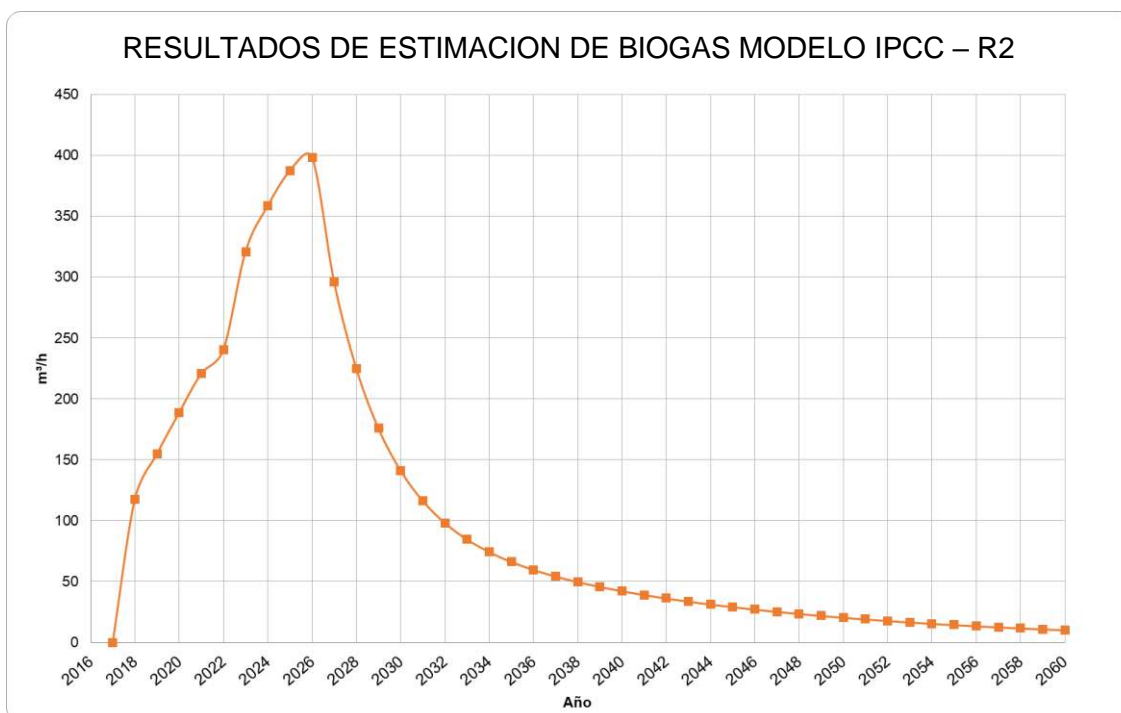
Cuadro 49. Datos de entrada y parámetros modelo IPCC R2

Características de R2				
Año de apertura	2017			
Año de clausura	2025			
Temperatura promedio anual (MAT)	26°C			
Precipitación promedio anual (MAP)	2 007 mm/año			
Evapotranspiración potencial (PET)	1 384 mm/año			
MAP/PET	1,5			
Capacidad de diseño (al cierre del año 2022)	302 710,88 T			
Parámetros del modelo IPCC				
Composición de los residuos, Carbono orgánico degradable (DOC) y Constante de generación de metano (<i>k</i>)	Tipo de residuo	<i>w_i</i> (%)	DOC (%)	<i>k</i> (año ⁻¹)
	Residuos orgánicos	26,3%	0,15	0,4
	Residuos de poda	0,0%	0,2	0,17
	Papel/cartón	8,4%	0,4	0,07
	Madera	0,0%	0,43	0,035
	Textiles	0,0%	0,24	0,07
	Pañales	0,0%	0,24	0,17

	Plásticos, vidrio, inertes y otros	65,2%	-	-
carbono orgánico degradable que se descompone (DOC_f)	0,5			
Factor de corrección de metano (MCF)	1			
Fracción de metano (F)	49,7 %			
Factor de oxidación (OX)	0			
Residuos depositados (T/año)	2017	66 475,00		
	2018	40 410,00		
	2019	44 010,00		
	2020	47 884,00		
	2021	45 248,00		
	2022	82 100,00		
	2023	70 146,00		
	2024	70 146,00		
	2025	63 796,00		

Considerando la temperatura y la precipitación promedio anual del sitio, R2 puede ser clasificado como un sitio tropical húmedo y mojado. Considerando esta clasificación y dependiendo el tipo de residuo, los valores de la constante de generación de metano son definidos.

Adicionalmente, teniendo en cuenta el manejo que se le da al sitio (relleno sanitario) se asignan los valores a los factores de corrección y oxidación respectivamente. A continuación, se presentan los resultados obtenidos por el modelo IPCC Waste Model para R2:



Gráfica 29. Producción de biogás modelo IPCC R2

Relleno Sanitario – R3

Los datos de entrada suministrados según el modelo IPCC son los siguientes:

Cuadro 50. Datos de entrada y parámetros modelo IPCC R3

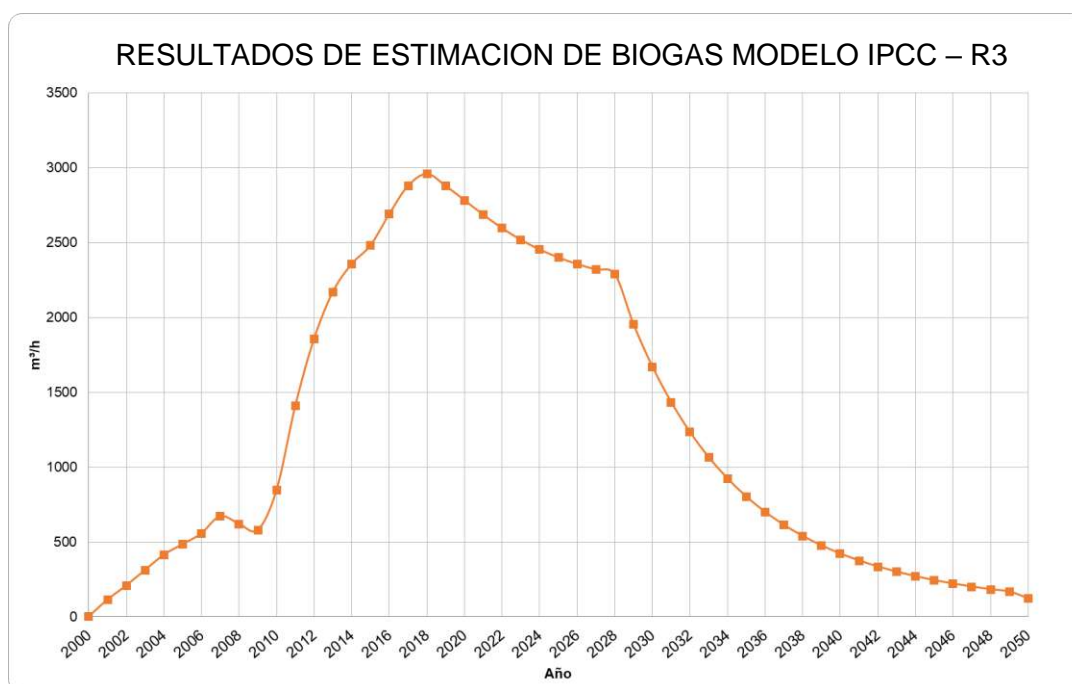
Características de R3				
Año de apertura	2000			
Año de clausura	2027			
Temperatura promedio anual (MAT)	20°C			
Precipitación promedio anual (MAP)	2 639 mm/año			
Evapotranspiración potencial (PET)	1 275 mm/año			
MAP/PET	2,1			
Parámetros del modelo IPCC				
Composición de los residuos, Carbono orgánico degradable (DOC) y Constante de generación de metano (<i>k</i>)	Tipo de residuo	<i>w_i</i> (%)	DOC (%)	<i>k</i> (año ⁻¹)
	Residuos orgánicos	51,7%	0,15	0,185
	Residuos de poda	0,0%	0,2	0,1
	Papel/cartón	5,7%	0,4	0,06
	Madera	0,0%	0,43	0,03
	Textiles	0,0%	0,24	0,06
	Pañales	0,0%	0,24	0,1
	Plásticos, vidrio, inertes y otros	42,6%	-	-
carbono orgánico degradable que se descompone (<i>DOC_f</i>)	0,5			
Factor de corrección de metano (MCF)	1			
Fracción de metano (F)	49,7%			
Factor de oxidación (OX)	0			
Residuos depositados (T/año)	2000	67 520,00		
	2001	67 520,00		
	2002	81 418,00		
	2003	90 354,00		
	2004	81 418,00		
	2005	88 368,00		
	2006	120 638,00		
	2007	32 670,66		
	2008	32 670,66		
	2009	212 627,84		
	2010	415 622,61		
	2011	399 245,60		
	2012	360 998,89		
	2013	313 385,17		
	2014	293 044,58		
	2015	354 739,71		
	2016	361 108,60		
	2017	312 243,94		
	2018	223 613,91		
	2019	205 542,18		
	2020	193 992,64		
	2021	188 944,82		
	2022	186 280,76		
	2023	186 280,76		
	2024	186 280,76		
	2025	186 280,76		

	2026	186 280,76
	2027	186 280,76

Considerando la temperatura y la precipitación promedio anual del sitio, R3 puede ser clasificado como un sitio húmedo. Considerando esta clasificación y dependiendo el tipo de residuo, los valores de la constante de generación de metano son definidos.

Adicionalmente, teniendo en cuenta el manejo que se le da al sitio (relleno sanitario) se asignan los valores a los factores de corrección y oxidación respectivamente. Al igual que como para el modelo LandGEM y considerando que el historial de disposición de residuos anuales en el relleno sanitario proporcionado por la entidad competente no contiene la información para todos los años de operación del relleno sanitario ni la capacidad de diseño del sitio, los valores faltantes son complementados a partir de la información suministrada por EBI.

Los valores introducidos permiten estimar la cantidad de biogás producido según el modelo IPCC tal y como se muestra a continuación:



Gráfica 30. Producción de biogás modelo IPCC R3

Relleno Sanitario – R4

Los datos de entrada suministrados según el modelo IPCC son los siguientes:

Cuadro 51. Datos de entrada y parámetros modelo IPCC de R4

Características de R4	
Año de apertura	2007
Año de clausura	2030
Temperatura promedio anual (MAT)	20°C
Precipitación promedio anual (MAP)	3 378 mm/año

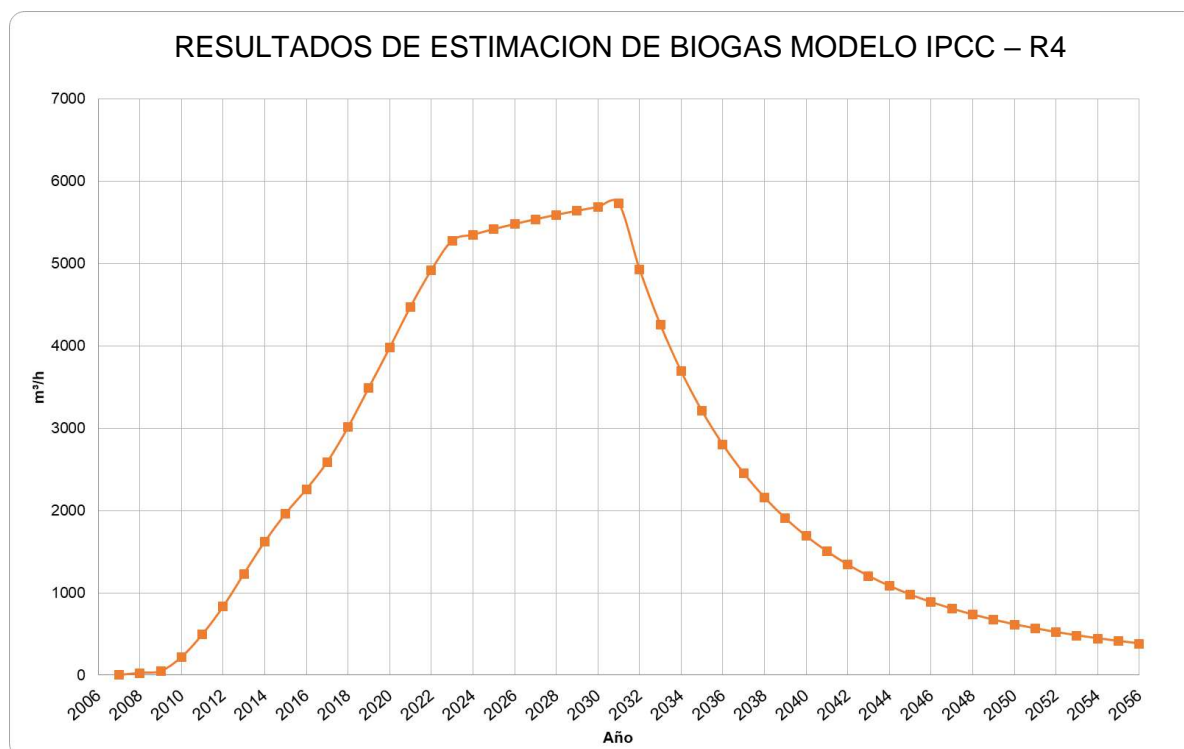
Evapotranspiración potencial (PET)	1 253 mm/año			
MAP/PET	2,7			
Capacidad de diseño (a octubre del 2014)	7 700 000 T			
Parámetros del modelo IPCC				
Composición de los residuos, Carbono orgánico degradable (DOC) y Constante de generación de metano (<i>k</i>)	Tipo de residuo	<i>w_i</i> (%)	DOC (%)	<i>k</i> (año ⁻¹)
	Residuos orgánicos	52,0%	0,15	0,185
	Residuos de poda	0,0%	0,2	0,1
	Papel/cartón	10,1%	0,4	0,06
	Madera	0,0%	0,43	0,03
	Textiles	0,0%	0,24	0,06
	Pañales	0,0%	0,24	0,1
	Plásticos, vidrio, inertes y otros	37,9%	-	-
carbono orgánico degradable que se descompone (<i>DOC_f</i>)	0,5			
Factor de corrección de metano (MCF)	1			
Fracción de metano (F)	51,3%			
Factor de oxidación (OX)	0			
Residuos depositados (T/año)	2007	14 047,75		
	2008	14 047,75		
	2009	98 685,23		
	2010	169 880,83		
	2011	228 230,41		
	2012	289 844,96		
	2013	317 512,10		
	2014	322 559,82		
	2015	325 040,50		
	2016	367 135,77		
	2017	445 060,89		
	2018	510 771,27		
	2019	550 598,81		
	2020	596 577,39		
	2021	607 375,12		
	2022	593 221,28		
	2023	463 027,37		
	2024	463 027,37		
	2025	463 027,37		
	2026	463 027,37		
	2027	463 027,37		
	2028	463 027,37		
	2029	463 027,37		
	2030	463 027,37		

Considerando la temperatura y la precipitación promedio anual del sitio, R4 puede ser clasificado como un sitio húmedo. Considerando esta clasificación y dependiendo el tipo de residuo, los valores de la constante de generación de metano son definidos.

Adicionalmente, teniendo en cuenta el manejo que se le da al sitio (relleno sanitario) se asignan los valores a los factores de corrección y oxidación respectivamente.

Con el apoyo de Cónica y su relación con EBI, se lograron conseguir los datos de disposición de los últimos 15 años (2008 – 2022). Los valores de disposición restante hasta el año de clausura son entonces estimados a partir de la capacidad de diseño del relleno sanitario proporcionada al 2014 considerando un valor constante anual.

Los valores introducidos permiten estimar la cantidad de biogás producido según el modelo IPCC tal y como se muestra a continuación:



Gráfica 31. Producción de biogás modelo IPCC de R4

Vertedero – V1

Los datos de entrada de V1 suministrados según el modelo IPCC son los siguientes:

Cuadro 52. Datos de entrada y parámetros modelo IPCC V1

Características de V1				
Año de apertura	1997			
Año de clausura	2023			
Temperatura promedio anual (MAT)	19,8°C			
Precipitación promedio anual (MAP)	3 600 mm/año			
Evapotranspiración potencial (PET)	1 238 mm/año			
MAP/PET	2,9			
Parámetros del modelo IPCC				
Composición de los residuos, Carbono orgánico degradable (DOC) y Constante de generación de metano (<i>k</i>)	Tipo de residuo	<i>w_i</i> (%)	DOC (%)	<i>k</i> (año ⁻¹)
	Residuos orgánicos	34,7%	0,15	0,185
	Residuos de poda	0,0%	0,2	0,1
	Papel/cartón	4,1%	0,4	0,06
	Madera	0,0%	0,43	0,03
	Textiles	0,0%	0,24	0,06

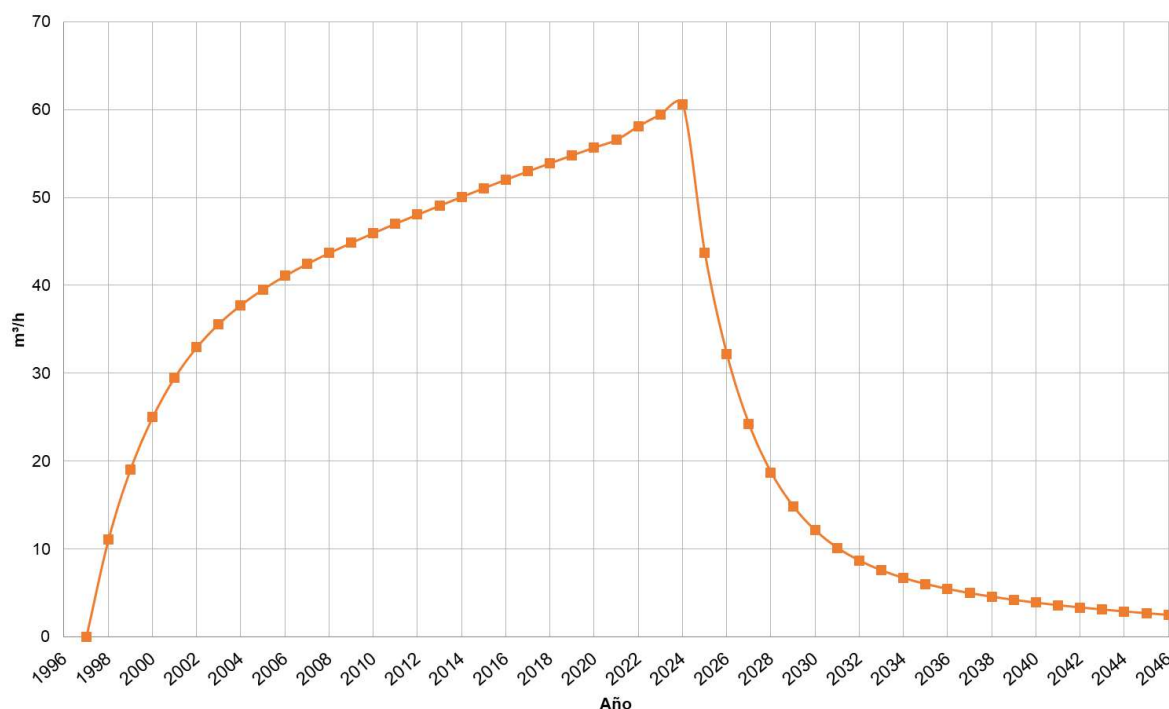
	Pañales	0,0%	0,24	0,1
	Plásticos, vidrio, inertes y otros	61,3%	-	-
carbono orgánico degradable que se descompone (DOC_f)	0,5			
Factor de corrección de metano (MCF)	0,6			
Fracción de metano (F)	45%			
Factor de oxidación (OX)	0			
Residuos depositados (T/año)	1997	8 671,00		
	1998	8 979,00		
	1999	9 285,00		
	2000	9 586,00		
	2001	9 780,00		
	2002	9 947,00		
	2003	10 106,00		
	2004	10 270,00		
	2005	10 431,00		
	2006	10 591,00		
	2007	10 754,00		
	2008	10 915,00		
	2009	11 088,00		
	2010	11 263,00		
	2011	11 422,00		
	2012	11 597,00		
	2013	11 771,00		
	2014	11 949,00		
	2015	12 122,00		
	2016	12 279,00		
	2017	12 435,00		
	2018	12 591,00		
	2019	12 749,00		
	2020	12 903,00		
	2021	13 610,00		
	2022	13 763,00		
	2023	13 909,00		

Considerando la temperatura y la precipitación promedio anual del sitio, V1 puede ser clasificado como un sitio húmedo. Considerando esta clasificación y dependiendo el tipo de residuo, los valores de la constante de generación de metano son definidos.

Adicionalmente, teniendo en cuenta el manejo que se le da al sitio (vertedero) se asignan los valores a los factores de corrección y oxidación respectivamente, considerando que como el manejo de los residuos es inferior, se espera una producción de biogás inferior.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos por el modelo IPCC Waste Model V1:

RESULTADOS DE ESTIMACION DE BIOGAS MODELO IPCC – V1



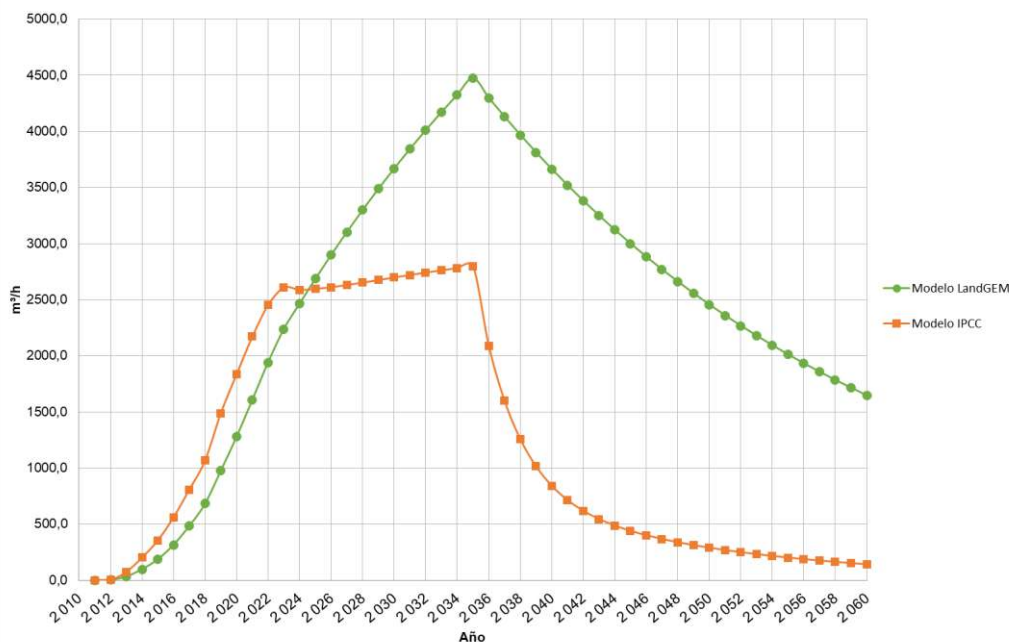
Gráfica 32. Producción de biogás modelo IPCC V1

4.2.3. Comparación y selección del modelo

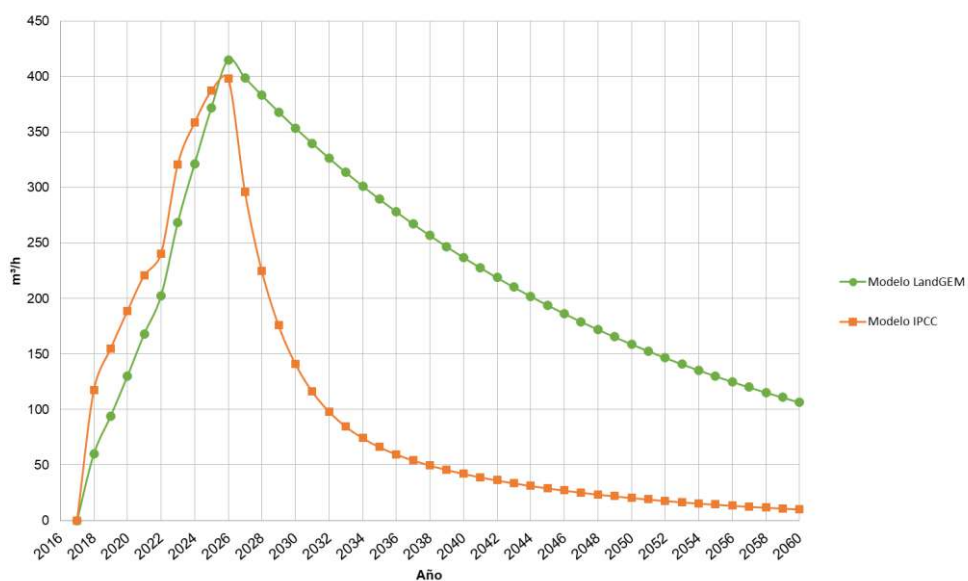
A continuación, se realiza un análisis de los resultados de ambos modelos con el fin de identificar cuál de ellos se ajusta más a las condiciones de los sitios de disposición final en Costa Rica.

Las siguientes gráficas presentan la comparación en la producción teórica de biogás entre los modelos LandGEM e IPCC para cada uno de los sitios de disposición estudiados.

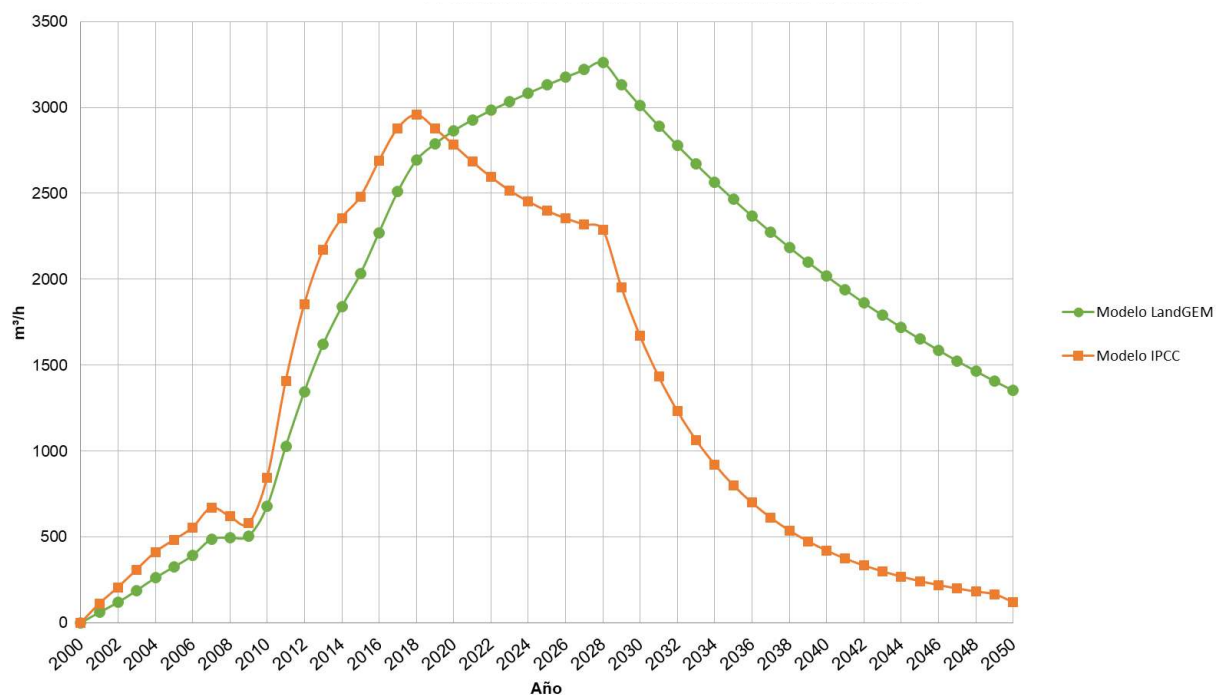
RESULTADOS DE ESTIMACION DE BIOGAS POR MODELO – R1



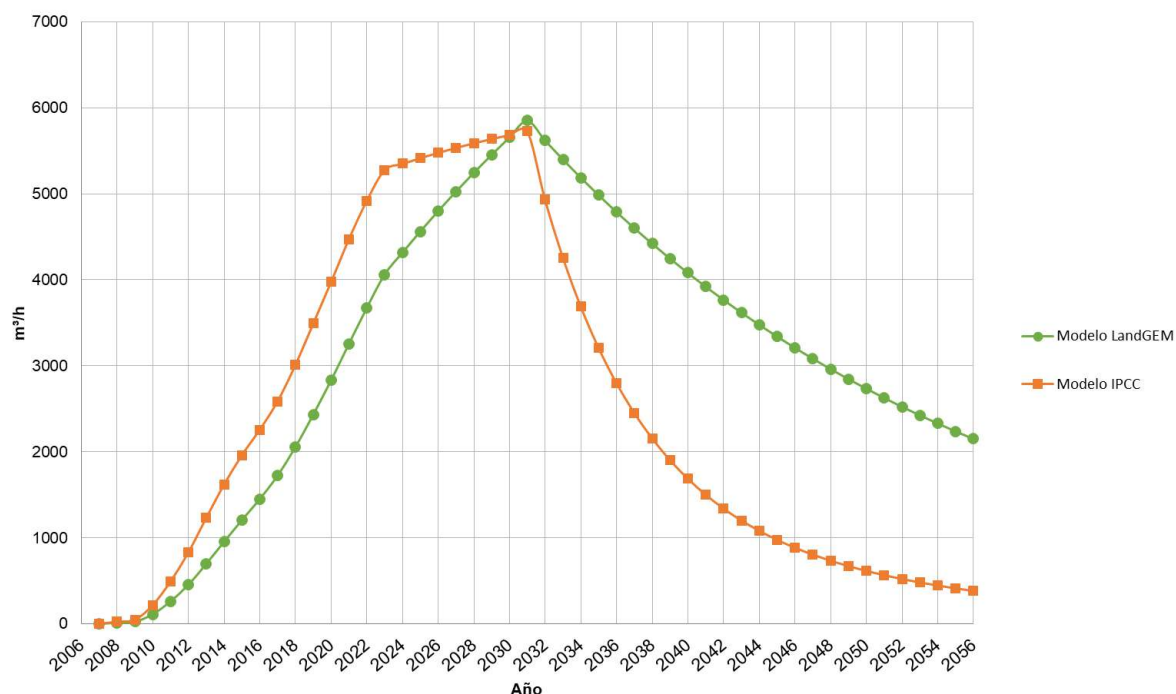
RESULTADOS DE ESTIMACION DE BIOGAS POR MODELO – R2

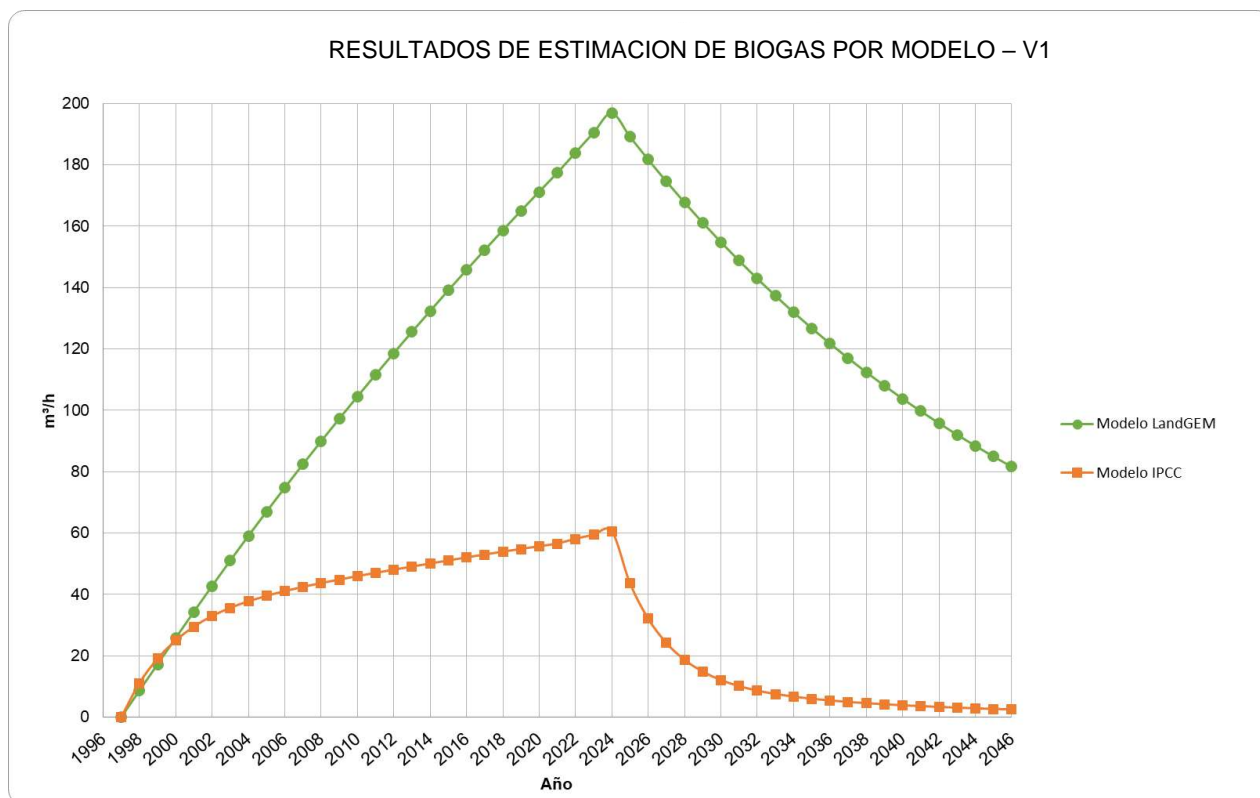


RESULTADOS DE ESTIMACION DE BIOGAS POR MODELO – R3



RESULTADOS DE ESTIMACION DE BIOGAS POR MODELO – R4





Gráfica 33. Comparación de los resultados de producción potencial de biogás para los diferentes sitios de disposición

Como se observa anteriormente, los diferentes rellenos sanitarios (R1 – R4) presentan una tendencia similar en el comportamiento de ambos modelos. El modelo IPCC considera una producción mayor de biogás en los primeros años hasta llegar al pico de producción de biogás, que se presenta algunos meses después de la fecha de clausura del sitio de disposición y después de este pico la producción de biogás disminuye rápidamente hasta valores inferiores a los del modelo LandGEM.

La diferencia significativa en el potencial de producción de biogás entre ambos modelos es ocasionada por los diferentes parámetros de cada modelo. Por un lado, el modelo LandGEM es un modelo bastante simplificado que no considera la composición de los residuos ni el manejo del sitio, y que por el contrario toma en cuenta valores predeterminados de rellenos sanitarios estadounidenses que ciertamente presentan condiciones de operación diferentes de las condiciones que puedan presentar un sitio en Costa Rica. Por otro lado, el modelo IPCC es un modelo más completo, puesto que toma en cuenta la caracterización de los residuos que se disponen en el sitio, así como el manejo que se le dan a estos.

De manera general se puede observar que los residuos de cada sitio presentan en su mayoría un porcentaje bastante elevado de plásticos, vidrio e inertes, residuos que no favorecen en absoluto la producción de biogás y que, por el contrario, dificultan la degradación de los residuos biodegradables. Adicionalmente, el contenido biodegradable presente en los residuos dispuestos corresponde en su mayoría a residuos de degradación rápida (residuos orgánicos), que se traduce entonces en una disminución rápida de la producción de biogás. Por estas razones, el uso del modelo LandGEM podría llevar a sobreestimar la generación de biogás en el sitio en los años posteriores a la clausura del sitio, ya que no se toma en cuenta el tipo de residuos depositados en el mismo.

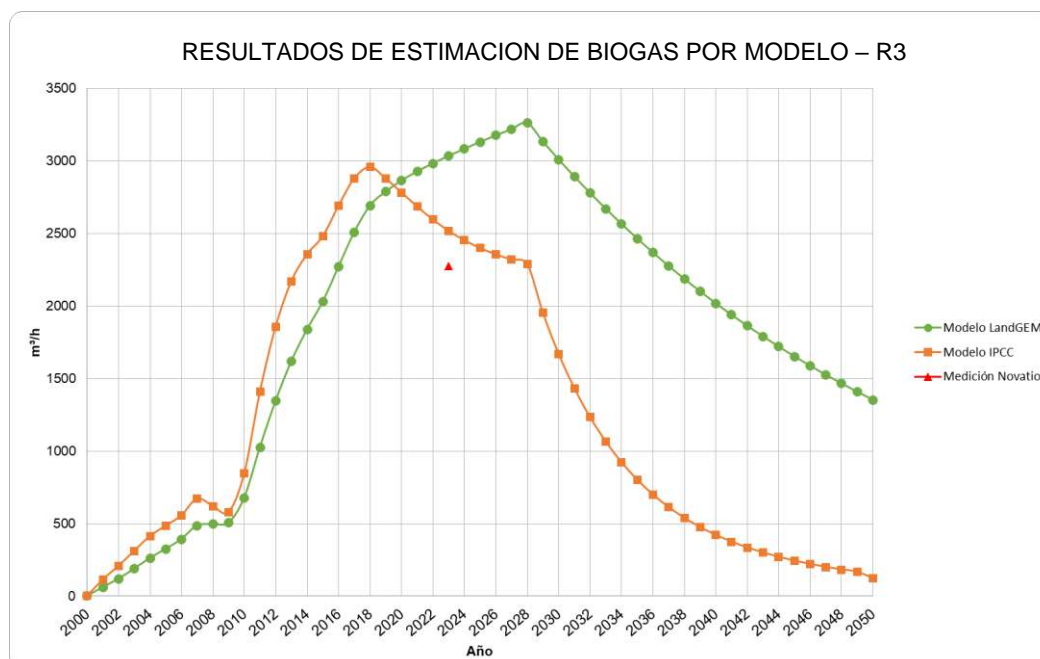
Se observa igualmente que la influencia en la producción de biogás con respecto a la tasa de disposición de residuos es mucho más pronunciada para el modelo IPCC que puede deberse a la complejidad de este con respecto al modelo LandGEM.

Por otro lado, la modelización de la producción de biogás con el modelo LandGEM en V1 se observa bastante sobreestimada, dado que no se considera una reducción en la producción de biogás por una operación como vertedero con respecto a los otros rellenos sanitarios estudiados. Es decir, el modelo LandGEM no crea una distinción en la producción de biogás según el manejo del sitio (sea este un relleno sanitario o un vertedero), como si se tratara en todos los casos de rellenos sanitarios estadounidenses.

De manera general, el modelo IPCC presenta una mayor compatibilidad con los rellenos sanitarios de Costa Rica estudiados dada su adaptabilidad y complejidad que toma en cuenta la composición de los residuos depositados y el tipo de sitio de disposición final.

Finalmente, con el objetivo de validar la información teórica con la experimental, los datos de producción de biogás medidos en la campaña de caracterización son tomados en cuenta como criterio de decisión. Sin embargo, las mediciones realizadas no tienen en cuenta la totalidad de puntos de extracción posibles para algunos de los sitios y, por lo tanto, no pueden ser utilizados para determinar la producción de biogás total en todos los sitios. El único modelo que presenta un valor comparable de producción de biogás es el relleno sanitario R3, el cual presenta una medición realizada en el punto de acopio ubicado en la planta de generación. Este punto de muestreo recoge todas las líneas de extracción de biogás del sitio y representa entonces una medida válida para la comparación de los modelos.

En la siguiente gráfica se presentan los resultados del potencial de generación de biogás para ambos modelos y la medición experimental realizada en la toma de muestras in situ.



Gráfica 34. Comparación de los resultados obtenidos por modelo con respecto al valor experimental

Como se observa en la gráfica anterior, el valor experimental de producción de biogás medido por en la caracterización en campo, se encuentra más cerca de los resultados de modelación

obtenidos mediante el modelo IPCC con una diferencia del 10% con respecto al valor experimental.

Cuadro 53. Comparación de los resultados de producción total de biogás teórico y experimental

Modelo	Flujo de biogás teórico (m ³ /h)	Flujo de biogás experimental (m ³ /h)	Diferencia (%)
IPCC	2 517	2 276	9,6%
LandGEM	3 034		25,0%

Teniendo en cuenta la complejidad de los modelos analizados y el valor experimental de producción de biogás R3, se considera que **el modelo que mejor describe el comportamiento de los sitios de disposición estudiados es el modelo IPCC Waste Model**. Dicho modelo es entonces seleccionado como referencia para la estimación del potencial de producción de biogás.

4.3. Caracterización del enfoque de género en los sitios seleccionados

Como se mencionó anteriormente en la metodología, se hizo una identificación de las brechas de género, utilizando las tres categorías de análisis: La **gestión ambiental y social**, las **relaciones con la comunidad** y la **gestión de recursos humanos**.

Así mismo, se analizó el **Índice de Desigualdad de Género (IDG-D)**, que refleja la desigualdad en tres dimensiones: **Salud reproductiva, Empoderamiento y Mercado de trabajo, por zona donde se encuentra el relleno sanitario o vertedero**. El índice muestra la pérdida potencial en desarrollo humano debido a la desigualdad entre logros de mujeres y hombres en las dimensiones anteriores. Varía entre cero, cuando a las mujeres y los hombres presentan igualdad, y 1, cuando a mujeres o hombres se encuentran en condiciones de total desigualdad.

Dentro de los indicadores contemplados también se evaluó aquellos del **Índice de Desarrollo de Género (IDG)**. Este índice **refleja las desigualdades entre hombres y mujeres en los logros de las tres dimensiones básicas de desarrollo humano: Salud, Conocimiento y Dominio sobre los recursos económicos**, medido por una estimación del bienestar material de mujeres y hombres. Estos datos proporcionaron una imagen global de la situación regional en términos de desigualdades. El **indicador de bienestar material del IDG**, así como el indicador de **tasa de participación en la fuerza de trabajo (TPFT)** y el **porcentaje de regidoras y regidores (PR) del IDG-G** son relevantes pues las acciones de las empresas o municipalidades que gestionan los rellenos pueden influir particularmente en estas brechas, **promoviendo la inclusión de mujeres en el sector**.

Toda la información presentada en las tres categorías de análisis proviene de las entrevistas realizadas y la revisión documental.

Cada brecha identificada señala las posibles puertas de entrada para la contribución activa de las mujeres en los procesos de valorización de biogás que surgen de estos hallazgos y que se describen en profundidad en el análisis. Teniendo en cuenta, como se mencionó en el desarrollo de la metodología, que estos **procesos de valorización no transforman de manera radical la gestión y funcionamiento de los rellenos sanitarios si nos centramos en la actividad misma de la valorización energética. No hay una alta demanda de mano de obra**, pero si grandes inversiones en equipos y adecuaciones. Sin embargo, **el medio de formal de la gestión y disposición final de residuos es altamente masculinizado y tiene múltiples entradas para incorporar un enfoque de género**.

Adicionalmente, para lograr una **transformación en materia de desigualdad de género, los planes de acción no deben únicamente centrarse en la actividad concreta sino en el sistema**, para lograr transformaciones estructurales en un sector económico determinado.

Relleno Sanitario – R1

R1 es sitio de disposición final para 19 cantones diferentes pertenecientes a 5 provincias como se puede observar a continuación

Cuadro 54. Cantones con disposición final en R1 y su IDG 2020- IDG-D 2020

	Provincia	Cantón	Distancia de transporte [km]	Índice de Desigualdad de Género (IDG-D) 2020	Índice de Desarrollo de Género (IDG) 2020
1	San José	Pérez Zeledón	223	0,161	0,973
2	San José	León Cortes	173	0,166	0,960
3	Alajuela	Grecia	78,3	0,188	0,968
4	Alajuela	Palmares	53,8	0,161	0,963
5	Alajuela	Poás	96,7	0,141	1,067
6	Alajuela	Upala	143	0,400	0,963
7	Heredia	Heredia	110	0,153	0,984
8	Heredia	Brava	97,4	0,130	1,036
9	Guanacaste	Liberia	122	0,211	0,995
10	Guanacaste	Cañas	75	0,173	0,982
11	Guanacaste	Abangares	50	0,21	0,994
12	Guanacaste	Tilarán	97	0,121	1,022
13	Puntarenas	Puntarenas	20	0,195	1,039
14	Puntarenas	Esparza	20	0,167	0,934
15	Puntarenas	Buenos Aires	58	0,158	0,936
16	Puntarenas	Montes de Oro	5,2	0,150	0,978
17	Puntarenas	Golfito	307	0,155	1,053
18	Puntarenas	Coto Brus	366	0,204	0,971
19	Puntarenas	Parrita	191	0,205	1,073

Según el **Índice de Desigualdad de Género (IDG-D)**, la provincia de Puntarenas tiene 5 cantones ubicados en la categoría de baja desigualdad y 6 en muy baja desigualdad de acuerdo con los datos de 2020. En el caso del cantón de Montes de Oro, donde se ubica el relleno sanitario, el IDG-D es de 0.150 lo que indica una muy baja desigualdad. Sin embargo, **en los indicadores que miden el empoderamiento y el mercado de trabajo podemos ver una disparidad entre la cantidad de regidoras y regidores y en la tasa de participación en la fuerza de trabajo, ámbitos en los que aún existen brechas de género.**

Cuadro 55. Índice De Desigualdad De Género Cantonal Y Sus Componentes, Puntarenas - 2020

De la misma manera, según los datos de 2020 el cantón está en la categoría de alto en el **Índice de Desarrollo de Género (IDG)**. Sin embargo, en la desagregación de datos del Atlas de desarrollo humano cantonal **no se puede constatar el Bienestar material de los hombres y las mujeres porque no hay datos específicos en este indicador.** Lo que evoca nuevamente lo encontrado en el marco normativo y reglamentario del género y la GIR, pues

Cantón	ón entos entes	Regidoras	Regidores	Al menos secundaria femenino	Al menos secundaria masculino	Tasa de participación en la fuerza de trabajo (Mujeres)	Tasa de participación en la fuerza de trabajo (Hombres)
Garabito	77,7	40,0 %	60,0 %	52,8 %	37,0 %	46,1 %	67,7 %
Corredores	12,3	50,0 %	50,0 %	42,2 %	34,3 %	41,6 %	68,3 %
Puntarenas	23,5	44,4 %	55,6 %	47,1 %	40,2 %	45,9 %	68,3 %
Esparza	35,1	40,0 %	60,0 %	42,4 %	50,0 %	45,9 %	68,4 %
Montes de Oro	220,5	40,0 %	60,0 %	36,6 %	43,5 %	45,9 %	68,4 %
Golfito	12,6	60,0 %	40,0 %	42,8 %	25,8 %	40,9 %	68,6 %
Osa	25,6	50,0 %	50,0 %	38,6 %	20,0 %	40,4 %	68,9 %
Buenos Aires	11,6	42,9 %	57,1 %	38,1 %	31,5 %	40,0 %	68,9 %
Parrita	163,4	40,0 %	60,0 %	47,1 %	34,9 %	45,4 %	69,6 %
Quepos	123,9	50,0 %	50,0 %	57,1 %	32,2 %	45,3 %	69,8 %
Coto Brus	39,1	50,0 %	50,0 %	22,4 %	32,3 %	37,5 %	70,0 %

no se cuenta con datos desagregados por sexo, que es el primer paso para lograr tomar decisiones informadas en términos de igualdad de género.

Cuadro 56. Índice De Desarrollo De Genero Cantonal Y Sus Componentes, Puntarenas – 2020

Categoría	Medio alto	Medio
Cantón	Bienestar material (mujeres)	Bienestar material (hombres) IDG
Osa		
Quepos		1,074
Parrita		1,073
Golfito		1,053
Puntarenas	242 049	247 107,14
Garabito	231 466	269 397,99
Corredores	265 148	268 173,51
Montes de Oro		
Coto Brus	210 073	249 237,83
Buenos Aires		0,936
Esparza		0,934

La gestión ambiental y social

✓ Compromisos ambientales y sociales

El relleno cuenta con remiso de funcionamiento y viabilidad ambiental. La gestión ambiental tiene como guía el Cronograma de monitoreos ambientales exigido por la autoridad ambiental SETENA. En él se presentan los aspectos y las actividades a monitorear, la frecuencia con la que se realizan estos monitoreos y las variables a medir, así como el responsable de su ejecución.

Estos monitoreos ambientales derivan de los impactos identificados en el Estudio de Impacto Ambiental, sin embargo, como se mencionó en la sección 2.1 el análisis de los impactos sociales y ambientales no suelen tener en cuenta las diferencias de género, porque se considera que las comunidades afectadas son entidades homogéneas.

Sin embargo, **hay impactos que tienen incidencias más altas en las mujeres como los impactos en la salud, derivados de la degradación de la calidad del agua o del aire (ver sección 1.1).** Estos impactos han sido bien identificados por la administración del relleno y hacen parte de los controles realizados, obteniendo los permisos necesarios por la parte de la autoridad ambiental.

Ahora bien, estos controles son susceptibles de cambios y mejoras con los que se pueden identificar con mayor precisión las necesidades específicas de hombres y mujeres. En el aspecto *Salud pública y bienestar social* se realiza anualmente un diagnóstico de las condiciones y necesidades del entorno del área de interés del proyecto con énfasis en el cantón de Montes de Oro, mediante la consulta a terceras partes interesadas como parte del Plan de Gestión de Relaciones Comunes. Este proceso puede reorientarse, tomando en cuenta un enfoque de género para determinar mediante consultas específicas las necesidades diferenciadas que pueden ser derivadas de los impactos ambientales y sociales de las actividades del relleno.

Otra de las acciones contemplada dentro de los monitoreos que es una oportunidad para la identificación de impactos diferenciados y medidas para cerrar estas brechas es la identificación de la percepción de la gestión ambiental y social del Proyecto, por terceras partes interesadas. El relleno sanitario realiza sondeos de opinión y/o entrevistas con terceras partes interesadas, con énfasis en cumplimiento de compromisos que podrían ser orientados a determinar las necesidades o impactos sexo-específicos.

La participación de mujeres y hombres en los procesos de consulta comunitaria acerca la gestión de residuos a la realidad sobre el terreno y ayudar a desarrollar soluciones más eficaces. La noción de género es esencial para comprender las complejidades y crear soluciones más sostenibles a los retos medioambientales.

✓ *Personal responsable de la gestión ambiental y social*

Dos consideraciones son importantes sobre las personas que gestionan los compromisos ambientales y sociales derivados de los impactos identificados en el EIA en el relleno sanitario Manejo Integral Tecnoambiente. La primera es que **las personas a cargo son en su mayoría mujeres, esto es positivo dado que las mujeres suelen tener más sensibilidad a las problemáticas medioambientales**. En efecto, un estudio de la GIZ (GIZ, 2011) demostró que los municipios dirigidos por mujeres tenían una mayor preocupación por el medio ambiente y hacían más hincapié en el reciclaje y la clasificación de residuos en origen que aquellos dirigidos por hombres.

La segunda es que las personas entrevistadas **no tienen conocimientos sobre el enfoque de género ni su aplicación a nivel de la gestión de residuos**. Sin embargo, **están de acuerdo en que hay desigualdades evidentes en términos de la representatividad laboral de las mujeres en el sector**. Así mismo, manifestaron interés en poder orientar sus acciones de compromisos ambientales y sociales hacia la disminución de las disparidades entre hombres y mujeres en cuanto a derechos, recursos u oportunidades en el sector de la gestión de residuos y sus impactos.

Relaciones con la comunidad (fuera del marco de compromisos ambientales y sociales)

La empresa cuenta con un plan de responsabilidad social y ambiental que incluye actividades como limpieza de ríos o playas en coordinación con municipalidades. Así mismo, aporta un apoyo financiero al centro acopio del cantón de Montes de Oro y participa en charlas y/o capacitaciones para enseñar y promover a reciclar, organizadas por las municipalidades. La empresa reporta diversos apoyos sociales que no están guiados por criterios específicos, pero tiene cuatro líneas de inversión social:

✓ Educación ambiental: Planes de capacitaciones internas al personal y de extensión comunal. Capacitación a colaboradores/as en el ámbito ambiental, por medio de

cursos con información actualizada y adaptada a la realidad y necesidades de la empresa.

- ✓ Programa de gestión integral de residuos (actividades internas): Reciclaje de materiales valorizables dentro de las instalaciones de la empresa, producción y donación de abono de lombricompostaje.
- ✓ Cuidando el ambiente: Voluntariados para recolección de residuos sólidos y siembra de árboles
- ✓ Donaciones: Los aportes son a la demanda de las municipalidades o de las asociaciones cercanas o de individuos particulares. Estos pueden ser la cofinanciación de eventos sociales y comunitarios, apoyos a instituciones educativas en materiales o dotación y la recolección de residuos de eventos comunitarios.

Dentro de la línea de Educación ambiental del programa de Responsabilidad social y ambiental empresarial está el Programa de capacitación en la Escuela de Formación y Desarrollo Técnico de la empresa, que constituye una oportunidad esencial para implementar acciones que permitan cerrar las brechas de género en educación y acceso de mujeres al sector.

Las donaciones y la inversión social voluntaria son otra puerta de entrada para focalizar las inversiones hacia las desigualdades de género del sector de gestión de residuos.

Por ejemplo, no hay una relación con las asociaciones o cooperativas que trabajan en la recuperación de residuos valorizables. No hay acciones educativas dirigidas a la integración de las mujeres o formalización de las mujeres a los procesos de valorización de residuos, entre otros.

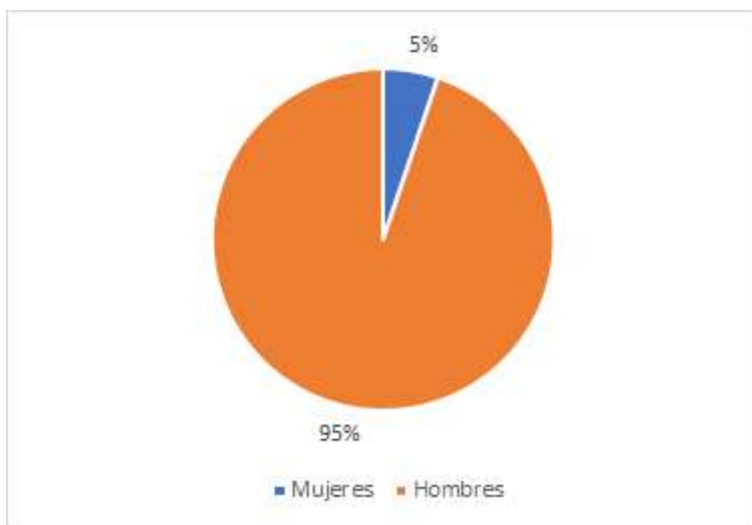
Como se mencionó anteriormente, estas y otras acciones son cruciales para la valorización energética pues la calidad de los residuos que llegan al sitio de disposición final influye en la calidad del biogás producido para una posible valorización energética.

La gestión de recursos humanos

Finalmente, se evaluó la existencia de políticas internas en términos de género y la participación de las mujeres en todos los cargos de la empresa.

No hay un plan de igualdad o una estrategia de género en la empresa. La equidad de género tampoco es incorporada en la política de responsabilidad social. Las políticas de contratación cuentan con criterios de no discriminación y las convocatorias a los puestos de trabajo son públicas. Sin embargo, no se identificaron medidas implantadas para mejorar la compatibilidad de la vida personal y laboral o la participación e implicación de la empresa en otras acciones a favor de la igualdad de oportunidades.

Las disparidades en la ocupación de cargos revelan la gran brecha en el **sector. En total la empresa reporto 566 empleados/as de los cuales 517 son hombres y 49 mujeres.** En la gestión administrativa la distribución es paritaria con 50% de mujeres y 50% hombres. Así mismo, en los cargos de dirección que hacen parte de los cargos administrativos, hay 5



gerencias ocupadas por dos mujeres y tres hombres, además de un cargo de coordinación general ocupado por una mujer.

Gráfica 35. Distribución de cargos no administrativos (operativos, técnicos) por género del Grupo RABSA en Costa Rica-2023

Todos los cargos de recolectores/as, operadores/as de maquinaria, supervisores/as de ruta, mantenimiento y peones son ocupados por hombres. Así mismo, los 27 cargos directamente relacionados al

relleno sanitario están ocupados por hombres.

Hay que tener presente que parte de las desigualdades que se presentan en la empresa, pueden explicarse por las desigualdades existentes en la sociedad. Hay diferencias significativas entre el tipo de formación de mujeres y hombres, así como estereotipos de género asociados a los trabajos de recolección y seguridad que tienen una influencia significativa en la composición por género de los cargos de la empresa. En estos casos, la empresa deberá hacer un esfuerzo todavía más grande para alcanzar niveles igualitarios de participación.

Relleno Sanitario – R2

La corporación municipal hizo una inversión para la compra de una finca de 30 hectáreas contiguo a la antigua celda temporal de esta municipalidad que permitió la integración de los otros componentes del proyecto, a saber: siete celdas para un Relleno Sanitario, un plantel de Reciclaje, un Mariposario, una zona de compostaje, un vivero de especies nativas, un aula de Educación Ambiental y un sendero interpretativo. El proyecto cuenta con Viabilidad Ambiental que fue otorgada en 2015 con la resolución 2550-2015 para la operación de todos los componentes.

El relleno sanitario es sitio de disposición final para las municipalidades de Santa Cruz, Carrillo, Nicoya, Ndayure, Hojancha y La Cruz. Así mismo, el cantón de Santa Cruz donde se ubica cuenta con un programa de reciclaje que recolecta residuos en las playas de Tamarindo, Potrero, Grande y Ostional, logrando recuperar 8 toneladas semanales de mezclas de plásticos, cartones y aluminio (El MundoCr, 2018).

Cuadro 57. Cantones con disposición final en R2 R2 y su IDG 2020- IDG-D 2020

	Provincia	Cantón	Distancia de transporte [km]	Índice de Desigualdad de Género (IDG-D) 2020	Índice de Desarrollo de Género (IDG-D) 2020
1	Guanacaste	Nicoya	29,2	0,398	0,979
2	Guanacaste	Santa Cruz	5	0,191	0,979
3	Guanacaste	Carillo	70,9	0,190	0,984
4	Guanacaste	Nandayure	60,7	0,114	1,002

5	Guanacaste	Hojancha	20	0,165	1,059
6	Guanacaste	La Cruz		0,232	1,085

Según el **Índice de Desigualdad de Género (IDG-D)**, la provincia de Guanacaste tiene 6 cantones ubicados en la categoría de baja desigualdad, 4 en muy baja desigualdad y el cantón de Nicoya con un nivel de desigualdad media de acuerdo con los datos de 2020. En el caso del cantón de Santa Cruz, donde se ubica el relleno sanitario, el IDG-D es de 0.191 lo que indica una baja desigualdad. Sin embargo, **en los indicadores que miden el empoderamiento y el mercado de trabajo podemos ver una disparidad en la tasa de participación en la fuerza de trabajo, ámbito en el que aún existen brechas de género.** Por el contrario, se resalta una **paridad en el número de regidores y regidoras** del cantón, indicador altamente positivo.

Cuadro 58. Índice De Desigualdad De Género Cantonal Y Sus Componentes, R2 - 2020

Cantón	Índice de Desigualdad de Género	Regidoras	Regidores	Al menos secundaria femenino	Al menos secundaria masculino	Tasa de participación en la fuerza de trabajo (Mujeres)	Tasa de participación en la fuerza de trabajo (Hombres)
Santa Cruz	8,2	50,0 %	50,0 %	38,7 %	32,1 %	41,8 %	67,9 %

Por otro lado, según los datos de 2020 el cantón se encuentra en la categoría de alto en el Índice de Desarrollo de Género (IDG). Este índice refleja las desigualdades entre hombres y mujeres en los logros de las tres dimensiones básicas de desarrollo humano: Salud, Conocimiento y Dominio sobre los recursos económicos, medido por una estimación del bienestar material de mujeres y hombres. Sin embargo, en la desagregación de datos del Atlas de desarrollo humano cantonal **se puede constatar aun una disparidad del Bienestar material de los hombres y las mujeres.**

La gestión ambiental y social

Para el caso del relleno de Santa Cruz no fue posible la realización de las entrevistas con las personas a cargo de la gestión ambiental, social y/o de recursos humanos. Sin embargo, la información fue obtenida de fuentes secundarias como el estudio de impacto ambiental, el último informe de regencia depositado en SETENA correspondiente al periodo de noviembre 2022 a marzo 2023 y la encuesta que transmitió el relleno.

✓ Compromisos ambientales y sociales

El relleno cuenta con permiso de funcionamiento y viabilidad ambiental. Sin embargo, la información en el estudio de impacto ambiental data del 2012, antes del inicio del proyecto y el último informe ambiental no hace un seguimiento al plan de gestión ambiental por lo que no se pueden identificar con claridad los impactos ambientales y sociales. Sin embargo, en el último informe de regencia se identifican los aspectos relevantes de la gestión ambiental que requieren acciones por parte del operador, respecto al relleno sanitario:

- Tratamiento de los canales abiertos para captar lixiviados de laderas.
- Adecuado manejo de aguas pluviales.
- Verificar los niveles de compactación.
- El personal continúa sin equipo de seguridad.
- El equipo de compactación ha presentado problemas de operación y se ha tenido que operar con la compactación de la excavadora, o mantener por días los residuos sin cubrir.

- Continuar con la identificación de los afloramientos de lixiviados y escurrimiento pluvial superficial.
- Atención a los eventos de erosión por escorrentía pluvial superficial.
- Es importante iniciar tareas de revegetación de laderas a finales de la época seca.

Según esta información ambiental presentada en el último informe a SETENA el relleno debe prestar especial atención a los **impactos que tienen incidencias más altas en la salud pues estos aumentan las cargas de cuidado ya asumidas mayoritariamente por las mujeres. Una gestión deficiente en el manejo de las aguas pluviales, el tratamiento de lixiviados o en los niveles de compactación pueden incrementar la degradación de la calidad del agua o del aire (ver sección 1.1).**

La observación sobre el equipo de seguridad es particularmente importante pues es uno de los aspectos que se deben tener en cuenta para la garantizar una seguridad en el trabajo de hombres y mujeres. El equipo de protección individual (EPI) es importante para la protección contra los riesgos en la seguridad de los trabajadores y trabajadoras. Sin embargo, existen aún brechas en las adaptaciones de estos equipos para las mujeres. Algunas experiencias relativas al uso de EPI confirman que, **al reducir el nivel efectivo de protección, éstos constituyen un obstáculo a la igualdad de oportunidades en el empleo.** Por ejemplo, no existen EPI para mujeres embarazadas. En el Reino Unido, la Asociación de Mujeres Ingenieras ("Women's Engineering Society" – WES) se propuso examinar cómo mejorar la seguridad y las condiciones de trabajo en los sectores de la ingeniería y de la construcción. La mayoría (75 %) de los EPI utilizados por las trabajadoras encuestadas habían sido diseñados para hombres. Más de la mitad de las entrevistadas señalaron que los EPI dificultaban la actividad laboral, disminuían la eficiencia laboral y podían ser un factor relevante a la hora de decidir dejar de trabajar en el sector.

Con respecto a la Planta de Tratamiento de lixiviados:

- Los niveles de calidad del agua tratada a la salida de la planta de tratamiento cumplen con los estándares de calidad.

Con respecto al Centro para la Recuperación y Aprovechamiento de Residuos Valorizables y Educación Ambiental:

- La cantidad de material para la venta presenta fluctuaciones mensuales, pero ha mostrado un incremento que registra valores del doble de los obtenidos en el año pasado.
- Se cuenta con tres unidades de composteo y personal que prepara los residuos a fermentar o digerir.
- Replicar el modelo de compostaje en colegios y escuelas, e iniciar un modelo a mayor escala.
- La operación del CCVR ha producido en 4 meses un promedio de casi 4.70 ton/día.
- Es muy importante destacar la adecuada labor y control de limpieza que se lleva a cabo, paralelamente al procesamiento y empacado de los desechos recuperados y vendidos.
- Se debe incrementar las sesiones de limpieza diarias al menos 2 o 3, con agua a alta presión y cepillo, para efectos de eliminar el problema de bacterias patógenas, ya que el personal también debe almorzar dentro de las instalaciones.

Según el informe de regencia ambiental el centro está dando muy buenos resultados, pero requiere implementar estrategias más efectivas para ampliar la cantidad de fuentes o puntos

de origen. Así mismo, aumentar la cantidad de producto recolectado y procesado y ampliar los puntos de venta del producto procesado, complementado con estrategias de mercadeo, que faciliten las labores del equipo de trabajo. La regencia también propone realizar acciones de divulgación sobre los resultados logrados para incentivar a las personas y los negocios a realizar la separación en la fuente y así incrementar el volumen diario de los desechos valorizables.

Este centro constituye una puerta de entrada para proponer acciones que disminuyan la brecha de género en los procesos de valorización de residuos para reciclaje. **Puede contribuir a la formalización de las personas que trabajan en la recolección de residuos dado que las mujeres recolectoras y recicladoras que trabajan en el sector informal tienden a quedar excluidas de los sistemas de recogida de residuos cuando éstos se formalizan y generan ingresos** (DFID_&_WEDC, 1998)

Con respecto a la Proyección Social del Proyecto:

- La regencia ambiental propone intensificar labores de proyección hacia escuelas y colegios de todo el cantón para capacitación sobre el adecuado tratamiento y disposición final de los desechos líquidos y sólidos de las ciudades, así como en la operación del composteo de desechos orgánicos para la producción de abono orgánico para las viviendas, en jardines y huertas de verduras.

No hay una identificación de impactos sociales en el proyecto ni medidas para ser abordados. Las medidas propuestas por la gerencia ambiental en la proyección social no integran una perspectiva de género.

- Personal responsable de la gestión ambiental y social

Según la información presentada por la municipalidad para R2, la Dirección de Gestión Ambiental se compone de tres departamentos, dos de los cuales son liderados por mujeres, el departamento Servicios Urbanos Ambientales y el de Protección Ambiental. Que **las personas a cargo sean en su mayoría mujeres, es positivo dado su nivel de sensibilidad a las problemáticas medioambientales** (Ver sección 1.1).

A la pregunta sobre el trabajo con organizaciones en favor de la igualdad de género y de empoderamiento de las mujeres y su relación con la actividad del relleno, la Municipalidad respondió que al ser un ente público trabaja bajo la legislación nacional en cuanto a la equidad de género. Igualmente se hizo mención en la encuesta enviada a un convenio con la ADI cacao que busca incentivar la participación igualitaria en las labores relacionadas a la gestión integral de residuos, sin embargo, no se tiene mayor información sobre el objetivo o los alcances del convenio.

No fue posible establecer el nivel de conocimiento de las personas a cargo de la gestión del relleno sobre las disparidades entre hombres y mujeres en cuanto a derechos, recursos u oportunidades en el sector de la gestión de residuos y sus impactos.

Relaciones con la comunidad (fuera del marco de compromisos ambientales y sociales)

La Dirección de Gestión Ambiental Municipal es el órgano encargado incentivar la protección y la educación ambiental y trabaja en conjunto con organizaciones que se enfocan en la limpieza de espacios naturales, la recolección de reciclaje y el desarrollo de proyectos de compostaje comunal, entre muchas otras actividades. Sin embargo, no se tuvo acceso al tipo

de programas o de asociaciones con las que se trabaja. **No fue posible establecer si hay una relación con las asociaciones o cooperativas que trabajan en la recuperación de residuos valorizables lideradas por mujeres. Así mismo se desconoce si las acciones educativas están dirigidas a la integración de las mujeres o formalización de las mujeres a los procesos de valorización de residuos, entre otros.**

Sigue siendo, sin embargo, una oportunidad para orientar dichos programas hacia la disminución de las brechas de género del sector de la gestión integral de residuos.

Como se mencionó anteriormente, estas y otras acciones son cruciales para la valorización energética pues la calidad de los residuos que llegan al sitio de disposición final influye en la calidad del biogás producido para una posible valorización energética.

Finalmente, la municipalidad manifestó que **el centro de recuperación de residuos valorizables y los proyectos futuros de la compostera y el mariposario serán dados en operación a una organización comunal, sin embargo, no se tiene información sobre los criterios para la selección** o la conformación de la organización comunal.

La gestión de recursos humanos

Se evaluó la existencia de políticas internas en términos de género y la participación de las mujeres en todos los cargos del relleno sanitario.

En el relleno sanitario trabajan actualmente 27 personas de las cuales 13 son de las cuadrillas de mantenimiento y operación del relleno sanitario, hay 2 supervisores/as y 11 peones de los cuales, una es mujer.

En el Centro para la Recuperación y Aprovechamiento de Residuos o Desechos Valorizables y Educación Ambiental trabajan 10 personas y 3 de ellas son mujeres, 6 son hombres y un hombre jefe de Planta.

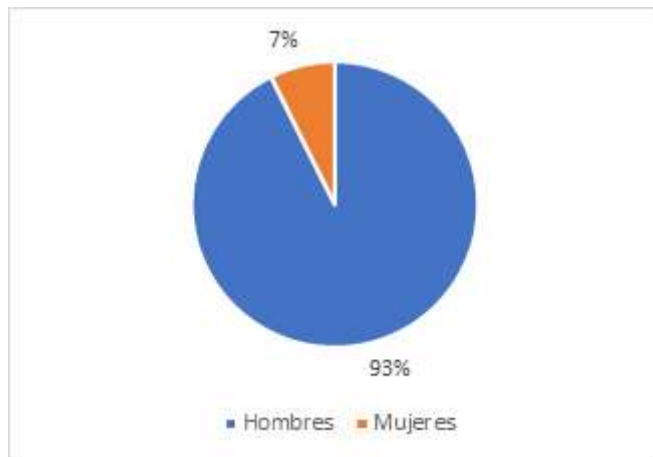
El personal administrativo está compuesto por tres hombres, el Coordinador del Parque Tecnológico Ambiental, el Administrador del Centro para la Recuperación y Aprovechamiento de Residuos o Desechos Valorizables y el Operador de Bascula. En recolección de residuos laboran una mujer y treinta hombres.

Las disparidades en la ocupación de cargos confirman la gran brecha en el sector. **En total hay 5 mujeres en los 68 cargos actuales.**

La municipalidad manifiesta que quizás las tareas propuestas no son tan atractivas para muchas mujeres y por eso son mayoritariamente hombres los que se desempeñan en estas tareas. Parte de las desigualdades que se presentan en el sector, pueden explicarse por las desigualdades existentes en la sociedad. Hay diferencias significativas entre el tipo de formación de mujeres y hombres, así como estereotipos de género asociados a los trabajos de recolección y seguridad que tienen una influencia significativa en la composición por género de los cargos del relleno. En estos casos, la municipalidad, como ente operador deberá hacer un esfuerzo todavía más grande para alcanzar niveles igualitarios de participación. Sin

embargo, su calidad de organismo público puede contribuir para apoyarse en otros programas en curso que faciliten la realización de estas actividades.

Gráfica 36. Distribución de cargos en R2 -2023



Relleno Sanitario – R3

El relleno es administrado por Empresas Berthier EBI de Costa Rica S.A. es la primera filial de EBI que opera fuera de Canadá. Esta filial se fundó en julio de 1997 que posee actualmente 3 rellenos sanitarios en Costa Rica:

- ✓ Parque de Tecnología Ambiental La Uruka, situado en San José (capital del país), inaugurado en noviembre de 2000.
- ✓ Parque de Tecnología Ambiental Aczarri, situado en San José, inaugurado en 2007.
- ✓ Parque de Tecnología Ambiental Limón, situado en la zona atlántica, inaugurado en 2009.

Los tres rellenos sanitarios funcionan con equipos especializados y las mismas técnicas que su matriz canadiense, tanto en lo que respecta al vertido como a la recogida de biogás. Así mismo, cuenta con sistemas de gestión interna que le han valido la certificación ISO 14001 (Gestión Medioambiental), ISO 45001 (Salud y Seguridad en el Trabajo) e ISO 50001 (Gestión Energética).

La empresa tiene otros proyectos en desarrollo en Costa Rica que incluyen, el Parque de Tecnología Ambiental Galagarza, situado en la zona del Pacífico, el proyecto de relleno en la costa del Pacífico y un proyecto de un emplazamiento adicional para el área metropolitana de San José.

Actualmente, la empresa cuenta con más de 400 empleados y trata más del 65% de los residuos del país. Su flota está compuesta por más de cien unidades, entre camiones de carga trasera, camiones de carga frontal, roll-offs, remolques push-out y camiones de vacío. Desde 2019, la empresa también ofrece a algunos de sus clientes municipales el servicio de separación de residuos para su co-tratamiento con el fin de utilizarlos como fuente de energía para una planta cementera establecida en el país.

El relleno sanitario, R3, es sitio de disposición final para 18 cantones diferentes pertenecientes a 3 provincias, pero geográficamente se encuentra ubicado en la provincia de San José, en el cantón de San José, atendiendo 11 de los 20 cantones de la provincia.

Cuadro 59. Cantones con disposición final R3 y su IDG 2020- IDG-D 2020

	Provincia	Cantón	Distancia de transporte [km]	Índice de Desigualdad de Género (IDG-D) 2020	Índice de Desarrollo de Género (IDG-D) 2020
1	San José	San José	9	0,305	0,093
2	San José	Escazú	12	0,132	0,991

3	San José	Puriscal	49,4	0,119	1,007
4	San José	Mora	53	0,177	1,001
5	San José	Goicoechea	17	0,135	0,998
6	San José	Santa Ana	19	0,141	1,004
7	San José	Alajuelita	13	0,135	1,051
8	San José	Acosta	39,7	0,139	1,037
9	San José	Moravia	22	0,108	1,033
10	San José	Montes de Oca	16	0,099	0,958
11	San José	Turubares	58,4	0,201	1,099
12	Alajuela	Alajuela	18	0,231	1,014
13	Heredia	Santo Domingo	10	0,110	1,002
14	Heredia	San Rafael	17	0,114	1,034
15	Heredia	San Isidro	11,4	0,098	0,987
16	Heredia	Flores	16,2	0,073	0,993
17	Heredia	Bélen	25	0,114	1,025
18	Heredia	San Pablo	14	0,159	1,008

Según el **Índice de Desigualdad de Género (IDG-D)**, la provincia de San José tiene 14 cantones ubicados en la categoría de muy baja desigualdad, 5 en baja desigualdad y el cantón de Turubares en categoría de desigualdad media, de acuerdo con los datos de 2020. En el caso del cantón de San José, donde se ubica el relleno sanitario, el IDG-D es de 0.305 lo que indica una baja desigualdad entre hombres y mujeres en las 3 dimensiones. Sin embargo, **en los indicadores que miden el empoderamiento y el mercado de trabajo podemos ver una disparidad entre la cantidad de regidoras y regidores y en la tasa de participación en la fuerza de trabajo, ámbitos en los que aún existen brechas de género.**

Cuadro 60. Índice De Desigualdad De Género Cantonal Y Sus Componentes, R3 - 2020

Cantón	Índice de Desigualdad de Género	Regidoras	Regidores	Al menos secundaria femenino	Al menos secundaria masculino	Tasa de participación en la fuerza de trabajo (Mujeres)	Tasa de participación en la fuerza de trabajo (Hombres)
Montes de Oca	43,3	35,7 %	64,3 %	64,9 %	72,5 %	58,3 %	76,0 %
Moravia	78,2	42,9 %	57,1 %	62,1 %	69,2 %	58,3 %	76,0 %
Vázquez de Coronado	28,8	50,0 %	50,0 %	60,4 %	65,2 %	57,9 %	76,2 %
Puriscal	76,9	44,4 %	55,6 %	38,4 %	36,3 %	53,3 %	78,4 %
Curridabat	84,3	42,9 %	57,1 %	61,5 %	67,1 %	58,3 %	76,0 %
Escazú	7,5	46,2 %	53,8 %	62,4 %	67,4 %	58,3 %	76,0 %
Alajuelita	3,3	50,0 %	50,0 %	61,2 %	59,2 %	58,3 %	76,0 %
Goicoechea	8,4	44,4 %	55,6 %	51,2 %	58,6 %	58,3 %	76,0 %
Aserri	25,5	57,1 %	42,9 %	63,9 %	60,6 %	56,4 %	76,9 %
Acosta	66,4	50,0 %	50,0 %	37,7 %	28,0 %	52,7 %	78,7 %
Santa Ana	17,1	42,9 %	57,1 %	59,3 %	62,1 %	58,3 %	76,0 %
Tibás	25,9	50,0 %	50,0 %	62,8 %	69,4 %	58,3 %	76,0 %
Pérez Zeledón	4,6	50,0 %	50,0 %	38,9 %	42,3 %	40,7 %	68,6 %
León Cortes	107,6	50,0 %	50,0 %	51,8 %	50,3 %	54,7 %	77,8 %
Mora	30,6	30,0 %	70,0 %	48,8 %	49,8 %	55,1 %	77,5 %
Turubares	449,0	40,0 %	60,0 %	73,6 %	50,4 %	52,5 %	78,8 %
Dota	177,6	50,0 %	50,0 %	57,8 %	54,8 %	53,6 %	78,3 %
San José	3,7	40,9 %	59,1 %	48,6 %	54,4 %	58,3 %	76,0 %
Desamparados	41,5	36,4 %	63,6 %	53,3 %	56,5 %	57,9 %	76,2 %
Tarrazú	24,6	50,0 %	50,0 %	31,9 %	30,3 %	55,6 %	77,4 %

Por el contrario, según los datos de 2020 el cantón está en la categoría de medio en el Índice de Desarrollo de Género (IDG). Esta posición del cantón en un índice medio de desarrollo de género se explica en la desagregación de datos del Atlas de desarrollo humano cantonal **por la disparidad en los años promedio de escolaridad entre hombres y mujeres, pero también por la disparidad en el Bienestar material.**

Cuadro 61. Índice De Desarrollo De Genero Cantonal Y Sus Componentes, San Jose – 2020

Cantón	Esperanza de vida al nacer (Hombres)	Años esperados de escolaridad (Mujeres)	Años esperados de escolaridad (Hombres)	Años promedio de escolaridad (Mujeres)	Años promedio de escolaridad (Hombres)	Bienestar material (Mujeres)	Bienestar material (Hombres)
San José	76,8	11,9	11,8	8,6	9,6	0238 039	449 093

La gestión ambiental y social

✓ *Compromisos ambientales y sociales*

El relleno cuenta con remiso de funcionamiento, viabilidad y garantía ambientales vigentes. La periodicidad establecida en la resolución de Viabilidad Ambiental para la presentación de los reportes ambientales es de cada cuatro meses en fase de operación. El objetivo de estos reportes es verificar el cumplimiento de las medidas ambientales a las cuales se comprometió la empresa operadora del relleno y que se fijaron como parte del Plan de Gestión Ambiental del proyecto. Aunque el estudio de impactos o el plan de gestión no incluye la determinación de impactos diferenciados por género, **hay impactos que tienen incidencias más altas en las mujeres como los impactos en la salud, derivados de la degradación de la calidad del agua o del aire (ver sección 1.1).** Estos impactos han sido bien identificados por la administración del relleno y hacen parte de los controles realizados, obteniendo los permisos necesarios por la parte de la autoridad ambiental.

Por ejemplo, según el reporte, se ha continuado de manera diaria y permanente con el control del viento, lo cual se informa al Ministerio de Salud junto con cualquier información de quejas que se reciba sobre olores. Estos se controlan mecánicamente mediante los odorizantes, independientemente de la dirección del viento. Existen protocolos que se activan cuando se identifica alguna posible afectación a vecinos. Sin embargo, **estos protocolos no contemplan consultaciones diferenciadas que pudiesen establecer con mayor claridad las afectaciones directas a mujeres y hombres.** Se tiene canales claros de comunicación para que las personas a cargo tomen las medidas que indican los protocolos cuando se dan estos casos.

El relleno recibe constantemente inspecciones de funcionarios del Ministerio de Salud, para dar seguimiento a la operación y hay una comunicación diaria mediante correo con la regional del Ministerio para el reporte de dirección del viento y quejas. Adicionalmente, se hacen reportes semanales, los cuales se dirigen a siete dependencias del Ministerio de Salud regional y central.

Desde abril del 2022, EBI está generando energía mediante un generador eléctrico alimentado por el biogás del proyecto. La capacidad de generación es de hasta 170 kW. Por el momento el equipo está generando 110 kW para abastecer el 100% de R3, utilizando un 10% del biogás recuperado. Este sistema se encuentra conectado en sincronía con red eléctrica de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL). Esto le permite al proyecto tener independencia energética y a la vez utilizar energías renovables, que contribuyen con el ambiente y disminución de huella de carbono. Según lo reportado, **en Costa Rica la autoridad ambiental**

no exige una renovación o modificación de la Viabilidad Ambiental cuando se incluyen actividades de generación de energía eléctrica mediante el biogás. Sin embargo, en otros países de la región, como Colombia, las autoridades ambientales aún se encuentran evaluando los protocolos necesarios para solicitar nuevamente un EIA de estas actividades. Esto representaría costos adicionales al proyecto, pero permitiría establecer impactos diferenciados y exigencias de consultaciones diferenciadas para establecer las necesidades, preocupaciones o intereses particulares que aporten a la disminución de desigualdades de género.

Es importante resaltar la proximidad del relleno a los asentamientos humanos. Los impactos ambientales recurrentes de la operación de un relleno sanitario pueden afectar de manera más permanente a estas comunidades aledañas.

Según las gestoras ambientales del relleno, los mayores impactos identificados por la comunidad son el polvo y el ruido producido por el tránsito de los camiones y los olores. Estos impactos están sujetos a monitoreos ambientales que derivan de los impactos identificados en el Estudio de Impacto Ambiental, sin embargo, como se mencionó en la sección 2.1 el análisis de los impactos sociales y ambientales no suelen tener en cuenta las diferencias de género, porque se considera que las comunidades afectadas son entidades homogéneas.

Ahora bien, hay actualizaciones posibles en el Plan de gestión Ambiental exigidas por SETENA, así como medidas propuestas por el regidos o la regidora ambiental. Esto representa una oportunidad para la integración del enfoque de género en la determinación de impactos y medidas para atenuarlos, puesto que **si el regidor o la regidora ambiental reciben una sensibilización en temas de género podrían identificar más fácilmente acciones enfocadas en las desigualdades o en las brechas de género.**

Dentro de los compromisos sociales que se integran en el plan de gestión ambiental está la **elaboración de un programa de visitas guiadas dirigido a la comunidad y líderes/lideresas comunales** para que estos puedan ver y comentar sobre los componentes del proyecto, las bondades de la separación, reúso y reciclaje, explicar el proceso de cierre y de las nuevas actividades de recuperación, revalorización y transferencia de residuos y de generación de energía. **Ninguno de estos programas cuenta con una perspectiva de género que podría ayudar a disminuir las brechas del sector en varias formas. Por ejemplo, en la disminución de la percepción de un ambiente laboral exclusivamente masculino o en la identificación de alianzas con posibles asociaciones lideradas por mujeres en el sector de la valorización.**

Otro de los compromisos sociales del PGA es la realización de reuniones trimestrales con líderes/lideresas comunales y otros actores. La empresa reportó en el último informe ambiental que mantiene comunicación permanente tanto presenciales como virtuales con personas vecinas o representantes de Organizaciones de la Sociedad Civil (OSC). Entre las organizaciones con las que se mantiene comunicación están: ASOCODECA, ADIFICA, iglesia RENEVOS, SIFAIS, Escuela La Carpio, Comité de Personas Vecinas Río Torres, Comité de Personas Vecinas San Vicente, Equipo de Beisbol La Carpio, entre muchos otros.

Aunque **el seguimiento de estas consultas no incluye indicadores de participación por género**, por ejemplo, es claro que **la participación de mujeres y hombres en los procesos de consulta comunitaria acerca la gestión de residuos a la realidad sobre el terreno y ayuda a desarrollar soluciones más eficaces al contemplar la noción de género para comprender las complejidades y crear soluciones más sostenibles a los retos medioambientales.**

Un enfoque de género en participación quiere decir, oportunidades reales para que los grupos marginados participen, asegurando que estos grupos tengan la confianza necesaria para expresarse y creer que otros escucharán sus puntos de vista. Involucramiento de todos los/las afectados o relacionados con el proyecto en la toma de decisiones. Así como mecanismos sensibles de retroalimentación para reportar quejas u otros comentarios.

Un ejemplo de las reuniones realizadas por la empresa es una capacitación realizada el 13 de abril a la que acudieron 13 líderes y lideresas comunitarias de 4 sectores diferentes de La Carpio. En este espacio se socializaron y explicaron con detalle los formularios que la empresa maneja para acceder al **Fondo de Financiamiento de Programas y Proyectos Comunitarios. Con esta actividad se busca promover la ejecución de iniciativas que aporten al bienestar de la comunidad. Este compromiso fue identificado por la responsable del programa de responsabilidad social como una oportunidad de integración del enfoque de género**, desarrollado en la sección de relaciones con la comunidad.

Otro de los compromisos del PGA es mantener un registro de elegibles a contratar del área de influencia del proyecto y mantener mínimo un 40% de trabajadores/as de la zona de influencia directa e indirecta del proyecto. El relleno reportó que más del 65 % son trabajadores/as de la zona de influencia directa. En este compromiso existe también una oportunidad de **incluir políticas que favorezcan una paridad de la ocupación de puestos o que demuestren lo que la empresa está haciendo para aumentar la cantidad de mujeres en el personal** pues como se evidencia más adelante la brecha de género en los puestos del sector es muy alta.

✓ *Personal responsable de la gestión ambiental y social*

Dos consideraciones son importantes sobre las personas que gestionan los compromisos ambientales y sociales derivados de los impactos identificados en el EIA en el relleno sanitario. La primera es que **las personas a cargo son en su mayoría mujeres, esto es positivo dado que las mujeres suelen tener más sensibilidad a las problemáticas medioambientales.**

La segunda es que las personas entrevistadas **no tienen conocimientos sobre el enfoque de género ni su aplicación a nivel de la gestión de residuos.** Sin embargo, **están de acuerdo en que hay desigualdades evidentes en términos de la representatividad laboral de las mujeres en el sector.** Así mismo, manifestaron interés en poder orientar sus acciones de compromisos ambientales y sociales hacia la disminución de las disparidades entre hombres y mujeres en cuanto a derechos, recursos u oportunidades en el sector de la gestión de residuos y sus impactos.

Relaciones con la comunidad (fuera del marco de compromisos ambientales y sociales)

Los compromisos sobre los impactos ambientales o sociales en el plan de gestión ambiental pueden ser abordados por la división de la empresa encargada de la gestión ambiental o juntamente con los programas de responsabilidad social. Un ejemplo, es el caso de un problema paisajístico señalado por la comunidad que fue abordado mediante el programa de responsabilidad social empresarial.

Uno de los programas más importantes de la empresa y con el que mantiene las relaciones comunitarias es el **Fondo de Financiamiento de Programas y Proyectos Comunitarios.**

Estos proyectos son generalmente programas de emprendimiento, pero no tienen que ver necesariamente con la gestión o impactos del medio ambiente.

Aquí la responsable de responsabilidad social identificó que es posible incluir criterios para la selección de los proyectos ganadores de fondos que favorezcan la autonomía económica de las mujeres. Se identifica como una necesidad y una puerta de entrada para la inclusión de la equidad de género en los programas y proyectos de responsabilidad social empresarial.

La empresa reporta diversos aportes comunitarios que no están guiados por criterios específicos, en el último cuatrimestre se encuentran los siguientes aportes:

- Campaña de sensibilización sobre el río Virilla y reforestación con la participación de 35 estudiantes “Guardianes del Agua” y 5 docentes de la Escuela La Carpio.
- Apoyo con transporte y alimentación para convivio del equipo de Judo de La Carpio, para 30 jóvenes.
- Donación de 280 “Kits escolares” a la Asociación de Desarrollo Promejoras Pequeña Gran Ciudad.
- Donación de pañales para personas adultas mayores a la Asociación Cáritas San Antonio de Padua.
- Donación de piedra bola a la Delegación de la Fuerza Pública Uruca-Merced-Mata Redonda.
- Convenio de Cooperación de la empresa con el Equipo de Judo de La Carpio, mediante el cual se acuerda un aporte de 200.000 colones mensuales de manera que el equipo pueda financiar rubros tales como compra de implementos deportivos, uniformes, inscripciones, transporte y alimentación para torneos

Ninguna de estas acciones recupera indicadores diferenciados por género. Tampoco existen líneas claras de inversión que podrían ser enfocadas a las grandes brechas de género del sector de gestión integral de residuos sólidos como la brecha de acceso al empleo del sector, la gestión de los impactos ambientales diferenciados, la autonomía económica de las mujeres en la zona, entre otros. **La estructuración de estos apoyos comunitarios constituye entonces una oportunidad de incidencia en las desigualdades de género del sector, según las personas entrevistadas.**

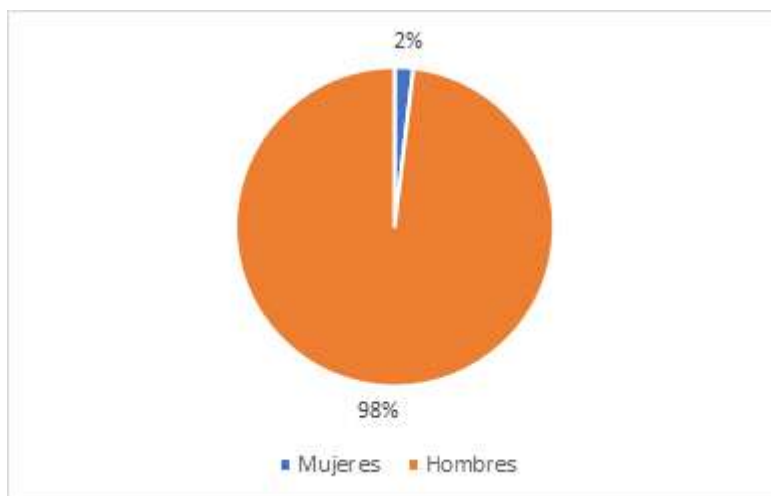
La gestión de recursos humanos

Finalmente, se evaluó la existencia de políticas internas en términos de género y la participación de las mujeres en todos los cargos de la empresa.

No hay un plan de igualdad o una estrategia de género en la empresa. La equidad de género tampoco es incorporada en la política de responsabilidad social. Las políticas de contratación cuentan con criterios de no discriminación y las convocatorias a los puestos de trabajo son públicas. Sin embargo, no se identificaron medidas implantadas para mejorar la compatibilidad de la vida personal y laboral o la participación e implicación de la empresa en otras acciones a favor de la igualdad de oportunidades.

Las disparidades en la ocupación de cargos revelan la gran brecha de género en el sector. **En total la empresa reporto 426 personas que trabajan en los rellenos de R3 y R4 de las cuales 8 son mujeres.** En la gestión administrativa la distribución es más equitativa con 40% de mujeres y 60% hombres. Así mismo, en los cargos de dirección que hacen parte de los

cargos administrativos, hay 8 direcciones y la dirección general. **Tres de las ocho direcciones están ocupadas por mujeres** y el director general es un hombre.



Gráfica 37. Distribución de cargos no administrativos por género. R3 y R4, EBI Costa Rica -2023

Hay que tener presente que parte de las desigualdades que se presentan en la empresa, pueden explicarse por las desigualdades existentes en la sociedad. **Hay diferencias significativas entre el tipo de formación de mujeres y hombres, así como estereotipos de género**

asociados a los trabajos de recolección y seguridad que tienen una influencia significativa en la composición por género de los cargos de la empresa. En estos casos, la empresa deberá hacer un esfuerzo todavía más grande para alcanzar niveles igualitarios de participación.

La empresa reconoce esta diferencia y realiza algunas hipótesis sobre las razones de esta falta de personal femenino. Entre ellas por ejemplo esta que algunos perfiles de puesto demandan una disponibilidad para movilizarse dentro y fuera del área metropolitana. Esto puede ser un impedimento específico para algunas mujeres por sus responsabilidades asociadas al cuidado de hijos u otros. **La dirección de talento humano reconoce que hay una oportunidad para fomentar la participación de las mujeres en los puestos de la empresa si se revisan las fichas de los puestos** y se proponen algunos cambios (utilizar un lenguaje inclusivo, comunicar políticas como acuerdos laborales flexibles, permisos parentales y otras prestaciones que apoyen el equilibrio entre la vida laboral y personal, entre otros). **La empresa, realiza acciones para garantizar una participación igualitaria como las jornadas de puertas abiertas.** Este espacio, **sin embargo, puede reforzarse con un enfoque de género para influir en el cierre de esta brecha del sector** (asegurar una participación paritaria, demandar a las instituciones educativas una particular atención para que la información llegue tanto a hombre como a mujeres u otros).

Finalmente hay nuevos proyectos en curso en los que representan una oportunidad para incluir una perspectiva de género en ellos procesos de contratación además de incluir un trabajo conjunto con las asociaciones de mujeres que puedan estar presentes en la zona y que trabajan en la gestión de residuos. Los proyectos son la estación de transferencia y la ampliación y adecuación de las instalaciones.

Relleno Sanitario – R4

Al ser el relleno administrado por Empresas Berthier EBI de Costa Rica S.A. varias de las brechas de género expuestas y las posibles acciones para cerrarlas ya fueron presentadas en la sección anterior, por lo que se presenta únicamente la información particular a este relleno.

Cuadro 62. Cantones con disposición final en R4 y su IDG 2020- IDG-D 2020

	Provincia	Cantón	Distancia de transporte [km]	Índice de Desigualdad de Género (IDG-D) 2020	Índice de Desarrollo de Género (IDG) 2020
1	San José	Desamparados	5	0,326	1,027
2	San José	Aserri	1	0,136	1,017
3	San José	Vásquez de Coronado	22	0,114	1,021
4	San José	Tibás	16	0,144	0,998
5	San José	Curridabat	11	0,130	0,978

En el caso del cantón de Aserri, donde se ubica el relleno sanitario, el IDG-D es de 0.136 lo que indica una muy baja desigualdad entre hombres y mujeres en las 3 dimensiones. Sin embargo, **en los indicadores que miden el empoderamiento y el mercado de trabajo podemos ver una disparidad poco recurrente entre la cantidad de regidoras y regidores ya que hay una mayoría de regidoras. Por el contrario, en la tasa de participación en la fuerza de trabajo aún se evidencian brechas de género.**

Cuadro 63. Índice De Desigualdad De Genero Cantonal Y Sus Componentes, Aczarri – 2020.

Cantón	Índice de Desarrollo de Género	Regidoras	Regidores	Al menos secundaria femenino	Al menos secundaria masculino	Tasa de participación en la fuerza de trabajo (Mujeres)	Tasa de participación en la fuerza de trabajo (Hombres)
Aserri	25,5	57,1 %	42,9 %	63,9 %	60,6 %	56,4 %	76,9 %

Según los datos de 2020 el cantón está en la categoría de Alto en el Índice de Desarrollo de Género (IDG). El cantón se encuentra en esta categoría pues no hay diferencias sustanciales entre hombre y mujeres en las tres dimensiones del desarrollo humano. En el caso del indicador de bienestar material hombre y mujeres se encuentran en un mismo nivel lo que refleja un dominio igualitario en sobre los recursos económicos.

La gestión ambiental y social

✓ *Compromisos ambientales y sociales*

Al igual que para R3, fueron identificados los impactos para hacer los respectivos controles y así obtener los permisos ambientales correspondientes para la operación.

Por ejemplo, según el reporte, para el control de la contaminación atmosférica por ruido, se realizan monitoreos donde en las edificaciones cercanas, talleres y otras áreas del proyecto reciclaje. Para la calidad del aire, se cuenta con el Informe elaborado por el laboratorio de la UNA, donde se presentan los resultados normales de los 3 puntos de muestreo. Finalmente se realizan análisis de la calidad de agua, trimestralmente conforme a la norma de vertido.

Por otro lado, el proyecto cuenta con un programa de revalorización de residuos que tiene un equipo de separación de residuos valorizables. Sin embargo, la gestión ambiental reporto durante la entrevista que aún se presentan eventos ligados a una chatarrería presente en el camino de ingreso de los camiones donde los separadores informales intentan tomar los residuos valorizables. La empresa también tiene actividades conjuntas con un centro de acopio comunitario, pero se desconoce el funcionamiento de este centro con respecto al número de mujeres involucradas.

Otro de los compromisos sociales del PGA es la realización de reuniones trimestrales con líderes/lideresas comunales y otros actores. **El seguimiento de estas consultas no incluye indicadores de participación por género** y se establece una reunión con “líderes” puesto que ninguno de los PGA utiliza un lenguaje inclusivo.

Así mismo, existe el compromiso de Asegurar la contratación de mano de obra local, mantener un registro de elegibles a contratar del área de influencia del proyecto y mantener mínimo un 50% de trabajadores de la zona de influencia directa e indirecta del proyecto del proyecto (Desamparados y Aczarrí). Nuevamente en este caso se habla únicamente de trabajadores invisibilizando la existencia de posibles trabajadoras.

Finalmente, dentro de los compromisos sociales del PGA está el “**desarrollo y mejoramiento de la infraestructura de las comunidades vecinas**”, de tal forma que la desarrolladora las irá ejecutando con el transcurrir de la vida del proyecto, y que serán verificados por el Departamento de Auditoría y Seguimiento Ambiental.” Este compromiso refleja **otra oportunidad de inclusión de consultas diferenciadas para maximizar la participación de mujeres y/u hombres en las actividades y lograr un mayor impacto**. A veces es estratégico realizar algunas actividades con grupos de un solo género, para facilitar la participación tanto de mujeres como de hombres, e incentivar a las participantes a hablar. Estos espacios de género único también pueden desarrollar las capacidades de las mujeres participantes para que puedan involucrarse mejor en grupos de género mixto.

Relaciones con la comunidad (fuera del marco de compromisos ambientales y sociales)

La empresa reporta diversas actividades de labor social en R4 que no están guiados por criterios específicos pero que incluyen: actividades comunitarias, donaciones, patrocinios, proyectos comunitarios, programas comunitarios, reuniones con grupos organizados y visitas. Al igual que R3, las actividades que desarrolla el operador no reportan acciones diferenciales por género o información segregada por ese mismo factor.

Vertedero – V1

El vertedero es administrado por la municipalidad y reúne diversos componentes en varios terrenos aledaños. Los proyectos de la municipalidad para hacer un trabajo más integral del manejo de los residuos sólidos son:

1. Planta de compostaje
2. Senderos y espacios de regeneración
3. Vivero
4. Estación de transferencia
5. Cierre técnico del vertedero

La municipalidad cuenta con un Plan Municipal de Gestión Integral de Residuos (2021) y aunque el vertedero no puede obtener Viabilidad Ambiental, pues su creación fue antes del reglamento de la gestión de los rellenos, si obtuvo un permiso excepcional de la sala constitucional para continuar operando mientras construye la estación de transferencia y realiza el proceso licitatorio para encontrar un sitio y operador de disposición final. Sin embargo, debe seguir lo estipulado en el Reglamento sobre Rellenos Sanitarios con respecto al proceso de cierre técnico.

El relleno sanitario es sitio de disposición final para los cantones de Jiménez, Turrialba y Alvarado.

Cuadro 64. Cantones con disposición final en V1 y su IDG 2020- IDG-D 2020

	Provincia	Cantón	Distancia de transporte [km]	Índice de Desigualdad de Género (IDG-D) 2020	Índice de Desarrollo de Género (IDG) 2020
1	Cartago	Jiménez	5	0,165	1,066
2	Cartago	Turrialba	1	0,222	1,042
3	Cartago	Alvarado	22	0,164	0,976

Según el **Índice de Desigualdad de Género (IDG-D)**, la provincia de Cartago tiene 3 cantones ubicados en la categoría de muy baja desigualdad, 3 en baja desigualdad y 2 cantones, el cantón de Oreamuco y El Guarco, con un nivel de desigualdad media de acuerdo con los datos de 2020. En el caso del cantón de Turrialba, donde se ubica el relleno sanitario, el IDG-D es de 0.222 lo que indica una baja desigualdad. Sin embargo, **en los indicadores que miden el empoderamiento y el mercado de trabajo podemos ver una disparidad en la tasa de participación en la fuerza de trabajo y en la cantidad de regidoras y regidores registrados, ámbitos en los que aún existen brechas de género.**

Cuadro 65. Índice De Desigualdad De Género Cantonal Y Sus Componentes, V1 – 2020

Cantón	ón entos entes	Regidoras	Regidores	Al menos secundaria femenino	Al menos secundaria masculino	Tasa de participación en la fuerza de trabajo (Mujeres)	Tasa de participación en la fuerza de trabajo (Hombres)
Alvarado	49,4	50,0 %	50,0 %	31,0 %	38,7 %	56,2 %	77,0 %
Jiménez	29,9	60,0 %	40,0 %	67,2 %	55,7 %	55,9 %	77,1 %
Paraíso	44,2	42,9 %	57,1 %	45,3 %	50,3 %	57,7 %	76,3 %
Turrialba	3,5	35,7 %	64,3 %	31,8 %	39,4 %	55,8 %	77,3 %
Cartago	34,0	50,0 %	50,0 %	50,4 %	52,4 %	58,3 %	76,0 %
La Unión	25,3	55,6 %	44,4 %	55,4 %	55,4 %	58,3 %	76,0 %
El Guarco	3,1	50,0 %	50,0 %	60,6 %	53,8 %	58,3 %	76,0 %
Oreamuno	16,1	60,0 %	40,0 %	57,3 %	61,7 %	58,3 %	76,0 %

Por otro lado, según los datos de 2020 el cantón se encuentra en la categoría de medio alto en el Índice de Desarrollo de Género (IDG). En la desagregación de datos del Atlas de desarrollo humano cantonal **se puede constatar para el cantón de donde se encuentra el vertedero, una disparidad positiva frente a las mujeres en términos de Bienestar material.**

La gestión ambiental y social

✓ *Compromisos ambientales y sociales*

El vertedero cuenta con permiso de funcionamiento, pero no de viabilidad ambiental. El Vertedero Municipal se operó durante el 2022 por la autorización otorgada en la Resolución 2022000001 del Expediente 17-017903-0007-CO de la Sala Constitucional. La Municipalidad adquirió el compromiso de informes de los avances a la Sala Constitucional y al Ministerio de Salud, conforme al documento denominado “Plan de Acciones para brindar solución a la disposición final de residuos sólidos municipales del cantón de Turrialba”.

Las actividades que cumple el vertedero para su cierre técnico son las relacionadas con:

- Acomodo y compactación de residuos sólidos
- Cobertura de residuos sólidos
- Limpieza de cunetas
- Mantenimiento de áreas verdes
- Mantenimiento de caminos internos
- Pesaje de residuos

El proyecto de Estación de transferencia de residuos que incluye el proyecto de compostaje, si cuenta con Viabilidad Ambiental mediante la Resolución N° 3418-2019-SETENA con vigencia de cinco años. En esta se establece que, para cada impacto ambiental identificado en la matriz básica de identificación de impactos ambientales, se presenta la correspondiente medida de mitigación, lo que quiere decir que el proyecto cuenta con un PGA.

El Área de Influencia Directa (AID) del proyecto, es la comunidad de San Juan Sur. La mayor parte está rodeada por zonas forestales, no obstante, también se comparte con áreas donde se ubican estructuras destinadas a casas de habitación, infraestructura comunal, así como, estructuras para actividades de bienes y servicios. Sin embargo, la relación del proyecto con el uso de la tierra actual no presenta impactos mayores ya que se lleva a cabo en una zona ya intervenida.

El proyecto se encuentra en fase preparación, así como el proyecto de compostaje, dos oportunidades para enfocarlos a una perspectiva de género. **La municipalidad lleva a cabo actualmente diferentes procesos licitatorios donde las acciones recomendadas en la sección 8.1.2, son pertinentes y serían un paso hacia el cierre de brechas de género en el sector de la gestión integral de residuos.** El concurso N° 2022LN-000001-0075 denominado “Construcción del proyecto Estación de Transferencia de residuos sólidos del cantón de Turrialba”, el resultó infructuoso y los fondos deben ser liquidados y presupuestados nuevamente.

La municipalidad cuenta con un Centro de Recuperación de Residuos Valorizables, el cual tiene rutas de recolección de material reciclable, recolectando vidrio, cartón y plásticos y operó por un gestor autorizado de residuos. Sin embargo, se desconoce la cantidad de mujeres que trabajan con este gestor autorizado.

Este centro constituye una puerta de entrada para proponer acciones que disminuyan la brecha de género en los procesos de valorización de residuos para reciclaje. **Puede contribuir a la formalización de las personas que trabajan en la recolección de residuos dado que las mujeres recolectoras y recicladoras que trabajan en el sector informal tienden a quedar excluidas de los sistemas de recogida de residuos cuando éstos se formalizan y generan ingresos.**

Así mismo la municipalidad tiene previsto que la estación de transferencia de residuos sea operada por personas asociadas a ASOPRET (Asociación de personas recolectoras de Turrialba) quienes actualmente trabajan como recolectores/as informales de residuos valorizables dentro del Vertedero. Otra oportunidad donde se podrían trabajar sobre los sesgos sexistas presentes en la cultura organizacional y operativa de los centros de acopio. Otro de los impactos sociales señalados por la gestora ambiental del municipio es **el próximo aumento de tarifas de recolección pues el sitio de disposición final quedara más alejado. Este punto se reconoció como una oportunidad para explorar los impactos diferenciales de esta aumentación y que el municipio pueda generar medidas de mitigación adecuadas** dado el impacto desigual que puede generar en las mujeres (seccion1.1).

✓ *Personal responsable de la gestión ambiental y social*

Según la información presentada por la municipalidad tiene tres departamentos que están a la cabeza de hombres, así como la alcaldía municipal. La vice-alcaldía está a cargo de una mujer. La Gestión Ambiental está liderada por un hombre y una mujer.

No se tiene más información sobre la distribución de los otros cargos de la municipalidad pues se solicitó el organigrama, pero este no ha sido actualizado desde 2007.

La persona entrevistada **no tiene conocimientos sobre el enfoque de género ni su aplicación a nivel de la gestión de residuos**. Sin embargo, **están de acuerdo en que hay desigualdades evidentes en términos de la representatividad laboral de las mujeres en el sector**. Así mismo, manifestó un interés en poder orientar las acciones de compromisos ambientales y sociales hacia la disminución de las disparidades entre hombres y mujeres en cuanto a derechos, recursos u oportunidades en el sector de la gestión de residuos y sus impactos.

Relaciones con la comunidad (fuera del marco de compromisos ambientales y sociales)

La Gestión Ambiental Municipal es el órgano encargado incentivar la protección y la educación ambiental y trabaja en conjunto con organizaciones que se enfocan en la limpieza de espacios naturales, la recolección de reciclaje y el desarrollo de proyectos de compostaje comunal, entre muchas otras actividades. Entre ellas se encuentran:

- Educación ambiental para comunidades, organizaciones, instituciones, comercios, enfocándose en valorización y economía circular.
- Proyección de trabajo con asociaciones de base e informales para proyectos como transformación de plásticos (los que no se exportan), aprovechamiento de residuos cárnicos
- Planta de compostaje
- Trabajo con ACEPESA para un proceso de formalización de las personas recicladoras del Vertedero
- Comité para la creación e implementación del Plan de Gestión Integral de Residuos en conjunto con la UCR, la UNED, el CATIE y la organización Turrialba Sostenible.

Estas constituyen otras oportunidades para orientar dichos programas hacia la disminución de las brechas de género del sector de la gestión integral de residuos.

Como se mencionó anteriormente, estas y otras acciones son cruciales para la valorización energética pues la calidad de los residuos que llegan al sitio de disposición final influye en la calidad del biogás producido para una posible valorización energética.

La gestión de recursos humanos

Se evaluó la existencia de políticas internas en términos de género y la participación de las mujeres en todos los cargos del relleno sanitario.

En el vertedero trabajan actualmente 18 personas con una mayoría masculina.

5.

PROPUESTAS DE CAPTURA APROVECHAMIENTO Y VALORACION DE BIOGAS

Los sistemas de captura, tratamiento y valorización del biogás se establecen a partir de las condiciones de los sitios de disposición final, donde los sistemas de captura activa deberán ser contemplados como obras intrínsecas en la gestión integral de los residuos, desde el inicio de la disposición de los residuos con el propósito de prevenir y mitigar los efectos de la emisión del biogás.

En el Anexo 6 se presentará los componentes típicos de cada sistema, su función, tecnologías, materiales y consideraciones de diseño contempladas en la elaboración de las propuestas de los 5 sitios muestreados.

5.1. Generalidades de los sistemas propuestos por sitio – Fase 4

Las propuestas que se describirán de cada uno de los 5 sitios se establecieron a nivel prefactibilidad teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la evaluación de producción de biogás, información de la operación actual, información recolectada y suministrada por los operadores. Para el análisis se asociaron las estructuras existentes, área actual de disposición, condiciones topográficas y configuración de las celdas de disposición, entre otros aspectos que se precisaran posteriormente.

La tipología usada en los **sistemas de captura** propuestos se basa en pozos verticales interconectados por medio de cabezales adaptados y llevados hasta manifolds que, a su vez, se conectarán a la conducción del biogás, por medio de líneas secundarias y líneas principales hasta el área de quema y/o aprovechamiento.

Dicha configuración planteada busca tener la mayor cobertura homogénea del área para evitar que se produzcan procesos de inestabilidad relacionados a los asentamientos diferenciales causados por la captura y extracción activa de biogás generando a su vez seguridad en el proceso, disminución de atmosferas explosivas, reducción de emisiones volátiles y la optimización de la eficiencia en la captura.

Adicionalmente se establece modularidad en las redes de conducción para dar continuidad a la operación en caso de requerir aislamiento local. En cuanto a las cantidades, se propone la redundancia de las unidades en caso de fallas y cambios requeridos durante el periodo de aprovechamiento para sostener la producción.

Por último, se establece que todas las líneas de conducción deberán presentar una pendiente que favorezca la conducción y extracción de condensado y así evitar taponamientos hidráulicos y la devolución hacia los pozos que terminen afectando la longitud filtrante de los pozos.

En los **sistemas de extracción forzada** requeridos para la conducción del biogás proveniente de las celdas de los rellenos se seleccionaron los sopladores por medio del flujo máximo a capturar y de una aproximación de la diferencia de presión que deberá proporcionar al sistema.

Lo anterior deberá ser revisado y ajustado con mayor detalle cuando se tenga los diseños a nivel de ingeniería del sistema de captura y conducción, con accesorios, requerimientos de

presión positiva a la salida de los blowers y elevación respecto al pozo que se encuentre a mayor distancia crítica posible desde la ubicación de los sopladores con el fin de establecer las pérdidas de energía que estos equipos deben suministrar para así establecer el punto de operación óptimo entre la curva del sistema y la curva de los sopladores.

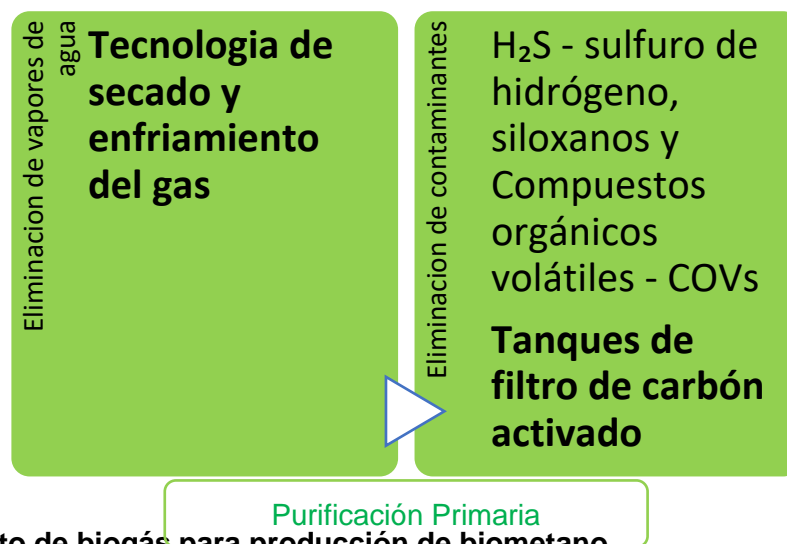
En cuanto a las propuestas para los **sistemas de tratamiento, quema y purificación (upgrading)** en función al aprovechamiento que se destine el biogás, se seleccionaron las tecnologías que mejor se ajustan según la complejidad de la tecnología, costos, facilidad en la adquisición y operación, flujos de biogás producidos y el tipo de aprovechamiento propuesto.

De manera general se detalla en cada sitio el tratamiento relacionado a la purificación primaria o limpieza inicial que corresponden a un conjunto de procesos aplicados independiente a las tecnologías usadas en la valorización, debido a que se relacionan con la prevención de daños en los sistemas, disminución de riesgos de explosión y optimización en las actividades de mantenimiento.

Los tratamientos contemplados en las propuestas en función de los aprovechamientos corresponden a:

✓ Tratamiento de biogás para generación eléctrica

Según las características típicas del biogás resultante del sistema de limpieza primaria y contrastadas con las exigencias para su uso en la generación eléctrica, se concluye que el tratamiento no requerirá equipos adicionales o sistema de depuración adicional. Por lo que los sistemas que se proponen en los sitios destinados a esta valoración abarcan tecnologías que conforman la purificación primaria únicamente correspondientes a:



✓ Tratamiento de biogás para producción de biometano

La definición de las tecnologías de tratamiento y el nivel de depuración al que se deba llegar para su uso como biometano es más restrictiva que los sistemas de purificación primaria requeridos para la generación de energía eléctrica.

Según lo anterior, las propuestas de tratamiento para producción de biometano que se desarrollan contemplan dos fases. La primera relacionara la etapa para la limpieza inicial orientada a la prevención de daños en los sistemas, disminución de riesgos de explosión

y optimización en las actividades de mantenimiento. La segunda etapa abarca la depuración que logre alcanzar el nivel de calidad para el biometano como se muestra en el siguiente esquema y la Ilustración 9.

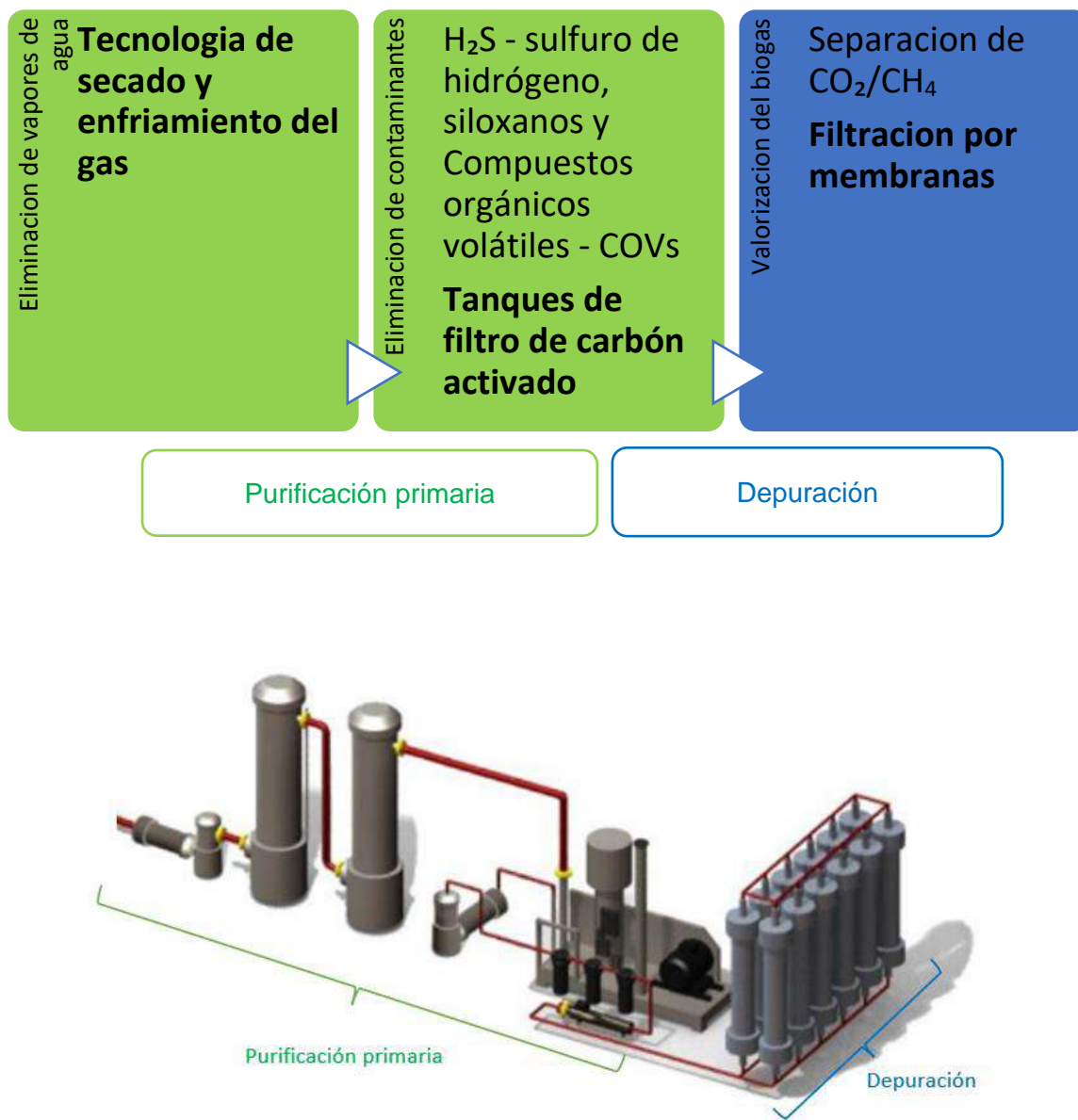


Ilustración 9. Esquema del proceso de depuración para producción de biometano Fuente AROL ENERGY

Las propuestas de los **sistemas de quema** planteadas se justifican para cada sitio según si se contempla una valoración o no, debido a que en el primer caso se concibe el proceso de quema como un método para la destrucción de los excedentes o de los volúmenes producidos cuando el sistema de aprovechamiento entra en parada. En el segundo caso, si en el sitio no se establece ningún tipo de valoración, la quema se orientará como una medida de gestión ambiental para la destrucción del metano que resultaría generando mayores impactos si no se destruye el biogás producido en los sitios de disposición final.

En cuanto a las antorchas, el parámetro de diseño corresponde al flujo máximo, el cual es un factor determinante para la selección del equipo entendiendo que este flujo a tratar en el escenario crítico

Finalmente, para el **sistema de valorización** se evaluó el potencial de generación de biometano para producción de GNV y GNL y el potencial de generación eléctrica.

Lo anterior se justifica al abordar el contexto nacional para dichos aprovechamientos y adicionalmente para Hidrogeno Verde y BioCO₂ donde no se evidencia mejores condiciones de desarrollo y oportunidades para su implementación para estas dos últimas alternativas.

Entre los retos encontrados para esas valorizaciones de biogás se ha encontrado:

- ✓ La falta de una demanda o grandes consumos que hagan comercialmente interesante la producción de hidrogeno verde y bioCO₂ imposibilitando la viabilidad financiera.
- ✓ El nicho del mercado actualmente es emergente, limitado y a nivel internacional se tiene una fuerte competencia, por lo que dificultaría la búsqueda de inversionistas nacionales e internacionales.
- ✓ Los sistemas de estas valoraciones permiten el aprovechamiento térmico de esta forma de energía remanente en actividades económicas que requieran calor en sus procesos productivos. De manera general en Costa Rica y puntualmente para los sitios seleccionados del estudio, no se identifico posibles interesados en adquirir esta energía térmica, por lo que no se obtendría un ingreso adicional y por el contrario se debería invertir para la gestión térmica de los procesos con el fin de no afectar la operación de dichos sistemas.
- ✓ Para la tecnología de producción de hidrogeno verde, los altos costos asociados al CAPEX y OPEX, y que no hay un mercado establecido predeterminan un modelo financiero con condiciones menos favorables que los aprovechamientos de biometano y producción de energía eléctrica

Como se puede apreciar en la siguiente ilustración se tiene que para la valorización del biogás en procesos de cogeneración se puede producir energía eléctrica y energía térmica. En los 4 rellenos sanitarios de la muestra seleccionada, se evaluó la generación de energía eléctrica, mas no la valorización de la energía térmica, ya que no se ha identificado el requerimiento de calor dentro de las instalaciones o para clientes externos. La justificación de la tecnología para la producción de la energía eléctrica se encuentra en el Anexo 6.

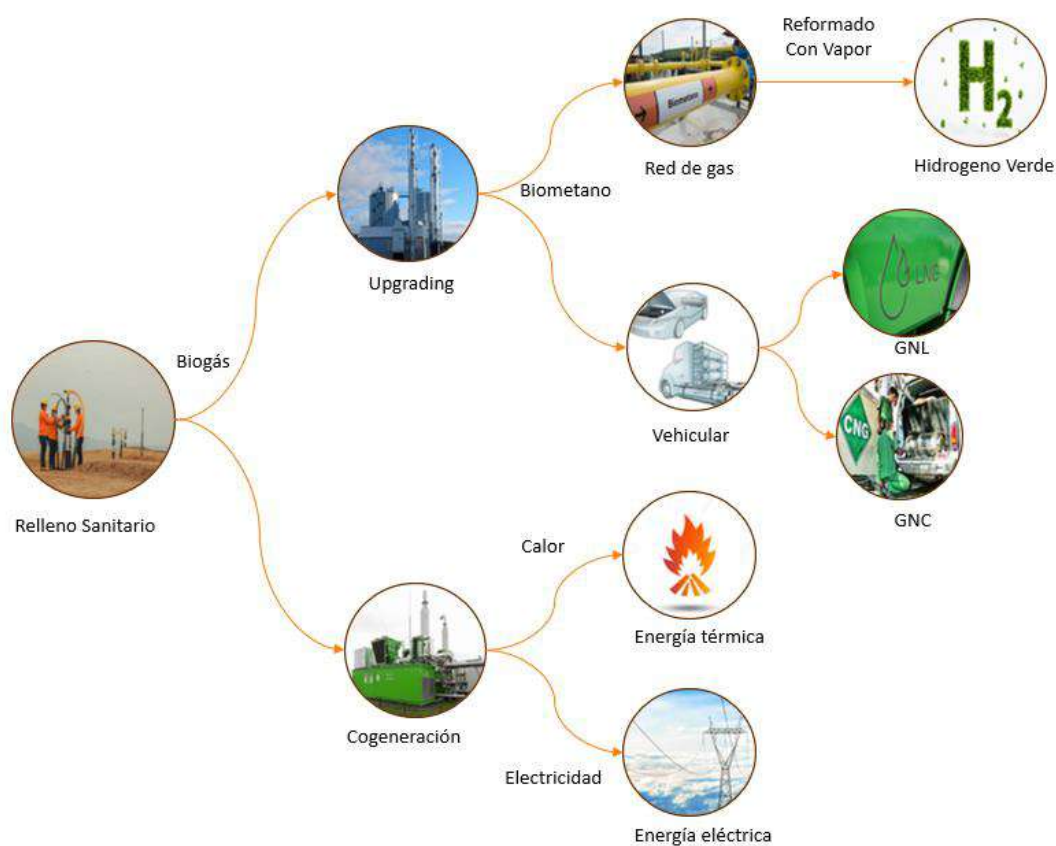


Ilustración 10. Formas de valorización de biogás generado en rellenos sanitarios .

Por otro lado, la producción de biometano se evaluó en los rellenos sanitarios ubicados GAMT de Costa Rica, ya que por el caudal de producción y la densidad poblacional se puede desarrollar el mercado de biometano para el abastecimiento de flota vehicular. Ver siguiente cuadro.

Partiendo de los diferentes sistemas se presenta el P&ID's (pumping and instrument diagram) de las propuestas de cada sitio en función de las etapas contempladas a nivel de prefactibilidad. A continuación, se presenta la descripción de los componentes con la finalidad de facilitar la lectura de los sistemas propuestos para cada sitio y sean un insumo para futuras

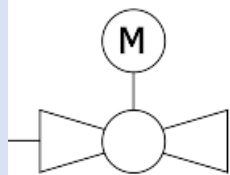
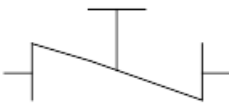
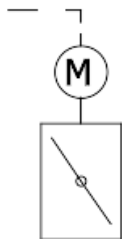
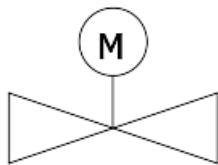
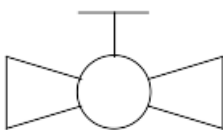
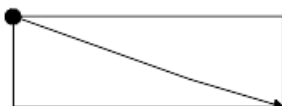
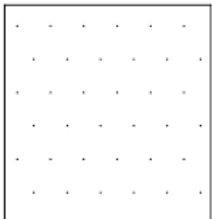
TIPO DE PROYECTO DE APROVECHAMIENTO	TAMAÑO DE PROYECTO RECOMENDADO	REQUERIMIENTOS	RELLENO SANITARIO
Planta de producción de biometano	Capacidad de producción de biogás > 600 m ³ /h	Red de gas Flota vehicular Puerto de exportación Alta densidad poblacional para desarrollo del mercado.	R3 (Caudal biogás: 2400 m ³ /h) Parque Tecnológico Ambiental Aczarrí (Caudal biogás: 5800 m ³ /h)
Estación de producción y abastecimiento de GNC en Relleno Sanitario	30 – 350 m ³ /h	Flota vehicular de camiones	
Energía eléctrica – Turbina / generador	Potencial de generación > 8 MW	Red eléctrica para inyección	
Energía eléctrica – Estándar generador eléctrico con motores recíprocos.	Potencial de generación > 800kW	Red eléctrica para inyección Potencial consumidor	R1 (Potencial: 2,2 MW) R3 (Potencial: 1,6 MW) Parque Tecnológico Ambiental Aczarrí (Potencial: 6,0 MW)
Energía eléctrica – Microturbina	Potencial de generación entre 30 -750 KW	Red eléctrica para inyección Potencial consumidor	R2 (Potencial: 250 KW)
Energía eléctrica – Small generador eléctrico con motores recíprocos.	Potencial de generación entre 100 KW - 1 MW	Red eléctrica para inyección Potencial consumidor	

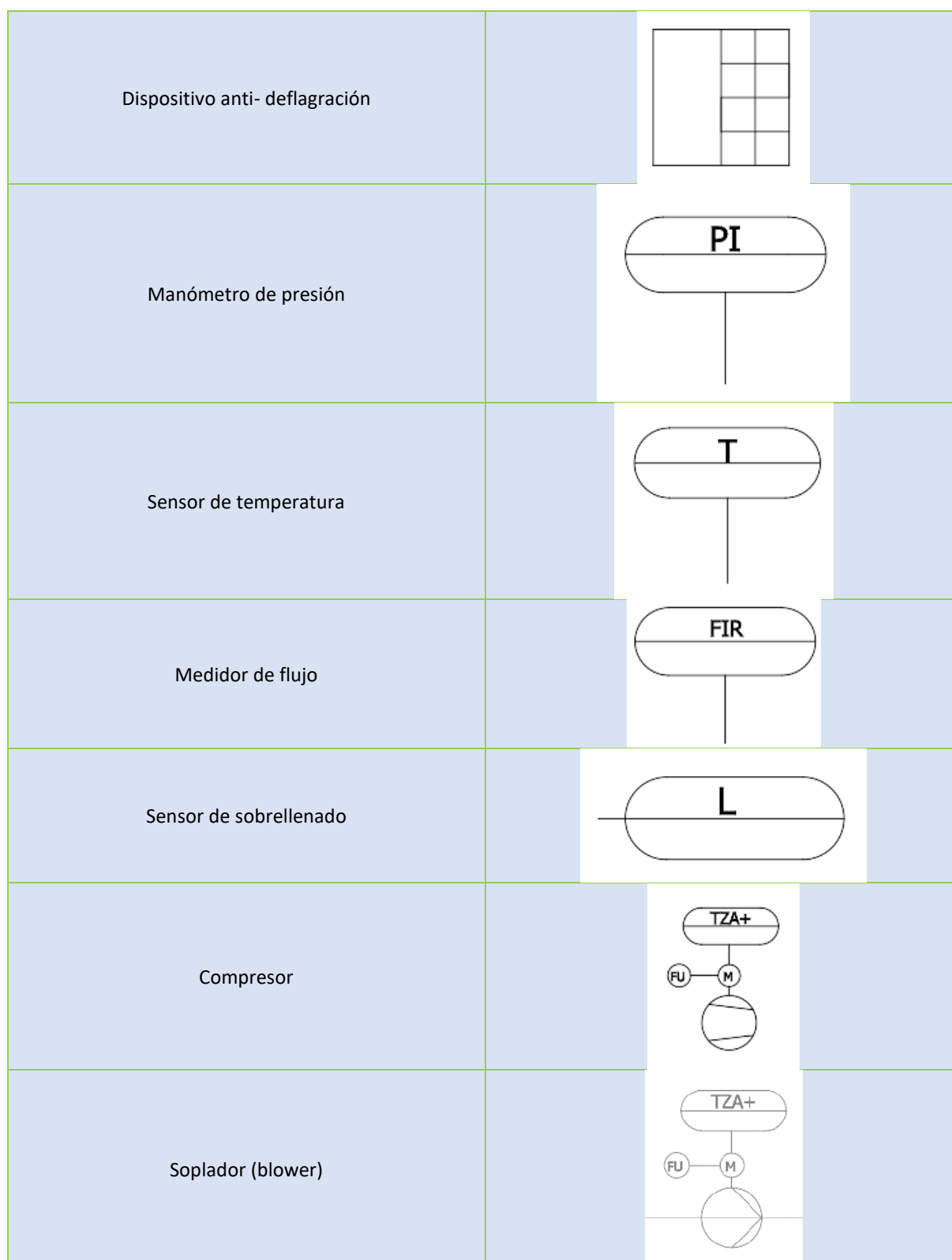
etapas de diseño a detalle.

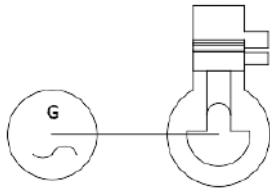

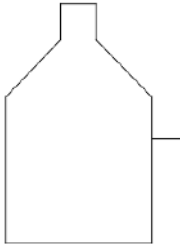
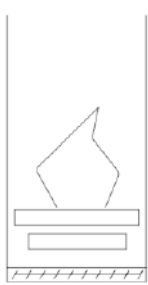
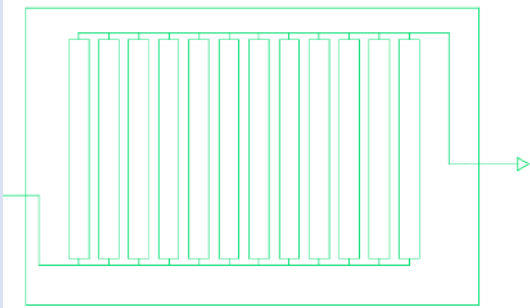
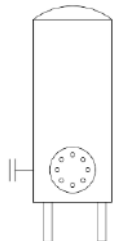
Cuadro 66. Parámetros considerados para las propuestas de valorización en los rellenos sanitarios

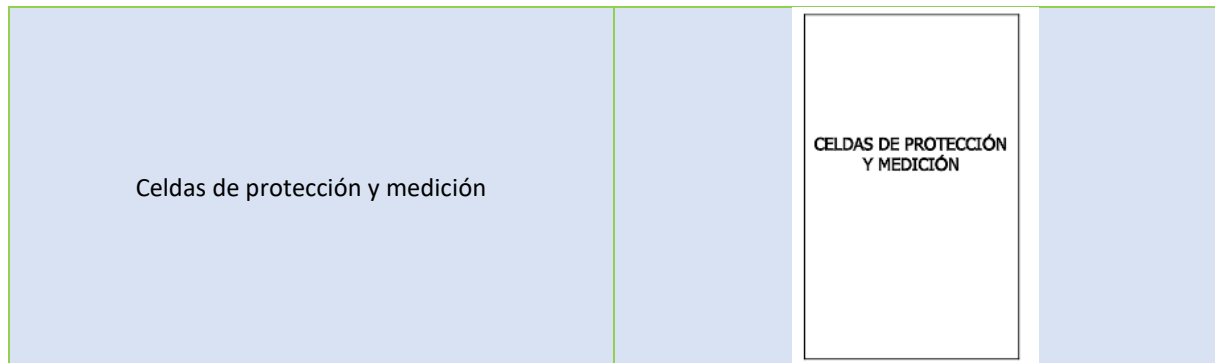
Cuadro 67. Descripción de los componentes P&ID de las diferentes propuestas

Descripción	Detalle
Válvula reguladora de presión	

Electroválvula de paso	
Válvula manual mariposa	
Válvula reguladora	
Válvula By-pass	
Válvula de bola	
Válvula Antirretorno	
Analizador de gases	



Generadores eléctricos	
Deshumidificador	
Tanque de condensado	
Antorcha	
Filtro de membranas	
Filtro de carbón activado	



5.2. Propuesta para R1

Para R1, según las generalidades de diseño mencionadas previamente, se ha planteado una propuesta que contempla los siguientes sistemas:

- ✓ Sistema de Captura
- ✓ Sistema de extracción forzada y quema
- ✓ Sistema de tratamiento de biogás
- ✓ Sistema de valoración

Cada uno de los sistemas se describirán función de las consideraciones encontradas en R1 y que a su vez orientaron a los resultados planteados como se evidencia en el siguiente P&ID.

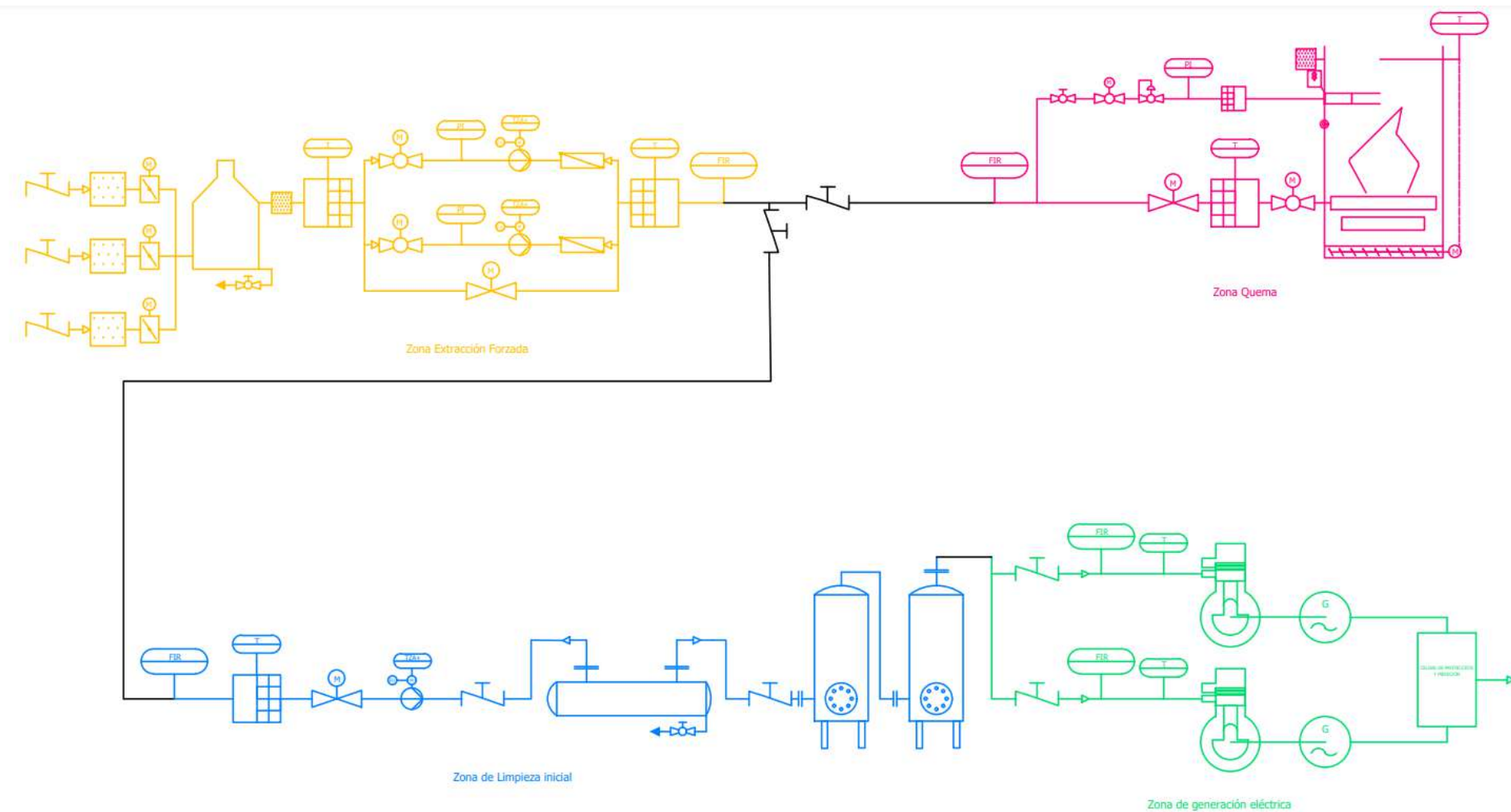


Ilustración 11. P&ID de los sistemas de extracción forzada, quema, tratamiento y valorización de R1

5.2.1. Sistema de Captura R1

El relleno sanitario está constituido por 6 celdas activas y 7 celdas proyectadas donde se tienen un número importante de chimeneas distribuidos en el área de la siguiente manera.



Imagen 19. Distribución de chimeneas existentes en R1 (Fuente: DWG proporcionado por el relleno sanitario)

Se evaluó el área cubierta por los pozos existentes y al observar la redundancia de chimeneas se localizaron aquellas que cubren no solo el área de aferencia propia si no de aquellas cercanas, con el propósito de ubicar los puntos estratégicos de conexión directa a los manifolds (trazados en Azul Imagen 20), y aquellas que para conexión entre pozos (trazados en fucsia Imagen 20) y así disminuir la red de conducción que se propone. A continuación, se presenta los pozos seleccionados para conexión directa a los manifold.



Imagen 20. Chimeneas seleccionadas para la conexión directa a los manifolds en R1

Siguiendo las consideraciones para definir las redes de captura y conducción relacionadas a la topografía y áreas de enterramiento de residuos, la propuesta establece una línea principal

con configuración en anillos según la Imagen 21 donde, ante casos de fallas o cierres parciales se pueda hacer aislamientos locales sin que afecte la captación del biogás en toda la red.

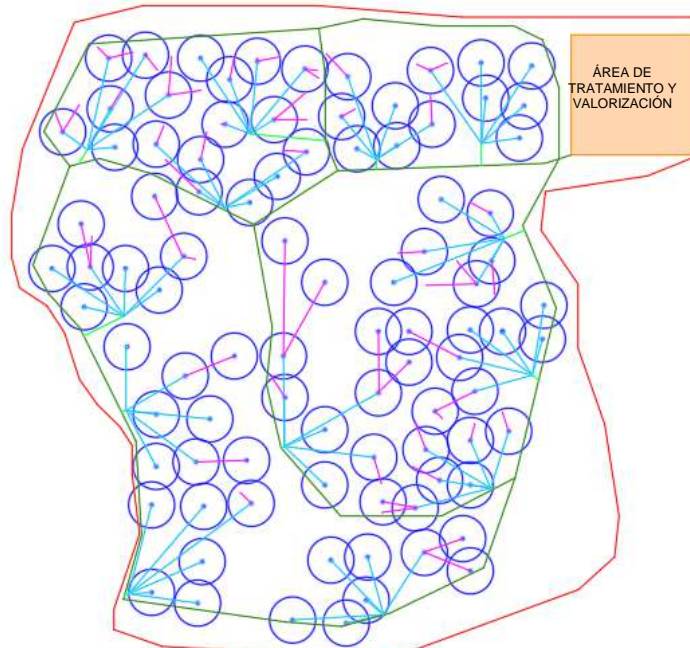


Imagen 21. Configuración de la red de conducción para R1

Con el propósito de garantizar que la succión en los pozos que se conectarían directamente a los manifold, no genere ingreso de aire de las chimeneas que son próximas y que no estarían adecuadas en la parte superior, se propone interconectar dichos pozos como se muestra en el Anexo 6.

Según la distribución de pozos se requieren de 13 manifold con 6 conexiones cada uno, como se puede observar en la Imagen 21.

Finalmente, se propone que el área para el tratamiento y/o aprovechamiento se localice en la zona nororiental donde no se tienen actividades de enterramiento y la topografía favoreciendo la conducción de condensado a los sistemas respectivos de tratamiento hacia la zona más baja del terreno.

El CAPEX asociado al sistema de conducción planteado se presenta en el siguiente cuadro.

Cuadro 68. CAPEX del sistema de conducción para R1

Descripción	Unidad	Precio Total (USD)
Tubería DN250	m	\$ 92 455,56
Tubería DN160	m	\$ 3 024,00
Tubería DN90	m	\$ 19 674,00
Válvula mariposa alma INOX DN 250	UN	\$ 2 664,00
Válvula mariposa alma INOX DN 160	UN	\$ 1 963,00
Válvula mariposa alma INOX DN 80	UN	\$ 3 978,00

Porta bridas DN250	UN	\$ 15 510,40
Porta bridas DN 160	UN	\$ 49,00
Reducción DN250-160	UN	\$ 2 847,00
Reducción DN160-90	UN	\$ 1 024,92
Tee 250	UN	\$ 18 960,00
Manguera flexible	m	\$ 23 218,00
Abrazaderas inox	UN	\$ 2 244,00
Manifold x 6	GLB	\$ 39 702,00
Cabezales de pozo	GLB	\$ 56 760,00
Tanque de desagüe	GLB	\$ 22 368,00
Puntos de muestreo	GLB	\$ 1 170,00
Anclajes	UN	\$ 4 446,00
Mano de Obra	GLB	\$ 98 883,57
Total CAPEX		\$ 410 941. 46

5.2.2. Sistema de Extracción y Quema R1

En el relleno R1 el sistema de quema se establece como una medida de seguridad para la destrucción de los excesos o de la totalidad de la producción en caso de que se presenten emergencias, paradas de mantenimiento o de emergencia en el sistema de valorización.

A continuación, se presenta las referencias, características, CAPEX y OPEX del sistema de extracción forzada y quema controlada para el relleno sanitario.

Cuadro 69. Propuesta de equipos para extracción forzada y quema en R1.

340 msnm	
1500 m ³ /h	
4 – 100 mbarg	
1 antorcha de 3000 m ³ /h	
Número de unidades	1

Cuadro 70. Especificaciones de la cotización realizada a la empresa C-deg – CAPEX. No Incluye transporte internacional, nacionalización y transporte nacional. No incluye IVA ni Arancel

LISTA	ITEM	PRECIO UNITARIO (USD)	PRECIO TOTAL (USD)
SISTEMA DE EXTRACCION Y QUEMA CONTROLADA			\$ 744 133
1	Sistema de extracción forzada y quema controlada	\$ 482.596	\$ 482.596
1.1	Sistema de quema alta temperatura		
1.2	Estructura en acero galvanizado		
1.3	Aislamiento cerámico de 100 mm		
1.4	Persianas para aire de combustión		

1.5	Controlador para persianas		
1.6	Termopar tipo s con certificado de calibración		
1.7	Sistema de ignición		
1.8	línea de gas válvula solenoide y con arrestador de llama en ¾ o ½ in		
1.9	Tren de gas DN 250 hacia antorchas		
1.10	Tren de gas en acero galvanizado con válvulas eléctricas transmisores de presión y temperatura medidor de flujo de tubo Pitot, arrestador de llama IIA1. Termopares		
1.11	Sistema de succión / estación del blower		
1.12	sistema de blower y variador de frecuencia		
1.13	Sistema de alimentación y control de combustión		
2	Puesta en marcha del sistema de extracción forzada y quema de biogás	\$ 96.519	\$ 96.519
3	Obras civiles	\$ 32.537	\$ 32.537
4	conexión eléctrica	\$ 132.481	\$ 132.481

Cuadro 71. Resumen de OPEX del sistema de extracción forzada y quema controlada – Cotización C-deg

OPEX ANUAL			
Descripción	Cantidad	Precio Unitario (USD)	60.648 USD/año
Repuestos para el sistema de extracción forzada y quema del biogás: La estimación de costos operativos se consideraron repuestos como termopares, sensores de composición del biogás, sensores UV y transformadores de ignición, que de acuerdo con la experiencia de C-deg en la operación de este tipo de proyectos, son los elementos que se requiere reponer con mayor frecuencia.	1	\$ 2.930	2.930 \$/año
Consumo energético de la planta de extracción (potencia = 70kW) Se estima un consumo energético anual de 526.937 kWh	362.269 kWh	0,14 \$/kwh ¹⁰	50.718 \$/año
Calibración de los analizadores para certificación de bonos de carbono en función de la metodología seleccionada	1	\$ 7.000	7.000 \$/año

¹⁰ Tarifa de vigente de kwh para industria en Costa Rica <https://www.cnfl.go.cr/servicios/electricos/inmuebles/tramites/tarifas>

5.2.3. Sistema de Tratamiento R1

El tratamiento del biogás antes de ser aprovechado como combustible en los equipos de generación reduce los periodos de mantenimiento del equipo en este tipo de instalaciones, como prolonga su vida útil y reduce el impacto de las emisiones de los gases de combustión a la atmósfera.

Los componentes para reducir o eliminar del flujo de biogás son las siguientes:

- ✓ Vapor de agua. El vapor de agua disminuye drásticamente el poder calorífico inferior PCI del biogás, así como, facilita la formación de ácidos corrosivos.
- ✓ Hidrocarburos halogenados. Particularmente aquellos que poseen cloro y flúor favorecen la corrosión de las partes internas de las máquinas.
- ✓ Sulfuro de hidrógeno: Prevenir la corrosión y evitar concentraciones tóxicas para el ser humano, así como, prevenir la formación de óxidos de azufre (SO_2) que posibilita la formación del ácido sulfuroso (H_2SO_3) que es altamente corrosivo.
- ✓ Siloxanos. Evitar la deposición de sílice en las diferentes partes internas de las máquinas, con ello, eliminar la posibilidad de desgastes de partes y piezas y la pérdida de estabilidad de partes que giran a gran velocidad

Los proveedores de los equipos usados en la generación de energía cuentan con fichas técnicas que describen los parámetros de especificación del biogás entrante al sistema para garantizar el uso, exposición y funcionamiento adecuado para evitar daños, deterioros prematuros o reducción en la eficiencia de operación.

Debido a que los requisitos de adecuación del biogás varían ampliamente de un proyecto a otro por la variabilidad en la fuente del biogás. Por lo tanto, no hay soluciones estándar, sino más bien, una combinación de componentes para ajustar los siguientes parámetros:



5.2.3.1. Eliminación de vapores de agua

Según la tecnología mencionada para la remoción de la humedad del biogás, se establece el equipo de enfriamiento requerido en función del contenido de humedad típico de biogás, la temperatura y el flujo máximo de la caracterización. La finalidad es el enfriamiento del gas hasta 8 °C, garantizar su condensación y secar el gas que ingresa posteriormente a los filtros de carbón activado y motores de generación eléctrica.

A continuación, se presenta los parámetros para la selección del sistema de eliminación de vapores en el R1 y las características del sistema de enfriamiento.

Temperatura de Entrada	42
Altitud	340 m.s.n.m
Flujo	1500 Nm ³ /h
Composición	Realizada en campo. % de contenido de H ₂ O referencial 7%
Caída de presión	15 mbar
Presión de operación del gas	200 mbar
Max. Presión de operación	0,5 bar
Humedad relativa biogás	100%
Se requiere	
Punto de rocío: 8 °C Temperatura a la salida de filtro carbón activado aprox: 8 °C (saturado)	

Unidad de Acondicionamiento de Biogás: **BioSec-1500**

La unidad de acondicionamiento de biogás del presente presupuesto está compuesta por un refrigerador biogás/agua con su separador de condensados y enfriadora de agua (Chiller) debidamente integrado.

Las especificaciones técnicas de los elementos del BioSec-1500, se adjuntan en el anexo de cotizaciones

- ✓ SEPARADOR DE CONDENSADOS SC-700:
- ✓ REFRIGERADOR RH-700/1500/E
- ✓ UNIDAD ENFRIADORA DE AGUA, CHILLER AIR-TAE-502

Los elementos que componen la unidad de acondicionamiento **BioSec** se encuentran Inter conexiónados entre ellos sobre una bancada de manera que forman una unidad compacta preparada para funcionar una vez conexiónadas la entrada y salida del biogás, y de recibir acometida eléctrica de cliente al cuadro de control (Plug&Play).

Entre los beneficios de la implementación de esta tecnología se tiene la reducción de tiempos de parada en las plantas de generación eléctrica, optimiza los procesos de combustión, reduce parcialmente sustancias solubles en el agua como siloxanos y optimiza procesos de tratamientos subsecuentes, como los filtros de carbón activado.

5.2.3.2. **Eliminación de contaminantes**

Esta etapa del sistema se centrará en la eliminación de H₂S - sulfuro de hidrógeno, siloxanos y Compuestos orgánicos volátiles (COVs) según la presencia de estos componentes en el biogás del relleno sanitario y como se pudo corroborar, respecto al sulfuro de hidrogeno, en la campaña de caracterización de biogás en R1

Por lo anterior, se realiza una comparación de la caracterización realizada a la muestra tomada del relleno frente a las exigencias de composición del biogás a la entrada de los equipos de generación eléctrica, con el propósito de identificar aquellos componentes que no se encuentran alineados a los requerimientos y así mismo proponer la tecnología que se ajusta al flujo de diseño y remueve los componentes químicos del biogás.

*Cuadro 72. Parámetros exigidos en la composición del biogás a la entrada de los equipos generadores de electricidad
(Fuente: Jenbacher data sheet)*

Limit levels for trace substances and impurities ¹⁾				
Designation	Additional	Limitation	Unit	Note
Total sulphur	S	≤ 700	mg/10 kWh	Note effect on oil service life ²⁾
		≤ 1200	mg/10 kWh	With limited warranty ³⁾
Halogen compounds	Total Cl + 2 x F	≤ 100	mg/10 kWh	Note partial load operation ⁴⁾
		≤ 400	mg/10 kWh	With limited warranty ³⁾
Ammonia	NH ₃	≤ 50	mg/10 kWh	Higher NH ₃ values in the fuel gas may result in the NO _x values for the engine exhaust gas stated in the specification being exceeded.
VOSC as total silicon	Total silicon as Si _{BG} (silicon operational limit value)	≤ 0.02		The operational value of silicon Si to be determined exactly by means of an oil analysis ⁵⁾
Highly flammable components	Acetylene (C ₂ H ₂)	≤ 0.02	% vol.	These substances can cause uncontrolled spontaneous combustion in the system!

Como se puede observar en el Cuadro 72 los parámetros detectados en la caracterización no restringen su uso en los equipos para la valoración definidos en el Cuadro 73 por lo que se procederá a establecer la especificación de los Tanques de filtro de carbón activado con flujo máximo de 1500 m³/h para R1.

La configuración de las referencias se diferencia en las cámaras, el flujo nominal, flujo máximo admisible y las dimensiones de su instalación. En las referencias comerciales se encuentra que los filtros tienen una tolerancia de hasta 2000 m³/h.

Relacionando el valor del flujo de biogás que se captaría en R1 se establece el sistema de limpieza primario con la siguiente descripción.

Cuadro 73. Propuesta de tecnología para limpieza primaria en R1

Referencia	FAKA 6000K2
Material	Acero con revestimiento electrostático en el interior
Número de unidades	1
Número de celdas	2
Flujo nominal del total de unidades	1400 m ³ /h
Máximo flujo del total de unidades	1700 m ³ /h

El uso de la tecnología descrita presenta requerimientos para la entrada del biogás al filtro relacionados a la composición y propiedades físicas que aseguran la eficiencia, el funcionamiento y la prevención de daños.

Cuadro 74. Composición del biogás a la entrada del sistema de tratamiento para R1 (Fuente: Data sheet FAKA 6000K2)

Methane CH ₄	approx. 60 vol. %
Carbon dioxide CO ₂	approx. 40 vol. %
Oxygen O ₂	> 0,5 & < 3 vol. %
Relative gas humidity	50 - 60 %
Hydrocarbons > C ₂	< 100 mg/m ³
Siloxanes	0 mg/m ³
Max. hydrogen sulphide H ₂ S	1,000 ppm

Cuadro 75. Propiedades físicas del biogás a la entrada del sistema de tratamiento para R1 (Fuente: Data sheet FAKA 6000K2)

Gas density	approx. 1,2 kg/Nm ³
Specific heat capacity C _p	approx. 1,6 kJ/Nm ³ K

A continuación, se presenta el CAPEX relacionado con el sistema de tratamiento de biogás para el relleno sanitario R1, el cual incluye el sistema de presurización hacia la zona de aprovechamiento de biogás para la generación eléctrica. Como sistema de presurización se ha seleccionado el Gas blower Model 1x031A-04, para un flujo de 1500 m³/h, se ha incluido el precio de un blower adicional redundante.

Cuadro 76. CAPEX y detalle de los equipos del sistema de tratamiento de biogás para la generación eléctrica

SISTEMA DE TRATAMIENTO				\$ 310 678
ítem	Lista	Precio Unitario	Cantidad	Precio Total
1	Gas blower Model 1x031A-04 Impellers 4x320	\$ 31.265	2	\$ 62.529
2	Una unidad de tratamiento de eliminación de agua BIOSEC-1350	\$ 97.417	1	\$ 97.417
2.1	REFRIGERADOR RH-700/1500/E:			
2.2	SEPARADOR DE CONDENSADOS SC-700:			
2.3	UNIDAD ENFRIADORA DE AGUA, CHILLER AIR-TAE-502			
4	Pretratamiento con carbón activado: FAKA 6000K2	\$ 46.478	2	\$ 92.957
5	Tuberías	\$ 60	100	\$ 5.995
6	Puesta en marcha del sistema de extracción forzada y quema de biogás	\$ 51.780	1	\$ 51.780

El OPEX de este sistema de tratamiento está incluido en la generación de energía eléctrica.

5.2.4. **Sistemas de Valorización R1: Generación de energía eléctrica**

Se propone un sistema de generación eléctrica para inyección a la red eléctrica de Costa Rica en R1 donde se inyectará el biogás en generadores eléctricos con motores reciprocantes. Este sistema de generación se plantea con una capacidad instalada de 2.2MW.

Para el desarrollo del dimensionamiento del sistema de generación se contemplaron los siguientes parámetros generales:

Cuadro 77. Parámetros generales del proyecto de generación eléctrica en el relleno sanitario R1

PARÁMETRO	DESCRIPCION DEL PARAMETRO	VALOR
Año de apertura del relleno	El año de inicio de operación	2011
Año de cierre del relleno	Conforme a la encuesta completada por el operador del relleno, la vida útil del relleno es 11 años, por lo que para fines del análisis se considera fecha de cierre el 2034.	2034
Año de inicio del proyecto	Suposición del año en el que la instalación del proyecto de energía eléctrica a partir de biogás de relleno sanitario estará completa y comenzará a operar.	2025
Vida útil del proyecto	En general, 15 años se considera la vida útil promedio de los equipos instalados en proyectos de generación eléctrica a partir de biogás y, por lo tanto, el período más largo para evaluar la economía del proyecto.	15 años
Eficiencia de recolección	El sistema de captura utilizado para recolectar el gas generado en los rellenos sanitarios normalmente opera con eficiencias entre el 50 y el 85 por ciento. La estimación se presenta en el Cuadro 78	55%

5.2.4.1. Estimación del cálculo de la eficiencia de recolección:

La eficiencia de recolección estimada para este relleno sanitario es de 55%, según el modelo colombiano de estimación de producción de biogás. Este valor de eficiencia permite calcular los caudales de recolección de R1. A continuación se presenta los parámetros que permiten determinar la eficiencia de recolección.

Cuadro 78. Estimación de la eficiencia de captura para R1, referencia Modelo colombiano.

PARAMETROS	VALORES
Profundidad promedio del relleno sanitario:	60 m
Porcentaje del área con residuos que cubre el sistema de captura: las celdas del relleno están equipado con 189 chimeneas distribuidas y con alcance de cobertura (100%)	100%
Porcentaje del área con residuos con cubierta final: En el relleno sanitario no tiene ninguna de las celdas en cierre técnico, por ende, no se cuenta con cobertura final	0%
Porcentaje del área con residuos con cubierta intermedia: La cobertura intermedia en este relleno se aplica en zonas donde no se estará trabajando en el corto y medio plazo. Como cobertura intermedia se utiliza tierra natural. El área cubierta es aproximadamente es 99.8%	99,8%
Porcentaje del área con residuos con cubierta diaria: el cual corresponde al área en la que se están disponiendo residuos diariamente y, por ende, es el área donde se aplica una cobertura diaria es 0.2%	0,2%

Porcentaje del área con residuos sin cobertura:	0%
Porcentaje del área de residuos con recubrimiento inferior de arcilla/geomembrana: Cada celda cuenta con un sistema de geomembrana.	100%
¿La compactación de residuos se hace regularmente?	Si
¿La disposición de residuos se hace en un área específica?	Si
¿Existe el afloramiento/brote de lixiviado en la superficie del relleno sanitario?: En la caracterización de biogás de las 42 chimeneas analizadas, se observó 12 chimeneas (29% de operación ineficiente) sin flujo debido al afloramiento y arrastre de lixiviado o fuga e ingreso de aire.	Si
Sobre el afloramiento, ¿esto ocurre solo después de llover?	No
Eficiencia de captura estimada: Según modelo Colombia de producción de biogás	55%

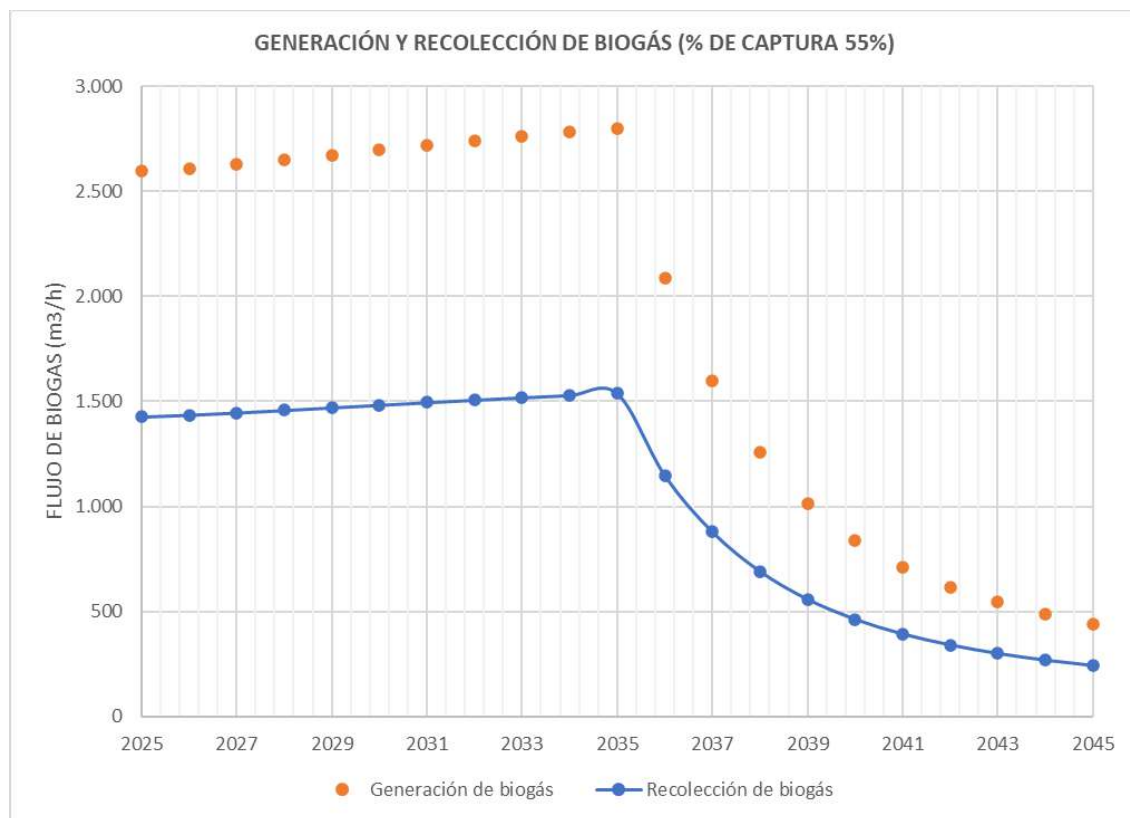
En el Cuadro 79, se presenta el resultado de la estimación de generación de biogás para los siguientes 15 años posterior a la implementación del proyecto para R1. Es importante mencionar que los valores presentados en la tabla corresponden a la generación total de biogás de todas las celdas del relleno sanitario. Así mismo, se presenta el caudal de recolección, considerando un 55% de eficiencia de recolección de biogás.

Cuadro 79. Caudales de generación de biogás en el relleno sanitario R1 utilizando el modelo de generación de biogás IPCC 2019 y los caudales de recolección de biogás para una eficiencia de captura de 55%

Año	Generación de biogás (m³/h)	Recolección de biogás (m³/h)
2025	2.595	1.427
2026	2.610	1.436
2027	2.630	1.446
2028	2.652	1.458
2029	2.674	1.471
2030	2.697	1.483
2031	2.719	1.496
2032	2.741	1.507
2033	2.761	1.519
2034	2.781	1.530
2035	2.799	1.540
2036	2.089	1.149
2037	1.598	879
2038	1.256	691
2039	1.014	558

En la Gráfica 38, se muestra la producción de biogás proyectada y la recolección de biogás en el relleno sanitario para una eficiencia de captura de 55%. Como se puede observar la producción durante los primeros 11 años de la instalación del proyecto (entre 2025 -2035), el caudal de generación de biogás se encuentra en aumento, hasta el año de cierre del relleno sanitario. Sin embargo, a partir del año 2035 la proyección presenta una disminución

considerable, lo cual podría afectar la viabilidad del proyecto. Por ello, es importante garantizar un flujo de generación de biogás y según lo reportado por el operador, tienen en trámite la extensión de la vida útil del relleno sanitario, lo cual garantizaría el suministro de biogás a la planta de generación.



Gráfica 38. Proyección de biogás generado y capturado en el relleno sanitario

5.2.4.2. Determinación del consumo real de biogás

Para realizar la evaluación de esta alternativa es importante iniciar con el estimado de energía posible para producción de electricidad. Para este análisis se considerará que del 100% de biogás recolectado dentro del relleno sanitario, existe un consumo real de biogás utilizado en la planta de generación eléctrica. La determinación de los caudales de consumo real de biogás en el proyecto de generación eléctrica se realiza considerando un factor de planta de 75% y un horario operativo de 8760 horas al año.

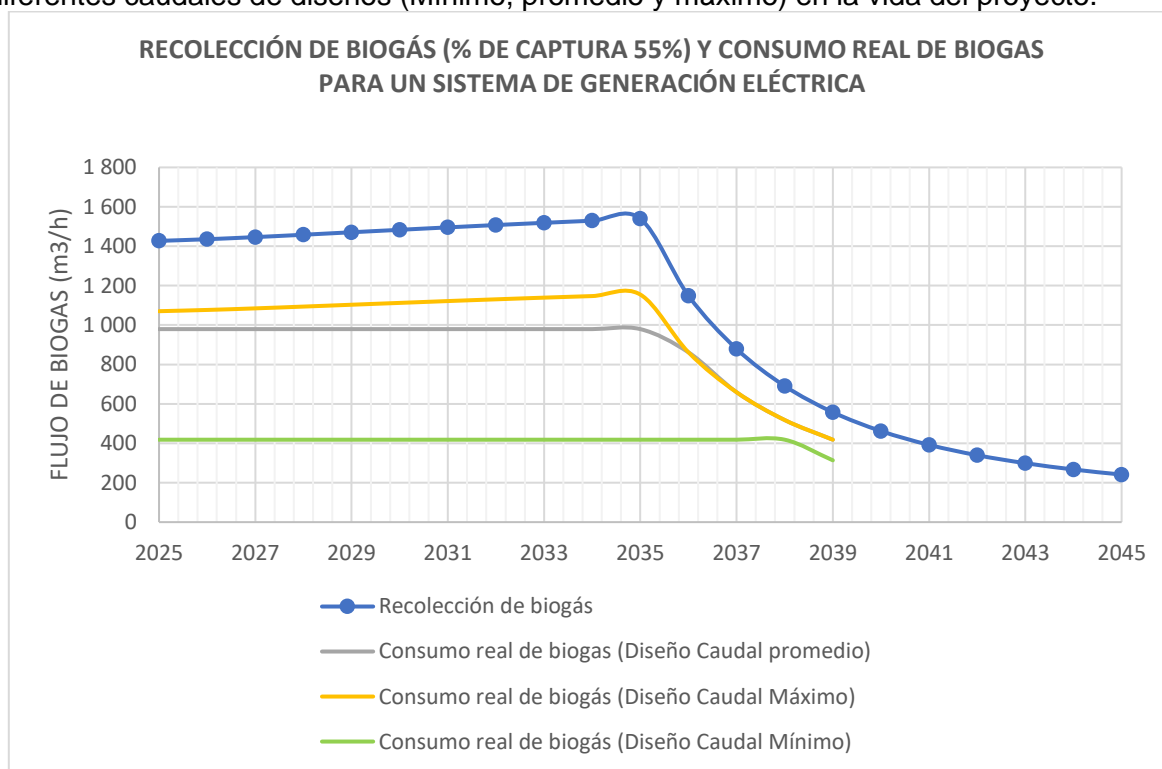
- ✓ **El factor de planta:** representa la pérdida de producción de energía debido a problemas en el sistema de recolección de gas, problemas con el equipo del proyecto, interrupciones de los servicios públicos locales relacionadas con el clima y apagones en el extremo del sistema que consume energía. Para el análisis de este estudio se considera un factor de planta del 75% dejando un 25% de no operación para mantenimiento y demás contingencias que al año no deberá superar este factor de descuento operativo.
- ✓ **Horario operativo del proyecto biogás:** Cuando el aprovechamiento del biogás se realiza para la producción de energía térmica en zonas donde el calor se requiere de forma estacional, el proyecto entra en funcionamiento de forma estacional (p. ej., para calentar áreas comunes seis meses al año). Por ello, este parámetro de horas de

funcionamiento permite a las personas usuarias especificar cuántas horas del día, días de la semana y semanas del año el proyecto de producción eléctrica requerirá biogás. Los valores seleccionados son 24 horas al día, 7 días a la semana, asumiendo que se busca el mayor aprovechamiento de biogás durante todo el año.

5.2.4.3. Definición del Tamaño del proyecto de producción eléctrica

El dimensionamiento de la capacidad instalada de la planta de generación eléctrica estará en función del caudal de recuperación de biogás elegido durante la vida útil del proyecto, ver Gráfica 39. Esta selección del caudal de operación varía entre el caudal mínimo de recolección 558 (m³/h), caudal promedio de recolección 1306 m³/h) y caudal máximo de recolección 1540 (m³/h). Valores calculados de la columna 3 del Cuadro 79.

En la Gráfica 39, se presenta la recolección de biogás y el consumo real de biogás para diferentes caudales de diseños (Mínimo, promedio y máximo) en la vida del proyecto.



Gráfica 39. Proyección de la estimación de la recolección de biogás en el relleno sanitario y representación del consumo real de biogás para 3 diferentes caudales de diseño (mínimo, máximo y promedio)

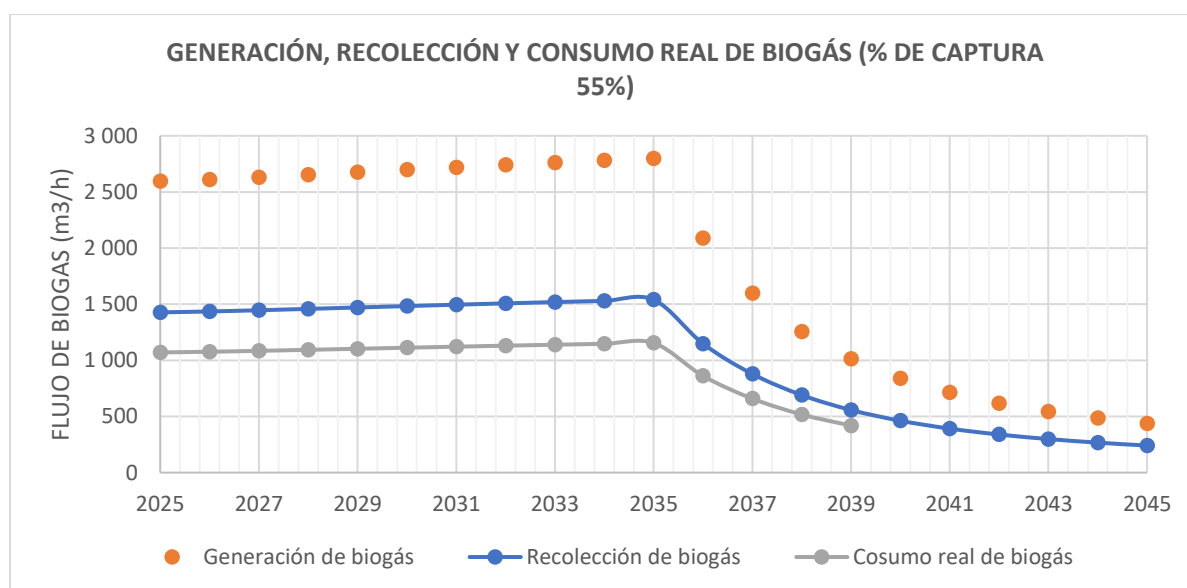
Cuando se dimensiona la capacidad instalada para un proyecto de generación eléctrica con el caudal máxima de recuperación de biogás, línea amarilla de la Gráfica 39, se tiene una mayor inversión de capital al inicio del proyecto. Esta inversión se justifica ya que, al inicio del proyecto, se tiene los valores más alto de generación y recolección de biogás, el cual aumenta durante los primeros 11 años.

Por otro lado, si el sistema se dimensiona con el caudal promedio o mínimo de recolección (línea gris y verde en la Gráfica 39), el sistema de generación eléctrica de igual forma operará a máxima capacidad de diseño los primeros 10 años del proyecto, ya que la producción y recuperación de biogás, durante este periodo, es la máxima. Sin embargo, la dificultad de diseñar a un caudal promedio de 1306 m³/h o mínimo 558 m³/h es que no se valorizará al

máximo la producción de biogás recolectado en el relleno sanitario, si no que el biogás que no se aprovecha para la generación eléctrica se destruirá en la antorcha.

Otro escenario sería la inversión e instalación modular de los motores reciprocantes de combustión interna, donde la capacidad instalada inicial está en función de la generación y recuperación de los primeros años y conforme la producción de biogás aumenta en el relleno, se incrementa la capacidad del sistema de generación. En este caso de estudio, no se ha contemplado este escenario, ya que se necesitaría información detallada de del historial de disposición de residuos en cada una de las celdas del relleno para proponer la configuración de los módulos de motores en la vida útil de proyecto.

El tamaño óptimo para los proyectos de generación de electricidad a menudo se basa en el caudal promedio de recolección de biogás. La selección del caudal óptimo de operación para el dimensionamiento del proyecto de producción eléctrica en este relleno se ha realizado en función de un análisis de sensibilización financiera, donde se garantiza mejores indicadores financieros. El caudal de diseño para la generación eléctrica seleccionado es el máximo 1540 m³/h. En la Gráfica 40, se presenta el consumo real de biogás en la planta de generación eléctrica propuesta para el relleno sanitario que tiene como capacidad de diseño un flujo de 1540 m³/h.



Gráfica 40. Caudales de generación, recolección (55% captura) y consumo real de biogás para R1.

5.2.4.4. Estimación de la generación de energía.

Para el análisis de generación de energía eléctrica en R1 se consideró los siguientes parámetros para la estimación de generación eléctrica anual:

Cuadro 80. Parámetros utilizados para la estimación de la generación de energía eléctrica en R1

Parámetros	Valores
Factor de planta	75%
Horario de funcionamiento del sistema (h/año)	7 884
La capacidad máxima de la planta de electricidad asume que el índice de calor bruto (BTU/kWh generado)	11 250

Eficiencia - pérdidas parasitas (%)	93%
Contenido de energía en metano (KWh/Nm3)	9.94
Contenido de metano	47%
Contenido de energía en el biogás (KWh/m3)	4.67

Como se observa en el Cuadro 81, la cantidad de biogás disponible en los 11 primeros años del proyecto permite al sistema de generación eléctrica a producir una potencia superior a 2 MW ya que el caudal de consumo real de biogás para este periodo es superior a 1200 m³/h. Por ello, se establece que la capacidad instalada del sistema de generación eléctrica propuesto es 2,2 MW, el cual permitirá generar electricidad que se inyectará en la red para la vida útil del proyecto. Así mismo, se observa que la producción de electricidad disminuye los últimos 4 años de operación, lo cual afectará la viabilidad de cualquier proyecto de aprovechamiento si no se considera otra fuente.

Como equipos se propone dos unidades de generadores de capacidad 1.0 y 1.2 MW para la planta de generación eléctrica de 2.2 MW para entregar al sistema interconectado nacional, el cual deberá cumplir todos los requisitos establecidos en la regulación para una central de generación

Cuadro 81. Estimación de la electricidad neta generada y cálculo de la capacidad instalada de la planta de generación para R1

Año	Consumo real de biogás (m3/h)	Consumo real de biogás (m3/año)	GWh térmico	Electricidad Neta generada MWh	Capacidad Máxima de generación de Electricidad Potencia MW
2025	1.070	9.376.613	43,81	12.356	2,02
2026	1.077	9.431.832	44,06	12.429	2,03
2027	1.085	9.502.535	44,39	12.522	2,05
2028	1.094	9.581.339	44,76	12.626	2,07
2029	1.103	9.663.450	45,15	12.734	2,08
2030	1.113	9.745.798	45,53	12.843	2,10
2031	1.122	9.826.458	45,91	12.949	2,12
2032	1.131	9.904.266	46,27	13.052	2,14
2033	1.139	9.978.556	46,62	13.149	2,15
2034	1.147	10.048.993	46,95	13.242	2,17
2035	1.155	10.115.451	47,26	13.330	2,18
2036	862	7.547.984	35,26	9.947	1,63
2037	659	5.775.079	26,98	7.610	1,25
2038	518	4.538.292	21,20	5.980	0,98
2039	418	3.664.146	17,12	4.829	0,79

5.2.4.5. Especificaciones para la planta de generación

La selección de los equipos para la producción de energía eléctrica se consideraron los siguientes parámetros:

- ✓ **Motores específicos para biogás:** Se deben usar motores de combustión interna especialmente diseñados para biogás, ya que tienen tolerancia a contaminantes propios del biogás de rellenos sanitarios y compuestos de silicio.
- ✓ Para evaluar la prefactibilidad de esta alternativa se analizó el uso de 2 motores marca CAPTERPILLER, los cuales tienen una capacidad total de 2.212 kW_{el} (1.012 kW_{el} y 1.200 kW_{el}). Estos motores garantizan el cumplimiento de los límites en las emisiones de NO_x, permiten ser contenerizados por su tamaño y facilitan la operación en la generación de energía en rellenos sanitarios.

5.2.4.6. Sistema de conexión

En la Imagen 22, se presenta la subestación más cercana, la de Garabito que se encuentra entre 3.5 – 4 km. De igual forma, se muestra un trazado preliminar de la línea de transmisión que sería necesaria para realizar el suministro de energía eléctrica hasta la subestación.

La instalación del proyecto de producción de energía eléctrica debe garantizar que en la operación de los motores la energía debe transportarse hasta los puntos establecidos para la conexión, por lo que se debe elevar el voltaje hasta las especificaciones necesarias de la subestación y considerando las pérdidas debido a la distancia. Así mismo, se debe garantizar la frecuencia de red (60 Hz) para poder realizar el sincronismo con el sistema eléctrico nacional.



Imagen 22. Ubicación de la subestación Garabito y de R1, y trazado referencial de la línea de conexión desde la planta de generación a la subestación.

El sistema de generación eléctrica contempla en el CAPEX desde los equipos propios de la producción hasta la línea de conexión requerida como se presenta en la anterior imagen y otros ítems como:

- ✓ **Las obras civiles requeridas**, tales como: cárcamos media, muros cortafuego para la instalación de los transformadores, losa de concreto y malla puesta a tierra.
- ✓ **Las instalaciones eléctricas** contempladas en el CAPEX son los equipos que se utilizarán para la transformación de la tensión según sea el caso, las celdas de protección, medida, el suministro del cableado entre los motores de generación y los transformadores y entre los transformadores y los equipos de protección, así también como las conexiones hasta las estructuras de salida de la central de generación. De igual forma se incluye el estimado de presupuesto para el tendido de una línea eléctrica hasta la subestación de Garabito.
- ✓ **Equipos de generación de energía** son los equipos más importantes del proyecto puesto que son los activos sobre los que recaerá el ingreso del proyecto: tanto la destrucción del metano para la venta de certificado de carbono, como la producción de energía eléctrica para su venta. Se presenta los valores de cotización de 2 moto generadores contenerizados de capacidad de 2.2MW.
- ✓ **Conexiones de biogás, tubería medición e integración:** Contempla tuberías, sistema de instrumentación de flujo, temperatura y presión para garantizar un adecuado funcionamiento de la planta de generación.
- ✓ **Línea eléctrica:** contempla la conexión de la central de generación a la subestación Garabito. El presupuesto estimado contempla la conexión de una línea de 4 Km, pero no se incluye los costos asociados a la servidumbre

Cuadro 82. Presenta el CAPEX relacionado al proyecto de generación eléctrica propuesta para el relleno R1

Ítems	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (USD)	Precio Total (USD)
Obras civiles	m ²	36	\$ 1.075	\$ 38.393
Obras eléctricas	kW	2200	\$ 124	\$ 272.800
conexión de biogás (medición e integración)	UN	2	\$ 8.484	\$ 16.968
Equipos de generación de energía	kW	2200	\$ 850	\$ 1.870.000
LINEA DE CONEXION SUBESTACION				
Línea eléctrica	km	4	\$ 58.983	\$ 235.932
Puesta en marcha	GLB	1	\$ 486.819	\$ 486.819

Total CAPEX				\$ 2 920 911

5.2.5. Beneficios Medioambientales de la propuesta para R1

Los beneficios ambientales se determinan para cada año del proyecto de producción de energía eléctrica. Para el escenario de generación eléctrica en el relleno se incorpora un sistema de captura, sistema de quema controlada y el sistema de aprovechamiento de producción eléctrica.

- ✓ **Metano recolectado y destruido (columna 3 del Cuadro 83):** Cantidad total anual de metano que es recolectado y destruido en la antorcha o utilizado en el sistema de generación eléctrica de capacidad instalada de 2.2 MW. Se calcula considerando un porcentaje de metano del 47% en el biogás.
- ✓ **Reducción de emisiones de metano totales (columna 4 del Cuadro 83):** Cantidad total anual de metano (en toneladas métricas equivalentes de dióxido de carbono por año, MTCO₂E/año) que se recolecta y destruye en la antorcha o se utiliza en el proyecto de generación eléctrica.

Cuadro 83. Caudales anuales de biogás recolectado, de metano recolectado y destruido en antorcha o planta de generación y reducción de millones de toneladas métricas de CO₂ equivalente (MTCO₂ E) totales en R1

Año	Biogás (m ³ /año) Recolección anual de biogás	CH ₄ (m ³ / año) Recolectado y destruido	MMTCO ₂ E/año Reducción de emisiones de CH ₄ totales Chimenea + proyecto de generación
2025	12.502.150	5.876.011	96.513
2026	12.575.776	5.910.615	97.082
2027	12.670.047	5.954.922	97.810
2028	12.775.119	6.004.306	98.621
2029	12.884.600	6.055.762	99.466
2030	12.994.397	6.107.367	100.313
2031	13.101.944	6.157.914	101.144
2032	13.205.687	6.206.673	101.945
2033	13.304.742	6.253.229	102.709
2034	13.398.657	6.297.369	103.434
2035	13.487.268	6.339.016	104.118
2036	10.063.979	4.730.070	77.691
2037	7.700.105	3.619.049	59.443
2038	6.051.056	2.843.996	46.713
2039	4.885.528	2.296.198	37.715

- **Reducción de emisiones de metano por el proyecto de generación eléctrica (Columna 4 del Cuadro 84):** toneladas métricas anuales de metano (en $\text{MTCO}_2\text{E/año}$) que utiliza el proyecto de generación de energía eléctrica a partir de biogás en el relleno.

Cuadro 84. Caudales anuales del consumo real de biogás en la planta de generación, caudales anuales de metano destruidos en los motores y reducción de millones de toneladas métricas de CO_2 equivalente (MMTCO_2E) por el proyecto de generación eléctrica solamente en R1.

Año	Consumo real de biogás ($\text{m}^3/\text{año}$)	CH_4 ($\text{m}^3/\text{año}$) Destruído en Motores	$\text{MTCO}_2\text{E/año}$ CH_4 reducción en el proyecto de generación
2025	9.376.613	4.407.008	72.385
2026	9.431.832	4.432.961	72.811
2027	9.502.535	4.466.191	73.357
2028	9.581.339	4.503.229	73.966
2029	9.663.450	4.541.822	74.599
2030	9.745.798	4.580.525	75.235
2031	9.826.458	4.618.435	75.858
2032	9.904.266	4.655.005	76.458
2033	9.978.556	4.689.921	77.032
2034	10.048.993	4.723.027	77.576
2035	10.115.451	4.754.262	78.089
2036	7.547.984	3.547.553	58.269
2037	5.775.079	2.714.287	44.582
2038	4.538.292	2.132.997	35.034
2039	3.664.146	1.722.149	28.286

Esta propuesta de proyecto de generación eléctrica tiene la capacidad de evitar la emisión de 1.324.717 MTCO_2E en un periodo de 15 años. Si se aumenta el porcentaje de recolección de 55% a 80%, las TCO_2E aumentarían en 45%.

5.3. Propuesta para R2:

Para R2, según las generalidades de diseño se ha planteado una propuesta que contempla los siguientes sistemas:

- ✓ Sistema de Captura
- ✓ Sistema de extracción forzada y quema
- ✓ Sistema de tratamiento
- ✓ Sistema de valoración

Cada uno de los sistemas se describirán función de las consideraciones encontradas en R2 y que a su vez orientaron a los resultados planteados como se evidencia en el siguiente P&ID.



5.3.1. Sistema de Captura R2

La configuración actual del relleno consiste en dos celdas activas donde se cuenta con chimeneas distribuidas: 5 en la celda 1 y 15 en la celda 2. Durante el desarrollo de la campaña de muestreo se logró tomar muestras de biogás el total de las chimeneas las cuales se consideran dentro de la propuesta para establecer el sistema de captura del biogás del relleno.



Imagen 23. Propuesta del sistema de chimeneas para la captura de biogás en R2

Según las consideraciones establecidas en la red de captura y conducción que logre una captura distribuida de manera uniforme en la totalidad del área con presencia de residuos, se evaluó para cada pozo existente el área de aferencia de captación de biogás con el propósito de establecer la cobertura actual que se tiene y la necesidad de implementación de nuevos pozos.

El área de captación definida de cada pozo se establece con radio de 15 m a partir del supuesto de que están debidamente conformadas y sin problemas de lixiviados al interior que resulten afectando la longitud filtrante. A continuación, se presenta los pozos existentes y el área que cubren.

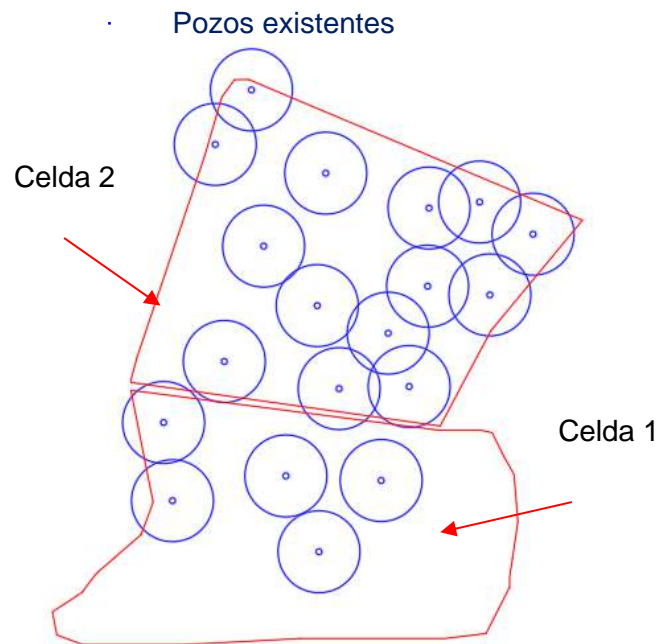


Imagen 24. Pozos existentes y área cubierta en R2

Para la celda 2 se tiene una amplia distribución de chimeneas que logran la mayoría de cobertura por lo que se estableció únicamente un pozo adicional mientras que para la celda 1 se establece la adición de 8 pozos según la distribución que se presenta en la Imagen 25.

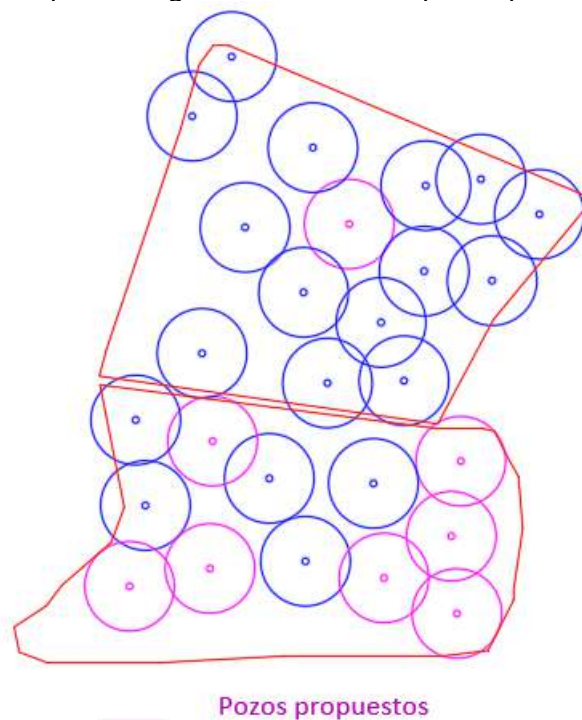


Imagen 25. Pozos sugeridos y área adicional cubierta para R2

Con la información satelital se encuentra que el área de las celdas activas es de 24.655 m² de la que el 57% del área se encuentra cubierto actualmente. Con los pozos adicionales se incrementaría la cobertura hasta en un 80%.

Según la distribución de pozos se requieren de 4 manifold, 3 de los cuales se conforman con 6 conexiones y el cuarto tendrá 8 conexiones como se puede observar en la Imagen 26.

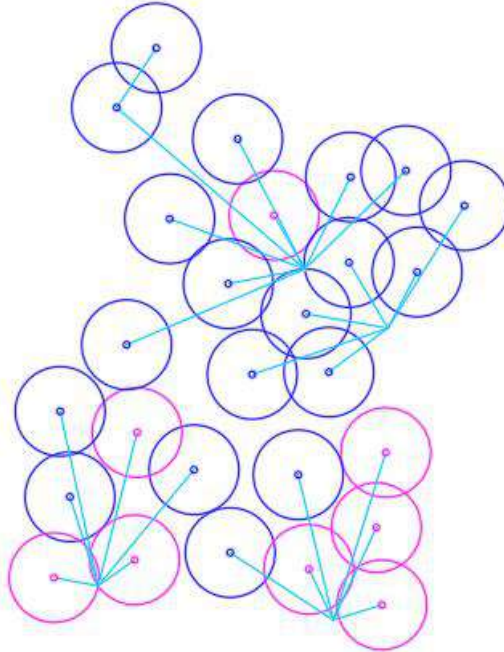


Imagen 26. Colector o Manifolds en R2

Las condiciones del sistema de conducción se configuro según la descripción de los componentes de la tipología presentada previamente. Se estableció en la propuesta la conexión de los colectores por medio de líneas primarias que los separan modularmente de la línea principal.

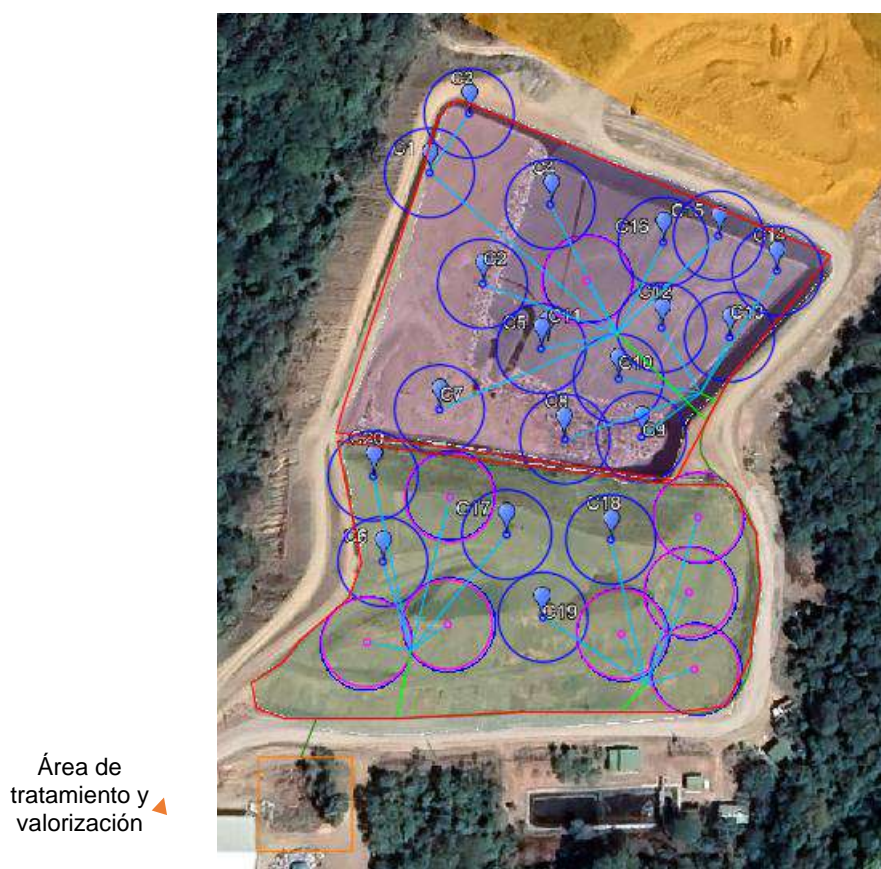


Imagen 27. Sistema de captura y conducción R2

La localización del área de quema y/o aprovechamiento se ubica en la zona sur del relleno debido a que se tiene una limitada disponibilidad para su ubicación en otro sector, el relleno sanitario tiene planes de expandirse hacia el norte.

En los diseños de detalle, deberá establecerse las condiciones topográficas para asegurar, las pendientes de evacuación de condensado. Es importante remarcar que los pozos propuestos adicionalmente para incrementar el porcentaje de recolección de biogás no son incluidos en los costos de inversión, ya que esta actividad es parte de la operación del relleno sanitario.

El CAPEX del sistema de conducción relacionado a la propuesta anteriormente descrita para R2 se presenta a continuación

Cuadro 85. CAPEX sistema de conducción para R2

Descripción	Función	Unidad	Precio Total (USD)
Tubería DN250	Líneas principales de transporte de biogás	m	\$ 12 571,49
Tubería DN160	Líneas de conexión entre manifolds y líneas principales	m	\$ 1 806,00
Tubería DN90	Líneas de conexión entre los cabezales de pozo y los manifolds.	m	\$ 6 294,00

Válvula mariposa alma INOX DN 250	Control de paso de biogás en las líneas principales.	UN	\$ 444,00
Válvula mariposa alma INOX DN 160	Control de paso y regulación de presión de succión en manifolds y líneas secundarias.	UN	\$ 604,00
Válvula mariposa alma INOX DN 80	Control de paso y regulación de presión de succión en los pozos.	UN	\$ 1 326,00
Porta bridas DN250	Uniones bridadas tubería DN250	UN	\$ 2 220,00
Porta bridas DN 160	Uniones bridadas tubería DN160	UN	\$ 14,00
Reducción DN250-160	Cambio de diámetro de tubería	UN	\$ 876,00
Reducción DN160-90	Cambio de diámetro de tubería	UN	\$ 315,36
Tee 250	bifurcación de la red de biogás	UN	\$ 4 740,00
Manguera flexible	Amortiguar las dilataciones o contracciones del polietileno debido a cambios en la temperatura.	m	\$ 532,00
Abrazaderas inox	Conexión entre mangueras flexibles y tubería de polietileno de alta densidad.	UN	\$ 476,00
Manifold x 8	Facilitar la operación del campo de gas, agrupando los puntos de muestreo y las válvulas de regulación.	GLB	\$ 4 072,02
Manifold x 6	Facilitar la operación del campo de gas, agrupando los puntos de muestreo y las válvulas de regulación.	GLB	\$ 9 162,00
Cabezales de pozo	Conectar los pozos con la red de captura.	GLB	\$ 12 040,00
Tanque de desagüe	Evacuar los condensados de la red de biogás.	GLB	\$ 14 912,00
Puntos de muestreo	Tapa roscada, soldada mediante cordón de extrusión a la tubería para realizar mediciones de composición de gas.	GLB	\$ 495,00
Anclajes	Soportes de acero galvanizado para evitar deslizamientos de la tubería	UN	\$ 1 596,00
Mano de Obra	Mano de obra para instalación de la red de biogás	GLB	\$ 23 838,68
Valor Total			\$ 98 334,54

5.3.2. Sistema de Extracción y Quema R2

Para el relleno R2 se contempla el desarrollo de la valorización para biogás, haciendo que el sistema de quema se establezca como una medida de seguridad para la destrucción de los excesos o de la totalidad de la producción en caso de que se presenten emergencias o paradas del sistema de valorización.

Aplicando la misma metodología para la selección de los equipos aplicada en el relleno anteriormente descrito, se procede a describir los equipos que se seleccionaron producto del análisis. Se recuerda las correcciones que se deberán realizar frente a los diseños de ingeniería que se desarrollen en futuras etapas.

Cuadro 86. Propuesta de equipos para quema en R2

50 msnm	
200 m³/h	
4 – 100 mbarg	
Antorchas	
Número de unidades	1
Capacidad	250 m³/h

Cuadro 87. Resumen del CAPEX del sistema de extracción forzada y quema controlada del biogás para el relleno R2

ítem	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (USD)	Precio Total (USD)
Sistema de extracción Forzada - Quema Controlada				\$ 274.380
Sistema de quema alta temperatura	UN	1	\$ 192.336	\$ 192.336
Estructura en acero galvanizado				
Aislamiento cerámico de 100 mm				
Persianas para aire de combustión				
Controlador para persianas				
Termopar tipo s con certificado de calibración				
Sistema de ignición				
línea de gas válvula solenoide y con arrestador de llama en 3/4 o 1/2 in				
Tren de gas DN 250 hacia antorchas				
Tren de gas en acero galvanizado con válvulas eléctricas transmisores de presión y temperatura medidor de flujo de tubo Pitot, arrestador de llama IIA1. termopares				
Sistema de succión / estación del blower	UN	1	\$ 38.467	\$ 38.467
sistema de blower y variador de frecuencia				
Sistema de alimentación y control de combustión				
Puesta en marcha del sistema de extracción forzada y quema de biogás	UN	1	\$ 32.537	\$ 32.537
Obras civiles	UN	1	\$ 11.040	\$ 11.040
conexión eléctrica	UN	1		

Cuadro 88. Resumen del OPEX del sistema de extracción forzada y quema controlada del biogás para el relleno R2

OPEX ANUAL			
Descripción	Cantidad	Precio Unitario	15 133 \$/año

Repuestos para el sistema de extracción forzada y quema del biogás: La estimación de costos operativos se consideraron repuestos como termopares, sensores de composición del biogás, sensores UV y transformadores de ignición, que de acuerdo con la experiencia de C-deg en la operación de este tipo de proyectos, son los elementos que se requiere reponer con mayor frecuencia.

1	\$ 953	1	1 953 \$/año
---	--------	---	--------------

Consumo energetico (potencia = 5kW)

44 140 kWh	0,14 \$/kwh		6 180 \$/año
------------	-------------	--	--------------

Calibracion de los analizadores para certificacion de bonos de carbono en funcion de la metodologia seleccionada

1	\$ 000	7	7 000 \$/año
---	--------	---	--------------

5.3.3. Sistema de Tratamiento R2

5.3.3.1. Eliminación de vapores de agua

Partiendo de las condiciones de flujo y temperatura del sitio donde se orienta la propuesta se desarrolla la misma tecnología que relleno anteriormente descrito. A continuación, se presenta el equipo y las condiciones de referencia para su selección

Temperatura de Entrada	46
Altitud	50 m.s.n.m
Flujo	200Nm ³ /h
Composición	Realizada en campo. % de contenido de H2O referencial 7%
Caída de presión	15 mbar
Presión de operación del gas	200 mbar
Max. Presión de operación	0,5 bar
Humedad relativa biogás	100%
Se requiere	
Punto de rocío: 8 °C Temperatura a la salida de filtro carbón activado aprox: 8 °C (saturado)	

Unidad Acondicionamiento Biogás BioSec-200

La unidad de acondicionamiento de biogás del presente presupuesto está compuesta por un refrigerador biogás/agua con su separador de condensados y enfriadora de agua (Chiller) debidamente integrado.

Las especificaciones técnicas de los elementos del BioSec-1500, se adjuntan en el Anexo 7 de cotizaciones

- ✓ REFRIGERADOR RH-100/1500/E
- ✓ SEPARADOR DE CONDENSADOS SC-300
- ✓ UN REFRIGERADOR DE AGUA FRIA, CHILLER AIR-TAE-081

Los elementos que componen la unidad de acondicionamiento **BioSec** se encuentran Inter conectados entre ellos sobre una bancada de manera que forman una unidad compacta preparada para funcionar una vez conectadas la entrada y salida del biogás, y de recibir acometida eléctrica de cliente al cuadro de control (Plug&Play).

5.3.3.2. Eliminación de contaminantes

Según la caracterización, este sitio de disposición también requiere de la eliminación H_2S – sulfuro de hidrógeno para el flujo de $250 \text{ m}^3/\text{h}$. A continuación, se presenta los datos del filtro de carbón activado contemplado en la propuesta de limpieza inicial para R2.

Cuadro 89. Propuesta de tecnología para limpieza primaria en R2

Referencia	MAKA 700
Material	Acero inoxidable
Número de unidades	1
Número de celdas	1
Flujo nominal del total de unidades	$250 \text{ m}^3/\text{h}$
Máximo flujo del total de unidades	$280 \text{ m}^3/\text{h}$

Para este relleno se realizó el mismo procedimiento que el anterior ya que se destina al mismo aprovechamiento haciendo la diferenciación sobre el valor del flujo de biogás máximo equivalente a $200 \text{ m}^3/\text{h}$.

A continuación, se presenta el CAPEX relacionado con el sistema de tratamiento de biogás para el relleno sanitario R2, el cual incluye el sistema de presurización hacia la zona de aprovechamiento de biogás para la generación eléctrica. Como sistema de presurización se ha seleccionado el Gas blower Model 1x008-06 Impellers 6x1201 para un flujo de $200 \text{ m}^3/\text{h}$, se ha incluido el precio de un blower adicional redundante.

Cuadro 90. Resumen del CAPEX del sistema de tratamiento de biogás para R2

Ítems	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Sistema de Tratamiento - generación eléctrica				\$ 95.313,57
Gas blower Model 1x008-06 Impellers 6x1201	UN	2	\$ 17.247,31	\$ 34.494,62
Una unidad de tratamiento de eliminación de agua BIOSEC-1350				
REFRIGERADOR RH-100/1500/E: SEPARADOR DE CONDENSADOS SC-300	UN	1	\$ 31.828	\$ 31.828
UN REFRIGERADOR DE AGUA FRIA, CHILLER AIR-TAE-081				

Pretratamiento con carbón activado: FAKA MAKKA 700	UN	2	\$ 3.555	\$ 7.110
Tuberías	m ²	100	\$ 60	\$ 5.995
Puesta en marcha del sistema de extracción forzada y quema de biogás	UN	1	\$ 15.885,59	\$ 15.886

El OPEX de este sistema de tratamiento está incluido en la generación de energía eléctrica.

5.3.4. Sistemas de Valorización R2: Generación de energía eléctrica

La ubicación geográfica del relleno sanitario y la baja potencia calculada de 250 kW para el relleno hace poco atractiva la opción de valorización de inyección a la red eléctrica nacional. En el escenario de producción de energía eléctrica, también se evalúa el autoconsumo en el relleno sanitario, pero la demanda de energía eléctrica en el relleno es muy baja 140 MWh por año. Sin embargo, se propone el sistema de generación de energía eléctrica de capacidad instalada 250 kW.

Para el dimensionamiento del sistema de generación, los parámetros generales que describe el proyecto son:

Cuadro 91. Parámetros generales del proyecto de generación eléctrica en el relleno sanitario R2

PARÁMETRO	VALOR
Año de apertura del relleno	2017
Año de cierre del relleno	Vida Útil de 22.
Año de cierre de celdas operativas	El cierre de las celdas 1 y 2 está proyectada para el 2025
Año de inicio del proyecto	2025
Vida útil del proyecto	15 años
Sistema de chimeneas en las celdas	Conforme al análisis de distribución de pozos, se observa que el porcentaje de área con residuos que cubre el sistema de chimeneas es aproximadamente 57% y que la propuesta de pozos permitiría alcanzar hasta el 80% de cobertura de los pozos. Para el estudio de dimensionamiento se considera el alcance actual de las chimeneas 57%
Eficiencia de recolección	La eficiencia estimada es de 40%, pero si se implementa los pozos propuestos en la Imagen 25 se podría aumentar la eficiencia hasta 54 %

5.3.4.1. **Estimación del cálculo de la eficiencia de recolección**

La eficiencia de recolección estimada para este relleno sanitario es de 40 %, según el modelo colombiano de estimación de producción de biogás. Este valor de eficiencia permite calcular los caudales de recolección en el relleno sanitario, ver Cuadro 92.

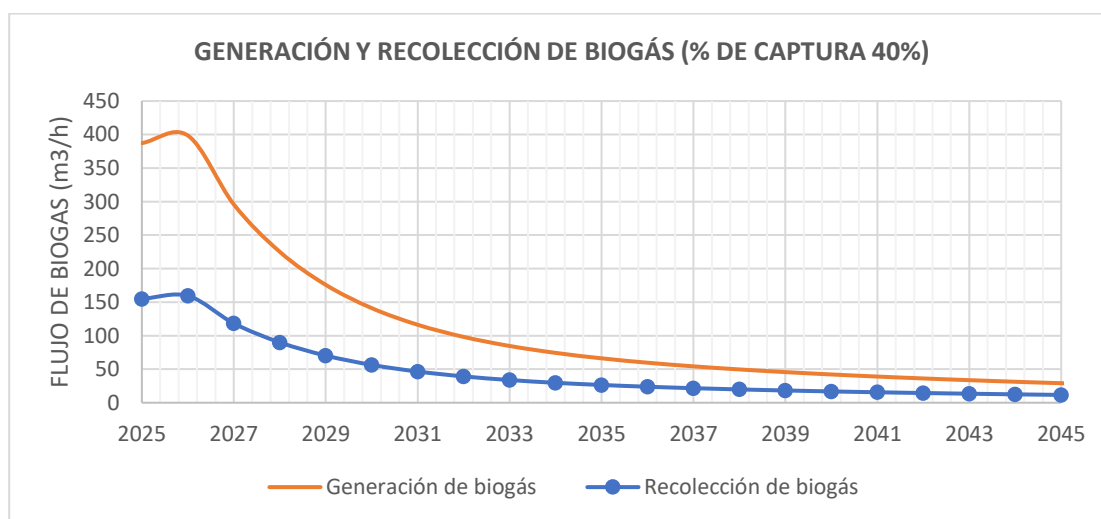
Cuadro 92. Estimación de la eficiencia de captura para R2, referencia Modelo colombiano.

PARAMETROS	VALORES
Profundidad promedio del relleno sanitario:	18 m
Porcentaje del área con residuos que cubre el sistema de captura	57%
Porcentaje del área con residuos con cubierta final: En el relleno sanitario no tiene ninguna de las celdas en cierre técnico, por ende, no se cuenta con cobertura final	0%
Porcentaje del área con residuos con cubierta intermedia: La cobertura intermedia en este relleno se aplica en zonas donde no se estará trabajando en el corto y medio plazo. Como cobertura intermedia se utiliza tierra natural.	90%
Porcentaje del área con residuos con cubierta diaria: el cual corresponde al área en la que se están disponiendo residuos actualmente y, por ende, es el área donde se aplica una cobertura diaria es 10 %	10%
Porcentaje del área con residuos sin cobertura:	0%
Porcentaje del área de residuos con recubrimiento inferior de arcilla/geomembrana: Cada celda cuenta con un sistema de geomembrana.	100%
¿La compactación de residuos se hace regularmente?	Si
¿La disposición de residuos se hace en un área específica?	Si
¿Existe el afloramiento/brote de lixiviado en la superficie del relleno sanitario?: el operador reporta “en raras ocasiones se da algún brote por alguno de los taludes, cuando hay mucha lluvia. Pero es algo raro de ver”	Si
Si la respuesta es "Si", ¿esto ocurre solo después de llover?	Si
Eficiencia de captura estimada: Según modelo Colombia de producción de biogás*	40%

En el Cuadro 93 y la Gráfica 41 se presenta el resultado de la estimación de generación de biogás para los siguientes 15 años posterior a la implementación del proyecto en el R2. Es importante mencionar que a pesar de que el relleno tiene una vida útil de 22 años con 7 celdas proyectadas a futuro, los valores presentados en la tabla corresponden a la generación de biogás en las 2 celdas operativas actualmente que tienen fecha de cierre en el 2025. Las 7 celdas proyectadas aun no cuentan con diseños, según lo informado por el operador. De igual forma, se presenta el caudal de recolección, considerando un 40 % de eficiencia del sistema de captura de biogás.

Cuadro 93. Caudales de generación de biogás en el relleno sanitario utilizando el modelo de generación de biogás IPCC 2019 y los caudales de recolección de biogás para una eficiencia de captura de 40% en R2

Año	Generación de biogás (m ³ /h)	Recolección de biogás (m ³ /h)
2025	387	155
2026	399	159
2027	296	118
2028	225	90
2029	176	70
2030	141	56
2031	116	47
2032	98	39
2033	85	34
2034	74	30
2035	66	26
2036	60	24
2037	54	22
2038	50	20
2039	46	18



Gráfica 41. Proyección de biogás generado y capturado en el relleno sanitario R2

5.3.4.2. Determinación del consumo real de biogás

Como se observa en la Gráfica 41, la generación de biogás en la celda 1 y 2 permite recolectar el máximo cantidad de biogás solo los 2 primeros años de instalación del proyecto de generación de energía eléctrica. Luego de este corto periodo entre 2025 y 2026, la generación y recolección de biogás en las celdas 1 y 2 disminuye considerablemente, lo cual impacta en la generación de energía eléctrica.

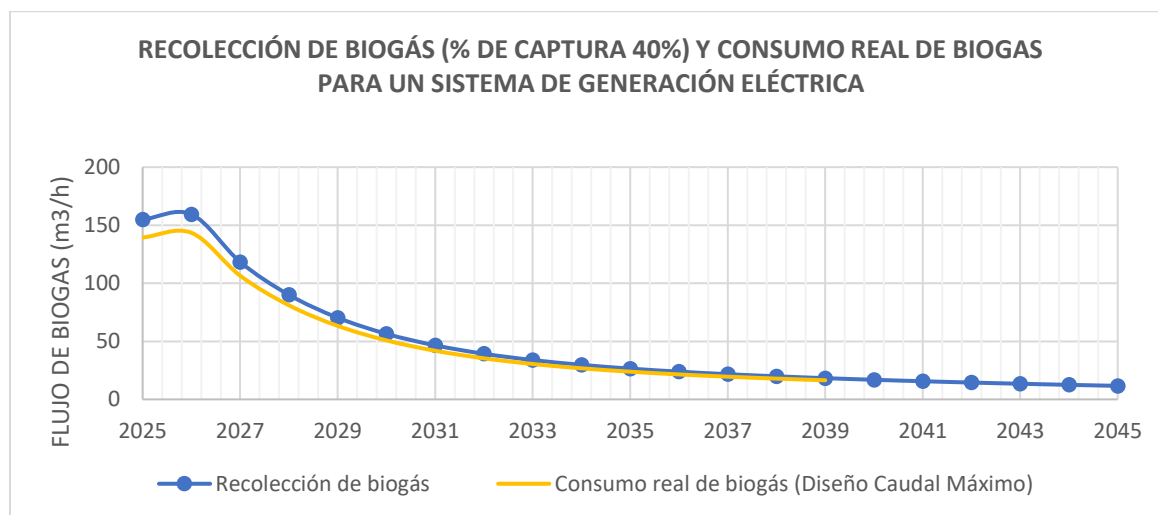
Es importante mencionar que el relleno sanitario tiene previsto construir progresivamente otras 7 celdas, lo cual asegura que habrá disponibilidad de biogás en el relleno sanitario para suplir el descenso de producción de biogás dentro de la celda 1 y 2. Por ello, el dimensionamiento de la planta de generación se realizará con el caudal máximo de

recolección 159 m³/h. Asumiendo que el déficit de biogás luego del 2026 es cubierto por las nuevas celdas que entraran en operación.

Del 100% de biogás recolectado dentro del relleno sanitario, existe un consumo real de biogás utilizado en la planta de generación eléctrica. La determinación de los caudales de consumo real de biogás en el proyecto de generación eléctrica se realiza considerando un factor de planta de 90% y un horario operativo de 8760 horas al año.

5.3.4.3. Definición del Tamaño del proyecto de producción eléctrica

El dimensionamiento de la capacidad instalada de la planta de generación eléctrica estará en función del caudal de recuperación de biogás elegido durante la vida útil del proyecto, como se mencionó previamente el caudal seleccionado para el dimensionamiento es 150 m³/h, el cual es caudal de recuperación máximo.



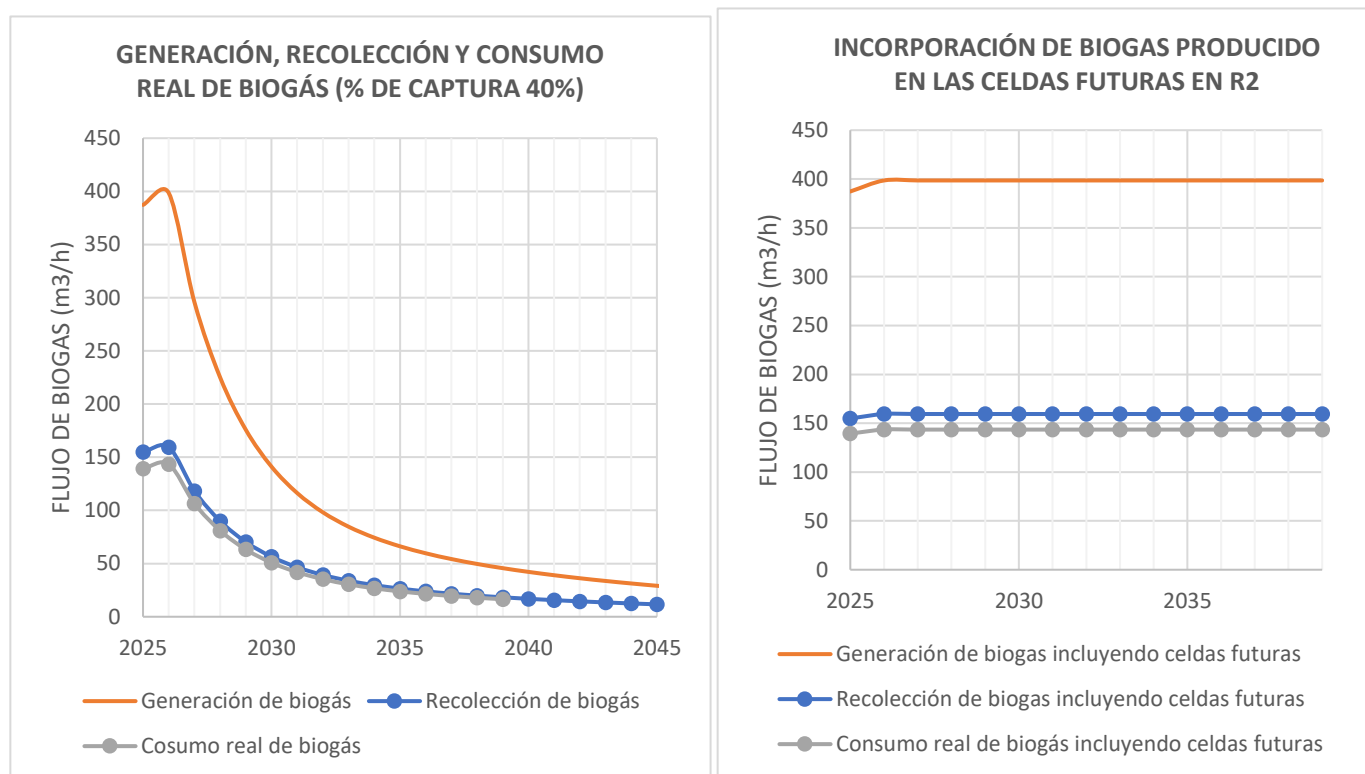
Gráfica 42. Proyección de la estimación de la recolección de biogás en R2 y representación del consumo real de biogás para caudal de diseño máximo y promedio

Para el análisis financiero, se asumirá que la cantidad de biogás que se espera aprovechar en el sistema de generación constante durante el periodo de evaluación del proyecto. El descenso en la producción de biogás en la celda 1 y 2 se va a completar con el gas capturado en los vasos futuros asumiendo que la disposición se mantiene constante. Por ello, se asume

un caudal de generación y captura constante para los años posteriores al 2026. Asumiendo, que las nuevas celdas seguirán recibiendo el mismo flujo de residuos que las celdas 1 y 2.

Gráfica 43. (a) Estimación de la generación, recolección y consumo real de biogás en R2. (b) Integración de la generación de biogás en las celdas futuras al proyecto de generación de energía eléctrica.

5.3.4.4. Estimación de la generación de energía.



Para el análisis de generación de energía eléctrica en el R2 se consideró los siguientes parámetros para la estimación de generación eléctrica anual:

Cuadro 94. Parámetros utilizados para la estimación de la generación de energía eléctrica en R2

Parámetros	Valores
Factor de planta	75%
Horario de funcionamiento del sistema (h/año)	7 884
La capacidad máxima de la planta de electricidad asume que el índice de calor bruto (BTU/kWh generado)	11 250
Eficiencia - pérdidas parasitas (%)	93%
Contenido de energía en metano (KWh/Nm3)	9.94
Contenido de metano	47%
Contenido de energía en el biogás (KWh/m3)	4.67

Como se observa en la siguiente tabla la capacidad máxima de generación es 240 kW, comercialmente la capacidad de microturbina que se propone es de 250 kWh.

Cuadro 95. Estimación de la electricidad neta generada y cálculo de la capacidad instalada de la planta de generación para R2

Año	Consumo real de biogás (m ³ /h)	Consumo real de biogás (m ³ /año)	GWh térmico	Electricidad Neta generada MWh	Capacidad Máxima de generación de Electricidad Potencia KW
2025	139	1.221.250	6,03	1.700	232
2026	143	1.256.882	6,20	1.750	239
2027*	143	1.256.882	6,20	1.750	239
2028*	143	1.256.882	6,20	1.750	239
2029*	143	1.256.882	6,20	1.750	239
2030*	143	1.256.882	6,20	1.750	239
2031*	143	1.256.882	6,20	1.750	239
2032*	143	1.256.882	6,20	1.750	239
2033*	143	1.256.882	6,20	1.750	239
2034*	143	1.256.882	6,20	1.750	239
2035*	143	1.256.882	6,20	1.750	239
2036*	143	1.256.882	6,20	1.750	239
2037*	143	1.256.882	6,20	1.750	239
2038*	143	1.256.882	6,20	1.750	239
2039*	143	1.256.882	6,20	1.750	239

* Indica que los caudales incluyen la incorporación de biogás producido en las celdas futuras del relleno sanitario.

5.3.4.5. Especificaciones para la planta de generación

La selección de la microturbina de 250 kW de energía eléctrica se consideraron los siguientes parámetros:

- Para evaluar la prefactibilidad de esta alternativa se analizó el uso de 1 microturbina de capacidad total de 250 kW_{el}. La especificación del desempeño es: índice de calor bruto 11 770 BTU/kWh, voltaje de 480V, frecuencia de salida 60Hz y trifásico.

5.3.4.6. Sistema de conexión

En la siguiente ilustración se presenta la ubicación de la subestación más cercana al relleno sanitario. La subestación Guayabal se encuentra a 5km aproximadamente del relleno. Como se mencionó previamente, la ubicación geográfica y la baja capacidad instalada propuesta (250kW), hacen inviable la exportación de la energía eléctrica.

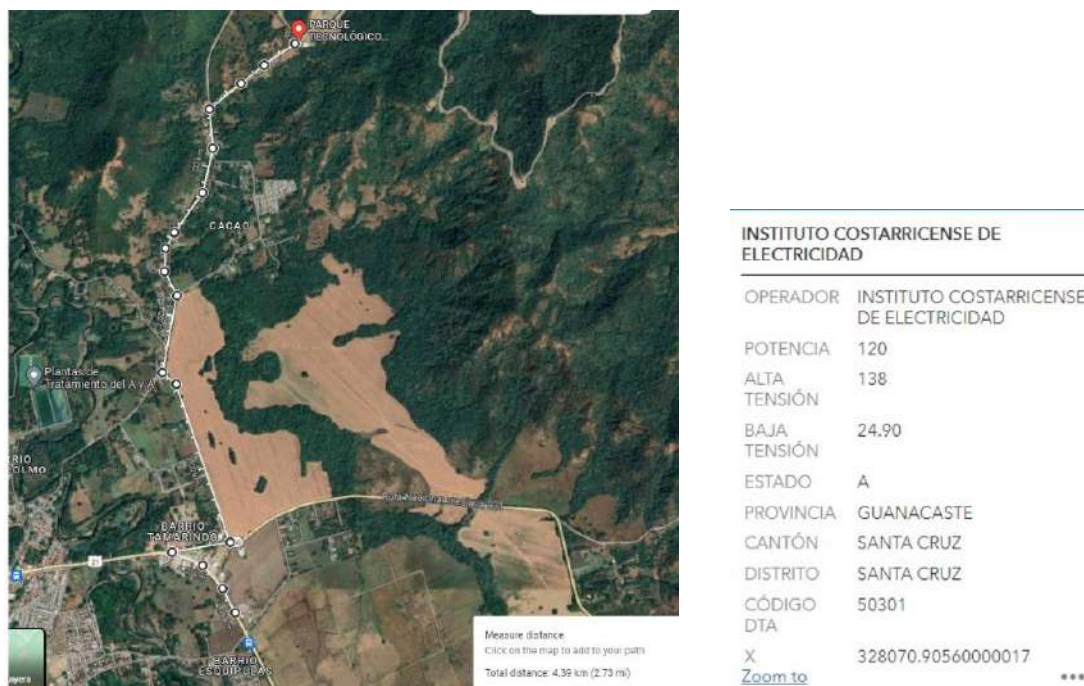


Imagen 28. Subestación de Guanacaste y trazado preliminar de línea eléctrica hasta el relleno sanitario R2

El costo de inversión (CAPEX) más importante en la exportación de energía eléctrica, después de los equipos de generación eléctrica, es el costo del sistema de conexión a la subestación.

Como se observa en el siguiente cuadro, la inversión más importante para esta potencia instalada de 250kW es la línea de conexión a la subestación más cercana al relleno sanitario. Esto supone un desafío a la factibilidad de este proyecto, el cual se observa en los indicadores financiero-determinados más adelante.

Cuadro 96. Resumen CAPEX para el sistema de generación eléctrica en el relleno sanitario R2

Item	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Sistema de Generación Eléctrica				\$ 566 095
OBRAS CIVILES Y ELÉCTRICAS EN PLANTA				
Obras civiles	m2	18	\$ 1 075	\$ 19 196
Obras eléctricas	KW	250	\$ 124	\$ 31 000
Conexión de biogás (medición e integración)	por unidad	1	\$ 8 484	\$ 8 484
Equipos de generación de energía	KW	250	\$ 850	\$ 212 500
LÍNEA DE CONEXIÓN SUBESTACIÓN				
Línea eléctrica	km	5	\$ 58 983	\$ 294 915

\$ 566
095,43

5.3.5. Beneficios Medioambientales de la propuesta para R2

Los beneficios ambientales se determinan para cada año del proyecto de producción de energía eléctrica. Para el escenario de generación eléctrica en el relleno se incorpora un sistema de captura, sistema de quema y el sistema de aprovechamiento

- ✓ **Metano recolectado y destruido (columna 3 del Cuadro 97):** Cantidad total anual de metano que es recolectado y destruido en la antorcha o utilizado en el sistema de generación eléctrica de capacidad instalada de 250 kW. Se calcula considerando un porcentaje de metano del 49.65 % en el biogás.
- ✓ **Reducción de emisiones de metano totales (columna 4 del Cuadro 97):** cantidad total anual de metano (toneladas métricas equivalentes de dióxido de carbono por año, $\text{MTCO}_2\text{E/año}$) que se recolecta y destruye en la antorcha o se utiliza en el proyecto de generación eléctrica.

Cuadro 97. Caudales anuales de biogás recolectado, de metano recolectado y destruido en antorcha o planta de generación y reducción de toneladas métricas de CO_2 equivalente (MTCO_2E) totales en R2

Año	Biogás ($\text{m}^3/\text{año}$) Recolección anual de biogás	CH_4 ($\text{m}^3/\text{año}$) Recolectado y destruido	$\text{MTCO}_2\text{E/año}$ Reducción de emisiones de CH_4 totales por: Chimenea + Destrucción en motores
2025	1.356.945	673.723	11.066
2026	1.396.535	693.380	11.389
2027	1.396.535	693.380	11.389
2028	1.396.535	693.380	11.389
2029	1.396.535	693.380	11.389
2030	1.396.535	693.380	11.389
2031	1.396.535	693.380	11.389
2032	1.396.535	693.380	11.389
2033	1.396.535	693.380	11.389
2034	1.396.535	693.380	11.389
2035	1.396.535	693.380	11.389
2036	1.396.535	693.380	11.389
2037	1.396.535	693.380	11.389
2038	1.396.535	693.380	11.389
2039	1.396.535	693.380	11.389

- **Reducción de emisiones de metano por el proyecto de generación eléctrica (Columna 4 del Cuadro 98)** millones de toneladas métricas anuales de metano (en $\text{MMTCO}_2\text{E/año}$) que utiliza el proyecto de generación de energía eléctrica a partir de biogás en el relleno.

Cuadro 98. Caudales anuales del consumo real de biogás en la planta de generación, caudales anuales de metano destruidos en los motores y reducción de toneladas métricas de CO_2 equivalente (MTCO_2E) por el proyecto de generación eléctrica solamente en R2.

Año	Consumo real de biogás (m³/año)	CH ₄ (m³/ año) Destruído en Motores	MTCO ₂ E/año CH ₄ reducción en el proyecto de generación
2025	1.017.708,53	505.292,29	8.299
2026	1.047.401,31	520.034,75	8.542
2027	1.256.881,57	624.041,70	10.250
2028	1.256.881,57	624.041,70	10.250
2029	1.256.881,57	624.041,70	10.250
2030	1.256.881,57	624.041,70	10.250
2031	1.256.881,57	624.041,70	10.250
2032	1.256.881,57	624.041,70	10.250
2033	1.256.881,57	624.041,70	10.250
2034	1.256.881,57	624.041,70	10.250
2035	1.256.881,57	624.041,70	10.250
2036	1.256.881,57	624.041,70	10.250
2037	1.256.881,57	624.041,70	10.250
2038	1.256.881,57	624.041,70	10.250
2039	1.256.881,57	624.041,70	10.250

En un horizonte de 15 años, el proyecto de generación eléctrica tiene la capacidad de evitar emisiones de 170.509 toneladas CO₂ equivalente.

5.4. Propuesta para R3:

Este relleno cuenta con sistemas para la producción eléctrica (Imagen 29) el cual cuenta con la red de extracción activa, equipos para la quema controlada y el respectivo sistema generador de energía, donde se aprovecha el 10% del biogás generado.



Imagen 29. Sistemas de captura, quema controlada y generación eléctrica en R3. (Fuente: EBI)

Debido que actualmente el relleno cuenta con un sistema de captura activa (caudal capturado: 2.517 m³/h), quema controlada de biogás y valorización del 10% del biogás generado, lo que se propone para este relleno es la expansión de la capacidad instalada de generación de energía o la producción de biometano.

Dichas propuestas se detallarán a continuación, analizando las implicaciones y requerimientos técnicos de cada alternativa de valoración incluyendo los tratamientos necesarios para lograr la optimización en la operación.

5.4.1. Sistema de Valoración R3: Generación de energía eléctrica

5.4.1.1. Sistema de Tratamiento R3: Generación de energía eléctrica

A continuación, se presenta los parámetros para la selección del sistema de eliminación de vapores en el R3 y las características del sistema de enfriamiento.

Temperatura de Entrada	50
Altitud	1200 msnm
Flujo	2000 Nm³/h
Composición	Realizada en campo. % de contenido de H ₂ O referencial 7%
Caída de presión	15 mbar
Presión de operación del gas	200 mbar
Max. Presión de operación	0,5 bar
Humedad relativa biogás	100%
Se requiere	
Punto de rocío: 8 °C Temperatura a la salida de filtro carbón activado aprox: 8 °C (saturado)	

Unidad de Acondicionamiento de Biogás: BioSec-2000

La unidad de acondicionamiento de biogás del presente presupuesto está compuesta por un refrigerador biogás/agua con su separador de condensados y enfriadora de agua (Chiller) debidamente integrado.

Las especificaciones técnicas de los elementos del BioSec-1500, se adjuntan en el Anexo 7.

- ✓ SEPARADOR DE CONDENSADOS SC-700:
- ✓ REFRIGERADOR RH-700/1500/E
- ✓ UNIDAD ENFRIADORA DE AGUA, CHILLER AIR-TAE-502

Los elementos que componen la unidad de acondicionamiento **BioSec** se encuentran Inter conectados entre ellos sobre una bancada de manera que forman una unidad compacta

preparada para funcionar una vez conectadas la entrada y salida del biogás, y de recibir acometida eléctrica de cliente al cuadro de control (Plug&Play).

Eliminación de contaminantes

Según la caracterización, este sitio de disposición también requiere de la eliminación H₂S - sulfuro de hidrógeno para el flujo de 2.000 m³/h. A continuación, se presenta los datos del filtro de carbón activado contemplado en la propuesta de limpieza inicial para R3

Cuadro 99. Propuesta de tecnología para limpieza primaria en R3

Referencia	FAKA 7000K1E
Material	Acero inoxidable
Número de unidades	1
Número de celdas	1
Flujo nominal del total de unidades	1.700 m ³ /h
Máximo flujo del total de unidades	2.000 m ³ /h

Para este relleno se realizó el mismo procedimiento que el anterior ya que se destina al mismo aprovechamiento haciendo la diferenciación sobre el valor del flujo de biogás máximo equivalente a 2000 m³/h.

A continuación, se presenta el CAPEX relacionado con el sistema de tratamiento de biogás para el relleno sanitario R3, el cual incluye el sistema de presurización hacia la zona de aprovechamiento de biogás para la generación eléctrica. Como sistema de presurización se ha seleccionado el Gas blower Model 1x031A-04 Impellers 4x3203 para un flujo de 1500 m³/h, se ha incluido el precio de un blower adicional redundante.

Cuadro 100. Resumen de CAPEX del sistema de tratamiento de biogás para el relleno sanitario R3

Ítems	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
SISTEMA DE TRATAMIENTO				\$ 304.373
Gas blower Model 1x031A-04 Impellers 4x320	UN	2	\$ 31.264,52	\$ 62.529
Una unidad de tratamiento de eliminación de agua BIOSEC-2000				
REFRIGERADOR RH-700/1500/E:	UN	1	\$ 114.017	\$ 114.017
SEPARADOR DE CONDENSADOS SC-700:				
UNIDAD ENFRIADORA DE AGUA, CHILLER AIR-TAE-502				
Pretratamiento con carbón activado: FAKA 7000K1E	UN	2	\$ 35.552	\$ 71.104
Tuberías	m	100	\$ 60	\$ 5.995
Puesta en marcha del sistema de extracción forzada y quema de biogás	UN	1	\$ 50.728,91	\$ 50.729

El OPEX del sistema de tratamiento del biogás está incluido en el CAPEX del sistema de generación.

5.4.1.2. **Sistema de Valoración R3: Generación de energía eléctrica**

En este escenario de valoración de biogás se evaluó la posibilidad de realizar la generación de energía para inyección a la red eléctrica de Costa Rica. A diferencia de los otros rellenos, la propuesta no contempla la instalación de un sistema de captura forzada y quema de biogás, ya que ambas instalaciones existen actualmente en el sitio. La propuesta contempla un sistema de tratamiento y valorización del biogás para la generación eléctrica con generadores reciprocantes de combustión interna. El sistema de generación propuesto tiene una capacidad instalada de 1.7 MW. Es importante resaltar que actualmente el relleno sanitario realiza valorización del 10% del biogás capturado en su sistema de captura activa. Por este motivo, la propuesta plantea la ampliación del sistema de generación eléctrica.

Para el desarrollo del dimensionamiento del sistema de generación, los parámetros generales que describe el proyecto son:

Cuadro 101. Parámetros generales del proyecto de generación eléctrica en el relleno sanitario R3

PARÁMETRO	VALOR
Año de apertura del relleno	2000
Año de cierre del relleno	Vida Útil de 5 años, año de cierre 2028.
Año de inicio del proyecto	2025
Vida útil del proyecto	15 años
Eficiencia de recolección	En la campaña de medición de biogás se determinó que el sistema de captura activa recolecta 2.517 m ³ /h y al compararlo con el valor teórico de producción de biogás 2.276 m ³ /h, se determina que el sistema de captura tiene una eficiencia de recolección de 90,4 %. Este valor es relativamente alto debido a que los sistemas de recolección biogás bien gestionados normalmente opera con eficiencias entre 75 y 85 %. Se considera valor promedio de 80%

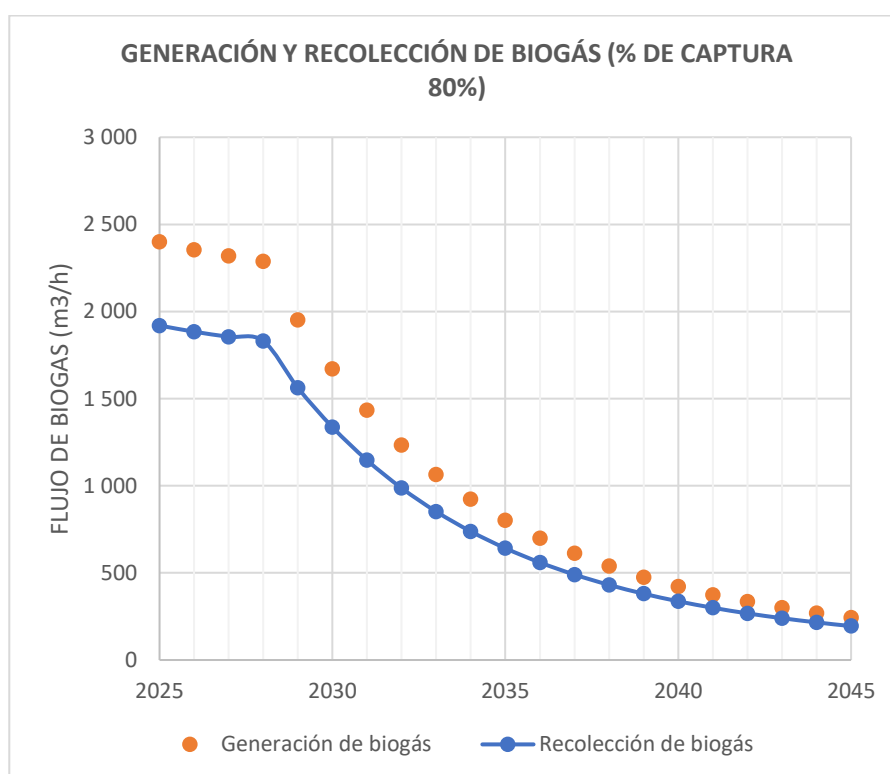
5.4.1.3. **Estimación del cálculo caudales de recolección:**

La eficiencia de recolección propuesta para este relleno sanitario es de 80 %. En el Cuadro 102, se presenta el resultado de la estimación de generación y recolección de biogás para los siguientes 15 años posterior a la implementación del proyecto

Cuadro 102. Caudales de generación de biogás en el relleno sanitario utilizando el modelo de generación de biogás IPCC 2019 y los caudales de recolección de biogás para una eficiencia de captura de 40% en R3

Año	Generación de biogás (m ³ /h)	Recolección de biogás 80 % (m ³ /h)
2025	2399,1	1919,3
2026	2355,0	1884,0
2027	2318,6	1854,9
2028	2288,6	1830,9

2029	1952,7	1562,1
2030	1670,5	1336,4
2031	1433,2	1146,6
2032	1233,4	986,7
2033	1064,9	851,9
2034	922,5	738,0
2035	802,0	641,6
2036	699,7	559,8
2037	612,9	490,3
2038	538,8	431,1
2039	475,6	380,5



Gráfica 44. Proyección de biogás generado y capturado en el relleno sanitario R3

5.4.1.4. Determinación del consumo real de biogás en el sistema de generación

Considerando que actualmente el relleno sanitario tiene un sistema de generación eléctrica, donde valoriza el 10% del biogás, se estima los flujos de biogás valorizable, los cuales se presentan en la siguiente tabla. El dimensionamiento se realiza con los caudales de biogás valorizable (Cuarta columna del Cuadro 103)

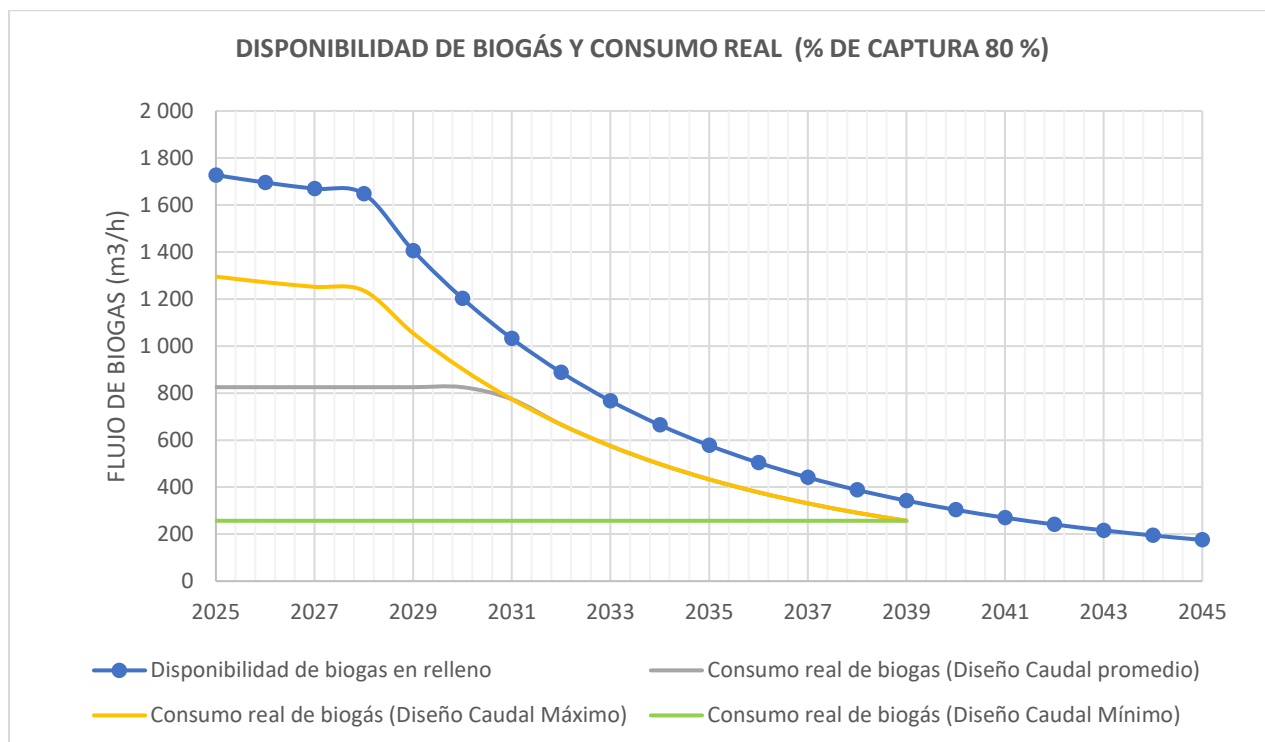
Cuadro 103. Caudal de generación, porcentaje de captura y caudal de biogás valorizable en el relleno R3.

Año	Generación	% Captura (%70)	Descontando el 10% de biogás ya valorizado
	m ³ /hora	m ³ /hora	m ³ /hora
2025	2399,1	1919,3	1727
2026	2355,0	1884,0	1696
2027	2318,6	1854,9	1669
2028	2288,6	1830,9	1648
2029	1952,7	1562,1	1406
2030	1670,5	1336,4	1203
2031	1433,2	1146,6	1032
2032	1233,4	986,7	888
2033	1064,9	851,9	767
2034	922,5	738,0	664
2035	802,0	641,6	577
2036	699,7	559,8	504
2037	612,9	490,3	441
2038	538,8	431,1	388
2039	475,6	380,5	342

Del 100% de biogás aprovechable dentro del relleno sanitario, existe un consumo real de biogás utilizado en la planta de generación eléctrica propuesta. La determinación de los caudales de consumo real de biogás en el proyecto de generación eléctrica se realiza considerando un factor de planta de 90% y un horario operativo de 8760 horas al año.

5.4.1.5. Definición del Tamaño del proyecto de producción eléctrica

El dimensionamiento de la capacidad instalada de la planta de generación eléctrica estará en función del caudal de aprovechable de biogás elegido durante la vida útil del proyecto. Este caudal de dimensionamiento de biogás aprovechable varía entre 1727 y 342 m³/h.



Gráfica 45. Proyección de la estimación de la recolección de biogás en el relleno sanitario R3 y representación del consumo real de biogás para caudal de diseño máximo y promedio

En la gráfica anterior se observa que las producciones más elevadas de biogás se encuentran los 4 primeros años y luego del 2029 la producción de biogás disminuye. Por ello, con la finalidad de evitar de sobredimensionar el sistema y maximizar la quema de biogás durante la vida útil del proyecto, se propone un caudal de diseño de 1.100 m³/h (Línea gris en la Gráfica 45).

5.4.1.6. Estimación de la generación de energía.

Para el análisis de generación de energía eléctrica en el relleno sanitario se consideró los siguientes parámetros para la estimación de generación eléctrica anual:

Cuadro 104. Parámetros utilizados para la estimación de la generación de energía eléctrica para R3

Parámetros	Valores
Factor de planta	75%
Horario de funcionamiento del sistema (h/año)	7 884
La capacidad máxima de la planta de electricidad asume que el índice de calor bruto (BTU/kWh generado)	11 250
Eficiencia - pérdidas parasitas (%)	93%
Contenido de energía en metano (KWh/Nm3)	9.94
Contenido de metano	47%
Contenido de energía en el biogás (KWh/m3)	4.67

En el siguiente cuadro se observa la producción de electricidad neta y la capacidad máxima de generación, la cual se presenta en los primeros años 6 del proyecto, donde el sistema

opera a máxima capacidad. Luego de este periodo, la producción disminuye. La capacidad propuesta de la ampliación del sistema de generación es de 1.7 MW

Cuadro 105. Estimación de la electricidad neta generada y cálculo de la capacidad instalada de la planta de generación en R3

Año	Consumo real de biogás (m ³ /h)	Consumo real de biogás (m ³ /año)	GWh térmico	Electricidad Neta generada MWh	Capacidad Máxima de generación de Electricidad Potencia MW
2025	825	7227000	35,7	10067	1,65
2026	825	7227000	35,7	10067	1,65
2027	825	7227000	35,7	10067	1,65
2028	825	7227000	35,7	10067	1,65
2029	825	7227000	35,7	10067	1,65
2030	825	7227000	35,7	10067	1,65
2031	774	6779670	33,5	9444	1,55
2032	666	5834445	28,8	8127	1,33
2033	575	5037227	24,9	7016	1,15
2034	498	4363696	21,5	6078	0,99
2035	433	3793601	18,7	5284	0,86
2036	378	3310071	16,3	4611	0,75
2037	331	2899054	14,3	4038	0,66
2038	291	2548834	12,6	3550	0,58
2039	257	2249646	11,1	3134	0,51

5.4.1.7. Especificaciones para la planta de generación

La selección de los equipos para la producción de energía eléctrica se consideraron los siguientes parámetros

- Motores específicos para biogás
- La evaluación de prefactibilidad de esta alternativa se analizó el uso de 2 motores marca CAPTERPILLER CG170-12 y CG170-16, los cuales tienen una capacidad total de 1760 kW_{el} (1200 kW_{el} y 1500 kW_{el}). Estos motores garantizan el cumplimiento de los límites en las emisiones de NO_x, permiten ser contenerizados por su tamaño y facilitan la operación en la generación de energía en rellenos sanitarios.

5.4.1.8. Sistema de conexión

En la Imagen 30, se presenta la subestación más cercana al relleno sanitario. La subestación La Caja que se encuentra a 525 m. De igual forma, se muestra que la línea de alimentación trifásica se encuentra a 50 m aproximadamente.

La instalación del proyecto de producción de energía eléctrica debe garantizar que en la operación de los motores la energía pueda transportarse hasta los puntos establecidos para la conexión, por lo que se debe elevar el voltaje hasta las especificaciones necesarias de la

subestación y considerando las pérdidas debido a la distancia de 525 m. Así mismo, garantizar la frecuencia de red (60 Hz) para poder realizar el sincronismo con el sistema eléctrico nacional.

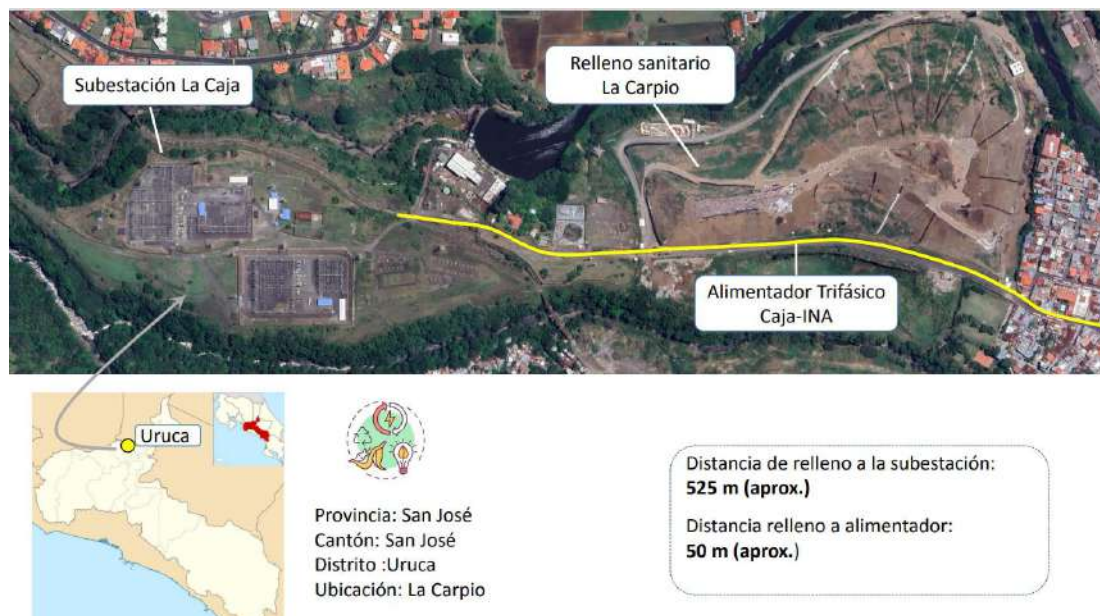


Imagen 30. Subestación y alimentador más cercanos a R3(Fuente: CNFL)

El presupuesto de CAPEX incluye el presupuesto estimado para:

- ✓ **Las obras civiles:** se ha contemplado una losa de 35 m²
- ✓ **Las instalaciones eléctricas:** son los equipos que se utilizarán para la transformación de la tensión según sea el caso, las celdas de protección, instrumentación, el suministro del cableado entre los motores de generación y los transformadores y entre los transformadores y los equipos de protección, así también como las conexiones hasta las estructuras de salida de la central de generación. De igual forma se incluye el estimado de presupuesto para el tendido de una línea eléctrica hasta la subestación La Caja.
- ✓ **Equipos de generación de energía:** Se presenta los valores de cotización de 2 moto generadores contenerizados de capacidad total de 1.76 MW.
- ✓ **Conexiones de biogás, tubería medición e integración:** Contempla tuberías, sistema de instrumentación de flujo, temperatura y presión para garantizar un adecuado funcionamiento de la planta de generación.
- ✓ **Línea eléctrica:** contempla la conexión de la central de generación a la subestación Garabito. El presupuesto estimado contempla la conexión de una línea de 4 Km, pero no se incluye los costos asociados a la servidumbre.

Cuadro 106. CAPEX relacionado al proyecto de generación eléctrica propuesta para el relleno sanitario R3.

Ítems	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
-------	--------	----------	-----------------	--------------

Sistema de generación				\$ 1.770.143,86
OBRAS CIVILES Y ELECTRICAS EN PLANTA				
Obras civiles	m ²	36	\$ 1.075,00	\$ 38.392,86
Obras eléctricas	kW	1700	\$ 124,00	\$ 210.800,00
conexión de biogás (medición e integración)	UN	2	\$ 8.484,00	\$ 16.968,00
Equipos de generación de energía	kW	1700	\$ 850,00	\$ 1.445.000,00
LINEA DE CONEXION SUBESTACION				
Línea eléctrica	km	1	\$ 58.983,00	\$ 58.983,00

5.4.1.9. Beneficios Medioambientales para la propuesta de generación eléctrica en R3

Los beneficios ambientales se determinan para cada año del proyecto de producción de energía eléctrica. Para el escenario de generación eléctrica en este relleno se incorpora el sistema de tratamiento y aprovechamiento para el biogás disponible. A diferencia de los otros rellenos la línea base de este relleno es un sistema de captura activa, chimeneas y valorización del 10% de biogás capturado. Por ello, la reducción de emisiones es contabiliza la quema de metano en los motores en la planta de generación de 1.76 MW

- ✓ **Reducción de emisiones de metano por el proyecto de generación eléctrica (Columna 4 del Cuadro 107):** cantidad de millones de toneladas métricas anuales de metano (en $\text{MMTCO}_2\text{E/año}$) que utiliza el proyecto de generación de energía eléctrica a partir de biogás en el relleno. No se contabiliza la quema de biogás, ni el 10% de bigas aprovechado actualmente.

Cuadro 107. Caudales anuales del consumo real de biogás en la planta de generación, caudales anuales de metano destruidos en los motores y reducción de millones de toneladas métricas de CO_2 equivalente (MTCO_2E) por el proyecto de generación eléctrica solamente para R3.

Año	Consumo real de biogás (m ³ /año)	CH ₄ (m ³ / año) Tratado sistema de generación	MMTCO ₂ E/año CH ₄ reducción en el proyecto de generación
2025	7.227.000	3.590.374	60.857
2026	7.227.000	3.590.374	60.857
2027	7.227.000	3.590.374	60.857
2028	7.227.000	3.590.374	60.857
2029	7.227.000	3.590.374	60.857
2030	7.227.000	3.590.374	60.857
2031	6.779.670	3.368.140	57.090
2032	5.834.445	2.898.552	49.130
2033	5.037.227	2.502.494	42.417
2034	4.363.696	2.167.884	36.746
2035	3.793.601	1.884.661	31.945
2036	3.310.071	1.644.443	27.873

2037	2.899.054	1.440.250	24.412
2038	2.548.834	1.266.261	21.463
2039	2.249.646	1.117.624	18.944

En un periodo de 15 años, el proyecto de generación eléctrica tiene la capacidad de evitar emisiones de toneladas de CO₂ equivalente 675.162 toneladas. A diferencia de los otros proyectos de generación, en el relleno sanitario R3 se contabiliza solo las emisiones evitadas del proyecto de generación, ya que el relleno cuenta con un sistema de extracción forzada y quema controlada.

5.4.2. Sistema de Valoración R3: Producción de biometano

El flujo máximo disponible de biogás para la producción de biometano es aproximadamente 1727 m³/h, considerando un 80% de recolección y descontando el 10% que actualmente se valoriza para la producción de energía eléctrica. Este flujo se ha utilizado para la selección de la tecnología de upgrading del biogás a la salida de la limpieza inicial (Punto de conexión en la Ilustración 13)

Según el contenido de metano en el biogás en el relleno (49.68%) se espera una generación de biometano de 858 m³/h. Por ello se considera de diseño de 900 m³/h con el que se planteara los equipos requeridos para la depuración. Dichos sistemas se ilustran en el P&ID de la siguiente ilustración

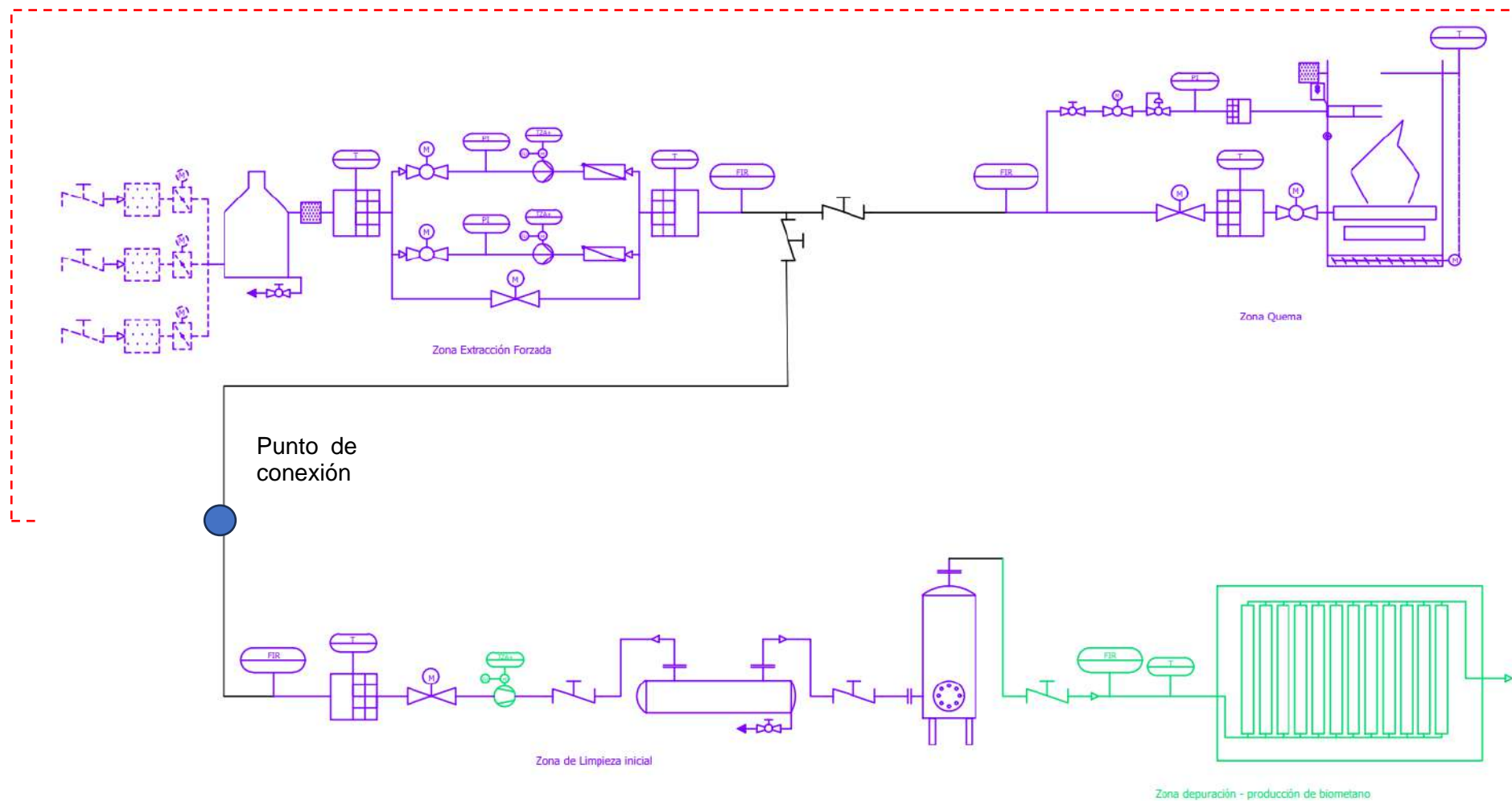


Ilustración 13. P&ID de la alternativa de producción de biometano para R3.

5.4.2.1. Sistema de Tratamiento R3: Producción de biometano R3

La propuesta abarca el filtro de membrana en función de la producción de biometano únicamente. A continuación, se presenta la configuración sugerida.

Cuadro 108. Configuración de filtro de membrana para R3

Referencia	Membrana PRISM®
Flujo de diseño	900 m ³ /h
Calidad de biometano	≥ 97 vol.% CH ₄
Numero de membranas modulares	50

Es importante destacar que estos filtros de membrana requieren una presión específica para lograr una operación eficiente, por lo que se deberá revisar en los sistemas ya instalados, la existencia de compresores que puedan ser aprovechados para el cumplimiento de este requisito. Sea el caso contrario donde los sistemas no cuenten con dicho equipo, se hace la recomendación de su inclusión en el sistema de limpieza primaria según **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Ilustración 13 (resaltado en verde).

5.4.2.2. Sistema de Valoración R3: Aprovechamiento directo del biometano

Con el biometano producido en la estación de depuración del relleno sanitario permite plantear propuestas de producción de (GNC y GNL) ya que su ubicación geográfica dentro de la GAMT permite evaluar alternativas de solución a la movilidad dentro de la ciudad.

Le producción de biometano a partir del año 2025 en R3 se presenta en el Cuadro 109.

Cuadro 109. Producción anual de biometano R3

Año	Biogás disponible para valorizar	Capacidad de producción de biometano
	m ³ /hora	m ³ /hora
2025	1.727	858
2026	1.696	842
2027	1.669	829
2028	1.648	819
2029	1.406	698
2030	1.203	598
2031	1.032	513
2032	888	441
2033	767	381
2034	664	330
2035	577	287
2036	504	250
2037	441	219
2038	388	193
2039	342	170

El biometano producido en el sistema de depuración propuesto tendría las siguientes características:

Cuadro 110. Características del biogás producido después de depuración para R3

Características del biogás a la salida de la unidad de depuración	Especificaciones	Unidades
Presión	7,6	barg
Temperatura	15	°C
Contenido de CH ₄	95,4	%
Contenido de CO ₂	0	%
contenido de N ₂	4	%
contenido de O ₂	0,6	%
Contenido de H ₂ S	<7	mg/Nm ³
Contenido de impurezas + O ₂	4,6	%
Poder calorífico superior (PCS)	>35,3	MJ/Nm ³
Índice de Wobbe	>46,6	MJ/Nm ³

Dada la composición y las características fisicoquímicas, la calidad del biometano producido es buena y comparable a un gas de tipo B producido en el norte de Francia o en Bélgica. Por tanto, este tipo de gas puede ser utilizado como combustible para vehículos ligeros, camiones, autobuses. No obstante, será necesario que el fabricante del vehículo valide que esta calidad del gas es efectivamente compatible para su uso.

5.4.2.3. **Sistema de Valorización R3: Aprovechamiento de biometano en forma de GNC**

Tomando en cuenta que el abastecimiento completo en GNC de un camión es de unos 150 kg de biometano para una autonomía de 600 km y que el abastecimiento completo de un bus es de 90 kg de biometano.

Las estimaciones de producción de GNC y equivalente en flota para cada uno de los sitios es la siguiente:

Se estima que, en horizonte de 15 años, la producción de biometano variará entre 170 – 858 Nm³/h (que en flujo masico corresponde a 134 – 677.9 kg/h). Esta producción de biometano permite abastecer 22 y 109 camiones por día respectivamente o 36 y 180 buses por día respectivamente.

Según lo mencionado la consultoría recomienda utilizar la producción de biometano en R3 para abastecer la flota de autobuses y contenedores de residuos domésticos de la ciudad. **Esto permitiría suministrar un máximo de 100 camiones/día o bien una estación de autobuses de 150 autobuses.**

Por lo anterior, se proponen diferentes soluciones técnicas para la producción y distribución de GNC tal como se presenta a continuación

✓ **Solución 1: Estación GNC en el R3**

Existen estaciones de distribución de GNC para recargar de 50 a 100 vehículos pesados por día. Estas estaciones se desarrollan en Europa y América. **En esta primera solución, se propone instalar la estación de GNC directamente en el sitio de disposición de R3.** Los camiones de recolección de residuos se pueden cambiar a GNC (que es aproximadamente 20% más caro que un camión diésel) y se recargarán después de depositar los residuos. Es posible imaginar que los autobuses también pasen por la estación, pero esto representaría desvíos por parte de los conductores y horas extras.

Dimensionamiento propuesto de la estación de GNC:

- 4 pistas de carga
- 3 distribuidores metrológicos con 6 pistolas NGV1
- 2 compresores de 1000 Nm³/h
- Rack de botellas de aproximadamente 160 btl de 150L a 300 bar

Posibilidad de hasta: 12 llenados/hora (óptimo)

Imagen 31 muestra la distribución espacial de la estación de servicio de GNC que ocupa una superficie de aproximadamente 2000 m².



Imagen 31. Implantación posible de la estación de GNC en R3

Las hipótesis sobre la inversión (CAPEX) y los costos operacionales (OPEX) se presentan a continuación en dólares americanos USD (euros €) con una tasa de cambio del 1.08 USD/€

- La inversión de las instalaciones eléctricas asciende a 89.440 USD e incluyen:

Instalaciones eléctricas	59.400 USD
Instalaciones de cajeros automáticos y ticketing	30.240 USD
Los costos de asistencia a la gestión de proyectos y gestión de construcción excluidos los costos de estudio, al igual que los proyectos varios y contingencias	Representan el 5% de la inversión

- Los costos operativos incluyen los cargos fijos y los cargos variables; los cuales se supone que son idénticos para todas las estaciones de bioGNV/GNV, los cuales comprenden:

Mantenimiento

- **Mantenimiento predictivo (Promedio a 10 años):** 7.344 USD /año (mantenimiento importante en los años 6 y 8)
- **Mantenimiento preventivo (Promedio a 10 años):** Intervención mensual de un técnico 4 horas: 4.320 USD/año y material 4.320 USD /año
- **Control reglamentario (Promedio 10 años):** 8.200 USD/año
- **Supervisión y seguimiento de la instalación y pago de las piezas de recambio:** 13.700 USD/año

Subscripciones y seguros

- **Seguros:** 6.000 USD/año
- **Sistema central – Banca electrónica – Cobro a distancia** 3.800 USD/año

Compra de electricidad

- **Contrato de electricidad que se pueda negociar en Costa Rica**
- Consumo eléctrico de aproximadamente 0,3 kWh/kg_{GNC}

Los valores estimados anteriormente son dados a un nivel de prefactibilidad basados en los costos presupuestados de las consultas preliminares con los proveedores y los índices comerciales (Ver Anexo 7)

Cuadro 111. Síntesis de los costos de CAPEX estación GNC R3

CAPEX TOTAL	1,88 M USD
Disposición del sitio	680 400 USD
Carreteras y diferentes redes – obra civil	648 000 USD
Conexión a red (electricidad, telecomunicaciones, agua)	32 400 USD
Equipos proceso y periféricos	1 020 500 USD
Estación de compresión y relacionado	684 700 USD
Tubería de GNC	84 200 USD
Distribución de carga rápida de GNC	151 200 USD
Intercomunicador / Gestión de abonos / Sistema de pago	30 200 USD
Electricidad/ Incendios	70 200 USD

Ingeniería, sitio de construcción y seguimiento	177 100 USD
Proyectos varios y contingencias	5% (CAPEX + estudios)
AMO y MOE/ estudio normativo y de seguridad	5% (CAPEX)

Cuadro 112. Síntesis de los costos OPEX estación GNC R3

OPEX TOTAL	99 200 USD
Cargos fijos	44 700 USD/año
Seguros y control reglamentario	5 900 USD/año
Mantenimiento preventivo/curativo/suscripción de software	38 800 USD/año

Cargos variables (en 2035: potencial máximo de GNV = 846,4 t_{GNV}/año)
Electricidad (Precio de negociación \$/kWh x 0.3 kWh/kg _{GNV})

Es posible construir una estación de servicio de GNC en R3, pero será difícil tener suficientes consumidores: al menos 120 vehículos pesados al día. Es necesario hacer pasar a todos los camiones y autobuses urbanos para cubrir la producción. Además, si los camiones no pasan durante un día toda la producción deberá ser:

- Almacenada lo que añade un costo adicional por almacenamiento (donde se dimensiona según el número de camiones que pasan por día y los días no trabajados)
- Quemada en la antorcha como se hace actualmente.

Por otro lado, es importante considerar el costo de desplazamiento de los autobuses desde la estación hasta el relleno sanitario. Entonces es posible construir la estación de servicio en la estación de autobuses o en el solar adyacente. Para ello es posible instalar:

- ya sea una tubería de gas subterránea entre el sitio de disposición y la estación de autobuses
- o un gasoducto virtual con camiones que van y vienen entre el relleno y la estación de buses. El transporte del biometano puede ser en forma de GNC o GNL.

✓ **Solución 2: Estación GNC en la estación de buses y gasoducto virtual**

Para la estación de GNC es posible hacer lo mismo que se propone en la solución 1, tomando una superficie similar en la estación de buses.

Para el gasoducto virtual, es necesario comprar camiones que transporten el GNC desde el relleno sanitario hasta la estación de autobuses. Este costo de transporte del GNC se sumará al costo del gas que ingresa a la estación de servicio.

Para el gasoducto virtual se debe construir la siguiente instalación:

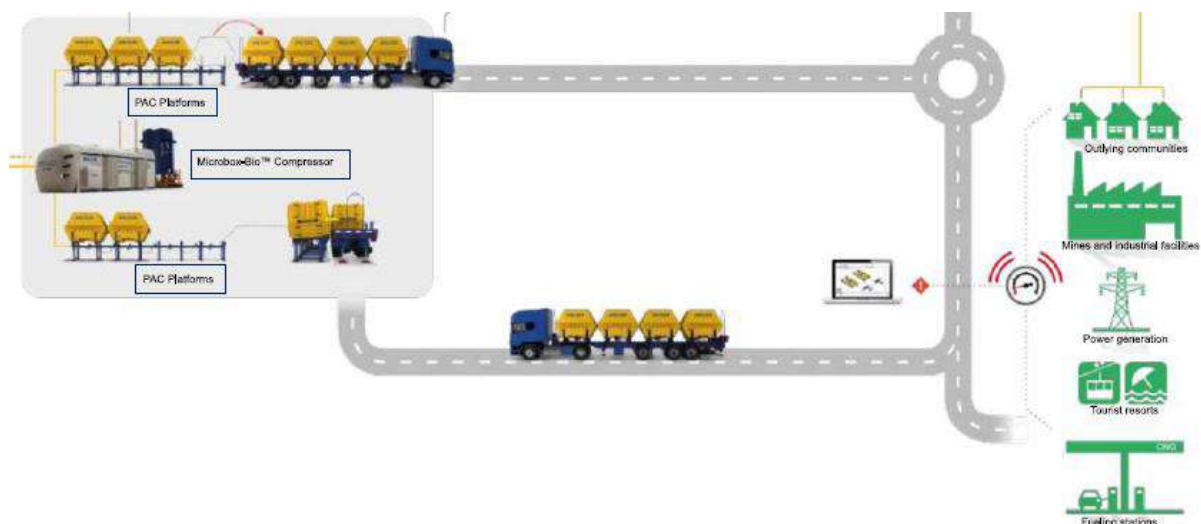


Ilustración 14. Representación de un gasoducto virtual según la solución de Edge Energy.

Para el transporte, las cajas de almacenamiento pueden transportar 1 500 Nm³ y tienen las siguientes características:

Cuadro 113. Características del sistema de almacenamiento de GNC

Maximum amount of cylinders per MAT		39
High temperature fusible plug		✓
Overflow shutoff in each cylinder		✓
Maximum nominal pressure load	bar	250
	psi	3625
Hydraulic capacity per cylinder	liters	150
	gallons	40
Maximum Hydraulic capacity	liters	11700
	gallons	3091
CNG maximum storage capacity*	Nm ³	1500
	GGE	420
Compliance with international regulations according to needs		✓
Cylinder compliance with regulations ISO9809-1 ISO9809-2 ASME DOT		✓

MAT containers can store up to 1500 Nm³ (420 GGE) of ambient temperature Bio-CNG at a pressure of 250 bar (3625 psi).



Para distribuir GNC desde el relleno sanitario hasta la estación de autobuses, se necesita el siguiente equipo:

- Una instalación de compresores
- Unidades de almacenamiento de GNC en remolques
- Camiones con remolques para asegurar las conexiones

- El medio de conexión de los depósitos a la estación de servicio está incluido en el precio de la estación

Para realizar el servicio, la instalación de compresión llenará 3 cajas de almacenamiento de GNC (un remolque) en 6 horas 40 minutos. A continuación, el camión sale con la carga hacia el depósito (ubicado a 1h30 de viaje). Deja el remolque y regresa con un remolque vacío, mientras se recarga un remolque en el sitio. Por tanto, es necesario disponer de 4 remolques:

- Uno encargado del relleno sanitario
- Uno abasteciendo la estación de servicio en la terminal de autobuses
- Uno recientemente abastecido en ruta hacia el depósito de buses
- Uno vacío en ruta hacia el sitio de disposición

Para transportar estos remolques se necesitan 2 camiones que van y vienen y 10 conductores que conducen los camiones a tiempo completo (las 24 horas del día, los 7 días de la semana, los 365 días del año). Es necesario contar con 5 conductores por semana para conducir 1 camión.

Para el flujo máximo de 858 Nm³/h es necesario disponer del siguiente equipamiento con la respectiva inversión:

Cuadro 114. CAPEX de la alternativa de aprovechamiento de biometano para producción de GNC en R3

Actividad	Unidad	Cantidad	Valor total
Instalación de unidad de compresión y recarga de cajas	UN	1	968 000 USD
Remolques equipados con 3 cajas cada uno	UN	4	860 000 USD
Camiones propulsados por GNC	UN	2	32 400 USD
Valor Total			2,11 M USD

Los cargos aplicables a la operación de las instalaciones y equipos son los siguientes:

- Consumo eléctrico: 0,25 kWh/kg_{GNC}
- 2 técnicos de mantenimiento de la instalación de compresión en el relleno sanitario y en la estación de servicio
- 10 conductores para conducir los camiones a tiempo completo
- Costo anual de mantenimiento de la compresión: 108.000 € sin IVA/año
- Seguros

Esta solución es complicada de implementar y requiere mucha logística. Si es posible, es mejor instalar un gasoducto de gas directamente entre el relleno sanitario y la estación de autobuses. Si no, esta solución existe y varios proveedores pueden implementarla. Sería interesante comparar esta solución con el transporte de GNL para abastecer una estación de GNL.

5.5. Propuesta para R4

Actualmente en el relleno R4 se está desarrollando el sistema de captura y conducción para este sitio de disposición. Por ello en la propuesta se presenta el sistema de extracción forzada, quema controlada, tratamiento de biogás y sistema de generación eléctrica. El máximo flujo de captura para una eficiencia de recolección de 80% es 4.600 m³/h, el cual se utiliza para el diseño del sistema de extracción y quema controlada.

Para R4 se evaluaron dos alternativas de valoración del biogás producido:

- ✓ Generación de energía eléctrica ()
- ✓ Producción de biometano ()

En la producción de biometano se evaluó su uso en forma de GNC y GNL. Cada propuesta de aprovechamiento detallara su propio sistema de tratamiento y valoración, mientras que para las propuestas de extracción forzada y quema las características serán las mismas para las dos alternativas.

A continuación, se describirá el sistema de extracción forzada y quema aplicable a las dos formas de aprovechamiento planteadas para R4, para posteriormente detallar en cada opción de valoración los respectivos sistemas de tratamiento y aprovechamiento.

5.5.1. Sistema de Extracción y Quema R4

El proceso de selección de los equipos de extracción forzada y quema sigue las mismas consideraciones que los sitios previamente descritos y se orienta como una medida de seguridad para la destrucción de los excesos o de la totalidad de la producción en caso de que se presenten emergencias o paradas del sistema de valorización. A continuación, se hace la presentación de los equipos escogidos en función de los parámetros de R4.

Para R4 se establece que, una antorcha de 5000 m³/h de capacidad no cabría en un contenedor, por lo que se debe revisar la opción de un transporte sobredimensionado, pero en este caso la mejor alternativa sería una construcción en sitio o proponer 2 antorchas de 2500 m³/h.

Cuadro 115. Propuesta de equipos para extracción forzada y quema en R4

Lista	Ítems	Precio Unitario	Precio Total
SISTEMA DE EXTRACCION Y QUEMA CONTROLADA			\$ 2.528.294
1	Sistema de extracción forzada y quema controlada	\$ 2.068.331	\$ 2.068.331
1.1	Sistema de quema alta temperatura		
1.2	Estructura en acero galvanizado		
1.3	Aislamiento cerámico de 100 mm		
1.4	Persianas para aire de combustión		
1.5	Controlador para persianas		
1.6	Termopar tipo s con certificado de calibración		
1.7	Sistema de ignición		

1.8	Línea de gas válvula solenoide y con arrestador de llama en 3/4 o 1/2 in		
1.9	Tren de gas DN 250 hacia antorchas		
1.10	Tren de gas en acero galvanizado con válvulas eléctricas trasmisores de presión y temperatura medidor de flujo de tubo Pitot, arrestador de llama IIA1. termopares		
1.11	Sistema de succión / estación del blower		
1.12	sistema de blower y variador de frecuencia		
1.13	Sistema de alimentación y control de combustión		
2	Puesta en marcha del sistema de extracción forzada y quema de biogás	\$ 294.944	\$ 294.944
3	Obras civiles	\$ 32.537	\$ 32.537
4	Conexión eléctrica	\$ 132.481	\$ 132.481

En el siguiente cuadro, se presenta el resumen del OPEX del sistema de extracción forzada y quema controlada. El costo de operación más importante en el sistema es el consumo energético para la extracción del biogás en las diferentes celdas. Se estima una potencia de 115kW y un consumo energético anual de 953.928 kWh

Cuadro 116. Resumen de OPEX del sistema de extracción y quema controlada del biogás del relleno R4

OPEX ANUAL			
Descripción	Cantidad	Precio Unitario	143.480 \$/año
Repuestos para el sistema de extracción forzada y quema del biogás: La estimación de costos operativos se consideraron repuestos como termopares, sensores de composición del biogás, sensores UV y transformadores de ignición, que de acuerdo con la experiencia de C-deg en la operación de este tipo de proyectos, son los elementos que se requiere reponer con mayor frecuencia.	1	\$ 2.930	2.930 \$/año
Consumo energético (potencia = 115 kW)	953.928 kWh	0,14 \$/kwh	133.550 \$/año
Calibración de los analizadores para certificación de bonos de carbono en función de la metodología seleccionada	1	\$ 7.000	7.000 \$/año

5.5.2. Sistema de Tratamiento R4: Generación de energía eléctrica

Eliminación de vapores de agua

Atendiendo los requerimientos físicos de los motores generadores de energía eléctrica, se presenta a continuación la opción de tecnología de enfriamiento que según las condiciones del relleno permite alcanzar dichos estándares

La finalidad del sistema propuesto es el enfriamiento del gas hasta 8 °C, garantizar su condensación y secar el gas que ingresa posteriormente a los filtros de carbón activado y motores de generación eléctrica.

A continuación, se presenta los parámetros para la selección del sistema de eliminación de vapores en el R4 y las características del sistema de enfriamiento.

Temperatura de Entrada	42
Altitud	1.200 msnm
Flujo	5000 Nm ³ /h
Composición	Realizada en campo. % de contenido de H ₂ O referencial 7%
Caída de presión	15 mbar
Presión de operación del gas	200 mbar
Max. Presión de operación	0,5 bar
Humedad relativa biogás	100%
Se requiere	
Punto de rocío: 8 °C	
Temperatura a la salida de filtro carbón activado aprox: 8 °C (saturado)	

Unidad de Acondicionamiento de Biogás: **BioSec-5000**

La unidad de acondicionamiento de biogás del presente presupuesto está compuesta por un refrigerador biogás/agua con su separador de condensados y enfriadora de agua (Chiller) debidamente integrado.

Las especificaciones técnicas de los elementos del BioSec-1500, se adjuntan en el Anexo 7.

- ✓ SEPARADOR DE CONDENSADOS SC-1400
- ✓ REFRIGERADOR RH-1953/1500/E
- ✓ UNIDAD ENFRIADORA DE AGUA, CHILLER AIR-AST-105

Los elementos que componen la unidad de acondicionamiento **BioSec 5000** se encuentran interconexiónados entre ellos sobre una bancada de manera que forman una unidad compacta preparada para funcionar una vez conexas la entrada y salida del biogás, y de recibir acometida eléctrica de cliente al cuadro de control (Plug&Play).

Eliminación de contaminantes

Como se ha mencionado previamente el sistema se centrará en la eliminación de H₂S - sulfuro de hidrógeno, siloxanos y Compuestos orgánicos volátiles – COVs según la presencia de estos componentes detectados en la campaña de muestreo.

La caracterización del biogás de R4 presenta contenido de H₂S el cual se propone ser tratado con la tecnología de filtro de carbón activado con los siguientes parámetros.

Cuadro 117. Propuesta de tecnología para limpieza primaria en R4

Referencia	FAKA 1500K1E
Material	Acero con revestimiento electrostático en el interior
Número de unidades	2
Número de celdas	2
Flujo nominal del total de unidades	3400 m ³ /h
Máximo flujo del total de unidades	4000 m ³ /h

A continuación, se presenta el CAPEX relacionado con el sistema de tratamiento de biogás para el relleno sanitario R4, el cual incluye el sistema de presurización hacia la zona de aprovechamiento de biogás para la generación eléctrica. Como sistema de presurización se ha seleccionado el Gas blower Model 1x077A1-04 Impellers 3x5212 para un flujo de 5000 m³/h, se ha incluido el precio de un blower adicional redundante.

Cuadro 118. CAPEX sistema de tratamiento para R4

Ítems	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
SISTEMA DE TRATAMIENTO				\$ 686.610
Gas blower Model 1x077A1-04 Impellers 3x5212	UN	2	\$ 55.937	\$ 111.873
Una unidad de tratamiento de eliminación de agua BIOSEC-5000				
SEPARADOR DE CONDENSADOS SC-1400	UN	1	\$ 270.552	\$ 270.552
REFRIGERADOR RH-1953/1500/E				
UNIDAD ENFRIADORA DE AGUA, CHILLER AIR-AST-105				
Pretratamiento con carbón activado: FAKA 1500K1E	UN	2	\$ 88.880	\$ 177.760
Tuberías	m ²	200	\$ 60	\$ 11.990
Puesta en marcha del sistema de extracción forzada y quema de biogás	UN	1	\$ 114.434,92	\$ 114.435

5.5.3. Sistema de Valoración R4: Generación de energía eléctrica

En términos de potencial energético, el relleno sanitario es el más importante del país. Este escenario de valorización propone la generación de energía eléctrica para inyección a la red de Costa Rica. A diferencia de los otros rellenos, la propuesta contempla la instalación de un sistema de captura forzada, quema de biogás, y un sistema de tratamiento y valorización del

biogás para la generación eléctrica con generadores recíprocos de combustión interna. El sistema de generación propuesto tiene una capacidad instalada de 7.0 MW.

Para el desarrollo del dimensionamiento del sistema de generación, los parámetros generales que describe el proyecto son:

Cuadro 119. Parámetros generales del proyecto de generación eléctrica en el relleno sanitario R4.

PARÁMETRO	VALOR
Año de apertura del relleno	2007
Año de cierre del relleno	Vida Útil de 5 años, año de cierre 2028.
Año de inicio del proyecto	2030
Vida útil del proyecto	15 años
Eficiencia de recolección	Al igual que el relleno sanitario de Uruca, se considera un valor de 80% de eficiencia de recolección, ya que ambos rellenos sanitarios son operados por el mismo operador. Nota: el porcentaje de eficiencia de recolección depende de la operación del relleno, por ello se asume que las prácticas de operación en el relleno están estandarizadas en la empresa.

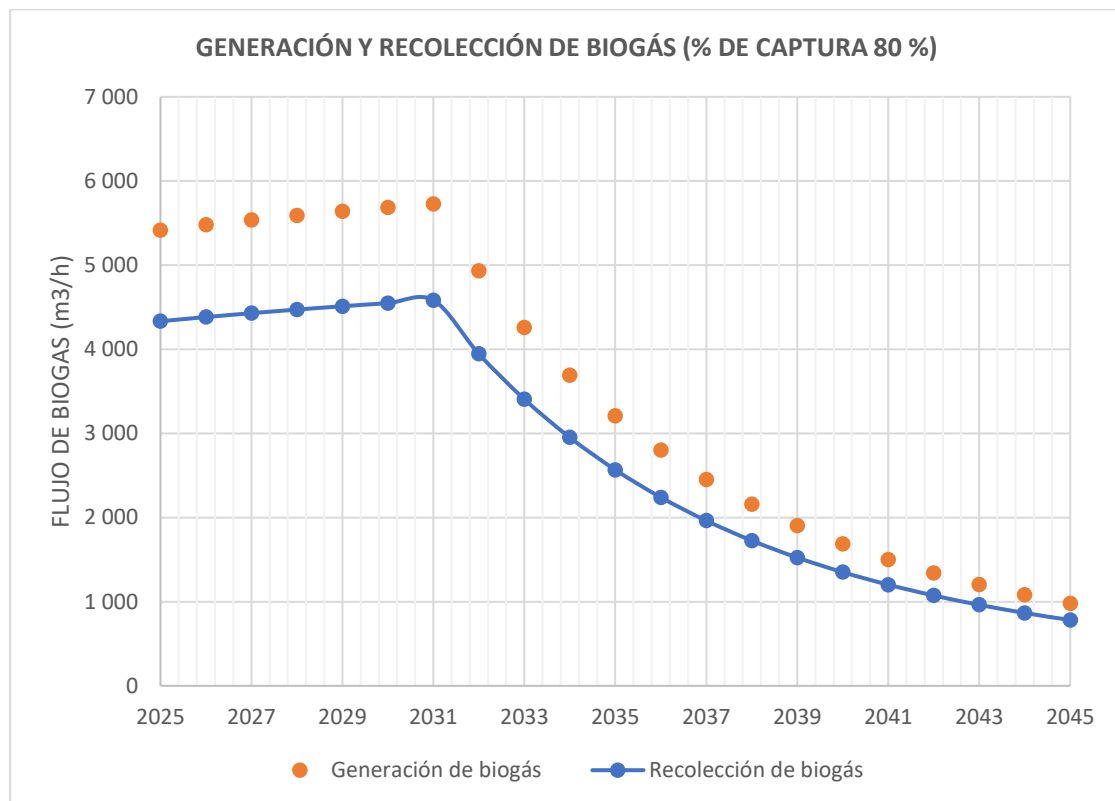
5.5.3.1. Estimación del cálculo caudales de recolección

La eficiencia de recolección propuesta para este relleno sanitario es de 80 %. En el Cuadro 120, se presenta el resultado de la estimación de generación y recolección de biogás para los siguientes 25 años posterior a la implementación del proyecto.

Cuadro 120. Caudales de generación de biogás en el relleno sanitario utilizando el modelo de generación de biogás IPCC y los caudales de recolección de biogás para una eficiencia de captura de 80% para R4

Año	Generación de biogás (m ³ /h)	Recolección de biogás 80 % (m ³ /h)
2025	5.416	4.333
2026	5.478	4.383
2027	5.536	4.429
2028	5.589	4.472
2029	5.639	4.511
2030	5.685	4.548
2031	5.729	4.583
2032	4.931	3.945
2033	4.258	3.407
2034	3.690	2.952
2035	3.209	2.567

2036	2.800	2.240
2037	2.453	1.963
2038	2.158	1.726
2039	1.905	1.524



Gráfica 46. Proyección de biogás generado y capturado en el relleno sanitario R4

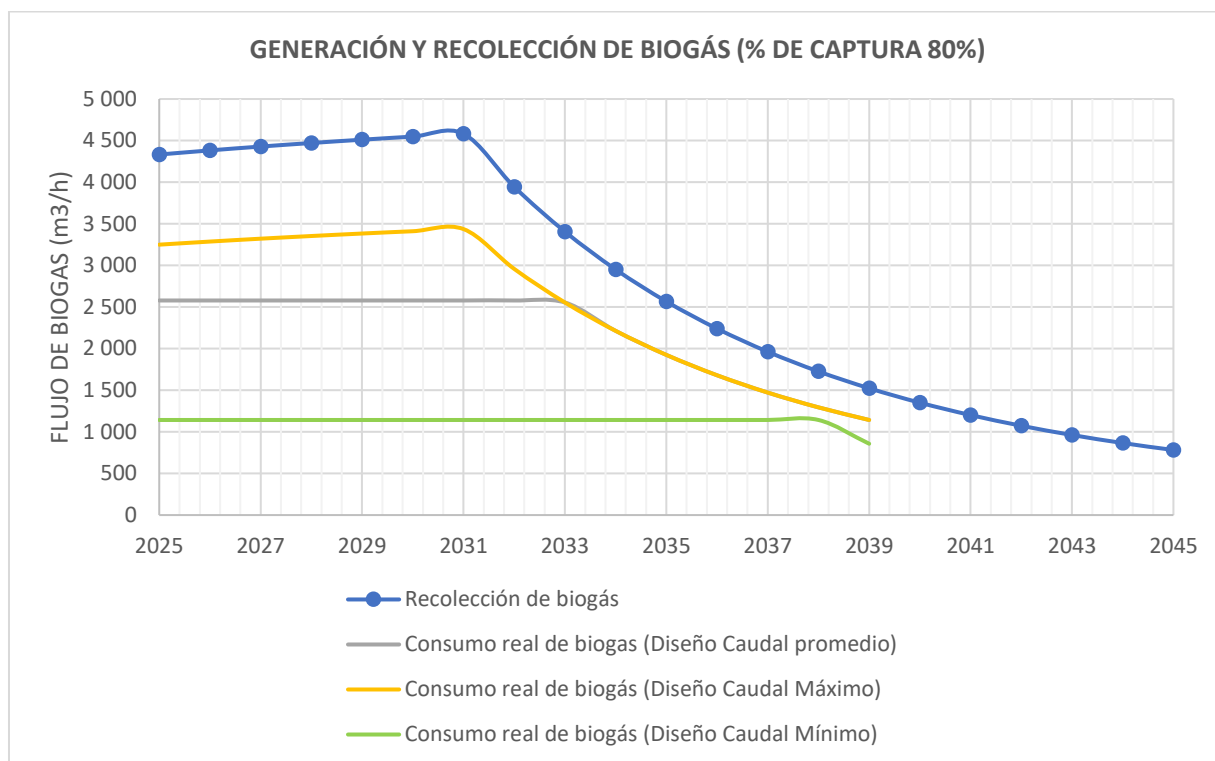
5.5.3.2. Determinación del consumo real de biogás en el sistema de generación

Del 100% de biogás aprovechable dentro del relleno sanitario, existe un consumo real de biogás utilizado en la planta de generación eléctrica propuesta. La determinación de los caudales de consumo real de biogás en el proyecto de generación eléctrica se realiza considerando un factor de planta de 90% y un horario operativo de 8760 horas al año.

5.5.3.3. Definición del Tamaño del proyecto de producción eléctrica

El dimensionamiento de la capacidad instalada de la planta de generación eléctrica estará en función del caudal de recolección de biogás elegido durante la vida útil del proyecto. Este caudal de dimensionamiento de biogás varía entre 4583 y 1524 m³/h ver Cuadro 120. Como se observa en la siguiente gráfica, la curva de generación de biogás garantiza un flujo ascendente de producción de biogás durante los 7 primeros años del proyecto. Por ello, el dimensionamiento que se propone es de una capacidad instalada de 6 MW, donde se

garantiza que el sistema operara a máxima carga de biogás la mitad de la vida útil del proyecto. El flujo de diseño del sistema que corresponde a 6 MW es de 3900 m³/h de biogás.



Gráfica 47. Proyección de la estimación de la recolección de biogás en el relleno sanitario R4 y representación del consumo real de biogás para caudal de diseño máximo y promedio

5.5.3.4. Estimación de la generación de energía

Para el análisis de generación de energía eléctrica en el relleno sanitario se consideró los siguientes parámetros para la estimación de generación eléctrica anual:

Cuadro 121. Parámetros utilizados para la estimación de la generación de energía eléctrica en R4

Parámetros	Valores
Factor de planta	75%
Horario de funcionamiento del sistema (h/año)	7 884
La capacidad máxima de la planta de electricidad asume que el índice de calor bruto (BTU/kWh generado)	11 250
Eficiencia - pérdidas parasitas (%)	93%
Contenido de energía en metano (KWh/Nm ³)	9.94
Contenido de metano	47%
Contenido de energía en el biogás (KWh/m ³)	4.67

En el siguiente cuadro se observa la producción de electricidad neta y la capacidad máxima de generación (potencia), donde el sistema opera a máxima capacidad entre 2029 y 2030. Luego de este periodo, la producción disminuye.

Cuadro 122. Estimación de la electricidad neta generada y cálculo de la capacidad instalada de la planta de generación para R4

Año	Consumo real de biogás (m³/h)	Consumo real de biogás (m³/año)	GWh térmico	Electricidad Neta generada MWh	Capacidad Máxima de generación de Electricidad Potencia MW
2025	2.925	25.623.000	130,66	36.855	6,0
2026	2.925	25.623.000	130,66	36.855	6,0
2027	2.925	25.623.000	130,66	36.855	6,0
2028	2.925	25.623.000	130,66	36.855	6,0
2029	2.925	25.623.000	130,66	36.855	6,0
2030	2.925	25.623.000	130,66	36.855	6,0
2031	2.925	25.623.000	130,66	36.855	6,0
2032	2.925	25.623.000	130,66	36.855	6,0
2033	2.555	22.381.739	114,13	32.193	5,3
2034	2.214	19.394.041	98,89	27.895	4,6
2035	1.925	16.864.802	86,00	24.257	4,0
2036	1.680	14.719.277	75,06	21.171	3,5
2037	1.472	12.895.191	65,76	18.548	3,0
2038	1.295	11.340.637	57,83	16.312	2,7
2039	1.143	10.012.337	51,06	14.401	2,4

5.5.3.5. Sistema de conexión

En la Imagen 32 se presenta la subestación más cercana al relleno sanitario. La subestación Higuito que se encuentra a 750 m. De igual forma, se muestra que la línea de alimentación trifásica se encuentra a 150 m aproximadamente. La línea de conexión a la subestación es contemplada en el CAPEX de esta propuesta, para el cálculo se utiliza una distancia de 750 m.

La instalación del proyecto de producción de energía eléctrica debe garantizar que en la operación de los motores la energía pueda transportarse hasta los puntos establecidos para la conexión, por lo que se debe elevar el voltaje hasta las especificaciones necesarias de la subestación y considerando las pérdidas debido a la distancia. Así mismo, garantizar la frecuencia de red (60 Hz) para poder realizar el sincronismo con el sistema eléctrico nacional.

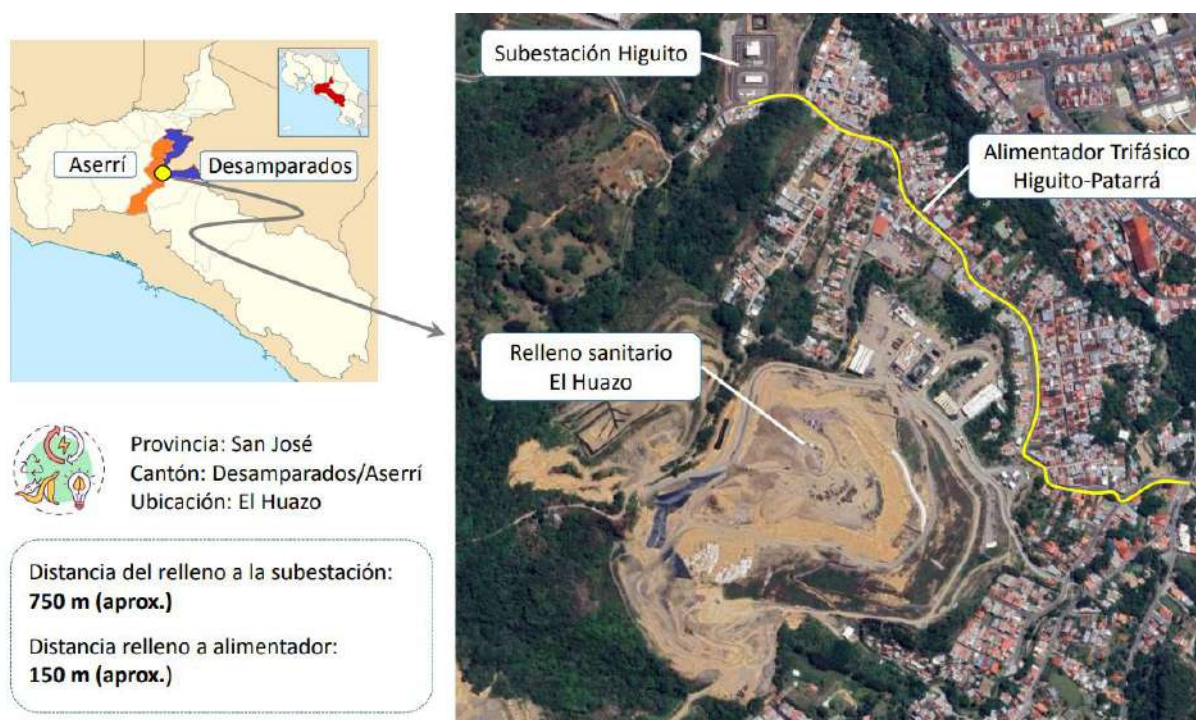


Imagen 32. Subestación y alimentador más cercanos a R4 (Fuente: CNFL)

5.5.3.6. Especificaciones para la planta de generación

La selección de los equipos para la producción de energía eléctrica se consideró el siguiente parámetro:

- ✓ Para evaluar la prefactibilidad de esta alternativa se analizó el uso de 6 motores marca CAPTERPILLER G3516A de 1.012kWe, los cuales tienen una capacidad total de 6.072 kWe. (Estos motores garantizan el cumplimiento de los límites en las emisiones de NO_x; permiten ser contenerizados por su tamaño y facilitan la operación en la generación de energía en rellenos sanitarios)

Se presenta a continuación, el CAPEX de la propuesta de generación eléctrica donde se incluyen los ítems relacionados a lograr la conexión hasta la subestación mencionada.

Cuadro 123. CAPEX relacionado al proyecto de generación eléctrica propuesta para el relleno sanitario R4

ítems	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Sistema de generación eléctrica				\$ 6.158.390
OBRAS CIVILES Y ELECTRICAS EN PLANTA				
Obras civiles	m ²	125	\$ 1.075	\$ 134.375
Obras eléctricas	kW	6072	\$ 124	\$ 752.928
Conexión de biogás (medición e integración)	UN	6	\$ 8.484	\$ 50.904
Equipos de generación de energía	kW	6072	\$ 850	\$ 5.161.200
LINEA DE CONEXION SUBESTACION				
Línea eléctrica	km	1	\$ 58.983	\$ 58.983

5.5.3.7. Beneficios Medioambientales de la generación de energía eléctrica para R4

Los beneficios ambientales se determinan para cada año del proyecto de producción de energía eléctrica. Para el escenario de generación eléctrica en el relleno se incorpora un sistema de quema y el sistema de aprovechamiento de producción eléctrica.

- ✓ **Metano recolectado y destruido (columna 3 del Cuadro 124)**
- ✓ **Reducción de emisiones de metano totales (columna 4 del Cuadro 124)**

Cuadro 124. Caudales anuales de biogás recolectado, de metano recolectado y destruido en antorcha o planta de generación y reducción de toneladas métricas de CO₂ equivalente (MTCO₂ E) totales para R4.

Año	Biogás (m ³ /año) Recolección anual de biogás	CH ₄ (m ³ /h) Recolectado y destruido en antorcha o sistema de generación	MTCO ₂ €/año Reducción de emisiones de CH ₄ totales por: Chimenea + Sistema de generación
2025	37.957.344	19.472.117	330.052
2026	38.392.795	19.695.504	333.839
2027	38.796.368	19.902.537	337.348
2028	39.171.020	20.094.733	340.606
2029	39.519.350	20.273.427	343.635
2030	39.843.653	20.439.794	346.455
2031	40.145.958	20.594.876	349.083
2032	34.556.839	17.727.658	300.484
2033	29.842.318	15.309.109	259.489
2034	25.858.721	13.265.524	224.851
2035	22.486.402	11.535.524	195.527
2036	19.625.703	10.067.986	170.652
2037	17.193.588	8.820.311	149.504
2038	15.120.849	7.756.996	131.481
2039	13.349.783	6.848.438	116.081

- **Reducción de emisiones de metano por el proyecto de generación eléctrica (Columna 4 del Cuadro 125)**

Cuadro 125. Caudales anuales del consumo real de biogás en la planta de generación, caudales anuales de metano destruidos en la planta de generación y reducción de toneladas métricas de CO₂ equivalente (MTCO₂ E) por el proyecto de generación eléctrica solamente en R4

Año	Consumo real de biogás (m ³ /año)	CH ₄ (m ³ /h) Destruído en Motores	MTCO ₂ E/año CH ₄ reducción en el proyecto de generación
2025	25.623.000	13.144.599	222.801
2026	25.623.000	13.144.599	222.801
2027	25.623.000	13.144.599	222.801
2028	25.623.000	13.144.599	222.801
2029	25.623.000	13.144.599	222.801
2030	25.623.000	13.144.599	222.801
2031	25.623.000	13.144.599	222.801
2032	25.623.000	13.144.599	222.801
2033	22.381.739	11.481.832	194.617
2034	19.394.041	9.949.143	168.638
2035	16.864.802	8.651.643	146.645
2036	14.719.277	7.550.989	127.989
2037	12.895.191	6.615.233	112.128
2038	11.340.637	5.817.747	98.611
2039	10.012.337	5.136.329	87.061

Esta propuesta de proyecto de generación eléctrica tiene la capacidad de evitar la emisión de 3.929.087 MTCO₂E en un periodo de 15 años.

Según el sistema de tratamiento y aprovechamiento planteado para la generación de energía eléctrica se presenta a continuación, el diagrama P&ID de los sistemas de componen esta propuesta.

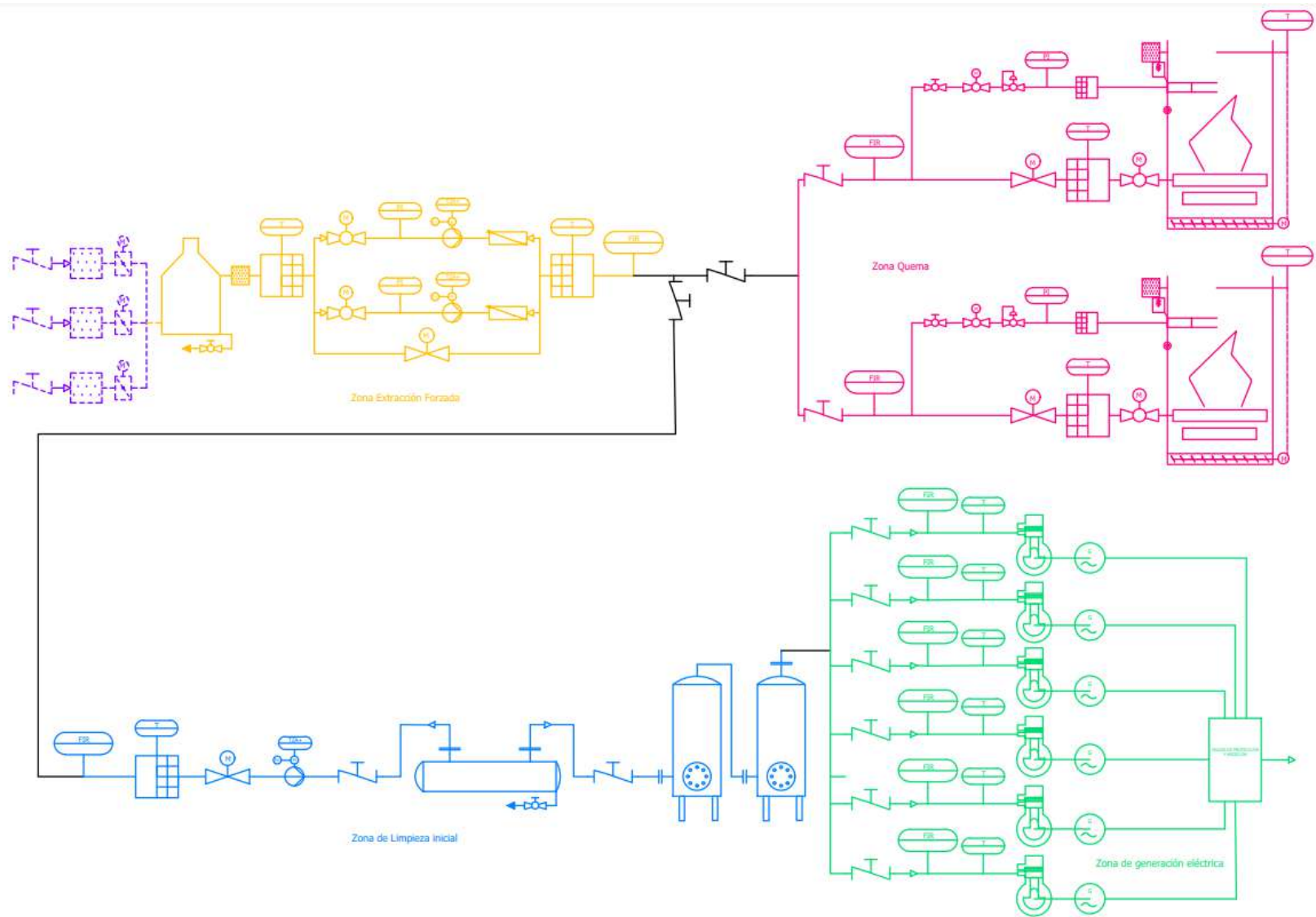


Ilustración 15. P&ID de la alternativa de producción de energía eléctrica para R4.

5.5.4. Sistema de Tratamiento R4: Producción de biometano

0.1.1.1. Depuración del biogás – Upgrading

Este tratamiento es requerido para lograr los estándares de calidad únicamente para la producción de biometano. Relacionado a lo anterior, es importante garantizar ciertos parámetros en la composición fisicoquímica del biogás a la salida del sistema de purificación primaria para que su ingreso a los equipos de la fase de depuración, puedan operar con las eficiencias y el resultado de tratamiento esperado para el biometano.

Los parámetros que debe cumplir el biogás para su ingreso a los equipos de depuración corresponden a los presentados en el Cuadro 126.

*Cuadro 126. Parámetros del biogás requeridos en el ingreso a los equipos de depuración para producción de biometano
Fuente (Arol Energy – 2019)*

PARAMETRE	UNITE	VALEUR
Débit maximum de <u>biogaz brut</u> <u>entrée unité</u>	Nm ³ /h
Débit maximum de <u>biogaz brut</u> <u>entrée membrane</u>	Nm ³ /h
Température biogaz entrée purification	°C
Pression relative du biogaz	mbars	3 à 5
Humidité relative	%	100 (saturé à la température de 30°C ou inférieure)
CH ₄	%	55 % sur <u>gaz sec</u>
CO ₂	%	Environ 44 % sur <u>gaz sec</u>
O ₂	%	< 0.3% sur <u>gaz sec</u> (en entrée des membranes)
N ₂	%	< 0.5% sur <u>gaz sec</u> (en entrée des membranes)
H ₂ S	ppm	Environ 100ppm
COV	mg/Nm ³	Non défini. Hypothèse 15 mg/Nm ³
Siloxanes	mg/Nm ³	0
Composés halogénés	mg/Nm ³	0
NH ₃	mg/Nm ³	0
CO	% volumique	< 1
H ₂	% volumique	< 6
Mercaptans	mg/Nm ³	< 50
Hg	µg/Nm ³	< 1
COS	mg/Nm ³	< 3

Al garantizarse la composición y condiciones físicas presentadas anteriormente para el biogás, se puede avalar que la tecnología de purificación actúe sobre el biogás llevándolo al cumplimiento de los parámetros de calidad del biometano que se presentan a continuación.

Cuadro 127. Parámetros de calidad del biometano Fuente: (Arol Energy -2019)

Pouvoir Calorifique Supérieur (conditions de combustion 0°C & 1,01325 bar)	Gaz de type H : 10,7 à 12,8 kWh/Nm ³
Indice de Wobbe (conditions de combustion 0°C & 1,01325 bar)	Gaz de type H : 13,64 à 15,7 kWh/Nm ³
Densité	Comprise entre 0,555 et 0,70
Point de rosée eau	Inférieure à -5°C à la Pression Maximale de Service du réseau en aval du Raccordement
Teneur en soufre de H ₂ S + COS	Inférieure à 5 mgS/ Nm ³
Teneur en CO ₂	Inférieure à 3,5 %
Teneur en O ₂	Inférieure à 0,7 % mol
Teneur en soufre total	Inférieure à 30 mg/Nm ³
Teneur en soufre mercaptique	Inférieure à 6 mg/Nm ³
Point de rosée hydrocarbures	Inférieur à -2°C de 1 à 70 bar (a)
Teneur en Hg	Inférieure à 1 µg/Nm ³
Teneur en Cl	Inférieure à 1 mg/Nm ³
Teneur en F	Inférieure à 10 mg/Nm ³
Teneur en H ₂	Inférieure à 6%
Teneur en CO	Inférieure à 2 %
Teneur en NH ₃	Inférieure à 3 mg/Nm ³
Impuretés et poussières	Gaz pouvant être transporté, stocké et commercialisé sans subir de traitement supplémentaire à l'entrée du réseau
Température biométhane	Inférieure ou égale à 35°C et supérieure à 5°C

Al igual que la propuesta anterior para producción de biometano, el sistema de tratamiento se conforma por el filtro de membrana en función de la producción de biometano relacionado al flujo total que se logra captar y transportar hasta este sistema. A continuación, se presenta la configuración sugerida

Cuadro 128. Configuración de filtro de membrana para R4

Referencia	Membrana PRISM®
Flujo de diseño	2400 m ³ /h
Calidad de biometano	≥ 97 vol.% CH ₄
Numero de membranas modulares	130

Como se puede observar en la tabla anterior, la calidad del biometano se mantiene y varía el número de filtros requeridos para tratar un volumen mayor que llega a este sistema.

En cuanto al compresor para garantizar la presión de trabajo de las membranas, se ha incorporado en el sistema de limpieza inicial como parte de dicha propuesta.

Se proponen la producción de biometano a partir del biogás tratado en una planta de depuración instalada en R4 que al igual que R3 representan los rellenos más grandes del país y que debido a su ubicación geográfica dentro de la GAMT permite proponer alternativas de solución a la movilidad dentro de la ciudad.

0.1.2. Sistema de Valoración R4: Producción de biometano

0.1.2.1. Descripción de las condiciones de valorización del biometano

Le producción de biometano a partir del año 2025 en R4 se presenta en el siguiente cuadro:

Cuadro 129. Producción anual de biometano para R4

Año	Generación	% Captura (%80)	Capacidad de producción de biometano
	m³/hora	m³/hora	m³/hora
2025	5416,3	4333,0	2222,8
2026	5478,4	4382,7	2248,3
2027	5536,0	4428,8	2272,0
2028	5589,5	4471,6	2293,9
2029	5639,2	4511,3	2314,3
2030	5685,5	4548,4	2333,3
2031	5728,6	4582,9	2351,0
2032	4931,1	3944,8	2023,7
2033	4258,3	3406,7	1747,6
2034	3689,9	2951,9	1514,3
2035	3208,7	2566,9	1316,8
2036	2800,5	2240,4	1149,3
2037	2453,4	1962,7	1006,9
2038	2157,7	1726,1	885,5
2039	1904,9	1523,9	781,8

Cuadro 130. Características del biogás producido después de depuración en R4

Características del biogás a la salida de la unidad de depuración	Especificaciones	Unidades
Presión	7,6	barg
Temperatura	15	°C
Contenido de CH ₄	95,4	%
Contenido de CO ₂	0	%
contenido de N ₂	4	%
contenido de O ₂	0,6	%
Contenido de H ₂ S	<7	mg/Nm³
Contenido de impurezas + O ₂	4,6	%
Poder calorífico superior (PCS)	>35,3	MJ/Nm³
Índice de Wobbe	>46,6	MJ/Nm³

La composición y las características fisicoquímicas son iguales que las esperadas para R3. Por tanto, este tipo de gas podrá tener los mismos usos planteados en dicha propuesta relacionando las mismas consideraciones señaladas.

En la siguiente ilustración se señala los sistemas asociados a la producción de biometano. Los equipos e instalaciones para el uso del biometano como GNC y GNL deberán ser detalladas en etapas posteriores al estudio.



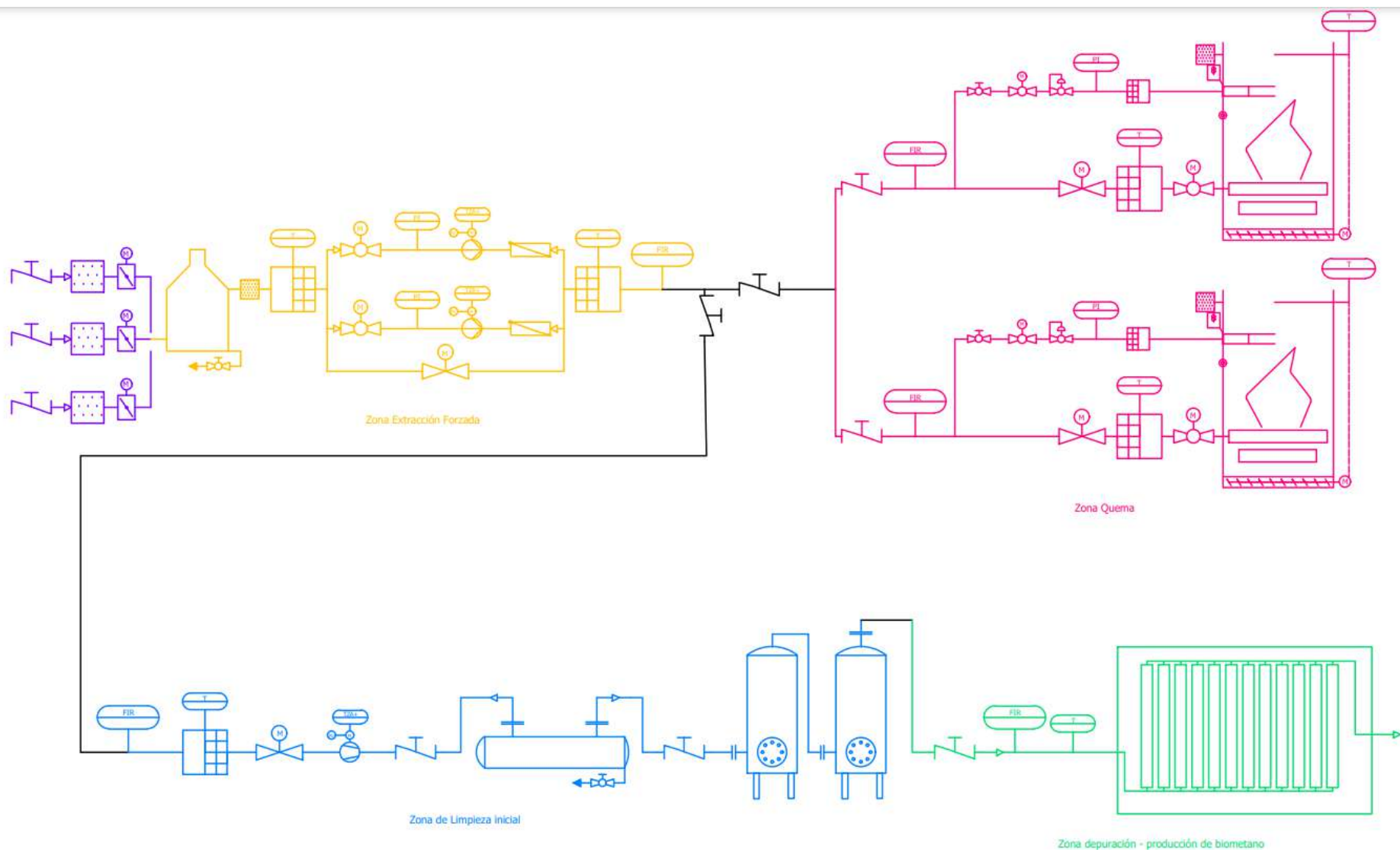


Ilustración 16. P&ID de la alternativa de producción de biometano para R4.

0.1.2.2. **Valorización del biometano en forma de GNC**

Considerando la misma relación establecida para el abastecimiento completo en GNC de un camión o autobús es de unos 150 kg para una autonomía de 600 km. Las estimaciones de producción de GNC y equivalente en flota para cada uno de los sitios es la siguiente:

Se estima una producción de 782 – 2351 Nm³/h (que en flujo masico corresponde a 618 – 1857 kg/h). En consecuencia, la producción de 618 kg/h corresponde a la capacidad diaria de 99 camiones o a una estación de autobuses de 164 autobuses, es decir, una estación media de la RATP (Agencia de Transportes de París). Una producción de 1857 kg/h es equivalente a la capacidad diaria de 296 camiones o a una estación de autobuses de 494 autobuses (es decir, la mayor estación de autobuses de la RATP en París).

Por lo tanto, desde la consultoría no se recomienda la movilidad por carretera con la producción de biometano de R4. Esta producción es demasiado grande y el parque de vehículos necesario es muy importante.

0.1.2.3. **Valorización del biometano en forma de GNL**

Teniendo en cuenta la relación usada para la definición de la propuesta respecto al llenado de un tanque de GNL correspondiente a 45 m³ y el llenado de un barco propulsado por GNL corresponde a 700 m³. Las estimaciones de producción de GNL y equivalente en flota/barcos es la siguiente:

Se estima una producción de 782 – 2351 Nm³/h (que en flujo volumétrico de GNL corresponde a 1,19 – 3,59 m³/h). En consecuencia, la producción de R4 permitiría repostar un barco en 8 a 24 días, dependiendo del ritmo de producción. O esta producción permitiría llenar el tanque de un camión que transporte GNL en 13 – 38 horas para su entrega a los consumidores.

La producción de biometano R4 puede ser licuada al igual que en R3, para producir bioGNL y poder abastecer a los consumidores, mediante transporte en camión:

- Barcos del Puerto de Puerto Limon
- Industrias con necesidades de gas natural o hidrógeno:
 - o Producción de metanol
 - o Producción de amoníaco o fertilizantes nitrogenados.
 - o Otros fabricantes
- Estación de servicio de GNC y GNL alimentada por GNL (en lugar de GNC)

El transporte de GNL se puede subcontratar a un proveedor de servicios equipado con un tanque criogénico (capacidad del tanque de 20 – 55 m³, estándar de 45 m³).



Imagen 33. Instalación de licuefacción de Cryo Pur en la planta de Valenton, Francia



Imagen 34. Estación de servicio de GNL y GNC en Sorigny, Francia

La solución propuesta para R4 son equipos de licuefacción que producirán GNL, el cual posteriormente se puede cargar en los tanques de los camiones para su transporte y entrega a los clientes: industriales (que consumen gas o hidrógeno) o portuarios.

Una instalación de licuefacción de 60 m³/día (2.5 m³ GNL/h) , produciría GNL a -160°C con llenado directo de tanques de camiones. Por tanto, es necesario disponer de 2 equipos principales:

- Unidad de licuefacción
- Muelle de carga de camiones

La superficie ocupada por la instalación completa representa aproximadamente 1 000 m².

Los costos de inversión de una instalación semejante ascienden a 11 M USD (10,1 M €) e incluyen:

Cuadro 131. CAPEX sistema de valoración para producción de GNL en R4

Ítems	Unidad	Precio Total (USD)	Precio Total (€)
Unidad de licuefacción de GNL con de depuración propia	UN	\$ 8 200 070	7.523.000 €
Instalación capacitación + Puesta en marcha	GLB	\$ 586 420	538.000 €
Traslado de unidad a camiones	GLB	\$ 352 070	323.000 €

Construcción de sitios: VRD & GC + Conexiones de red	GLB	\$ 703 050	645.000 €
Intercomunicador / Gestión de abonados / Sistema de pago	GLB	\$ 35 970	33.000 €
Línea eléctrica / Incendios	GLB	\$ 117 720	108 000 €
Obras Complementarias	GLB	\$ 463 000	463.000 €
AMO y MOE estudio reglamentario y de seguridad (5% CAPEX)	GLB	\$ 506 670	463.000 €

Los cargos aplicables a la instalación son los siguientes:

- Consumo eléctrico: 1,05 kWh/kg_{GNL}

Cuadro 132. OPEX sistema de valoración para producción de GNL en R4

Ítems	Unidad	Precio Unitario (USD)	Precio Unitario (€)
Recambios que garantizan la disponibilidad de la instalación	Año sin IVA	\$ 252 880	232 000 €
Costo anual de mantenimiento en Francia	Año sin IVA	\$ 305.200	280 000 €
Coste anual de mano de obra en la instalación: 1 ETP	Año	\$ 45.000	42 012 €

El OPEX presentado no considera costos de seguros requeridos en la operación de la instalación, por lo que deberán incluirse en etapas posteriores.

La solución GNL presentará la principal dificultad de encontrar clientes. Aproximadamente un tercio de los nuevos buques en 2023 tienen motores híbridos GNL/diésel. Como resultado, cada vez más barcos surcarán los mares con combustible GNL. Los principales constructores de barcos como CMA o CMG están cambiando oficialmente sus barcos al GNL. Estos barcos estarán especialmente interesados en recargar con combustibles renovables, como el BioGNL procedente de rellenos sanitarios.

0.2. Propuesta para V1

0.2.1. Sistema de Conducción V1

La captación y conducción de biogás del vertedero se relaciona a la topografía y la conformación de los volúmenes depositados. La característica topográfica principal del vertedero V1 corresponde a que las capas de residuos se encuentran en cotas superiores a las del terreno circundante, lo que limita la generación natural del aislamiento térmico respecto a la temperatura del entorno.

Cuando dicho aislamiento se genera es posible favorecer la producción de biogás y su recuperación, pero bajo las condiciones mencionadas, el vertedero se encuentra más expuesto a las temperaturas del entorno disminuyendo la producción de biogás y, por ende, se requerirán un mayor número de pozos para la captación y el flujo esperado de recuperación será menor. (Martin, 1997)



Imagen 35. Condiciones de conformación del vertedero V1

La topografía relacionada para determinar el trazado de la red de conducción fue suministrada por el operador para contribuir información que permita el adecuado planteamiento de las actividades y obras que estarán desarrollando en la próxima etapa de cierre del vertedero.

La conformación de los volúmenes depositados permitirá orientar las acciones futuras de cierre y las características de los pozos de captación en cuanto a la cantidad, material y longitud. A continuación, se presenta el levantamiento topográfico con el que se establece la propuesta.

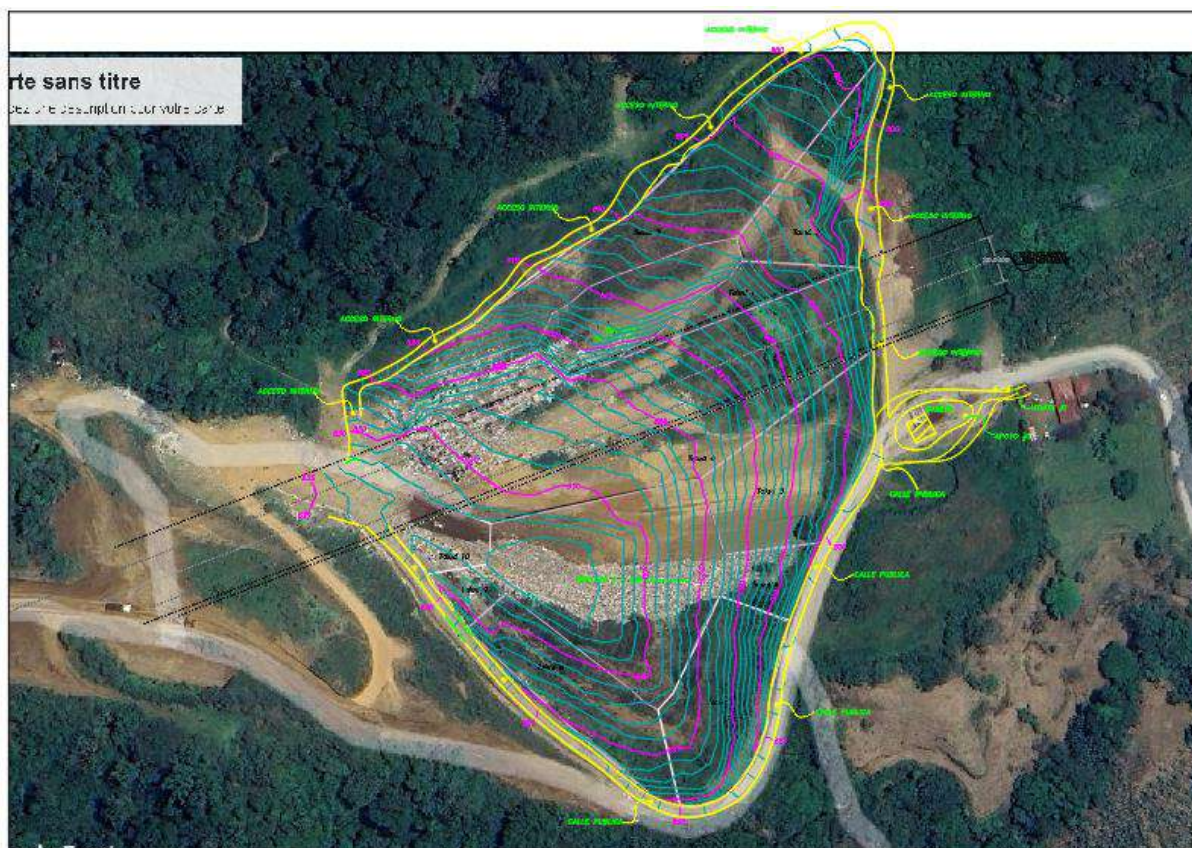


Imagen 36. Levantamiento topográfico del V1

Según el levantamiento topográfico, el operador del relleno ha establecido una distribución y diseño de pozos para la captación de biogás teniendo en cuenta los cortes transversales y longitudinales en función de la disposición que se hará hasta el cierre. Es decir que el levantamiento se realiza sobre los volúmenes de residuos depositados hasta la fecha (noviembre 2022) con el fin de hacer la adecuación de los taludes.

Partiendo de la información proporcionada por el operador, se hará las recomendaciones pertinentes para lograr que el sistema de captura sea óptimo, reduzca las emisiones difusas de biogás y pueda conducir el flujo para su quema controlada.

0.2.1.1. **Pozos de captación**

Para la definición de estas estructuras se evaluó en los diseños preliminares el área que logran cubrir para la extracción de biogás, asignando en cada pozo aferencias de 13 m de radio con lo que se logra una cobertura del 37 % del área en planta.

El área cubierta es baja según los diseños elaborados por el operador para su desgasificación y con llevaría a no lograrse este proceso de forma homogénea imposibilitando la captura del total de la producción de biogás estimada en este estudio.

Adicionalmente este diseño presenta una configuración de los pozos que se orientaría a un venteo pasivo, lo que no cumpliría con el objetivo de establecer una medida de gestión

ambiental frente a los impactos que se producirían si se continua con esas medidas para el biogás.

Por lo anterior se estudiaron dos posibilidades de mejoramiento de los diseños que se señalan a continuación:

Propuesta 1	Propuesta 2
Incrementar el número de chimeneas para conducción por ventilación sin equipo de extracción.	Modificación al diseño de pozos con conducción forzada (activa) y recomendaciones de capa final.

Las dos propuestas se conforman buscando que en el vertedero se produzca

- ✓ Concentración del biogás para su conducción al punto de tratamiento
- ✓ Reducción y/o eliminación de las emisiones difusas

Propuesta 1: El objetivo es incrementar el área cubierta al aumentar el número de pozos lo que representara la reducción de las emisiones difusas de las zonas que con la propuesta del operador no se lograrían capturar. Dicha configuración se presenta a continuación:



Imagen 37. Propuesta 1 para el sistema de captura en V1

El incremento de los pozos resultara en una cobertura del 82% para la captura del biogás.

Como se puede observar en la Imagen 37 no se proponen pozos en la zona delimitada como servidumbre, ya que este espacio se destina para la instalación de redes eléctricas lo cual no permite interferir o instalar estructuras.

Propuesta 2: Se busca con esta propuesta reducir los costos asociados a las perforaciones manteniendo los pozos contemplados por el operador, estableciendo las

recomendaciones a la configuración de estos y de las obras complementarias requeridas para que la captura de biogás no genere ingresos de aire al sistema al igual que se propicie la reducción de las emisiones de biogás.

0.2.1.2. Sistema de conducción

0.2.1.3. Propuesta 1

El trazado de este sistema busca que actúe al igual que los sistemas de ventilación de los sistemas de sanitarios, donde la conducción de los gases se realiza aprovechando las pendientes de las tuberías que, por las propiedades del gas, se moviliza y acumula en las partes más altas de los sistemas para luego conectarse a los respectivos sistemas de ventilación.

Según lo anterior, el trazado del sistema de conducción se relaciona directamente con la topografía buscando que cada tramo de la red cuente con pendientes positivas en dirección a al flujo y así el biogás se movilice hasta la zona más alta del vertedero donde se ubicara el sistema de quema como se puede observar en la Imagen 38.

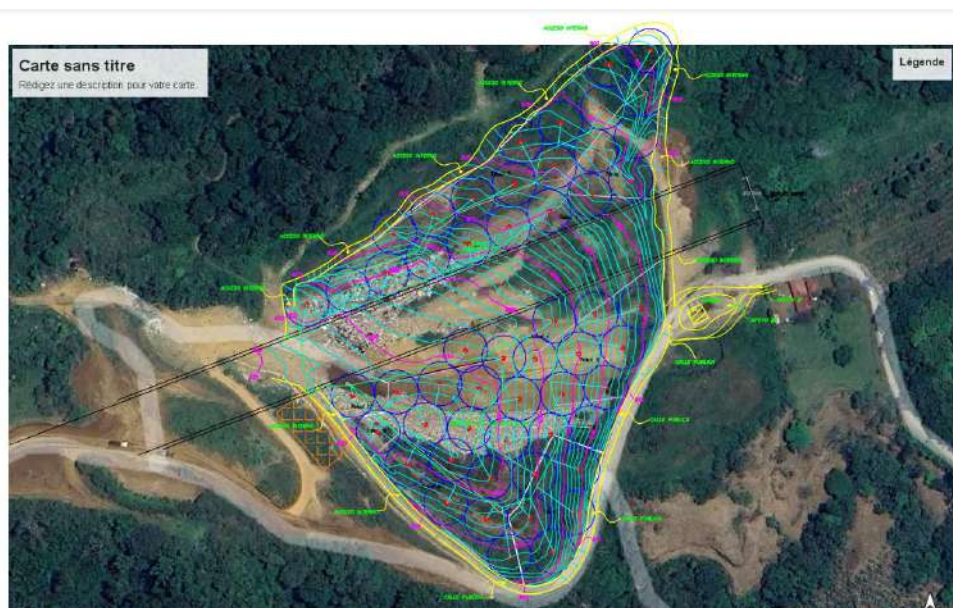




Imagen 38. Configuración del sistema de conducción de la propuesta 1 para V1

La configuración en espiga establecida permite la conducción y acumulación del biogás con mayor eficiencia y menos requerimientos de tubería.

0.2.1.4. **Propuesta 2**

El trazado busca ser lo menos invasivo como se observa en la Imagen 39 que, a diferencia de las redes establecidas para los rellenos, la conexión de los pozos se hará directamente a la línea principal ya que el número de estas estructuras es bajo y podrán regularse independientemente.



Imagen 39. Configuración del sistema de conducción de la propuesta 2 en V1.

Una vez establecidas las características del sistema de captura y conducción de las dos propuestas, se evaluó el valor del presupuesto requerido para cada una de ellas.

El anterior parámetro junto a la eficiencia resultante de captura que se tendría con cada opción permitió seleccionar la opción 1 debido que la diferencia de inversión entre las dos opciones en baja por lo que se recomienda dicha propuesta que adicionalmente, tendrá un porcentaje de área cubierta mayor reduciendo las emisiones de V1 y la reducción del riesgo de inestabilidad al tenerse un sistema de captación más homogéneo.

A continuación, se asocia el CAPEX de la propuesta 1 de conducción donde se podrá apreciar los diferentes componentes establecidos desde el trazado de la propuesta.

Cuadro 133. CAPEX del sistema de conducción para V1.

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (USD)	Precio Total (USD)
Sistema de conducción de biogás				\$ 101.609,90
Tubería DN160	m	819	\$ 21,00	\$ 17.200,05
Tubería DN90	m	1249	\$ 6,00	\$ 7.491,84
Válvula mariposa alma INOX DN 160	UN	5	\$ 151,00	\$ 755,00
Válvula mariposa alma INOX DN 80	UN	54	\$ 51,00	\$ 2.754,00
Porta bridas DN 160	UN	137	\$ 7,00	\$ 955,56
Reducción DN160-90	UN	54	\$ 78,84	\$ 4.257,36
Manguera flexible	m	54	\$ 19,00	\$ 1.026,00
Abrazaderas inox	UN	54	\$ 17,00	\$ 918,00
Cabezales de pozo	GLB	54	\$ 430,00	\$ 23.220,00
Tanque de desagüe	GLB	4	\$ 3.728,00	\$ 14.912,00
Puntos de muestreo	GLB	25	\$ 15,00	\$ 375,00
Anclajes	UN	55	\$ 57,00	\$ 3.112,39
Pozos perforados	m	378	\$ 366,00	\$ 14.640,00
Mano de Obra	GLB	1	\$ 24.632,70	\$ 24.632,70

0.2.2. Sistema de Extracción y Quema

En el segundo escenario se contempla a V1 que por los altos costos que involucraría la implementación de un sistema de valorización frente a la producción de biogás aprovechable, hace más interesante proponer un sistema de quema que actúe como medida ambiental para la destrucción térmica del biogás antes de su emisión a la atmosfera.

Por lo anterior, se plantea una chimenea con las siguientes características relacionadas al flujo esperado del sistema de captación propuesto

50 msnm
200 m ³ /h

4 – 100 mbarg	
Antorchas	
Número de unidades	1
Capacidad	500 m ³ /h

Si bien la propuesta contempla que la producción de biogás se movilice por la red de conducción al igual que un sistema de conducción, la antorcha requiere una presión de operación y cierto flujo para que pueda operar y asegurar la destrucción del metano. Por lo que se plantea dentro del presupuesto una microturbina, que permita la extracción activa del biogás y cumpla con los parámetros requeridos de operación de la antorcha

Cuadro 134. CAPEX sistema de extracción forzada y quema para V1

Item	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Sistema de Extracción Forzada - Quema Controlada				\$369.125,19
Sistema de quema a alta temperatura	GLB	GLB	\$ 279.640,29	\$279.640,29
Sistema de ignición				
Tren de gas hacia antorchas				
Sistema de succión / estación del blower				
Sistema de alimentación y control				
Sistema de medición de la composición del gas				
Mano de obra			\$ 89.484,89	\$ 89.484,89

1.

ANÁLISIS FINANCIERO

Se desarrolló un modelo financiero para cada uno de los proyectos de generación eléctrica en los rellenos sanitarios. A continuación, se presenta un resumen de los proyectos.

Cuadro 135. Alcance de las propuestas de generación de energía eléctrica en la muestra de rellenos sanitarios.

	R1	R2	R3	R4
Alcance del proyecto	Sistema de captura forzada	Sistema de captura forzada		
	Sistema tratamiento para la quema controlada	Sistema tratamiento para la quema controlada		Sistema tratamiento para la quema Controlada
	Sistema de tratamiento para la generación eléctrica	Sistema de tratamiento para la generación eléctrica	Sistema de tratamiento para la generación eléctrica	Sistema de tratamiento para la generación eléctrica
	Generación eléctrica	Generación eléctrica		

			Generación eléctrica	Generación eléctrica
Porcentaje de recolección de biogás	55%	40%	80%	80%
Capacidad eléctrica instalada	2.2MW	250KW	1.6MW	6.0 MW

Partiendo de las propuestas descritas, el análisis financiero se realizó relacionando los siguientes componentes:

- ✓ Resumen de los CAPEX, OPEX e INGRESOS del proyecto
- ✓ Análisis de rentabilidad de los escenarios
- ✓ Análisis de sensibilidad con 3 opciones: Valor fijo de la tarifa eléctrica, valor fijo de la TIR, valor variable de la tarifa eléctrica y valor de subvención variable para las propuestas que no logran la viabilidad financiera.

Como se puede observar según la tabla anterior se alinearán los modelos financieros a las propuestas de generación eléctrica de cada sitio disposición ya que, dentro del análisis técnico de las demás valorizaciones, se encontraron dificultades para su desarrollo de carácter operativo, de implementación, construcción, conexión y complejidad de la tecnología según lo descrito en dicho análisis de propuestas. Por otro lado, se encontró que es la valorización con condiciones favorecedoras para obtener ingresos como lo es la venta de energía eléctrica y transacción de bonos/certificados de carbono.

A continuación, se presentarán los resultados, datos e información vinculada en los componentes mencionados para todos los rellenos sanitarios, haciendo la descripción de consideraciones y detalles de relevancia que orientaron la modelación financiera.

1.1. CAPEX, OPEX e ingresos de las propuestas de valoración de energía eléctrica

1.1.1.1. CAPEX de las propuestas de valoración energética

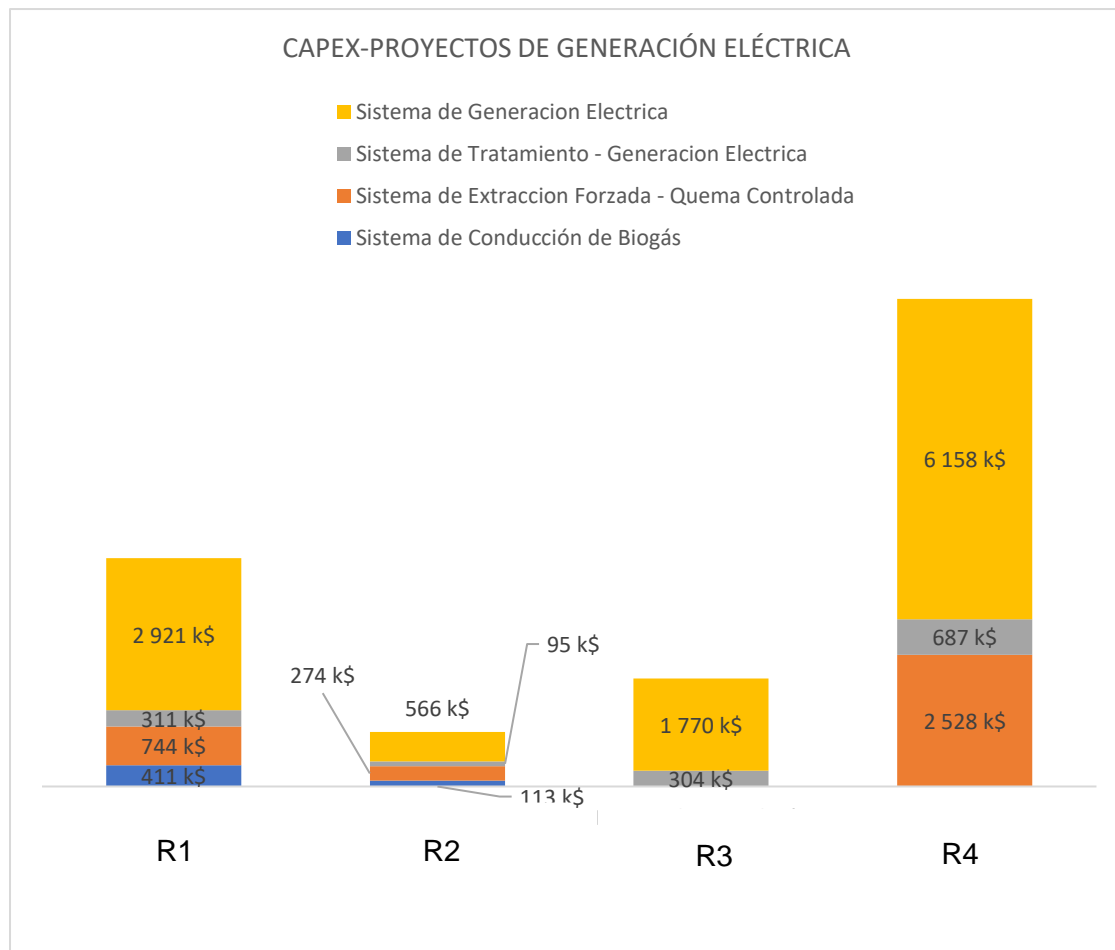
- ✓ Para todos los elementos financieros (CAPEX y OPEX), no se ha tenido en cuenta el impuesto IVA para los productos ni el equivalente para los equipos franceses exportados (la TVA Impuesto sobre el valor agregado Frances) o costos agregados por aranceles de exportación y transporte.
- ✓ Los valores relacionados en CAPEX y OPEX son detallados por medio de cotizaciones adjuntas en el Anexo 7, y presupuestos desarrollados por la consultoría en proyectos similares (Base de Datos S3d Ingeniería)
- ✓ Se anota que la tasa de cambio aplicada en el estudio corresponde a: 1 EURO = 1,075 US\$
- ✓ Cabe señalar que el “.” en las cifras compartidas corresponde a la división de miles

La inversión de los 4 escenarios se presenta en el siguiente diagrama. Según lo explicado anteriormente, la tasa de cambio utilizada es de 1 EURO = 1, 075 \$, y los equipos considerados provienen mayoritariamente de empresas europeas. Es importante señalar que, en el modelo financiero no se contempló la inclusión de valores de reinversión en obras ni

equipos dado que la estructura de los costos de operación y mantenimientos planteados permite mantener el funcionamiento de los equipos hasta el final del periodo de estudio.

Cuadro 136. Resumen de los CAPEX por relleno sanitario, donde se detalla el alcance (conducción, quema forzada, tratamiento y generación eléctrica)

	R1	R2	R3	R4
Sistema de Conducción de Biogás	411 k\$	113 k\$		
Sistema de extracción Forzada - Quema Controlada	744 k\$	274 k\$		2.528 k\$
Sistema de Tratamiento - generación eléctrica	311 k\$	95 k\$	304 k\$	687 k\$
Sistema de generación eléctrica	2.921 k\$	566 k\$	1.770 k\$	6.158 k\$
Total	4.387 k\$	1.049 k\$	2.075 k\$	9.373 k\$



Gráfica 48. Representación comparativa de los costos de inversión de las propuestas por relleno sanitario

1.1.1.2. OPEX de las propuestas de valoración energética

Los gastos operativos para las propuestas en los rellenos sanitarios han sido agrupados por sistemas:

- ✓ Sistema de captura activa y quema controlada
- ✓ Sistema de tratamiento y valoración

Los gastos operativos para la unidad de captura activa y quema controlada comprende los repuestos para el sistema de extracción forzada y quema del biogás, consumo energético de los blowers y calibración de los analizadores para la certificación de los certificados de bonos de carbono. En el caso del **sistema del relleno sanitario R3, no se consideró sistema captura y quema porque actualmente el sistema existe y los costos operativos están incluidos en la disposición de los residuos.**

R1	60.648 \$/año
R2	15.133 \$/año
R3	N/A
R4	157.317 \$/año

Por otro lado, los costos de operación OPEX de la planta de unidad de generación (incluyendo el sistema de tratamiento) son presentados en la siguiente tabla.

Cuadro 137. Resumen de los costos de operación asociados a cada una de las instalaciones de generación

RELLENO SANITARIO	OPEX				
	Generador			Personal de planta \$/año	Otros (equipos electromecánicos, carbón activado) \$/año
	Repuestos \$/kWh	Consumibles \$/kWh	Mano de obra \$/kWh		
R1	0,01750	0,00625	0,00625	84627	119650
R2	0,01750	0,00625	0,00625	84627	33500
R3	0,01750	0,00625	0,00625	84627	105700
R4	0,01750	0,00625	0,00625	84627	242100

1.1.1.3. Venta de Electricidad

La definición de una tarifa para vincular en los modelos financieros se realizó inicialmente desde la revisión de las condiciones actuales de venta y compra de energía en Costa Rica por medio de estudio de la regulación, gobernanza y entrevistas con empresas prestadoras del servicio como se podrá detallar en su respectivo apartado del análisis legal.

Producto del estudio se concluyó que **actualmente no se cuenta con una metodología para determinar una tarifa de venta de energía producida a partir de biogás de rellenos sanitarios** por lo que, la definición de un valor de tarifa de venta se relacionó con la experiencia nacional de generación de energía a partir del bagazo de caña donde el valor se sitúa en \$95.82/MWh. Dicho valor será el tomado como referencia para ingresar en los

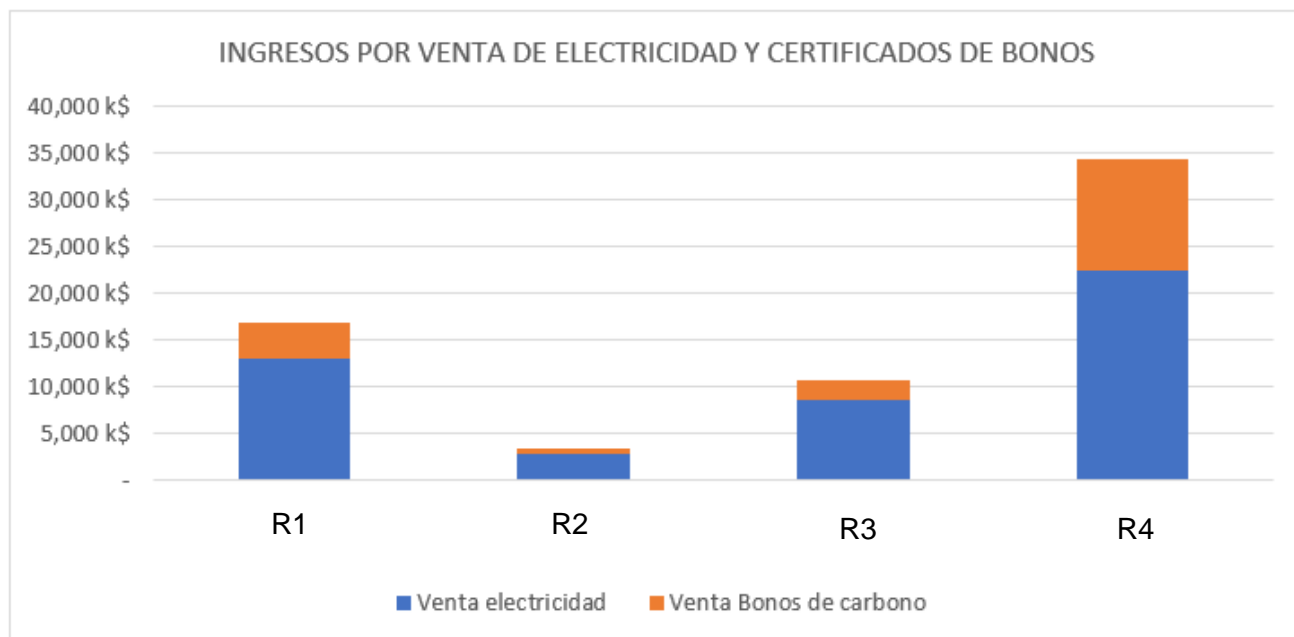
modelos financieros y posteriormente se modificará en el análisis de sensibilidad para evaluar la rentabilidad con incrementos en dicha tarifa.

1.1.1.4. Venta de Certificados de carbono

El valor con el que vincula este ingreso a los modelos corresponde a \$ 3 USD/MTCO₂e. A continuación, se presenta los resultados de los ingresos calculados para cada relleno sanitario

Cuadro 138. Resumen de los ingresos anuales en los proyectos de generación de energía eléctrica en los rellenos sanitarios

Año	R1		R2		R3		R4	
	Venta electricidad	Venta Bonos de carbono	Venta electricidad	Venta Bonos de carbono	Venta electricidad	Venta Bonos de carbono	Venta electricidad	Venta Bonos de carbono
2025	939 k\$	290 k\$	184 k\$	34 k\$	775 k\$	183 k\$	1.843 k\$	990 k\$
2026	945 k\$	291 k\$	190 k\$	35 k\$	775 k\$	183 k\$	1.843 k\$	1.002 k\$
2027	952 k\$	293 k\$	190 k\$	35 k\$	775 k\$	183 k\$	1.843 k\$	1.012 k\$
2028	960 k\$	296 k\$	190 k\$	35 k\$	775 k\$	183 k\$	1.843 k\$	1.022 k\$
2029	968 k\$	298 k\$	190 k\$	35 k\$	775 k\$	183 k\$	1.843 k\$	1.031 k\$
2030	976 k\$	301 k\$	190 k\$	35 k\$	775 k\$	183 k\$	1.843 k\$	1.039 k\$
2031	984 k\$	303 k\$	190 k\$	35 k\$	727 k\$	171 k\$	1.843 k\$	1.047 k\$
2032	992 k\$	306 k\$	190 k\$	35 k\$	626 k\$	147 k\$	1.843 k\$	901 k\$
2033	999 k\$	308 k\$	190 k\$	35 k\$	540 k\$	127 k\$	1.610 k\$	778 k\$
2034	1.006 k\$	310 k\$	190 k\$	35 k\$	468 k\$	110 k\$	1.395 k\$	675 k\$
2035	1.013 k\$	312 k\$	190 k\$	35 k\$	407 k\$	96 k\$	1.213 k\$	587 k\$
2036	756 k\$	233 k\$	190 k\$	35 k\$	355 k\$	84 k\$	1.059 k\$	512 k\$
2037	578 k\$	178 k\$	190 k\$	35 k\$	311 k\$	73 k\$	927 k\$	449 k\$
2038	455 k\$	140 k\$	190 k\$	35 k\$	273 k\$	64 k\$	816 k\$	394 k\$
2039	367 k\$	113 k\$	190 k\$	35 k\$	241 k\$	57 k\$	720 k\$	348 k\$
Ingresos totales	12.890 k\$	3.974 k\$	2.841 k\$	528 k\$	8.599 k\$	2.025 k\$	22.481 k\$	11.787 k\$



Gráfica 49. Resumen de los ingresos totales, durante los 15 años del modelo financiero, por relleno sanitario.

1.2. Análisis global de la rentabilidad

Los principales indicadores financieros para evaluar la rentabilidad económica de los proyectos generación eléctrica se detallarán en los siguientes escenarios plantados que se según la metodología de construcción de la modelo descrita en el apartado de metodología, se calcula y presenta la TIR, VPN y Tiempo de retorno de la inversión TR.

Los escenarios planteados para evaluación de viabilidad financiera corresponden a:

- ✓ Escenario 1: Evaluación de ingreso por venta de energía eléctrica a un valor fijo de 95.82 \$/MWh
- ✓ Escenario 2: Análisis con un valor fijo de tasa interna de retorno - TIR de 10.64%
- ✓ Escenario 3: Análisis de sensibilidad de indicadores financieros ante diferentes precios de venta de electricidad
- ✓ Escenario 4: Evaluación de la rentabilidad para R2 en función de diferentes porcentajes de subvención sobre el CAPEX

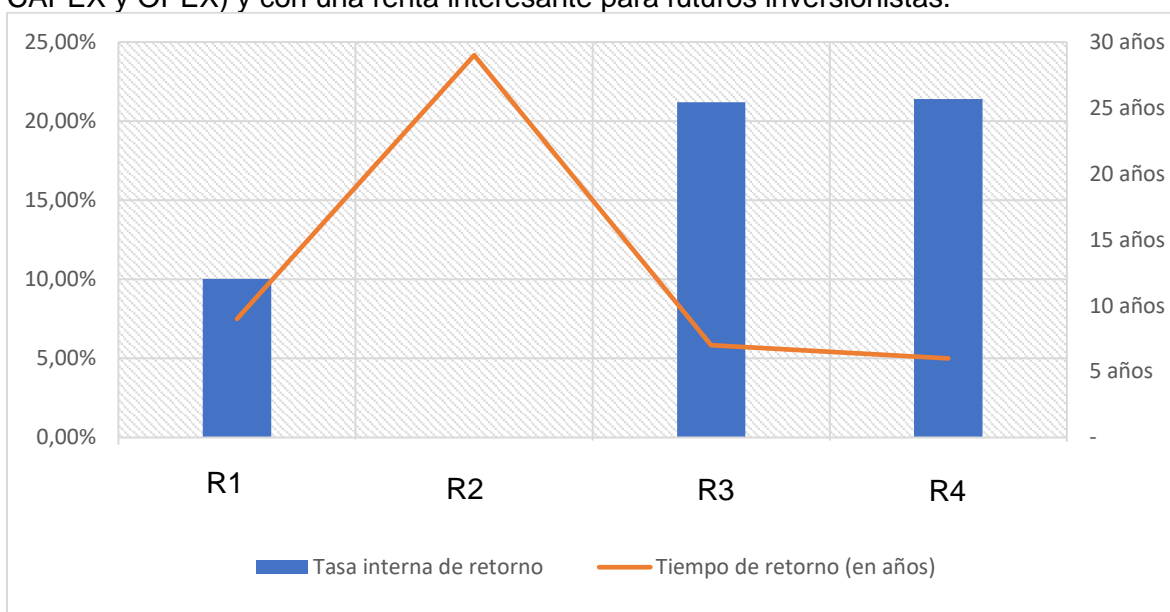
1.2.1. Precio de venta de energía eléctrica fijo

El primer escenario de análisis establece inicialmente un valor fijo de ingreso de tarifa de venta de energía eléctrica equivalente a 95.82 \$/MWh, el cual es ingresado a los modelos financieros de cada relleno sanitario para calcular los respectivos indicadores financieros presentados en el siguiente cuadro.

Cuadro 139. Análisis de rentabilidad de las propuestas de generación.

	R1	R2	R3	R4
Capacidad instalada	2,2MW	250kW	1,7 MW	6,0 MW
Precio de venta de electricidad	95,82 \$/MWh	95,82 \$/MWh	95,82 \$/MWh	95,82 \$/MWh
Valor presente neto	7.241 k\$	- 795 k\$	2.033 k\$	11.976 k\$
Tasa interna de retorno	10.02%		21,19%	21,4%
Tiempo de retorno (en años)	9 años	62 años	7 años	6 años

Los indicadores financieros de R1, R3 y R4 reflejan que con el valor fijo de venta energía eléctrica se logra tener una viabilidad financiera para dichas propuestas, debido a que se tiene un VPN positivo (calculada sobre el tiempo de operación de las propuestas traída a valor presente) con una tasa de retorno a su vez positiva (porcentaje de renta producida sobre el CAPEX y OPEX) y con una renta interesante para futuros inversionistas.



Gráfica 50. Análisis de la TIR y del tiempo de amortización según las propuestas de generación en los rellenos sanitario

De esta gráfica y el cuadro anterior, se puede observar que para R2 sostener el mismo valor de venta de energía no permite tener una rentabilidad por lo que, **bajo este planteamiento** no podrá ser financieramente viable la propuesta elaborada.

1.2.2. TIR Fijo

En este segundo escenario se define que la Tasa Interna de Retorno es fija y corresponderá al 10.64% para determinar la tarifa de energía eléctrica mínima y la rentabilidad de los proyectos. Al fijar este valor para la evaluación en este escenario, se garantiza no afectar los indicadores financieros de los rellenos que si presentaron viabilidad financiera con la tarifa fija y lograr determinar para R2 el valor mínimo de dicha tarifa de manera que se logre un modelo rentable para su propuesta.

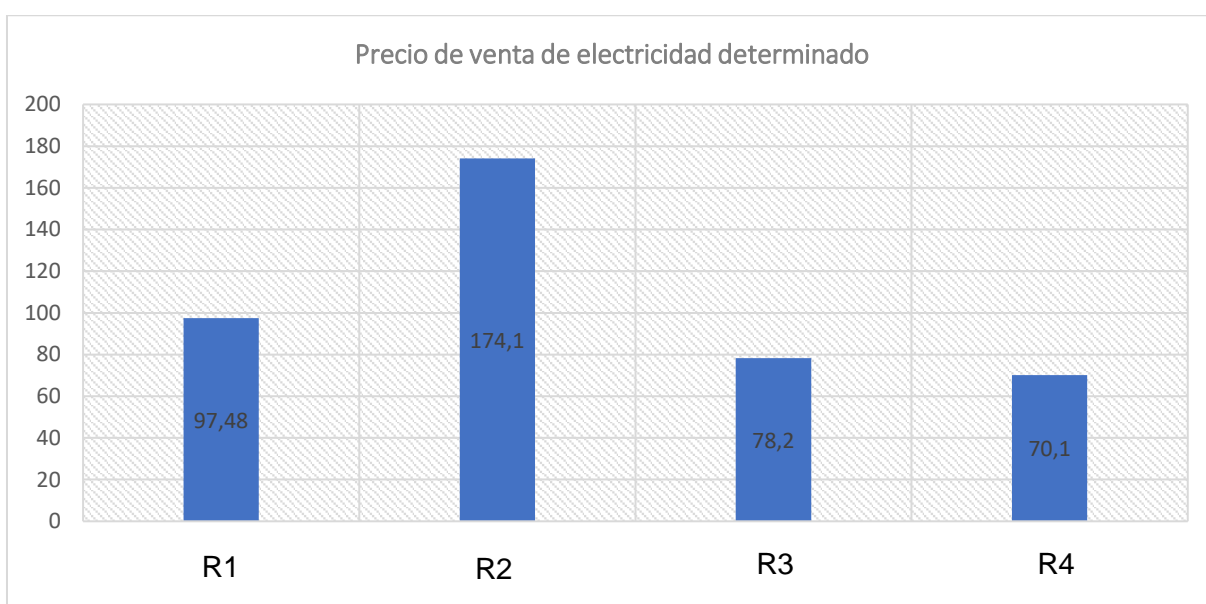
Cuadro 140. Evaluación del precio de electricidad para un TIR=WACC

	R1	R2	R3	R4
--	----	----	----	----

Precio de venta de electricidad determinado	97,48 \$/MWh	174,10 \$/MWh	78,20 \$/MWh	70,10 \$/MWh
---	--------------	---------------	--------------	--------------

Según el cuadro anterior, se encuentra que **R2 lograra tener una TIR positiva del 10.64% si se obtienen ingresos de venta electricidad por un valor de 174,10 \$/MWh**. Para R1 se puede apreciar que el valor aumento levemente debido a que la TIR fija de este escenario es superior a la TIR calculada por medio de fijar la tarifa de venta de electricidad que proporcionalmente es inferior a la encontrada en el Cuadro 140.

Se puede observar que para R3 y R4 se obtendría un precio de venta de energía inferior al encontrado en el escenario 1 ya que la TIR fijada del escenario 2 es inferior a la TIR con valor de tarifa de venta de energía fija.



Gráfica 51. Precio de electricidad determinado para WACC=TIR

Para evidenciar las diferencias entre las tarifas eléctricas, se presenta la Gráfica 51, donde R2 presentara el mayor valor entre los rellenos sanitarios.

1.2.3. **Análisis de sensibilidad sobre el precio de venta de la electricidad.**

En orden al objetivo del escenario 1, se plantea en este tercer escenario evaluar cómo se modifican los indicadores financieros en relación con diferentes valores para la tarifa de venta de electricidad. Esto se realiza con el fin de que se puede obtener una visión más amplia sobre la rentabilidad esperada para cada sitio con una tarifa variable y así, los actores relacionados puedan conocer las implicaciones de definir cierto valor de tarifa en cuanto a la viabilidad financiera de la propuesta.

Por lo anterior, se presenta para cada relleno sanitario el respectivo análisis de sensibilidad

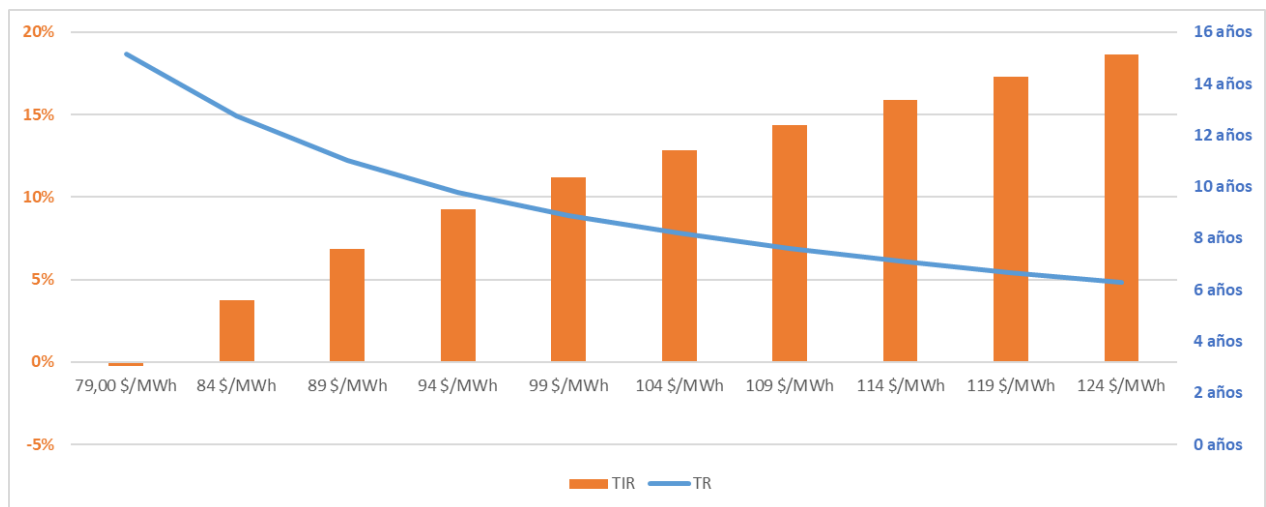
1.2.3.1. **Análisis de sensibilidad para R1**

Cuadro 141. Resumen de una simulación en R1, mostrando la evolución de los parámetros financieros según diferentes precios de energía eléctrica

Pv =	79,00 \$/MWh	84 \$/MWh	89 \$/MWh	94 \$/MWh	99 \$/MWh	104 \$/MWh	109 \$/MWh	114 \$/MWh	119 \$/MWh	124 \$/MWh
VAN	4.388 k\$	5.236 k\$	6.084 k\$	6.932 k\$	7.780 k\$	8.628 k\$	9.476 k\$	10.324 k\$	11.172 k\$	12.020 k\$
DSCR	71%	84%	97%	110%	120%	131%	141%	150%	160%	170%
TIR	0%	4%	7%	9%	11%	13%	14%	16%	17%	19%
TR	15 años	13 años	11 años	10 años	9 años	8 años	8 años	7 años	7 años	6 años

PV: Precio de venta de energía eléctrica

VAN: Equivalente al VPN



Gráfica 52. Análisis de la TIR y del tiempo de amortización para diferentes precios de electricidad

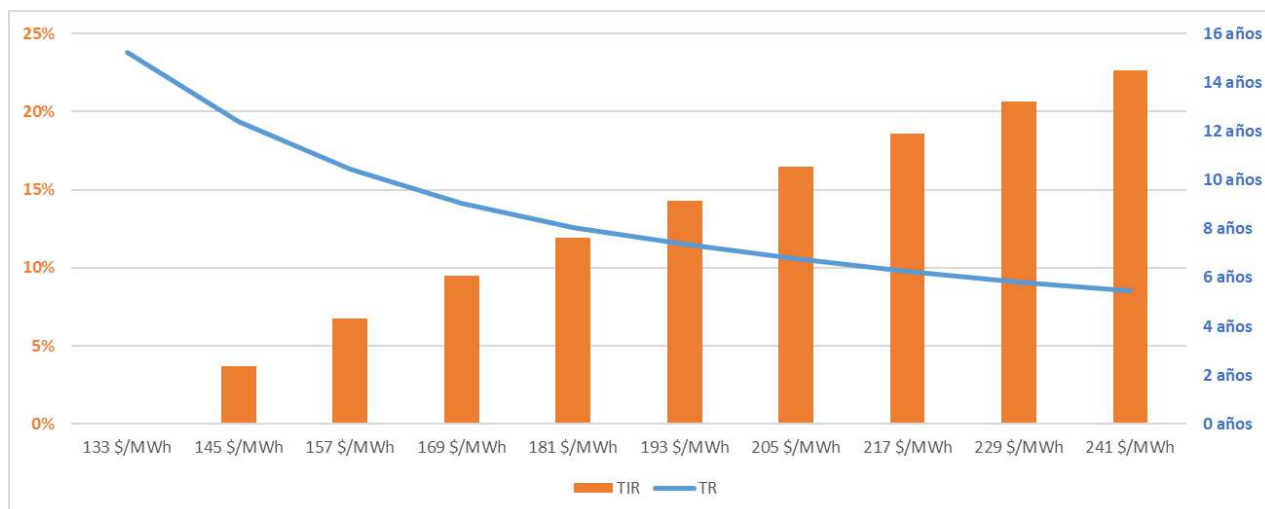
1.2.3.2. Análisis de sensibilidad para R2

Cuadro 142. Resumen de una simulación en R2, mostrando la evolución de los parámetros financieros según diferentes precios de energía eléctrica

Pv =	133 \$/MWh	145 \$/MWh	157 \$/MWh	169 \$/MWh	181 \$/MWh	193 \$/MWh	205 \$/MWh	217 \$/MWh	229 \$/MWh	241 \$/MWh
VAN	-111 k\$	97 k\$	305 k\$	512 k\$	696 k\$	862 k\$	1.028 k\$	1.193 k\$	1.358 k\$	1.524 k\$
DSCR	70%	86%	102%	118%	133%	145%	158%	171%	184%	197%
TIR	0%	4%	7%	9%	12%	14%	16%	19%	21%	23%
TR	15 años	12 años	10 años	9 años	8 años	7 años	7 años	6 años	6 años	5 años

PV: Precio de venta de energía eléctrica

VAN: Equivalente al VPN



Gráfica 53. Análisis de la TIR y del tiempo de amortización para diferentes precios de electricidad

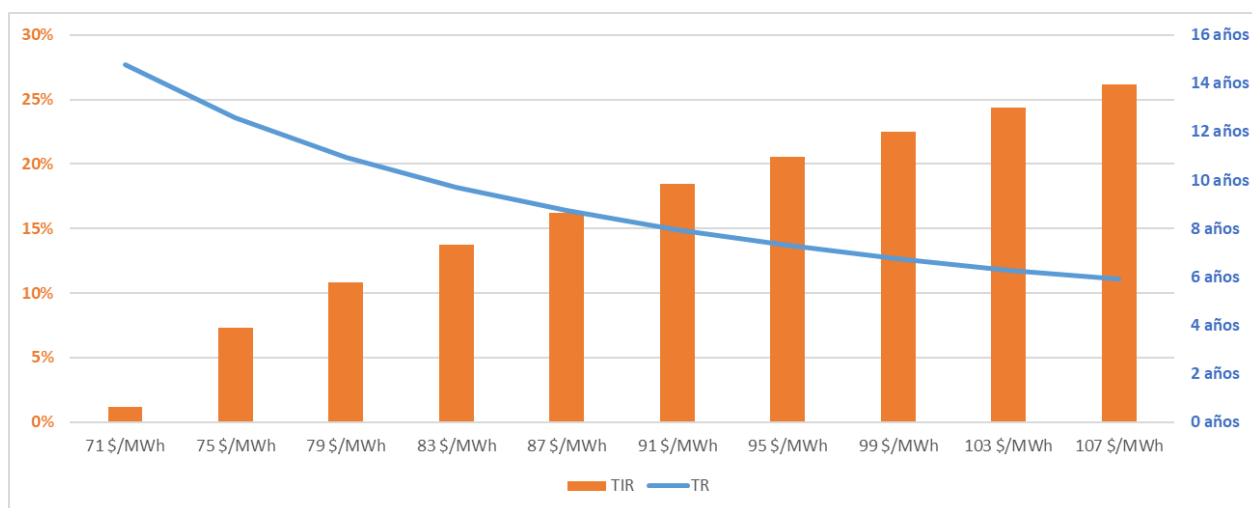
1.2.3.3. Análisis de sensibilidad para R3

Cuadro 143. Resumen de una simulación en R3, mostrando la evolución de los parámetros financieros según diferentes precios de energía eléctrica

Pv =	71 \$/MWh	75 \$/MWh	79 \$/MWh	83 \$/MWh	87 \$/MWh	91 \$/MWh	95 \$/MWh	99 \$/MWh	103 \$/MWh	107 \$/MWh
VAN	15 k\$	345 k\$	667 k\$	990 k\$	1.309 k\$	1.623 k\$	1.931 k\$	2.239 k\$	2.541 k\$	2.838 k\$
DSCR	72%	85%	98%	110%	122%	135%	147%	158%	170%	182%
TIR	1%	7%	11%	14%	16%	18%	21%	22%	24%	26%
TR	15 años	13 años	11 años	10 años	9 años	8 años	7 años	7 años	6 años	6 años

PV: Precio de venta de energía eléctrica

VAN: Equivalente al VPN



Gráfica 54. Análisis de la TIR y del tiempo de amortización para diferentes precios de electricidad

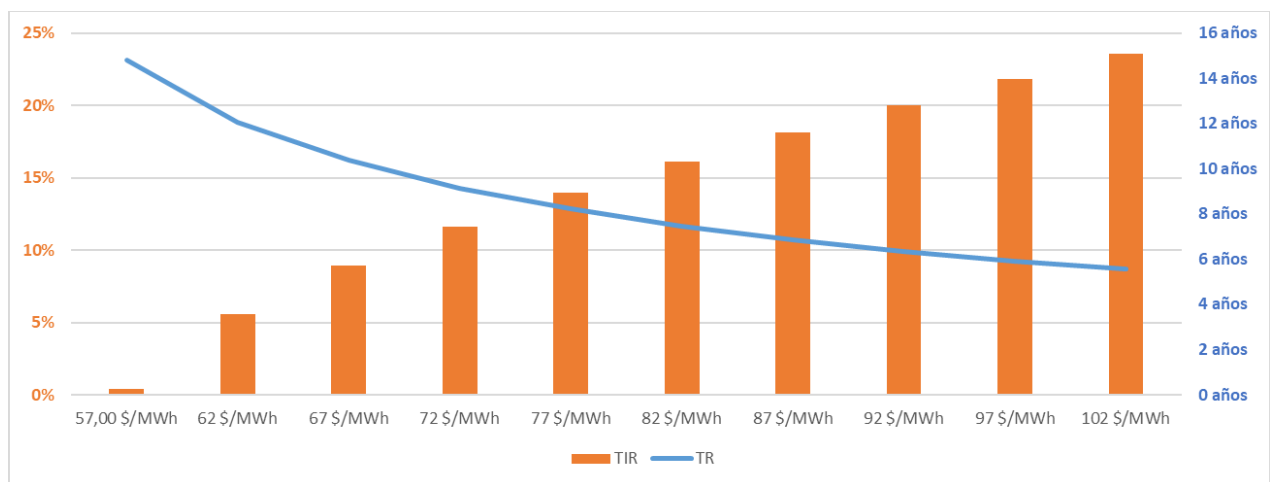
1.2.3.4. Análisis de sensibilidad para – R4

Cuadro 144. Resumen de una simulación en R4, mostrando la evolución de los parámetros financieros según diferentes precios de energía eléctrica

Pv =	57,00 \$/MWh	62 \$/MWh	67 \$/MWh	72 \$/MWh	77 \$/MWh	82 \$/MWh	87 \$/MWh	92 \$/MWh	97 \$/MWh	102 \$/MWh
VAN	-308 k\$	1.600 k\$	3.294 k\$	4.894 k\$	6.436 k\$	7.955 k\$	9.430 k\$	10.890 k\$	12.311 k\$	13.720 k\$
DSCR	72%	89%	103%	117%	130%	143%	156%	169%	181%	193%
TIR	0%	6%	9%	12%	14%	16%	18%	20%	22%	24%
TR	15 años	12 años	10 años	9 años	8 años	7 años	7 años	6 años	6 años	6 años

PV: Precio de venta de energía eléctrica

VAN: Equivalente al VPN



Gráfica 55. Análisis de la TIR y del tiempo de amortización para diferentes precios de electricidad

El análisis de sensibilidad refleja las tendencias identificadas en el escenario 1 y 2 donde en R1, R3 y R4 presentaran un valor de tarifa de energía menor que R2 y con un tiempo de retorno más bajo.

1.2.4. Análisis de rentabilidad incluyendo subvención

Como se observa en la Gráfica 50 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, en el proyecto de generación eléctrica en el relleno sanitario R2 no es viable financieramente. Por ello, en este cuarto escenario se propone la simulación de un escenario donde el CAPEX es subvencionado parcialmente en forma de donación.

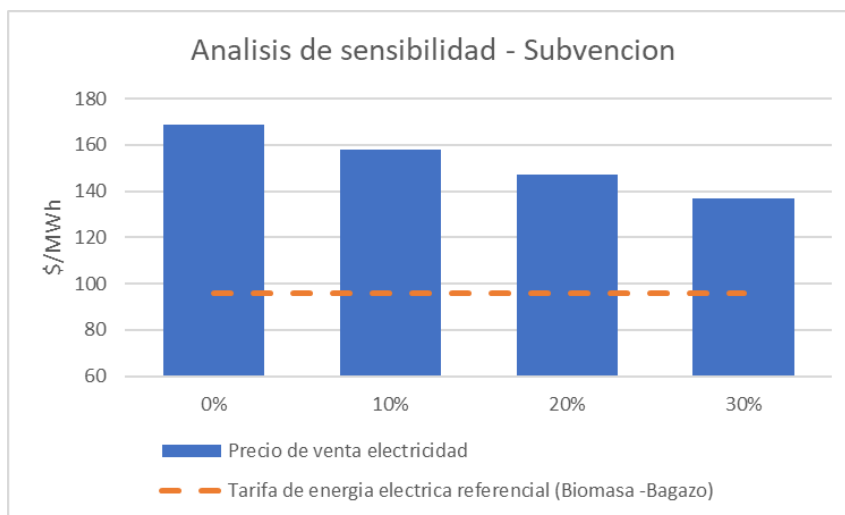
En la columna con subvención del 0% del siguiente cuadro, se tiene los mismos indicadores financieros presentados en la evaluación del escenario 2 para R2 por lo que, a partir de este se establece una TIR fija del 10.64 % con el fin de reflejar que ante una subvención se podrá tener reducciones en el valor de la tarifa de electricidad y buscar que sea competitiva.

Cuadro 145. Análisis de rentabilidad del proyecto de generación en función de la tasa de subvención aplicada al CAPEX.

Subvención	0%	10%	20%	30%
TIR=WACC	10,64%	10,64%	10,64%	10,64%
Precio de venta electricidad	174,10 \$/MWh	164.25 \$/MWh	154.43 \$/MWh	144,58 \$/MWh

VPN	602 k\$	524 k\$	447 k\$	369 k\$
TR	9 años	9 años	9 años	9 años

Como se observa en la siguiente gráfica, la subvención impacta en el precio de venta de electricidad, pero no logra alcanzar un valor competitivo con respecto a la tarifa de energía eléctrica tomada como referencia de 95.82 \$/MWh.



Gráfica 56. Variación del precio de venta de electricidad producida a partir de biogás del relleno sanitario R2, considerando subvenciones.

2.

NALSIS LEGAL

Una vez establecido en marco de referencia de sobre la valoración de biogás de rellenos sanitarios en Costa Rica, se procede en este apartado a identificar las actualizaciones, adiciones, cambios, desafíos y oportunidades que deben considerarse para propender por el desarrollo de estos proyectos y futuras iniciativas.

A continuación, se aborda un análisis de aspectos legales relacionado condiciones técnicos, reglamentarios, operativos, administrativos, financieros y de reducción de brechas de género.

2.1. Requerimientos para asociar en futuros proyectos de rellenos sanitarios – Carteles licitatorios.

- **Los impactos y costos socioambientales no impactan de igual manera a hombres y mujeres.**

Uno de los enfoques orientadores del **Plan nacional para la gestión integral de residuos 2016-2021** es el enfoque de Igualdad y Equidad de Género. Este establece que las mujeres y los hombres tienen por igual el derecho a disfrutar de un ambiente saludable, libre de contaminación y donde se promueva la salud general de las personas. Sin embargo, no hay estudios a nivel nacional que analicen de manera precisa de qué manera los impactos ambientales y sociales de la gestión de los residuos afectan de manera diferenciada a

hombres y mujeres. Esto se debe en parte a que, si bien en el plan nacional el enfoque de género existe, no hay una materialización en acciones concretas en la reglamentación que acompaña este plan. Por lo que en los sitios actuales de disposición será importante iniciar con la recolección de datos que permita constituir un contexto sobre los impactos asociados a los rellenos sanitarios y para los futuros proyectos, será importante exigir a los desarrolladores tener presente la evaluación de impactos diferenciados o con enfoque de género para que en los reportes operacionales se pueda recolectar dicha información y así crear un contexto nacional y acciones orientadas a los datos recopilados.

- **Estudios de Impacto Ambiental – EIA's como herramienta para la integración de perspectiva de género**

Siendo la EIA el instrumento más importante para la determinación de impactos socioambientales, se han identificado retos en la integración de género relacionados con tres aspectos principales¹¹:

1. Los impactos negativos y positivos tienen "género": Estos varían según la distribución de roles y el acceso y control de los recursos entre mujeres y hombres. Por lo tanto, la distribución de los impactos entre mujeres y hombres depende de las estructuras sociales locales y de la definición local de las relaciones de género.
2. El análisis de los impactos sociales y ambientales no suelen tener en cuenta esta diferencia, porque se considera que las comunidades afectadas son entidades homogéneas. El resultado es un análisis de los impactos sociales y ambientales basado en las percepciones masculinas.
3. La cultura profesional de las consultorías que realizan las EIA's favorece los puntos de vista masculinos, porque suele haber pocas mujeres en los equipos implicados y porque esta cultura profesional procede de las ciencias medioambientales y a menudo no tiene en cuenta los aportes de las ciencias sociales.

- **Reglamento de Rellenos Sanitarios – Oportunidades y desafíos**

Partiendo de las actividades indirectas que se relacionan con la conformación de condiciones favorables para aprovechar biogás, se ha encontrado una serie de características que al incorporarse en el Reglamento de Rellenos Sanitarios permiten reducir la emisión de biogás y su correcta gestión para su posterior valoración. Entre las sugerencias a incluir se tiene:

- Cambiar la categorización de Relleno Mecanizado y Manual, por tamaño (Pequeño, mediano grande) de tal forma que todo relleno mediano y grande haga extracción activa y **combustión de alta eficiencia de biogás**
- Establecer límites de emisiones y de composición de contaminantes en rellenos pequeños y para los demás tamaños considerar límites para emisiones luego de la quema
- Entre las alternativas de valoración de biogás, en primera instancia debe ser considerado para su conversión a energía, y en ausencia de una factibilidad técnica y económica, realizar una quema activa.
- Independiente del tipo de quema y valoración, deberá realizar monitoreo de las emisiones durante la operación de disposición de residuos para actualizar y adaptar los

¹¹ AFD, Herramientas de Género, Debida Diligencia medioambiental y social, 2018.

respectivos sistemas asegurando cumplir con los límites de emisiones y composición. Esto también deberá solicitarse en etapas posteriores al cierre del relleno sanitario.

- Los reportes operacionales a SETENA, deberán unificarse en un formato de manera que se pueda hacer seguimiento a parámetros asociados al correcto desarrollo de actividades para reducción de emisiones y la apropiada valoración de biogás en los rellenos.
- Hacer esfuerzos para incluir que la tarifa de disposición final sea un proceso por medio de la Aresep. Esto abre la posibilidad de factorizar el valor verdadero de actividades de valorización que se requiere para residuos orgánicos en disposiciones finales, diferentes a relleno sanitario (ie. Compostaje).
- Incluir estrategias para reducción de morosidad de pago a nivel municipal.
- Cerrar la brecha legal sobre la factibilidad de generación eléctrica con gas de relleno, específicamente el desarrollo y validación de una metodología para cálculo de dicha tarifa
- Si el operador del relleno sanitario decide realizar actividades adicionales, como procesos de valorización de residuos (reutilización, recuperación y reciclado), no es claro en la normatividad estudiada si debería iniciar otro proceso de modificación a la Viabilidad Ambiental otorgada o solicitar una nueva para evaluar los impactos ambientales y sociales ligados a este “subproyecto”. Igualmente, para la valorización activa del biogás no es claro si deben realizarse una modificación a esta Viabilidad Ambiental por lo que la autoridad pertinente deberá analizar dicho procedimiento legal para priorizar y facilitar dichas actividades adicionales.

En el caso de Colombia, las entidades encargadas de las Licencias Ambientales, tramite equivalente a la Viabilidad Ambiental de Costa Rica, aún se encuentran estudiando si se deben solicitar modificaciones a las licencias o solicitar una nueva licencia para estas actividades adicionales de valorización que realizarían los rellenos sanitarios. Así mismo, en qué medida y como se deben contemplar los impactos ambientales y sociales de las actividades de valorización activa de biogás.

Por ejemplo, con respecto a la calidad del aire, en Colombia el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible precisa en su concepto, que para el control de emisiones generadas en rellenos sanitarios se debe tener en cuenta la Resolución 909 de 2008, la cual estipula en su capítulo XVII “Determinación del punto de descarga de la emisión por fuentes fijas” y específicamente en sus artículos 69 y 71 lo siguiente: “Obligatoriedad de construcción de un ducto o chimenea. Toda actividad que realice descargas de contaminantes a la atmósfera debe contar con un ducto o chimenea cuya altura y ubicación favorezca la dispersión de éstos al aire, cumpliendo con los estándares de emisión que le son aplicables.” “Localización del sitio de muestreo: La altura de la chimenea, diámetro y localización de los puertos de muestreo deben construirse de acuerdo con los métodos y procedimientos adoptados en el Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Generada por Fuentes Fijas”

- **Los procesos de licitación como oportunidad para ampliar la participación y la inclusión de las mujeres en sectores altamente masculinizados.**

Ampliar la inclusión y la participación de las mujeres en sectores no tradicionales -como el caso de la gestión integral de residuos- forma parte de los esfuerzos para eliminar patrones socioculturales patriarcales que dificultan su plena y efectiva incorporación en diversos sectores de la actividad económica, productiva y social.

Una de las herramientas para ampliar esta participación es los procesos de licitación pública. Para la realización de procesos licitatorios que tengan promoción de la equidad entre mujeres y hombres se recomienda la utilización de manuales que favorezcan la implementación del enfoque de género. Uno de estos instrumentos es el Manual “La perspectiva de género en el ciclo de la Obra Pública”¹². Es una iniciativa del Ministerio de Obras Públicas de la Nación Argentina (MOP) que cuenta con la asistencia técnica de la Entidad de las Naciones Unidas para la Igualdad de Género y el Empoderamiento de las Mujeres (ONU Mujeres) y de la Oficina de las Naciones Unidas de Servicios para Proyectos (UNOPS). Su objetivo es contribuir a una mayor igualdad en el MOP y a complementar y fortalecer la articulación de las políticas de Obra Pública con perspectiva de género.

Entre las recomendaciones del manual las siguientes pueden ser incorporadas en los eventuales procesos licitatorios para la valorización de biogás en producción de energía eléctrica u otros proyectos en la gestión integral de residuos en Costa Rica:

- Detalle de políticas y acciones de género y paridad vigentes del oferente al momento de presentarse a la oferta (plan de igualdad de género, protocolos contra el acoso y la violencia laboral y de género) y/o compromiso de implementación en la obra, o medidas a implementar durante el transcurso del proyecto para mejorar esta situación.
- Declaración jurada de la nómina del personal capacitado en género y abordaje de las violencias contra las mujeres con la debida acreditación.
- Declaración jurada de la plantilla desagregada por género: incorporar no solo a hombres y mujeres, sino también personas con identidades no binarias y las funciones que realizan. Además, se sugiere que incluyan al personal contratado y a quienes integran puestos directivos y/o funciones jerárquicas.
- Incluir la perspectiva de género como criterio de adjudicación desempate o exclusión para asegurar que quienes oferten presenten la incorporación de mujeres y diversidades de acuerdo con la definición de los requerimientos de pliegos.
- Utilizan el criterio de definición Empresa Propiedad de Mujer (EPM), establecido por ONU Mujeres.
- Se recomienda incorporar en las bases de licitación y todo documento de trabajo un uso del lenguaje inclusivo no sexista y que, a su vez, se exija a las empresas y/o cooperativas oferentes que sus propias propuestas también cumplan con este requisito.
- Paridad de género en los jurados de selección de la evaluación de las propuestas recibidas mediante las licitaciones.
- Ampliar oportunidades de acceso en los procesos de licitación, convenios, contratos e instancias de compras públicas a entidades dirigidas por mujeres.
- Contar con y/o generar normativa que inste a quienes contratan a disponer de vestuarios y sanitarios en las obras, que sean seguros y adecuados para la diversidad de género y faciliten la higiene y la gestión menstrual: la inexistencia de estas instalaciones para mujeres desalienta la incorporación de esta mano de obra.

¹² ONU MEJERES, Manual 1. La perspectiva de género en el ciclo de la Obra Pública Argentina, 2022

- Exigir en los pliegos y convenios a la empresa oferente o al organismo involucrado que garantice y cumpla los estándares de seguridad correspondientes en la provisión de indumentaria y calzado adecuados a la talla de mujeres.
 - Incluir especificaciones vinculadas a que las empresas oferentes cuenten con instrumentos como: Protocolos o mecanismos de prevención e intervención en situaciones de acoso laboral y violencia sexual. Licencias por violencias por motivos de género y por trabajo de cuidados.
 - Sugerir que la empresa oferente u organismo realice un autodiagnóstico inicial sobre las brechas de género en su organización, e informes de desempeño en los que se explicitan las acciones tomadas.
 - Asegurar que los criterios de evaluación y las propuestas sean revisados por una persona especialista en materia de género.
- **Estándares Internacionales en la valoración del biogás para orientar los carteles licitatorios.**

A continuación, se hace referencia a algunos requerimientos normativos, técnicos y regulatorios exigidos para los estudios ambientales de las plantas de metanización en la unión europea, así como los estándares medioambientales y sociales internacionales que pueden orientar a las autoridades ambientales costarricenses en el proceso de valorización de biogás para la producción eléctrica

En el decreto del 10/11/09 en aplicación del Título I del Libro V del Código de Medio Ambiente Frances y modificado por última vez el 14 de junio de 2021, se establecen las normas técnicas que deben cumplir las instalaciones de metanización. Este decreto se aplica a las instalaciones de metanización de residuos no peligrosos o de materias primas vegetales. Este no aplica para las instalaciones experimentales para investigación, desarrollo y pruebas destinadas a mejorar los procesos de digestión anaerobia, cuando la cantidad de residuos, materia orgánica o efluentes admitidos en un año no supere las 200 toneladas.

Estos requerimientos dan orientaciones pertinentes que se deben tener en cuenta para un buen manejo ambiental. Así mismo donan orientaciones precisas para tener en cuenta en la constitución de los pliegos de licitación en cuanto a la gestión ambiental y social. El documento completo puede ser consultado en el sitio web de información sobre el derecho medioambiental desarrollado en el marco de la misión de servicio público del Instituto Nacional del Medio Ambiente y los Riesgos Industriales para el Ministerio del medio ambiente¹³.

La mención a autorizaciones prefectorales se refiere a las autorizaciones de la autoridad local regulatoria en gestión de desechos o a la autoridad regulatoria medioambiental, para el caso de Costa Rica su equivalente sería las instancias regulatorias como SETENA. Igualmente, el decreto hace referencia a otras normas técnicas emitidas que pueden encontrarse su equivalente en la reglamentación y normatividad costarricense.

¹³ <https://aida.ineris.fr/>

Por otro lado, en términos de estándares para la identificación y manejo de los impactos ambientales y sociales están los estándares internacionales que siguen las grandes instituciones de ayuda al desarrollo. Son dictados por el Banco Mundial en su Marco Ambiental y Social¹⁴. Estos estándares no son únicos a proyectos de plantas de metanización, pero constituyen el marco general que debe ser aplicado en cualquier proyecto que quiera incluir altos estándares de la gestión de riesgos ambientales y sociales.

- **Aprobación Técnica en el diseño y operación de los rellenos sanitarios**

Entre la evaluación técnica para la selección de propuestas de proyectos de rellenos sanitarios, será importante evaluar los siguientes parámetros para garantizar desde la contratación, que los futuros desarrolladores incorporen la valoración de biogás.

- **Eficiencia en la Valorización del Biogás:** Las empresas licitadoras deberán presentar un plan detallado para la valorización del biogás generado a partir de los residuos en el relleno sanitario. Este plan debe incluir la generación de energía eléctrica como mínimo. Se valorarán propuestas que optimicen la eficiencia en la captura y conversión del biogás en electricidad, minimizando las pérdidas y garantizando una alta disponibilidad de la planta.

La única mención al manejo del biogás en los rellenos sanitario es el artículo 12, inciso 7, del Decreto de Rellenos Sanitarios, donde se establece que se debe incluir en el diseño del relleno un sistema de recolección, conducción y tratamiento de gases, con detalles constructivos correspondientes. Esta mención es general, no regula y controla las emisiones de metano de rellenos sanitarios. Si se compara con la normativa internacional, según el subtítulo D de “Resource Conservation and Recovery Act” (RCRA), quien establece control de mitigación de gases de rellenos sanitarios en USA. Se detalla que los propietarios y operadores de rellenos sanitarios deben garantizar que la concentración de gas metano no exceda:

El 25% del LEL (Lower explosive limit) para metano en las estructuras de las instalaciones (1,25% en volumen)

El LEL para metano en los límites de la instalación (5 % en volumen)

En la caracterización de biogás hecha para los rellenos sanitarios, se puede observar que los porcentajes de contenido de metano esta sobre el 40% por lo que las emisiones de GEI de dichos sitios no cumplirían con esa restricción internacional.

- **Control de Emisiones y Tratamiento de Siloxanos:** Las empresas licitadoras deben demostrar la implementación de sistemas de control de emisiones de gases de efecto invernadero, incluyendo la eliminación adecuada de siloxanos y otros compuestos contaminantes presentes en el biogás. Se exigirá la adopción de tecnologías avanzadas de tratamiento que cumplan con estándares ambientales rigurosos y que aseguren la calidad del aire circundante.
- **Diversificación de Uso de Energía Eléctrica Generada:** Además de la generación de energía eléctrica a partir del biogás, las empresas licitadoras deberán proponer

¹⁴ <https://projects.bancomundial.org/es/projects-operations/environmental-and-social-framework>

soluciones para la diversificación del uso de esta energía. Se dará preferencia a proyectos que planteen la posibilidad de inyectar la electricidad generada en la red local o utilizarla para abastecer usos propios como iluminación, bombeo de agua, o incluso la recarga de vehículos eléctricos, fomentando así un enfoque integral en la valorización energética del biogás

2.2. Incentivos y excepciones para promover la valoración de biogás

El aprovechamiento del biogás generado en rellenos sanitarios representa una valiosa oportunidad para diversificar la matriz energética y promover la sostenibilidad en Costa Rica. Sin embargo, hasta la fecha, se han identificado diversas limitaciones e insuficiencias en los incentivos y excepciones destinados a fomentar esta práctica.

Uno de los principales obstáculos que ha desincentivado la generación de electricidad a partir de biogás en rellenos sanitarios se relaciona con la ausencia de una metodología específica para estimar la tarifa de generación de electricidad. La Autoridad Reguladora de Servicios Públicos (ARESEP) no ha establecido directrices claras al respecto, lo que ha llevado a una falta de certeza para los potenciales inversionistas. Esta incertidumbre ha resultado en la inexistencia de proyectos de generación eléctrica basados en biogás en el país.

El Decreto de Rellenos Sanitarios, en su artículo 12, inciso 7, establece la obligación de incluir en el diseño de los rellenos un sistema de recolección, conducción y tratamiento de gases, con detalles constructivos correspondientes. No obstante, esta mención resulta insuficiente para fomentar el aprovechamiento efectivo del biogás. La falta de regulaciones detalladas y específicas sobre cómo llevar a cabo este proceso y cómo integrarlo a la generación eléctrica es una limitación significativa.

A pesar de estas limitaciones, existen señales positivas en el panorama nacional que podrían servir como incentivos para el desarrollo de proyectos de generación eléctrica con biogás. El VII Plan Nacional de Energía 2015-2030 destaca la importancia de diversificar la matriz eléctrica y establece un objetivo específico (7.3.4) que busca fomentar la producción y el uso de biogás como sustituto de fuentes de energía fósiles. Este objetivo puede ser un punto de partida para impulsar la generación eléctrica a partir de biogás.

Además, la Ley 7200 (artículo 17) ofrece un incentivo importante al establecer que las empresas productoras de energía eléctrica autónoma o paralela gozarán de las mismas exoneraciones que el Instituto Costarricense de Electricidad en la importación de maquinaria y equipo relacionados con la generación eléctrica. Esto incluye los equipos necesarios para la generación eléctrica a partir de biogás. Esta disposición legal podría estimular la inversión en proyectos de generación eléctrica basados en biogás al ofrecer beneficios fiscales a los inversores.

En resumen, si bien existen obstáculos y limitaciones que han dificultado el aprovechamiento del biogás de rellenos sanitarios para la generación eléctrica en Costa Rica, también hay señales positivas y oportunidades para promover esta práctica. Es fundamental que se trabaje en el desarrollo de regulaciones más específicas y claras, así como en la promoción de los incentivos fiscales existentes, para impulsar la inversión en proyectos de generación eléctrica sostenible a partir de biogás.

En cuanto a las herramientas internacionales aplicables a Costa Rica se encuentra que lo desarrollo en Colombia para beneficiar los desarrolladores de proyectos de FNCE al no pagar

los derechos y/o gravámenes arancelarios al importar maquinas, equipos, insumos y materiales que se vayan a utilizar exclusivamente en las etapas de pre-inversión e inversión dentro de los proyectos de FNCE, es aplicable al país.

Por medio de un encuentro con un representante del MINAE, se concluyó que se encuentran conformando la lista de los equipos que serían candidatos para hacer la exclusión de los aranceles similar a la constituida en Colombia.

2.3. Definición de las actualizaciones técnicas requeridas frente al Plan de Descarbonización Nacional

La vinculación entre el Plan Nacional de Descarbonización y la generación de energía eléctrica a partir de biogás de rellenos sanitarios es una asociación estratégica con un gran potencial para impulsar la transición hacia una economía baja en carbono en Costa Rica. La generación de energía a partir de biogás de rellenos sanitarios puede contribuir significativamente al logro de los objetivos del Plan Nacional de Descarbonización, las actualizaciones técnicas necesarias y cómo esta fuente de energía puede desempeñar un papel clave en la implementación exitosa del plan.

El Plan Nacional de Descarbonización de Costa Rica, lanzado con el ambicioso objetivo de lograr una economía libre de emisiones netas de carbono para 2050, es una hoja de ruta crucial para abordar el cambio climático y promover la sostenibilidad ambiental. Una de las áreas clave de enfoque del plan es la transformación del sector energético hacia fuentes limpias y renovables. Aquí es donde la generación eléctrica a partir de biogás de rellenos sanitarios entra en juego.

Los rellenos sanitarios son una fuente significativa de emisiones de metano, un potente gas de efecto invernadero. Sin embargo, estos lugares también ofrecen una oportunidad valiosa para capturar y utilizar ese metano como biogás para generar electricidad y así diversificar la matriz energética. A continuación, se detallan algunas formas en que la generación de energía a partir de biogás de rellenos sanitarios puede vincularse de manera efectiva con el Plan Nacional de Descarbonización:

- ✓ Reducción de emisiones de GEI: La generación de energía a partir de biogás de rellenos sanitarios reduce las emisiones de metano, un gas de efecto invernadero más potente que el dióxido de carbono. Al aprovechar este recurso, se logra una disminución significativa de las emisiones totales de GEI en el país.
- ✓ Fomento de la energía renovable: El Plan Nacional de Descarbonización se centra en el aumento de la participación de las energías renovables en la matriz energética. La generación de energía a partir de biogás contribuye directamente a esta meta al proporcionar una fuente de energía limpia y renovable.
En la normativa nacional, no se detalla que los rellenos sanitarios que cumplan con ciertos criterios de capacidad de diseño y emisiones totales deban recolectar el gas generado en un sistema activo y quemarlo o usarlo como energía. Es por ello, que solo uno de los 7 rellenos que existe a nivel nacional, realiza captura activa, quema controlada y valorización del 10% de sus emisiones. Según Clean Air Act (CAA) Regulations (NSPS/EG), establece que rellenos sanitarios con capacidad de diseño mayor o igual a 2,5 Mg y 2,5 millones de metros cúbico y con tasa de

emisión anual de NMOC (Non-methane volatile organic compound) mayor o igual a 50 Mg deben realizar captura y quema o valorización de los gases generados en los sitios de disposición

- ✓ Diversificación energética: La inclusión de biogás de rellenos sanitarios en la matriz energética diversifica la fuente de energía, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles y aumentando la resiliencia energética del país.
- ✓ Generación distribuida: Los rellenos sanitarios están distribuidos por todo el país, lo que permite la generación distribuida de energía, una estrategia que puede aumentar la estabilidad de la red eléctrica y reducir las pérdidas de transmisión.

Sin embargo, para que la generación eléctrica con biogás de rellenos sanitarios desempeñe un papel clave en el Plan Nacional de Descarbonización, se requieren algunas actualizaciones técnicas y consideraciones importantes:

- ✓ Infraestructura adecuada: Es necesario invertir en la infraestructura adecuada para la captura y tratamiento del biogás en los rellenos sanitarios. Esto incluye sistemas de recolección y purificación del biogás.
- ✓ Tecnología eficiente: Se deben implementar tecnologías eficientes para la conversión del biogás en electricidad, como motores de cogeneración o turbinas de gas.
- ✓ Normativas y regulaciones: Se deben establecer regulaciones claras y eficaces que promuevan la generación de energía a partir de biogás y faciliten la inversión privada en este sector, específicamente incluir una metodología para la estimación competitiva de una tarifa a base de biogás.
- ✓ Capacitación y desarrollo de capacidades: Se requiere capacitación y desarrollo de capacidades tanto para operar eficazmente las instalaciones de biogás como para mantenerlas y supervisar su funcionamiento.
- ✓ Participación del sector privado: La colaboración con el sector privado, incluidas empresas de gestión de residuos y productores de energía, puede acelerar la implementación de proyectos de generación de energía con biogás.

En cuanto a cómo se puede explotar plenamente esta oportunidad, es esencial una planificación estratégica. El gobierno de Costa Rica puede identificar y priorizar los rellenos sanitarios con mayor potencial de generación de biogás y establecer asociaciones público-privadas para su desarrollo. Además, se pueden implementar esquemas de incentivos para fomentar la inversión en esta tecnología.

La generación de energía eléctrica a partir de biogás de rellenos sanitarios se alinea de manera efectiva con el Plan Nacional de Descarbonización de Costa Rica al reducir las emisiones de GEI, promover las energías renovables y diversificar la matriz energética. Sin embargo, se requieren inversiones y actualizaciones técnicas para aprovechar plenamente este recurso y cumplir con los objetivos del plan. Con la planificación adecuada y la colaboración entre el gobierno y el sector privado, esta fuente de energía puede desempeñar un papel clave en la transición hacia una Costa Rica más sostenible y libre de carbono.

3.

CONCLUSIONES

- ✓ Para garantizar la reducción de emisiones de biogás en rellenos sanitarios y vertederos, deberán acompañarse intrínsecamente a la conformación de estos sitios de disposición final, los sistemas de captura activa y quema eficiente como medidas mínimas.
- ✓ En función de los objetivos establecidos en los planes de descarbonización deberá establecerse en la regulación o complementar el Art 12. Inciso 7 del Decreto de Rellenos Sanitarios de manera detallada, los límites de emisión de biogás y apoyarse desde los permisos ambientales, el planteamiento específico de las medidas de mitigación en función de las emisiones, tamaño de la instalación y su respectivo monitoreo.
- ✓ Para los operadores de rellenos sanitarios que decidan realizar actividades adicionales, como procesos de valorización de residuos (reutilización, recuperación y reciclado) y valorización de biogás, no es clara la normatividad respecto a si debería iniciar otro proceso de modificación a la Viabilidad Ambiental otorgada o solicitar una nueva para evaluar los impactos ambientales y sociales ligados a este “subproyecto”.
- ✓ Producto de la caracterización de biogás producido en los 4 rellenos sanitarios y un vertedero, se puede comparar con las restricciones internacionales de concentración de gas metano, donde actualmente los sitios no cumplirían con dichos límites de emisión. Por lo tanto, será aun de mayor prioridad priorizar los sistemas propuestos para la reducción de dichas emisiones.
- ✓ Actualmente, bajo las condiciones comerciales, técnicas, energéticas, de regulación y según los actores distribuidores de energía entrevistados (ICE, CNFL, ESPH), el aprovechamiento de biogás con mejor proyección de desarrollo en Costa Rica corresponde a la generación de energía eléctrica.
- ✓ La legislación internacional ofrece una variedad de ejemplos y enfoques que Costa Rica podría considerar para fortalecer su marco legal en relación con la valorización del biogás en rellenos sanitarios. La adaptación de buenas prácticas y la implementación de regulaciones específicas, así como la creación de incentivos fiscales, podrían ayudar a promover proyectos de generación eléctrica sostenible a partir del biogás en el país y deberá ser desarrollado por los actores enmarcados en la gobernanza de la valoración de biogás.
- ✓ El mercado de bonos de carbono con mejor proyección de desarrollo y por el que se podría apalancar de mejor forma proyectos o iniciativas para valorizar el biogás, es el mercado voluntario, que luego de entrevistar Anaconda Carbón, se concluye que este tipo de iniciativas en Costa Rica son de interés para compradores internacionales.
- ✓ A partir de datos recopilados de consultas a corredores de carbono a nivel regional e internacional con expertos como Anaconda Carbón y South Pole se sugiere que, considerando la naturaleza, ubicación y escala de los proyectos, un valor estimado podría oscilar entre \$3 y \$6 USD por tonelada de CO_{2E}
- ✓ A nivel nacional, existen los reglamentos y normas, pero aún falta los mecanismos habilitantes e incentivos apropiados para lograr la emisión de bonos nacionales y su comercialización local.
- ✓ Existe actualmente un vacío en el desarrollo de una metodología específica y aprobada para proyectos de generación eléctrica con biogás que permita la definición de un valor de tarifa. Será vital para impulsar la generación eléctrica a partir de biogás de rellenos sanitarios, establecer una metodología específica para estimar la tarifa de generación de electricidad para brindar garantías a los potenciales inversionistas.

- ✓ De acuerdo con los resultados de caracterización de biogás, se puede concluir que en función a la composición de biogás y la producción de biogás en los 3 rellenos (R1, R3 y R4) analizados es positiva y posibilitaría el desarrollo de proyectos de valorización en estos sitios. En efecto, el CH₄ se encuentra cerca de un 50% en promedio, con margen de mejora implementando sistemas de monitoreo, captura y operación más finos para optimizar la captura de una mezcla más rica en CH₄.
- ✓ En Costa Rica, los rellenos sanitarios tienen un potencial significativo de producción de biogás. Dentro de la muestra seleccionada, se ha determinado que, en el 2023, los 4 rellenos sanitarios y el vertedero en estudio tienen la capacidad de generar 47 millones m³/año de biogás
- ✓ Considerando las curvas de producción de biogás y la operación en cada uno de los sitios, se propone las siguientes capacidades instaladas de generación eléctrica en los rellenos **R1: 2.2 MW, R2: 250kW, R3 1.6 MW, R4: 6.0 MW**. El potencial de generación eléctrica y las capacidades instaladas propuestas podrían aumentar significativamente si los rellenos sanitarios optimizan la gestión de las celdas para poder aumentar el porcentaje de recolección que tienen actualmente.
- ✓ En el análisis de generación eléctrica se concluyó que, en los R1, R2, R3 y R4 tienen un potencial de generación eléctrica de R1: 3.6 MW, R2:0.53MW, R3: 2.9 MW y R4: 8.0 MW, si se establece porcentaje de captura de 90%
- ✓ En un horizonte de 15 años, las propuestas de generación eléctrica (R1: 2.2 MW, R2: 250kW, R3 1.7MW, R4: 6.0 MW) para cada uno de los sitios, tienen la capacidad de prevenir la emisión de **6.1 millones de TCO₂E**. La contribución de cada propuesta es la siguiente (R1: 1.324.717 MTCO₂E, R2: 170.509 MTCO₂E, R3: 675.162 MTCO₂E y 3.929.087 MTCO₂E).



Ilustración 17. Capacidad de prevenir las emisiones de CO₂E para cada uno de los proyectos de generación, horizonte de evaluación 15 años.

- ✓ Entre las acciones y propuestas establecidas en torno a la valoración de biogás y las actividades indirectas relacionadas para la reducción de la brecha de género, se establecieron las siguientes acciones:

Gestión de Compromisos ambientales y sociales

- Sensibilización de regidores y regidoras al enfoque de género
- Levantamiento de indicadores desagregados por sexo de las acciones realizadas
- Incluir en el diagnóstico de las condiciones y necesidades del entorno del área de interés del proyecto que se realiza anualmente consultas diferenciadas por género para identificar capacidades que permitan alcanzar la igualdad efectiva de género
- Orientar los sondeos de opinión y/o entrevistas con terceras partes interesadas sobre el cumplimiento de los compromisos ambientales y sociales hacia la determinación de necesidades o impactos sexo-específicos.
- Dado el interés y la identificación de las desigualdades evidentes en el sector, formar a las personas a cargo de la gestión ambiental y social sobre el enfoque de género y su aplicación a nivel de la gestión de residuos.

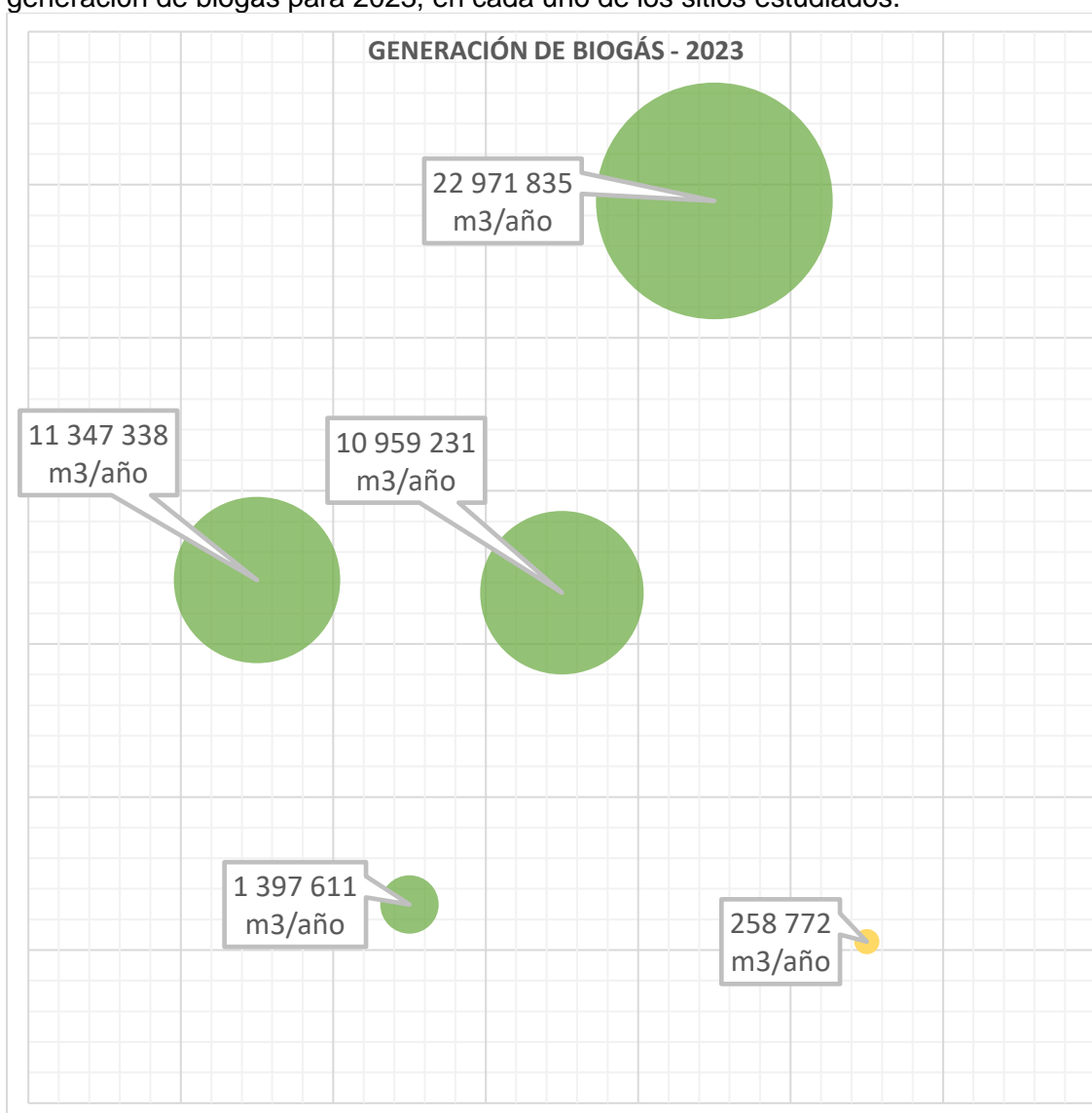
Relación con las comunidades (Diferentes a las exigidas en el PGA)

- Reorientar el Programa de capacitación en la Escuela de Formación y Desarrollo Técnico de la empresa EBI a la promoción de la participación de mujeres, mediante acciones afirmativas.
- Focalizar las donaciones y la inversión social voluntaria hacia las desigualdades de género del sector de gestión de residuos. (Ej. acciones educativas dirigidas a la integración de las mujeres o formalización de las mujeres a los procesos de valorización de residuos)
- Incluir criterios para la selección de los proyectos comunitarios financiados por los fondos de inversión social voluntaria que favorezcan la autonomía económica de las mujeres.

Recursos humanos

- Formular un plan de igualdad o una estrategia de género en la empresa
 - Identificar e implementar acciones para mejorar la compatibilidad de la vida personal y laboral o la participación e implicación de la empresa/ institución, en otras acciones a favor de la igualdad de oportunidades
 - Visibilizar las mujeres que trabajan en el sector para Contribuir al cambio de roles, la eliminación de los estereotipos de género -sobre todo en sectores masculinizados- y la deconstrucción de los modelos de masculinidad hegemónicos vigentes.
 - la siguiente (R1: 1.324.717 MTCO₂E, R2: 170.509 MTCO₂E, R3: 675.162 MTCO₂E y 3.929.087 MTCO₂E).
- ✓ De acuerdo con los resultados de caracterización de biogás, se puede concluir que tanto la composición como la cantidad de biogás producido en los 4 rellenos analizados es positiva para posibilitar el desarrollo de proyectos de valorización en estos sitios. En efecto, el CH₄ se encuentra cerca de un 50% en promedio, con margen de mejora implementando sistemas de monitoreo, captura y operación más finos para optimizar la captura de una mezcla más rica en CH₄.
- ✓ El relleno sanitario que tiene menor porcentaje de metano (47% de metano) es el R1. Adicionalmente este relleno sanitario tiene la composición de aire alrededor de 30% (6% O₂ + ~24% N₂), lo cual sugiere la necesidad de mejorar la hermeticidad del sistema de captación y de cobertura final para limitar al máximo las entradas de aire y poder así mejorar el contenido de CH₄ y cuando se establezca un sistema de captura activa, se podrá tener un porcentaje de captura superior al estimado actualmente (55%).
- ✓ Con respecto a la composición de H₂S en el biogás de los rellenos sanitarios se encuentra en cantidades bajas 160 a 310 ppm(v) por lo cual un sistema sencillo de remoción por carbón activado sería suficiente para cumplir con los requerimientos de calidad de los equipos de valorización energética (< 100 – 200 ppm(v)).
- ✓ El modelo que mejor describe el comportamiento de los sitios de disposición estudiados es el modelo IPCC Waste Model. Dicho modelo fue el seleccionado como referencia para la estimación del potencial de producción de biogás, ya que tiene una mayor compatibilidad con los rellenos sanitarios de Costa Rica estudiados dada su adaptabilidad y complejidad que toma en cuenta la composición de los residuos depositados y el tipo de sitio de disposición final

- ✓ En Costa Rica, los rellenos sanitarios tienen un potencial significativo de producción de biogás. Dentro de la muestra seleccionada, se ha determinado que, en el 2023, los 4 rellenos sanitarios y el vertedero en estudio tienen la capacidad de generar 47 millones m³/año. Dentro de los principales 3 principales generadores de GEI, 2 se encuentran en la GAMT de Costa Rica. En la Gráfica 54, se presenta la contribución en la generación de biogás para 2023, en cada uno de los sitios estudiados.
- ✓ De los 47 millones de m³ de biogás generado al año, solo se aprovecha el 2% para la producción eléctrica. En la siguiente gráfica, se presenta la contribución en la generación de biogás para 2023, en cada uno de los sitios estudiados.



Gráfica 57. Contribución a la generación de biogás en el 2023 por relleno

- ✓ El vertedero contemplado en el estudio permitió definir que por la naturaleza de su constitución no se podrá esperar tener el mismo potencial de producción y de valorización de biogás que un relleno correctamente diseñado y operado ya que hay varios factores que afectan la calidad del biogás, volúmenes de producción, facilidades en la captación, entre otros. Por lo anterior, es importante aclarar que, aunque no son

sitios potenciales de valorización de biogás será necesario establecer medidas ambientales frente a la emisión de GEI que se producen y que dentro de estas medidas deberá asegurarse la captación activa y quema controlada para asegurar la destrucción de GEI como medidas mínimas frente al biogás

- ✓ Se sugiere establecer para los vertederos como medidas mínimas la captura activa y quema controlada del biogás producido en estos sitios, por ello será de vital importancia monitorear y establecer las condiciones de los vertederos que no fueron contemplados en el presente estudio que, si bien se encuentran clausurados, pueden ser potenciales generadores de emisiones de GEI y/o requieren tener un estudio específico de riesgos, impactos y obras que permitan la descarbonización o mitigación de las afectaciones que se generen.
- ✓ Las propuestas generadas en este estudio involucran la captura y uso del biogás proveniente de rellenos sanitarios para la generación de energía eléctrica, tienen el potencial de generar créditos de carbono, siempre y cuando cumplan con los requisitos de adicionalidad que refiere a los proyectos donde sus actividades son generadoras de GEI y que de manera voluntaria y buscando de manera adicional a dichas actividades, desarrollar las acciones necesarias para reducir y evitar dichas emisiones.
- ✓ Existe la posibilidad técnica de que los rellenos sanitarios generen electricidad a través del biogás según el Decreto 39220 de Generación Distribuida para Autoconsumo. Sin embargo, bajo este régimen solo se permite una medición neta sencilla, lo que implica que el generador puede inyectar electricidad no consumida a la red y consumir el 49% de esa cantidad en los meses siguientes. Esta opción no permite la comercialización de la energía a terceros y no es económicamente viable a menos que el relleno tenga un consumo considerable de energía. Además, se deben pagar mensualmente los costos de acceso a la red de distribución según la tarifa establecida por la ARESEP
- ✓ Las tarifas de compra de electricidad por parte del ICE están sujetas a la regulación de la Autoridad Reguladora de Servicios Públicos (ARESEP). Sin embargo, en la actualidad, no existe en la regulación una metodología específica para la generación de electricidad con biogás de rellenos sanitarios. Las metodologías más cercanas se encuentran en la resolución RJD 004 2010, donde la ARESEP aprobó la metodología tarifaria basada en la estructura de costos típicos de una planta modelo de generación de electricidad con bagazo de caña, y la RJD-162-2011, similar pero aplicable a la biomasa distinta al bagazo. Este modelo ha permitido determinar una tarifa referencial y WACC para el análisis financiero del presente estudio
- ✓ A pesar de que se han acumulado experiencias en la generación eléctrica para autoconsumo, la falta de una legislación y metodología específicas ha obstaculizado, hasta la fecha, la realización de proyectos de generación eléctrica con biogás destinados a la venta en Costa Rica. Sin embargo, el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), a través de su programa de biogás, ha dado pasos significativos al llevar a cabo pruebas piloto. Actualmente, el precio de referencia más cercano es el de la energía generada a partir del bagazo de caña, que se sitúa en alrededor de \$95.82/MWh. Estas pruebas piloto han explorado la posibilidad de que, en lugar de que los Rellenos Sanitarios se involucren directamente en un proceso contractual con el ICE o cualquiera de sus concesionarios, opten por comercializar el biogás a uno de estos actores, permitiendo así que sean ellos quienes aprovechen y generen electricidad a partir del biogás. Hasta la fecha, no existe regulación alguna que prohíba esta práctica en el país, lo que representa una oportunidad para valorizar el biogás en la generación eléctrica a gran escala

- ✓ El Análisis de rentabilidad para una tarifa fija de venta de energía eléctrica a 95.82 \$/MWh arroja que, según las tasas internas de retornos obtenidas en el análisis financiero, el único proyecto de generación que no es rentable es para R2. Este proyecto tiene un TIR negativo y no es financieramente viable un proyecto de generación. El desafío radica en la baja capacidad de generación de energía eléctrica, el bajo porcentaje de biogás recolectado y en la distancia entre el sitio de generación y la subestación (4km). Como se analizó, los costos de inversión de las líneas eléctricas son mayores a los costos de inversión de la planta de generación. Con la finalidad de evaluar el comportamiento de la tarifa eléctrica en el proyecto de generación en el R2, se analizó la simulación de un escenario donde el CAPEX es subvencionado parcialmente, esta subvención se simula en forma de donación sobre el CAPEX y considerando un TIR = WACC. Los escenarios son 0%, 10%, 20% y 30%, se concluye, que el proyecto de generación en R2 con diferentes valores de subvención no logran producir electricidad a una tarifa de venta competitiva. Las tarifas obtenidas son 174,10\$/MWh, 164,25\$/MWh, 154,43\$/MWh y 144,58 \$/MWh, todos estos valores por encima al referencial de 95.82 \$/MWh.
- ✓ El Análisis de rentabilidad para una tarifa fija de venta de energía eléctrica a 95.82 \$/MWh, en función de la tasa interna de retornos obtenidas en el análisis financiero para los proyectos de generación en R3 y R4 son financieramente rentables, al presentar TIR 21.19 y 21.40 % respectivamente, mayores a la tasa de oportunidad establecidas. En el caso del R2, el TIR determinado es 10,02%
- ✓ El análisis de tarifas de venta de energía estableciendo la tasa interna de retorno igual a la tasa de oportunidad igual 10,64% permite concluir que los proyectos de generación que logran alcanzar una tarifa competitiva son R1 97,48 \$/MWh, R3 78,20\$/MWh y R4 70.10 \$/MWh.
- ✓ De manera global, la producción de biometano en Costa Rica es un desafío al no disponer de una red de gas natural para inyectar el biometano. Sin embargo, en el presente estudio se ha evaluado la posibilidad de producción de BioGNC y BioGNL a partir del biometano producido en las unidades de depuración de biogás de relleno.

En R3 se ha evaluado la producción de biometano para su utilización en una estación de GNC dentro del relleno, la principal dificultad se centra en identificar suficientes consumidores del bioGNC, al menos 120 vehículos pesados al día, para ello es necesario hacer pasar a todos los camiones y autobuses urbanos para cubrir la producción. Si los camiones no pasan durante un día toda la producción deberá ser almacenada, lo cual añade costos de inversión para las esferas de almacenamiento, o quemar el biogás en la antorcha. Por otro lado, movilizar flota de buses o camiones hasta el relleno para poder cargar de bioGNC tiene costos de desplazamiento asociados.

En el relleno sanitario R3, también se evaluó el escenario de un gasoducto virtual, donde se propone camiones que transporten el bio GNC desde el relleno sanitario hasta la estación de recarga de autobuses. Esta solución es compleja debido a la logística de distribución del biometano.

En el relleno sanitario R4, desde la consultoría no se recomienda la movilidad por carretera con la producción de biometano debido a que el caudal de producción es elevado y el parque de vehículos necesario para este consumo es muy importante. Por ello, se evaluó el escenario de licuefacción que produciría bio GNL, el cual posteriormente se puede cargar en los tanques de los camiones para su transporte y

entrega a los clientes: industriales o portuarios. La principal dificultad de este escenario es encontrar clientes, sin embargo, la ubicación geográfica de Costa Rica, es interesante en términos puertearías ya que aproximadamente un tercio de los nuevos buques en 2023 tienen motores híbridos GNL/diésel y podrían convertirse en clientes potenciales.

4.

ECOMENDACIONES

R

- ✓ Si bien las Municipalidades al tener la facultad para desarrollar tecnologías alternativas en el tratamiento de residuos y pueden incentivar el desarrollo por parte de los operadores de estos sistemas de valoración, la coordinación de estas acciones a nivel nacional propiciara mejores escenarios de impulso del sector de biogás.
- ✓ También se les permite establecer tasas diferenciadas u otro incentivo fiscal para aquellos que separen los residuos desde la fuente lo que traería consigo el desarrollo de tecnologías como la biometanización, donde se requieren de dicha separación en la fuente para producir biogás a partir de la fracción de RSO
- ✓ Aunque los GEI producidos en rellenos sanitarios y vertederos, representan el tercer sector con más emisiones en Costa Rica, deberá priorizarse acciones de control, seguimiento y desarrollo de alternativas de valoración que evite la emisión de biogás o restringir su gestión estrictamente, a una quema de alta eficiencia con el fin de garantizar la correcta destrucción de componentes con fuertes impactos socioambientales como CH₄ y el H₂S, u otros componentes que se transforman cuando la quema no es eficiente y terminan produciéndose gases con mayores impactos.
- ✓ Según las tendencias internacionales, se observa que los pasos dados se orientan a dejar atrás las prácticas de enterramiento de residuos y por el contrario se busca la promoción de tecnologías más amigables para el tratamiento de los residuos como o es la metanización y gasificación con propósitos de valorizar y crear economías circulares entorno a la gestión integral de todo tipo de residuos.
- ✓ Con el propósito de apoyar la conformación de medidas que ayuden a impulsar la valoración de biogás en Costa Rica, se recomienda adaptar la lista colombiana de equipos, materiales y otros elementos susceptibles a exención de aranceles. Se puede consultar dicha información pública en el siguiente link

http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/Anexos_Res045_Lista_de_bienes_y_servicios.pdf
- ✓ La existencia de incentivos estimulara la inversión en proyectos de generación eléctrica como lo establecido en la ley 7200 Art. 17 permite que las empresas productoras de energía autónoma y paralela apliquen a las mismas exoneraciones que el ICE para importan maquinaria y equipo de generación eléctrica.
- ✓ Incluir un enfoque de género transversal en los procesos de Viabilidad Ambiental a los que están sujetos las entidades administradoras de los rellenos y vertederos con el fin de determinar los impactos sociales y ambientales diferenciales por género. Esto puede contribuir a identificar retos y oportunidades de intervención específicos. Por

ejemplo, comprender cómo afecta la eliminación de residuos a los medios de subsistencia y la salud de mujeres y hombres de forma diferente puede servir de base para estrategias específicas.

- ✓ Incluir a las mujeres y establecer espacios exclusivos de discusión en los procesos de toma de decisiones. Las mujeres suelen tener perspectivas y conocimientos únicos relacionados con la gestión de residuos, ya que pueden estar más implicadas en la eliminación y el reciclaje de residuos domésticos.
- ✓ Integrar de manera transversal el género en las entidades que gestionan y administran los rellenos sanitarios. A través de diagnósticos de género, sensibilizaciones, capacitaciones en una primera etapa, para luego pasar a modificaciones en la estructura. Como modificaciones en las publicaciones de puestos ofrecidos, modificaciones en las instalaciones del relleno y los diferentes cargos, para ofrecer más oportunidades al ingreso de mujeres a este sector masculinizado, entre otros. Los rellenos sanitarios pueden ofrecer oportunidades de generación de ingresos mediante actividades como la clasificación de residuos, el reciclaje y el compostaje. Garantizar que estas oportunidades sean accesibles tanto a hombres como a mujeres, y que se les proporcione igual salario por igual trabajo, puede ayudar a abordar las disparidades de género en la capacitación económica.
- ✓ Los programas educativos sobre gestión de residuos y sostenibilidad medioambiental que dan algunas de las empresas que gestionan los rellenos, deben diseñarse teniendo en cuenta las necesidades y preferencias específicas de cada sexo. Esto puede ayudar a garantizar que tanto las mujeres como los hombres estén equipados con los conocimientos y habilidades necesarios para participar en prácticas sostenibles de gestión de residuos.
- ✓ Supervisar y evaluar periódicamente el impacto de las iniciativas de gestión de residuos en los distintos grupos de género para tomar decisiones informadas y ajustar las estrategias a lo largo del tiempo.
- ✓ Ofrecer programas de formación y capacitación específicamente diseñados para mujeres sobre la producción de biogás, la generación de electricidad y las habilidades técnicas relacionadas. Esto puede incentivar a las mujeres para participar activamente en el proceso.
- ✓ Fomentar una cultura del lugar de trabajo que sea integradora, respetuosa y libre de discriminación o acoso por razón de género. Fomenta la comunicación abierta y crea oportunidades para que las mujeres expresen sus opiniones e ideas sobre todo en medios altamente masculinizados como la gestión de residuos.
- ✓ Garantizar que las mujeres tengan las mismas oportunidades para desempeñar funciones de liderazgo y puestos de toma de decisiones dentro del proyecto de valorización del biogás. Esto podría incluir funciones en la gestión del proyecto o la supervisión técnica.

- ✓ Ofrecer modalidades de trabajo flexibles que se adapten a las diversas responsabilidades y horarios de las mujeres, en particular de aquellas que puedan tener responsabilidades de cuidado o domésticas. Esto podría incluir puestos a tiempo parcial, trabajo compartido u horarios flexibles.
- ✓ Identificar y abordar cualquier barrera cultural, social o logística que pueda dificultar la participación de las mujeres en el proyecto. Esto podría incluir la prestación de servicios de guardería o abordar los problemas de transporte que ya se han sido identificados por las empresas privadas que actualmente administran los rellenos.
- ✓ Evaluar por parte de la autoridad ambiental sobre exigir o no una renovación o modificación de la Viabilidad Ambiental cuando se incluyen actividades de generación de energía eléctrica mediante el biogás. En otros países de la región, como Colombia, las autoridades ambientales aún se encuentran evaluando los protocolos necesarios para solicitar nuevamente un EIA de estas actividades. Esto representaría costos adicionales al proyecto, pero permitiría establecer impactos diferenciados y exigencias de consultas diferenciadas para establecer las necesidades, preocupaciones o intereses particulares que aporten a la disminución de desigualdades de género.
- ✓ Ampliar la inclusión y la participación de las mujeres en sectores altamente masculinizados -como el caso de la gestión integral de residuos- mediante los procesos de licitación pública contribuyendo a eliminar patrones socioculturales patriarcales que dificultan su plena y efectiva incorporación en este sector económico, productivo y social.
- ✓ Crear ofertas de empleo inclusivas que atraigan a un abanico diverso de candidatos y generar incentivos para las mujeres considerando sus necesidades específicas. Algunas de las estrategias son:
 - Evitar utilizar lenguaje sexista y estereotipos en las descripciones de puestos. Utilizar un lenguaje neutro que no disuada inadvertidamente a las mujeres de presentar su candidatura.
 - Comunicar claramente las políticas como acuerdos laborales flexibles, permisos parentales y otras prestaciones que apoyen el equilibrio entre la vida laboral y personal.
 - Evitar los títulos sexistas (técnico, conductor, regidor)
- ✓ La generación eléctrica con biogás de rellenos sanitarios desempeña un papel clave en el Plan Nacional de Descarbonización el cual requiere de algunas actualizaciones técnicas y la inclusión de consideraciones importantes como:
 - Infraestructura adecuada: Es necesario invertir en la infraestructura adecuada para la captura y tratamiento del biogás en los rellenos sanitarios. Esto incluye sistemas de recolección y purificación del biogás.
 - Medidas de gestión de biogás claras: Se requiere para futuros sistemas de disposición final de residuos, aclarar el nivel que deben alcanzar las medidas para el tratamiento y gestión del biogás.

- Tecnología eficiente: Se deben implementar tecnologías eficientes para la conversión del biogás en electricidad, como motores de cogeneración o turbinas de gas
- ✓ Adaptar límites de emisiones para ciertos sectores donde progresivamente se reduzca el límite para alcanzar metas a mediano y largo plazo de reducción de emisiones GEI y así crear el mercado regulado de bonos de carbono.
- ✓ Contar con plataformas públicas sobre la certificación de bonos de carbono por medio de metodologías donde se registren las transacciones según las negociaciones entre privados para tener datos sobre el comportamiento del mercado
- ✓ Digitalizar los reportes operativos de los rellenos sanitarios, permitirá acceder a la información entregada por los operadores de una forma más ágil y clara.

5.

REFERENCIAS

- Agudelo, A., & Carmona, A. (2020). Metodología para el diseño de un sistema de captación y aprovechamiento de biogas proveniente de residuos sólidos urbanos. Pereira, Colombia.
- Andrade, A., Restrepo, A., & Tibaquirá, J. E. (15 de enero de 2018). *Estimación de biogás de relleno sanitario, caso de estudio: Colombia*. Obtenido de Scielo org: <http://www.scielo.org.co/pdf/ecei/v12n23/1909-8367-ecei-12-23-00040.pdf>
- Anthesis Lavola, Findeter, MinVivienda, MinAmbiente, & Departamento Nacional de Planeación. (2021). *Resumen ejecutivo - Estructuración y formulación de la NAMA de Residuos Sólidos Municipales*.
- Biogas Metano Latinoamérica. (28 de Agosto de 2023). *BIOGASMETANO LATINOAMERICA SAS*. Obtenido de BIOGASMETANO LATINOAMERICA SAS: <https://biogasmetano-latam.com/productos-sopladores-para-biogas/>
- Carbon, A. (18 de Julio de 2023). Definición de condiciones de mercado para la comercialización de bonos de carbono de biogas de rellenos sanitarios. (S. Ingeniería, Entrevistador)
- Castells, X. E. (5 de Mayo de 2012). Tratamiento térmico de gases.
- C-Deg. (2022). *Hofgass 2000 - Ficha técnica*.
- Condorchem envitech. (12 de Septiembre de 2023). *Tratamiento del biogás*. Obtenido de <https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-del-biogas/>
- Corporation Finance Institute CFI. (8 de December de 2022). *Levelized Cost of Energy (LCOE)*. Obtenido de <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/valuation/levelized-cost-of-energy-lcoe/>
- DFID_ & WEDC. (1998). *Recognising gender issues in the management of urban waste, Synthesis note No.5*. Obtenido de http://wedc.lboro.ac.uk/resources/books/Solid_Waste_Management_-_SN_5_-_Complete.pdf
- Direct Industry. (12 de Septiembre de 2023). *Variador de velocidad de alta eficacia*. Obtenido de <https://www.directindustry.es/prod/weg/product-12491-1400221.html>
- Endress + Hauser EH. (12 de Septiembre de 2023). *iTHERM CompactLine TM311*. Obtenido de <https://bdi-h->

- .endress.com/files/DLA/005056A500261EDCB38F79C6974A9D1E/BA01952TES_0322-00.pdf
- ENERGY, W. (s.f.). *Waga-Energy*. Obtenido de <https://waga-energy.com/es/tecnologia/>
- GIZ. (2011). *Recovering resources, creating opportunities*. Obtenido de <https://www.giz.de/de/downloads/giz2011-en-recycling-partnerships-informal-sector-final-report.pdf>
- Gobierno_de_Costa_Rica. (2018). *Plan de Descarbonización*. Obtenido de <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Plan%20Nacional%20de%20Descarbonizaci%C3%B3n%20-%20Espa%C3%B1ol.pdf>
- Herrera, J. A. (31 de agosto de 2020). Energía de la biomasa y el agua.
- INEC. (2022). *Sistema de indicadores ODS 2021 : tomo 1, informe de capacidades estadísticas*. Obtenido de https://admin.inec.cr/sites/default/files/2022-12/reodsinec_tomoi_2021.pdf
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (Mayo de 2008). ELABORACIÓN DE BALANCES HÍDRICOS POR CUENCAS HIDROGRÁFICAS Y PROPUESTA DE MODERNIZACIÓN DE LAS REDES DE MEDICIÓN EN COSTA RICA. San Jose , Costa Rica.
- International Bank for Reconstruction and Development. (2023). State and trends of carbon pricing 2023. Washington.
- Invest Pacific. (2023). *Agroindustria en el Valle del Cauca*. Obtenido de <https://investpacific.org/agroindustria/>
- Madrigal, R., & Alpízar, F. (2023). *Análisis de oportunidades para la introducción de instrumentos fiscales que incentiven la descarbonización del sector de gestión de residuos en Costa Rica*. Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- María T. Varnero, M. C. (12 de Septiembre de 2023). *SciELO*. Obtenido de Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás : https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642012000200005
- Martin, S. (Octubre de 1997). Producción y Recuperación del biogás en vertederos controlados de residuos sólidos urbanos: Análisis de variables y modelización. Gijón.
- MGS. (12 de Septiembre de 2023). *MGS - quality products trusted service since 1988*. Obtenido de <https://www.mgs.co.uk/product/non-boxed-landfill-manifolds/>
- MINAE. (s.f.). Obtenido de Sistema Costarricense de Información Jurídica: http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=53029
- MINAE_BIOFIN_PNUD. (2023). *Análisis sobre la igualdad de género y el empoderamiento de las mujeres en su diversidad en el sector de ambiente, energía y mares*. Obtenido de <https://www.undp.org/es/costa-rica/publicaciones/analisis-sobre-la-igualdad-de-genero-y-el-empoderamiento-de-las-mujeres-en-su-diversidad-para-el-primer-plan-estrategico>
- Ministerio de Ambiente. (10 de 2023). Contexto Mercados de Carbono . Colombia.
- Ministerio de Ambiente y Energía. (2013). *Reglamento de regulación y operación del mercado doméstico de carbono (N° 37926 - MINAE)*. Sistema Costarricense de Información Jurídica.
- Ministerio de Salud de Costa Rica. (2011). *Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos*. Obtenido de <https://residuoselctronicosal.org/wp-content/uploads/2020/05/Poli%CC%81tica-nacional-para-la-gestio%CC%81n-integral-de-residuos-2010-2021.pdf>
- Ministerio de Salud de Costa Rica. (2016). *Estrategia Nacional de Separación, Recuperación y Valorización de Residuos (ENSRVR), 2016-2021*. Obtenido de <https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/biblioteca-de-archivos->

- left/documentos-ministerio-de-salud/ministerio-de-salud/planes-y-politicas-institucionales/planes-institucionales/estrategias-planes-institucionales/729-estrategia-nacional-de-reciclaje-
- Norgaard, K. (2005). Gender Equality and State Environmentalism. *In Gender and Society*, 19(4).
- NUK Automatisierung Analysentechnik. (12 de Septiembre de 2023). *Gas Analyzing System NGA 5*. Obtenido de <https://www.nuk-gmbh.de/Downloads/Gas%20Analyzing%20System%20NGA5-E.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2019). *Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (UTF/ARG/020/ARG) - Colección Documentos Técnicos N° 12*. Food & Agriculture Org.
- Perez, K. A., & Avila, J. A. (2006). Determinacion de Humedad con Tecnicas Nucleares y Produccion de Biogas en Rellenos Sanitarios. Bogota, Colombia.
- PNUD_Costa_Rica_INAMU_MINAE. (2023). *Plan de Accion de Género y Cambio Climatico*. Obtenido de <https://www.undp.org/es/costa-rica/publicaciones/plan-de-accion-nacional-sobre-igualdad-de-genero-en-la-accion-por-el-clima>
- SecretaríaConsejoNacionalAmbiental. (2020). *PLAN NACIONAL DE COMPOSTAJE 2020-2050*. Obtenido de <https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2021/05/Plan-Nacional-de-Compostaje-2020-2050.pdf>
- Superintendencia de Servicios Publicos, Departamento Nacional de Planeacion, & Presidencia de la Republica . (2021). *Informe Nacional de disposicion final de residuos solidos 2020*. Obtenido de https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/2022-01/informe_df_2020.pdf
- Ulate, D. (2023). *Ubicacion de rellenos sanitario y centros de transferencia*. San José: Ministerio de Salud.
- UWT Level Control. (12 de Septiembre de 2023). Obtenido de <https://www.uwtgroup.com/es/mwdownloads/download/link/id/3096/>
- WIKA. (12 de Septiembre de 2023). *WIKA*. Obtenido de Transmisor de presión: https://www.wika.es/upload/DS_PE8158_es_es_65534.pdf

6.

NEXOS

- Anexo 1. Formato de encuesta enviada a los operadores de los sitios de disposición final.
- Anexo 2. Matriz de evaluación multicriterio
- Anexo 3. Metodologías de caracterización de residuos y biogás
- Anexo 4. Matriz multicriterio para la selección de los sitios a muestrear
- Anexo 5. Detalles técnicos de los sistemas de captura, tratamiento y valoración de biogás.
- Anexo 6. Propuestas y Cotizaciones para presupuestación sistema de captura y conducción
- Anexo 7. Registros fotográficos de la campaña de muestreo
- Anexo 8. Trazados y esquemas de las propuestas