

Desarrollo de una estrategia integral para la gestión y aprovechamiento energético del biogás en
el relleno sanitario regional la cortada del municipio de Pamplona (Norte de Santander-
Colombia)

Diana Alexandra Gómez García

Asesor

Carlos Alberto Vera Romero

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería-ECBTI

Programa Ingeniería Industrial

2025

Dedicatoria

Primero que todo le doy gracias a Dios por darme la oportunidad de cada día adquirir conocimientos, aplicarlos en mi campo laboral y profesional colocándolos al servicio de la comunidad.

A mis padres quienes me han educado con valores y humildad siempre me inculcaron ser buena persona y tener perseverancia para cumplir mis metas.

A mi hijo y pareja quienes me impulsan a seguir mis sueños con sacrificio y dedicación animándome cada día para lograr cada paso que doy.

Mis hermanas mis cómplices de toda mi trayectoria y aventuras quienes con perseverancia me enseñaron a luchar y superar cada reto y obstáculo en el camino.

Agradecimientos

Primeramente, a Dios por permitirme superarme como persona, a la universidad UNAD por ser facilitadores en el proceso por medio del programa ingeniería industrial. Donde he adquirido conocimiento y experiencias en el desarrollo de cursos en el transcurso de mi carrera profesional.

Al docente Carlos Alberto Vera Romero por facilitar a través de su dirección en el proyecto de investigación con aportes y orientaciones claras para la culminación de este trabajo.

A la empresa de servicios públicos de Pamplona EMPOPAMPLONA S.A. E.S.P. quienes me abrieron las puertas para desarrollar un proyecto fundamental y de contribución a la sostenibilidad ambiental.

Resumen

En los rellenos sanitarios la disposición final de residuos sólidos es la técnica más utilizada. En Colombia según la superintendencia de servicios públicos el 94% de residuos son llevados a rellenos sanitarios.

En el relleno sanitario regional la cortada se logró reducir el área ocupada y mitigar los impactos ambientales asociados a la descomposición anaeróbica de los residuos sólidos. Durante el desarrollo de la investigación se abordó la generación de biogás, compuesto principalmente por metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), ambos considerados gases de efecto invernadero (GEI). Las acciones implementadas permitieron disminuir la generación y liberación de estos gases, evidenciando el cumplimiento de los objetivos planteados y contribuyendo a la reducción de las emisiones contaminantes y a la protección del entorno ambiental.

La cortada es donde se disponen los residuos sólidos de Pamplona y de 13 municipios más 6 de Santander Tona, Surata, Vetas, Charta, Matanza, California y 7 de Norte de Santander Toledo, Chitaga, Labateca, Cacota, Silos, Mutiscua, Cucutilla.

El presente trabajo de investigación se evaluó el desarrollo de una estrategia integral para la gestión y aprovechamiento energético del biogás en el relleno sanitario para reducir la emisión de gases de efecto invernadero y aprovechar este para proponer fuentes de energía. Se realizó el análisis y evaluación de viabilidad para su aprovechamiento teniendo en cuenta las tecnologías existentes y aplicables de acuerdo con la normativa, se realizó monitoreo y medición cumpliendo con la cuantificación y caracterización de la producción de gases en cada una de las chimeneas de las celdas de disposición convirtiéndose una alternativa para el desarrollo de este proyecto.

Palabras clave: *aprovechamiento energético, biogás, energía renovable, gestión de gases de efecto invernadero, relleno sanitario.*

Abstract

In landfills, the final disposal of solid waste is the most commonly used technique. In Colombia, according to the Superintendence of Public Services, 94% of waste is taken to landfills.

At the regional landfill, the cut allowed reducing the occupied area and mitigating the environmental impacts associated with the anaerobic decomposition of solid waste. During the development of the research, biogas generation was addressed, composed mainly of methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂), both considered greenhouse gases (GHGs). The actions implemented made it possible to reduce the generation and release of these gases, demonstrating the fulfillment of the objectives set and contributing to the reduction of pollutant emissions and the protection of the environmental surroundings.

The landfill is where the solid waste from Pamplona and 13 other municipalities, plus 6 from Santander: Tona, Surata, Vetás, Charta, Matanza, California; and 7 from Norte de Santander: Toledo, Chitagá, Labateca, Cacota, Silos, Mutiscua, Cucutilla, are disposed of.

This research work evaluates the development of a comprehensive strategy for the management and energy utilization of biogas in the sanitary landfill to reduce greenhouse gas emissions and take advantage of it to propose energy sources. The analysis and feasibility evaluation for its utilization were carried out considering the existing and applicable technologies in accordance with regulations, monitoring and measurement were conducted, complying with the quantification and characterization of gas production in each of the chimneys of the disposal cells, becoming an alternative for the development of this project.

Keywords: *energy recovery, biogás, renewable energy, greenhouse gas management, landfill, municipal solid waste.*

Tabla de contenido

Introducción	15
Formulación del problema	17
Justificación	19
Objetivos.....	21
Objetivo general.....	21
Objetivos específicos	21
Marco teórico	22
Generación de residuos.....	22
Operación del relleno sanitario regional la cortada	23
Criterios de aceptación	26
Horarios	28
Registros de control de ingreso y seguimiento de operación	28
Maquinaria.....	29
Mantenimiento preventivo.....	30
Mantenimiento correctivo.....	30
Equipos para la operación del relleno sanitario la cortada	32
Reglamento interno.....	33
Perfiles y funciones de cargo	33
Método de disposición final	34
Recepción y descarga.....	34

Condiciones de ingreso.....	34
Exclusión de residuos peligrosos.....	35
Manejo de desechos especiales.....	36
Programa de compactación.....	41
Densidad de compactación	41
Proceso de construcción de la celda	41
Descarga ordenada de residuos sólidos:	42
Formación de la celda -extendido:.....	42
Compactación de los residuos:	43
Llenado del Sitio:.....	43
Programa de manejo de lixiviados.....	44
Control de lixiviados.....	44
Sistema de recepción y tratamiento de lixiviados	45
Recepción de lixiviados.....	47
Tratamiento de lixiviados	48
Caudal de lixiviado promedio actual	49
Cerca Perimetral	50
Canales perimetrales.....	50
Biogás	51
El Metano (CH ₄).....	52
Propiedades del metano	52
Fuentes de metano	52
Impacto ambiental del metano.....	53

Aplicaciones del metano.....	53
Dióxido de carbono (CO ₂)	53
Fuentes de dióxido de carbono	53
Impacto ambiental	54
Aplicación dióxido de carbono.....	54
Factores que intervienen en la generación del biogás	54
Caracterización y composición de los residuos	55
Composición.....	55
Residuos orgánicos:	55
Residuos inorgánicos:.....	55
Caracterización	55
Análisis fisicoquímico:	55
Potencial de generación del biogás:.....	55
Modelo colombiano de generación del biogás	55
Características.....	56
Ecuación de degradación:	56
Parámetros específicos:.....	56
Estimación de generación de metano:	56
Aplicabilidad en colombia:.....	56
Ventajas	56
Opciones tecnológicas del uso del biogás.....	63
Generación de electricidad	63
Generación de calor	63

Combustible vehicular	64
Inyección a la red de gas natural.....	64
Producción de biocombustibles	64
Uso directo de cocina.....	64
Producción de hidrogeno	64
Ventajas	64
Estrategia colombiana de desarrollo bajo en carbono	65
Análisis del ciclo de vida	66
Marco referencial	67
Ubicación del sitio	67
Capacidad operativa.....	68
Vida útil del relleno	70
Marco legal	70
Antecedentes.....	74
Estudios internacionales.....	75
Estudios nacionales.....	76
Estudios locales.....	77
Metodología	79
Resultados.....	86
Fase 1	86
Caracterización de los residuos	89
Caracterización fisicoquímica del lixiviado en cada etapa a fin de determinar la eficiencia de las unidades.....	91

Resultados obtenidos	92
Manejo de gases.....	93
Matriz DOFA.....	95
Medición y monitoreo del biogás en el campo	105
Clausura del relleno sanitario	113
Propuesta de una alternativa de una estrategia integral para el aprovechamiento del biogás .	114
Fase 3	114
Evaluación de la estrategia	120
Análisis de resultados	120
Conclusiones	123
Recomendaciones	125
Referencias bibliográficas.....	126

Lista de figuras

Figura 1 Organigrama relleno sanitario	33
Figura 2 Esquema procedimental para la exclusion de residuos peligrosos	36
Figura 3 Celda de disposicion final de los residuos solidos	44
Figura 4 Diagrama de flujo de la planta de lixiviados	46
Figura 5 Sistema de recepcion y tratamiento de lixiviados	47
Figura 6 Diagrama de flujo de recepcion de lixiviados	47
Figura 7 Diagrama de flujo sistema de tratamiento de lixiviados	48
Figura 8 Sistema de tratamiento de lixiviados	49
Figura 9 Generacion de biogas relleno sanitario La Glorita Pereira Colombia	59
Figura 10 Generacion de biogas relleno sanitario Doña Juana Bogota Colombia	60
Figura 11 Generacion de biogas relleno sanitario Don Juanito Villavicencio Colombia.....	61
Figura 12 Generacion de biogas relleno sanitario Antanas Pasto Colombia	62
Figura 13 Usos del biogas según tratamientos.....	65
Figura 14 Relleno sanitario La Cortada	67
Figura 15 Celdas de disposicion final y chimeneas del relleno La Cortada	88
Figura 16 Diagrama de flujo de la planta de lixiviados	91
Figura 17 Grafica de remocion de la planta.....	93
Figura 18 Chimenea de gas.....	94
Figura 19 Descripcion de la matriz DOFA	95
Figura 20 Diagrama de flujo evaluacion economica	96
Figura 21 Diagrama de la planta de compresion y tratamiento del biogas	117

Lista de Tablas

Tabla 1 Descripción de la normatividad que se aplica en el relleno sanitario la cortada	23
Tabla 2 Descripción del formato de registro de entrada de los vehículos	28
Tabla 3 Equipos para utilizar en el relleno sanitario la cortada	32
Tabla 4 Descripción de la disposición de los residuos especiales en el relleno sanitario la cortada	37
Tabla 5 Especificaciones del bulldozer para el movimiento de material.....	42
Tabla 6 Presentación de las distribuciones porcentuales de los gases	51
Tabla 7 Descripción de alternativas tecnológicas.....	80
Tabla 8 Descripción de análisis de parámetros de biogas.....	84
Tabla 9 Clasificación y caracterización de residuos	89
Tabla 10 Los análisis físicoquímicos de DQO	92
Tabla 11 Toneladas dispuestas de la vigencia 2019	97
Tabla 12 Toneladas dispuestas de la vigencia 2020	98
Tabla 13 Toneladas dispuestas de la vigencia 2021	99
Tabla 14 Toneladas dispuestas de la vigencia 2022	100
Tabla 15 Toneladas dispuestas de la vigencia 2023	102
Tabla 16 Toneladas dispuestas de la vigencia 2024	104
Tabla 17 Descripción de la medición y monitoreo realizado en las chimeneas día 1	106
Tabla 18 Descripción de la medición y monitoreo realizado en las chimeneas día 2	107
Tabla 19 Descripción de la medición y monitoreo realizado en las chimeneas día 3	108
Tabla 20 Descripción de la medición y monitoreo realizado en las chimeneas día 4	109

Tabla 21 Descripción de la medición y monitoreo realizado en las chimeneas día 5	110
Tabla 22 Descripción de los datos solicitados	111
Tabla 23 Descripción de las formulas a utilizar.....	112
Tabla 24 Datos de velocidad y dirección se las chimeneas	113
Tabla 25 Estrategia 1	115
Tabla 26 Estrategia 2	118

Lista de Apéndices

Apéndice A Dron utilizado para la toma de ubicación de fuentes de emision de gases.....	130
Apéndice B Equipo de muestreo de gases	130
Apéndice C Cuadrícula para recorrido de vuelos	131
Apéndice D Plano actualizado del relleno sanitario la cortada.....	132
Apéndice E Formato de entrada RSU al relleno sanitario la cortada	132
Apéndice F Formato de entrada RSU al relleno sanitario la cortada otros municipios.....	133
Apéndice G Muestreo de gases.....	134
Apéndice H Manual de operaciones relleno sanitario	134
Apéndice I Manual de operaciones planta lixiviados	135

Introducción

En Colombia, la disposición final de residuos sólidos se realiza principalmente en rellenos sanitarios, los cuales concentran aproximadamente el 94% de los residuos generados en el país (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2015).

El aprovechamiento del biogás se ha convertido en una alternativa sostenible y renovable para la generación de energía, reduciendo la dependencia de los combustibles reduciendo el impacto ambiental (Botero, 2020). En el relleno sanitario la captura del biogás minimiza las emisiones de GEI también ofrecen oportunidad de producir energía renovable.

El biogás es un combustible renovable que se produce a partir de la descomposición anaeróbica del material orgánico, como los residuos sólidos biodegradables. El aprovechamiento del biogás se ha convertido en una alternativa sostenible para la generación de energía renovable, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero la descomposición aeróbica produce biofertilizantes de alta calidad y mayor eficiencia en comparación con los procesos anaeróbicos. La combinación de ambos procesos resulta en una estrategia eficiente para maximizar los beneficios de cada tratamiento.

Diversos estudios han demostrado la viabilidad del aprovechamiento del biogás en diferentes contextos. Según Hernández (2018) analizó la generación de biogás a partir de residuos sólidos biodegradables, mientras que Quevedo (2022) evaluó la implementación de sistemas de captura de biogás en rellenos sanitarios.

presenta un caso de implementación de un sistema de captura de biogás en un relleno en Portoviejo. Estos proyectos proporcionan una base sólida para que las tecnologías y estrategias sean más efectivas en el aprovechamiento energético del biogás.

En Colombia, el aprovechamiento del biogás se encuentra respaldado por un marco normativo favorable que promueve el uso de energías renovables y la reducción de emisiones (Velásquez & Castiblanco, 2021), realizaron una revisión de las políticas y normas relacionadas con las energías renovables orientadas al desarrollo del biogás en el país, en la cual se evidencia un marco normativo favorable que impulsa su crecimiento y aprovechamiento como fuente energética sostenible.

En el marco del proyecto de desarrollo de una estrategia integral para la gestión y aprovechamiento energético del biogás en el relleno sanitario la cortada, este estudio buscó analizar las tecnologías de captura y tratamiento del biogás, con la implementación de este sistema de aprovechamiento energético se puede lograr promover la sostenibilidad ambiental. Los resultados obtenidos en el desarrollo de la estrategia evidencian que se puede reducir un 60% en las emisiones asociadas a la liberación de biogás generado por la descomposición anaeróbica de los residuos sólidos en el relleno sanitario regional la cortada.

Formulación del problema

La disposición final de residuos sólidos en el relleno sanitario la cortada, representa uno de los principales desafíos ambientales y energéticos en Pamplona, debido a la generación de gases producto de la descomposición anaerobia de la materia orgánica. Entre estos gases se encuentra el metano (CH_4), considerado uno de los gases de efecto invernadero con mayor potencial de calentamiento global, el cual, cuando no es captado ni tratado adecuadamente, contribuye significativamente al deterioro ambiental, la contaminación atmosférica y el incremento de riesgos para la salud pública y la seguridad operacional del relleno sanitario.

En muchos rellenos sanitarios del país, la gestión del biogás se limita únicamente a sistemas básicos de venteo o quema controlada, desaprovechando el potencial energético que posee este recurso. Esta situación genera no solo impactos ambientales negativos asociados a las emisiones de gases contaminantes, sino también la pérdida de una alternativa viable para la producción de energía renovable y la reducción de costos operativos en la gestión integral de residuos sólidos.

Adicionalmente, la ausencia de estudios técnicos y económicos detallados sobre tecnologías de captura, tratamiento y aprovechamiento energético del biogás dificulta la toma de decisiones para la implementación de soluciones sostenibles y eficientes dentro de la infraestructura de los rellenos sanitarios. Factores como las condiciones operativas, la composición de los residuos, la generación estimada de biogás, los costos de inversión y mantenimiento, así como los beneficios ambientales y económicos, deben ser evaluados de manera integral para determinar la viabilidad de dichas tecnologías.

En este contexto, surge la necesidad de desarrollar una estrategia de las tecnologías de captura y tratamiento de gases aplicables al relleno sanitario, con el fin de identificar las alternativas más adecuadas para las condiciones ambientales y operativas existentes. Asimismo, es fundamental evaluar la viabilidad técnica y económica de las tecnologías seleccionadas, así como cuantificar los beneficios ambientales y energéticos derivados de su implementación, contribuyendo de esta manera a la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero y al fortalecimiento de estrategias de aprovechamiento energético sostenible.

¿De qué manera las tecnologías de captura, tratamiento y aprovechamiento energético del biogás generado en el relleno sanitario la cortada puede contribuir a la reducción del impacto ambiental y al aprovechamiento sostenible de los residuos sólidos, considerando su viabilidad técnica, económica y ambiental?

Justificación

Para la gestión y aprovechamiento del biogás se justifica por su potencial para mitigar el cambio climático, generar energía renovable, mejorar la calidad de vida, cumplir con normativa ambiental y generar oportunidades económicas. En el relleno sanitario regional la cortada, la falta de un sistema para capturar y tratar el biogás permite su liberación directa al aire, lo que agrava el impacto ambiental y desaprovecha su posible uso como fuente energética.

Este estudio resulto significativo al ofrecer alternativas factibles para manejar y valorizar dichos gases, integrando criterios técnicos, económicos y ecológicos. Así mismo, busco ofrecer posibles prácticas sostenibles en la disposición de residuos sólidos, en concordancia con la normativa ambiental vigente y los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), especialmente en lo referente a la acción climática y la promoción de energía limpia.

Desde la perspectiva de la ingeniería industrial, la investigación pretendió mejorar procesos, impulsar la innovación tecnológica y generar información útil para futuros proyectos.

Dentro de los beneficios económicos esta la generación de energía renovable para la generación de energía, calor o combustible generando ingresos adicionales para la operación del relleno sanitario a través de la venta de energía. Ahorro de costos asociados con la gestión de residuos y mitigación de impactos ambientales, evitando sanciones y costos asociados con la no conformidad con las regulaciones ambientales.

La implementación de prácticas sostenibles en la gestión de residuos trae consigo beneficios sociales significativos. Al mejorar la calidad de vida de la comunidad, se promueve la conciencia ambiental y se fomenta la educación en prácticas sostenibles; esto no solo permite

cumplir con las normas ambientales vigentes, sino también manifiesta compromiso con la sostenibilidad y la protección del medio ambiente.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar una estrategia de gestión integral para la captura, tratamiento y aprovechamiento energético de los gases producidos en el relleno sanitario regional la cortada, con el fin de mitigar el impacto ambiental fomentando la sostenibilidad en la región.

Objetivos Específicos

Analizar las tecnologías de captura y tratamiento de gases del relleno sanitario, con el fin de identificar las opciones más adecuadas para las condiciones operativas y ambientales.

Evaluar la viabilidad técnica y económica de las tecnologías seleccionadas, para determinar su potencial de implementación y rentabilidad dentro de la infraestructura.

Cuantificar los beneficios ambientales y económicos de la implementación de las tecnologías propuestas, con el propósito de justificar la inversión y contribuir a la mitigación del impacto ambiental de la región.

Marco teórico

Generación de residuos

La generación de residuos es un proceso esencial en las actividades humanas y económicas. Los residuos pueden ser clasificados en diferentes categorías, incluyendo residuos sólidos urbanos, industriales, agrícolas y peligrosos. La gestión adecuada es fundamental para reducir su impacto en el medio ambiente y salud pública.

Existen diversas tecnologías para la captura y tratamiento del biogás, incluyendo sistemas de captura pasivos y activos, métodos de purificación biológicos y químicos. La selección de la tecnología adecuada depende de factores como la calidad del biogás, y los objetivos de aprovechamiento; esta puede ser utilizada para generar energía eléctrica, térmica o como combustible vehicular. La cogeneración de energía a partir de biogás es una práctica común que permite maximizar la eficiencia energética y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero GEI.

De acuerdo con la (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2015) en Colombia se generaron aproximadamente 13,8 millones de toneladas de residuos sólidos en el año 2014, el departamento nacional de planeación estimó que en 2014 la generación de residuos sólidos urbanos y rurales fue de aproximadamente 13,8 millones de toneladas anuales, con una producción per-capital de 283 kg por persona. Asimismo, se proyecta que para el año 2030 la generación alcanzará cerca de 18,74 millones de toneladas, lo que representa un incremento significativo del 13,4% (Departamento Nacional de Planeación, 2016).

La generación de residuos en el municipio de Pamplona durante los periodos anteriores a disminuido gracias al aprovechamiento de residuos por parte de las empresas encargadas como

lo son la asociación de Renacer y Nueva Corporación Ambientalista y de Reciclaje Ecología y Paz (CAREP) que junto con la empresa EMPOPAMPLONA S.A. E.S.P. encargada de realizar la disposición final de los residuos en el relleno sanitario regional la cortada. El desafío ha sido eliminar los residuos que su vida útil ya ha finalizado y no tiene forma de hacer aprovechamiento, el 60% de residuos son orgánicos y es ahí donde se deben empezar a tratar y así se extenderá la vida útil del relleno para disponer solo lo no aprovechable.

El relleno sanitario la cortada opera bajo un marco normativo el cual garantiza la protección del medio ambiente y la salud pública, en la siguiente tabla se presentan algunas de las normas más relevantes que se aplican en el relleno:

Operación del relleno sanitario regional la cortada

Tabla 1

Descripción de la normatividad que se aplica en el relleno sanitario la cortada

Titulo	Descripción	Quien la expide
Ley 09 de 1979	Por el cual se dictan medidas sanitarias.	El congreso de la República de Colombia
Ley 142 de 1994	Por el cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.	El congreso de la república

Decreto 1713 de 2002	Por el cual se reglamenta la ley 142 de 1994, la ley 632 del 2000 y la ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo, y el decreto ley 2811 1974 y la ley 99de 1993 en relación con la gestión integral de residuos sólidos.	El presidente de la república de Colombia
Decreto 1505 de 2003	Por el cual se modifican parcialmente el decreto 1713 de 2002, en relación con los planes de gestión integral de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones.	El presidente de la república de Colombia
Decreto 838de 2005	Por el cual se modifica el decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones.	Presidencia de la república

Decreto 2981 de 2013	Por el cual se reglamenta la prestación del servicio público de aseo.	Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible; Ministerio de vivienda, ciudad y territorio
Resolución 754 de 2014	Por el cual se adopta la metodología para la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los planes de gestión integral de residuos sólidos.	Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible; Ministerio de vivienda, ciudad y territorio
Resolución 1045 de 2003	Por la cual se adopta la metodología para la elaboración de los planes de gestión integral de los residuos sólidos, PGIRS, y se toman otras determinaciones.	Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible; Ministerio de vivienda, ciudad y territorio (hoy en día Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible)
Resolución 541 de 1997	Por medio de la cual se regula el cargue, descargue, transporte, almacenamiento y	Ministerio del medio ambiente (hoy en día

disposición final de	ministerio de ambiente y
escombros, materiales,	desarrollo sostenible)
elementos, concretos y	
agregados sueltos, de	
construcción, de demolición y	
capa orgánica, suelo y	
subsuelo de excavación.	

Fuente. Adaptado del manual de funciones de (EMPOPAMPLONA S.A. E.S.P. 2024).

Criterios de aceptación

En el relleno sanitario se aceptan los residuos sólidos provenientes de sectores residenciales, comerciales, institucionales, industrial y barrido de vías y áreas públicas del municipio de Pamplona y de 13 municipios más los cuales son: Vetas, Surata, California, Matanza, Tona, Charta, Toledo, Chitaga, Labateca, Cacota, Cucutilla, Silos, Mutiscua.

De acuerdo con el artículo 32 del decreto 4741 del 2005 del ministerio de ambiente, está prohibido ingresar residuos o desechos peligrosos en rellenos sanitarios si no existen celdas de seguridad dentro de estos, autorizadas para la disposición final de este tipo de residuos, de lo contrario estos deben ser excluidos del relleno sanitario con el fin de proteger las aguas subterráneas de la contaminación, prevenir la incompatibilidad con otros materiales del relleno que afecten la estabilidad del mismo, y evitar la afectación del sistema de tratamiento de lixiviados.

Es por lo que dentro de las instalaciones del relleno sanitario la cortada no se aceptan en ninguna circunstancia los siguientes tipos de residuos:

Desechos clínicos resultantes de la atención médica prestada en hospitales, centros médicos y clínicas.

Desechos de medicamentos y productos farmacéuticos.

Desechos de carácter explosivo que no estén sometidos a una legislación diferente.

Residuos inflamables.

Residuos con una concentración de disolventes halogenados.

Desechos de aceites minerales no aptos para el uso a que estaban destinados.

Residuos líquidos.

Residuos con un contenido de agua superior al 65%, si distorsionan la labor ordinaria de disposición; puesto que los residuos aceptados no pueden superar en ningún caso el 10% de la cantidad de residuos depuestos mensualmente, aunque se efectúe en las condiciones normales de explotación de la instalación.

Residuos con contenido de hidrocarburos.

Residuos que contengan sustancias que puedan emitir olores que, en las condiciones normales de explotación de la instalación, puedan ser detectados en el entorno de esta.

Residuos transportables en camión cisterna.

Residuos radiactivos.

Sustancias y artículos de desecho que contengan, o estén contaminados por, bifenilos policlorados (PCB), terfenilos policlorados (PCT) o bifenilos polibromados (PBB).

Desechos resultantes de la producción o el tratamiento de coque de petróleo y asfalto.

Desechos resultantes de la producción de hidrocarburos halogenados alifáticos (tales como cloro metano, diclorometano, cloruro de vinilo, cloruro de alilo y epicloridrina).

Horarios

El horario para el funcionamiento de disposición de los residuos es necesario para garantizar correctamente todas las tareas como el mantenimiento de la máquina, limpieza y mantenimiento de la red de zanjas perimetrales para la captación de aguas pluviales, mantenimiento de canalizaciones y pozos de lixiviados para el tratamiento adecuado, caminos de acceso y mantenimiento de chimeneas.

El acceso de vehículos es controlado por el servicio de vigilancia que se encuentra en la entrada del relleno de acuerdo con las normas para la recepción de los residuos. De acuerdo con el manual de operaciones del relleno sanitario la Cortada el horario establecido es 6 días a la semana por 24 horas de lunes a sábado.

Registros de control de ingreso y seguimiento de operación

Los registros son tomados por el operador en estos formatos se registra el ingreso de vehículos, entrada de visitantes y control de disposición.

Tabla 2

Descripción del formato de registro de entrada de los vehículos

N°	Descripción
1	Hora de llegada del vehículo
2	N° de placa del vehículo
3	Lugar de procedencia, municipio o entidad
4	Ruta atendida
5	Peso del vehículo más los residuos que contiene

6	Peso del vehículo después de la descarga
7	Peso neto de los residuos dispuestos
8	Hora de salida del vehículo
9	CC: camión compactador
10	V: volqueta
11	CM: camión
12	P: vehículo
13	RS: ruta selectiva
14	O: otros
	Observaciones: si se trata de otro
15	vehículo particular.

Fuente: Adaptado del Manual de Operaciones del Relleno Sanitario Regional La Cortada (EMPOPAMPLONA, 2024).

Maquinaria

La importancia de la maquinaria adecuada puede ayudar a reducir costos, mejorar la eficiencia y seguridad, por eso en la cortada se usa un bulldozer el cual se encarga de la compactación de residuos sólidos y cubrimiento de estos.

Mantenimiento preventivo

Según el manual de operaciones del relleno sanitario la cortada mediante el mantenimiento preventivo se pretende realizar un conjunto de operaciones en todos y cada uno de los equipos de las instalaciones, de forma anticipada y con carácter sistemático, para conseguir que se disminuyan al máximo el factor de averías, roturas, accidentes y sus consecuencias.

El programa de mantenimiento preventivo a llevar a cabo en las instalaciones será el mismo utilizado en la disposición final, y en forma esquemática será el siguiente:

Se realiza un estudio exhaustivo de los aparatos que integrarán la parte mecánica y eléctrica de las instalaciones, basado en los manuales editados por las empresas suministradoras de los equipos. Se confeccionan una ficha de mantenimiento para cada equipo. Cada ficha describirá todas las operaciones de mantenimiento a realizar con un equipo concreto, así como su periodicidad. Incluirá además los intervalos de engrase y cambios de aceite con los tipos de materiales a emplear. Una vez realizado este estudio y confeccionadas las fichas de mantenimiento, valiéndose de ellas como soporte, se confeccionará el plan director de mantenimiento y engrase.

En él se distribuirá a lo largo del año, las distintas operaciones especificadas en las fichas. Igualmente se determinarán las distintas operaciones por su carácter de intervención, con especificación teórica de la duración de cada grupo de operaciones. Se confeccionarán los diarios de inspección, basados en las fichas de mantenimiento.

Mantenimiento correctivo

Se entiende como mantenimiento correctivo al conjunto de operaciones necesarias para reparar las averías y roturas producidas en los equipos durante su funcionamiento. Esta actividad

estará relacionada directamente con la actividad del programa de mantenimiento preventivo, por lo cual la tendencia de su evolución generará las correcciones precisas o adecuadas sobre el mantenimiento preventivo implantado.

El equipo de mantenimiento correctivo dispondrá en su archivo del expediente completo de cada equipo, en el que figurarán los siguientes datos:

Ficha de identificación de la máquina con fotografía.

Emplazamiento.

Características del equipo.

Clasificación del equipo.

Horas de funcionamiento.

Fichas de lubricantes y engrase.

Historial de lubricación y engrase con observaciones.

Características de los elementos auxiliares.

Planos.

Dirección y datos del fabricante.

Historias de las averías.

Observaciones más importantes.

Piezas de recambio.

Instrucciones de mantenimiento del fabricante.

Este expediente estará controlado por el servicio de mantenimiento correctivo. Se mantendrá al día y se reflejará el historial de la máquina con todas sus incidencias.

Equipos para la operación del relleno sanitario la cortada

La maquinaria de tratamiento debe seleccionarse en función del número de toneladas diarias a tratar, y en un caso como el que nos ocupa, debe ser versátil para poder realizar varias tareas (compactación, extracción de material de cobertura, mantenimiento de caminos, cortafuegos, etc.) ya que de lo contrario, el alto costo de disponer de maquinaria específica para cada labor, puede incrementar los costos de explotación hasta hacerlos inviables si el número de toneladas sobre la que hay que repercutir es escaso. Para la correcta gestión del relleno sanitario La Cortada se ha considerado la siguiente maquinaria:

Tabla 3

Equipos para utilizar en el relleno sanitario la cortada

Equipo	Función	Unidad
Retro excavadora	Excavación, acarreo, colocación y compactación del material de cobertura y de los residuos sólidos en el sitio de disposición final.	1
Bulldozer D85 LT	Acarreo de desechos en épocas de lluvia desde el sitio donde descargan los carros recolectores hasta el frente de trabajo.	1
Bascula		1

Pesaje de los vehículos con
los residuos.

Fuente: Adaptado del manual de operaciones del relleno sanitario regional la cortada (EMPOPAMPLONA, 2024).

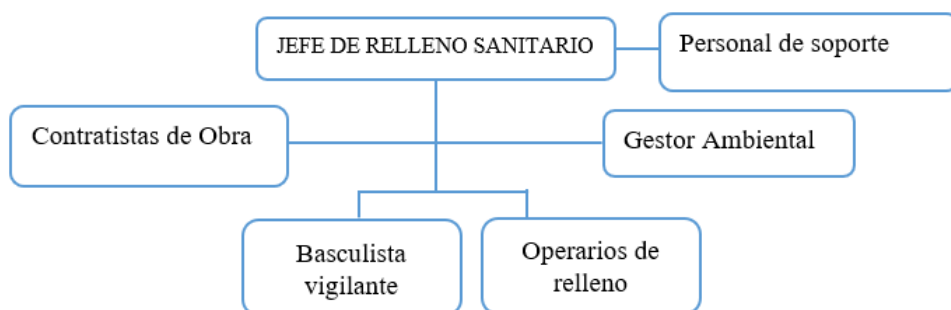
Reglamento interno

Perfiles y funciones de cargo

Según EMPOPAMPLONA, para llevar a la práctica de una forma eficaz los objetivos planteados hay que disponer de una organización dotada de los recursos tanto humanos como materiales suficientes para ejecutar todos los trabajos y servicios objeto de este contrato. Este desarrollo organizativo determina la elección de los medios a emplear, las instalaciones necesarias y el apoyo técnico aportado por esta empresa. Las funciones y operaciones del personal que aparecen en el organigrama serán las que a continuación se citan: La supervisión de la operación del relleno será responsabilidad de la gerencia del proyecto.

Figura 1

Organigrama del relleno sanitario



Nota: Fuente: Adaptado del manual de operaciones del relleno sanitario regional la cortada (EMPOPAMPLONA, 2024).

Método de disposición final

Recepción y descarga

La instalación cuenta con un sistema de control conformado por una báscula eléctrica y su correspondiente ordenador que registra la cantidad de toneladas el operador se encarga de registrar en un formato y en un tique la fecha, hora y la cantidad del pesaje que genera la báscula también coloca la placa del vehículo entregando la copia al conductor quedando el original para la empresa encargada.

Condiciones de ingreso

De acuerdo con el manual de operación del relleno La Cortada los residuos deben acceder a la instalación en vehículos convenientemente acondicionados, de manera que no produzcan derrames ni esparcimiento volátil en su recorrido por el interior de la instalación. En caso contrario el encargado del relleno sanitario de la cortada advertirá al conductor del vehículo en primer apercibimiento, pudiendo prohibir el acceso en caso de reincidencia.

Si se produjeran derrames de residuos en los accesos o en el interior del depósito como consecuencia de las deficientes condiciones de transporte, el conductor responsable del vehículo

será asimismo responsable de su recogida y retirada, teniendo el operador los medios y útiles elementales para ello.

El conductor o responsable del vehículo estará atento en todo momento a lo que disponga y ordene el personal encargado del centro de tratamiento, facilitando cuantos datos sean precisos para la identificación de la carga y su procedencia, así como siguiendo las instrucciones que se le indiquen para su descarga.

No se admitirá presencia de personal en el frente de trabajo salvo autorización expresa del operador.

El operador será responsable del control de acceso al recinto.

Está expresamente prohibido descargar residuos fuera de las zonas establecidas para ello y en particular sobre viales y accesos.

A partir de la descarga sobre el lugar indicado los vertidos pasan a ser propiedad del titular de la instalación.

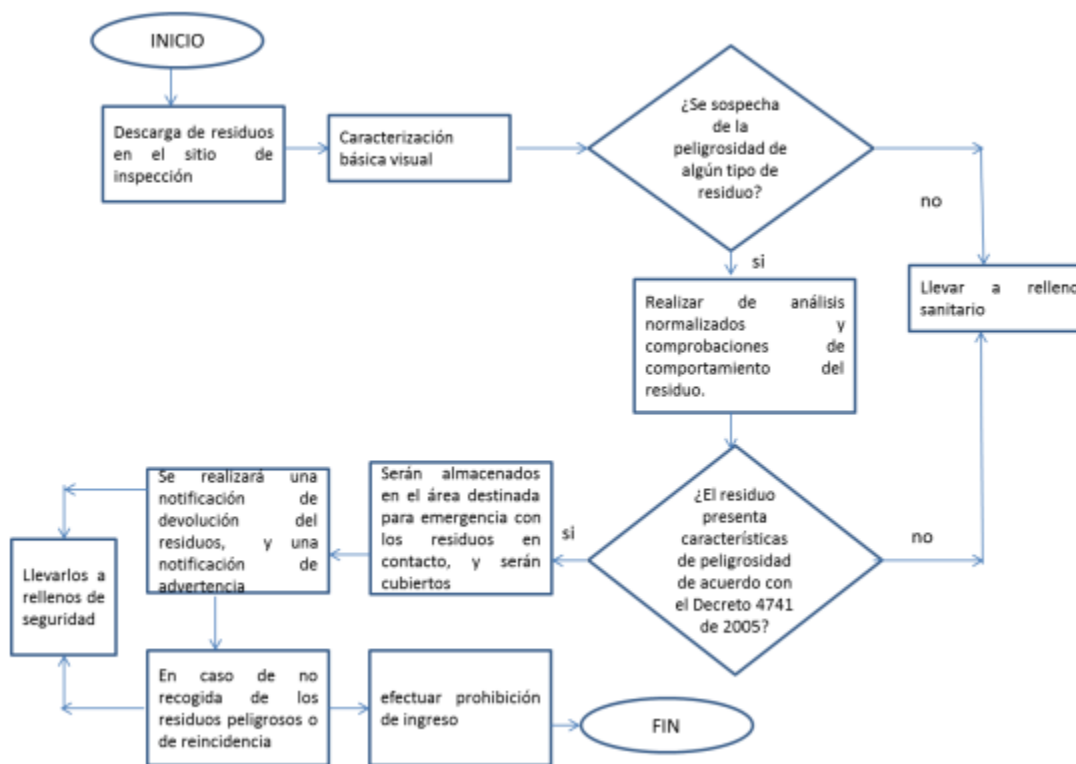
Exclusión de residuos peligrosos

En el momento que los residuos sean descargados se debe realizar una revisión visual de lo que contiene, si se considera que no es aceptable por su peligrosidad, el supervisor está facultado para rechazar estos residuos en el relleno sanitario no deben permanecer más de 48 horas, se registrara fecha y hora de ingreso y se reportara a la empresa encargada y se notificara la devolución de los residuos.

En este sentido se deberá seguir el siguiente esquema procedimental:

Figura 2

Esquema procedimental para la exclusión de residuos peligrosos



Nota: Fuente: Adaptado del manual de operaciones del relleno sanitario regional la cortada (EMPOPAMPLONA, 2024).

Manejo de desechos especiales

Algunos tipos de desechos requieren tratamiento especial como lo indica la siguiente tabla:

Tabla 4

Descripción de la disposición de los residuos especiales en el relleno sanitario la cortada

Manejo de Residuos Especiales	
Animales Muertos	<p>El tratamiento ideal para este tipo de residuos es la incineración, sin embargo, en ausencia de éste, se puede realizar lo siguiente: Los animales pequeños como perros y gatos pueden incorporarse generalmente en el relleno sin un tratamiento especial; los animales voluminosos como vacas y caballos requieren una disposición especial. Estos animales deben colocarse en el fondo de la celda, al final de las operaciones del día, en el área que va a ser rellenada en el siguiente día laborable. El animal debe cubrirse inmediatamente con un mínimo de 60 cm de suelo previa adición de cal sobre los cadáveres, antes de la colocación y compactación de desechos sólidos sobre el animal. El contacto entre animales muertos y el personal de operación debe reducirse al mínimo posible.</p>

Llantas y Colchones

Estos residuos se deben recolectar para posteriormente colocarse en o cerca al fondo de la celda. Estos deben compactarse hasta conseguir la máxima reducción de volumen posible. Los desechos sólidos situados alrededor de los desechos voluminosos deben sobre compactarse con el fin de impedir la recuperación de volumen de los desechos no voluminosos y de compensar el grado de compactación final. También pueden ser utilizadas para darle peso al material plástico utilizado como cobertura diaria para evitar su levantamiento por la acción eólica.

Escombros y Demoliciones

Este tipo de residuos no se recibirán en el relleno sanitario La Cortada, teniendo en cuenta que es responsabilidad del generador enviar a sitios que cuente con todas las características técnicas para su disposición.

Los lodos desecados procedentes de plantas de tratamientos no peligrosos y bien

Lodos desecados Procedentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Negras

digeridos pueden ser dispuestos en el relleno exitosamente si se mezclan con desechos sólidos más secos antes de su compactación. Un lodo bien digerido no debe ser volátil ni causar problemas de olores. Aparentemente el lodo es forzado a ocupar los vacíos de los desechos sólidos compactados que de otra manera estarían ocupados por aire. Otros lodos estabilizados no peligrosos no pueden aceptarse en el relleno. Los lodos procedentes de plantas de tratamiento a base de alumbre no deben aceptarse debido a la dificultad para su desecación. Ningún desecho líquido o peligroso debe aceptarse. Se deben ejecutar análisis químicos periódicos a todos los desechos que tengan posibilidad de portar sustancias peligrosas.

Desechos de Mataderos y Carnicerías

Los desechos generados durante el procesamiento de animales pueden aceptarse en el relleno si no se dispone de otras alternativas tales como incineración o aprovechamiento (reciclaje o compostaje).

Este tipo de desecho debe cubrirse inmediatamente de manera similar a la descrita para animales voluminosos.

Recortes de Césped

El producto de la poda de césped debe separarse de otros desechos y llevarse al sitio en camiones diferentes. Estos desechos deben almacenarse en un lugar convenientemente alejado de las instalaciones. Las pilas de almacenamiento deben mezclarse semanalmente para acelerar el compostaje y reducir los refugios de los roedores. El césped compostado puede utilizarse como abono con la cobertura final o la hierba puede utilizarse sin compostar como elemento para prevenir la erosión. Ningún material que contenga materia putrefacta debe ser compostado o regado para el control de la erosión. Se recomienda que la grama no sea incorporada al relleno propiamente dicho debido a la dificultad de compactarla y los grandes asentamientos que genera.

Nota: Fuente: Adaptado del manual de operaciones del relleno sanitario regional la cortada (EMPOPAMPLONA, 2024).

Programa de compactación

El programa de compactación en el relleno sanitario es una estrategia clave para optimizar la disposición de los residuos sólidos, ya que permite reducir su volumen, aumentar la estabilidad del terreno y prolongar la vida útil del sitio. Mediante el uso de maquinaria especializada, los residuos se comprimen en capas controladas, disminuyendo la presencia de vacíos que podrían generar asentamientos o infiltraciones. Además, esta práctica contribuye al control de olores, vectores y emisiones de gases, mejorando las condiciones ambientales y operativas del relleno sanitario.

Densidad de compactación

Con base en el peso aproximado del buldócer de 13 toneladas, para el relleno sanitario de la cortada se tendrá una compactación de mediana densidad calculada en aproximadamente 1213.5kg/m^3 , para la cual también se tiene en cuenta el proceso de descomposición de la materia orgánica y el peso propio de las capas o celdas superiores que producen mayor carga. Las dimensiones de la celda diaria fueron consideradas con base en:

Experimentalmente y para la estabilidad de los taludes se recomienda una altura de un metro.

Proceso de construcción de la celda

El proceso de construcción de la celda diaria se realizará en 4 etapas principales:

Descarga ordenada de residuos sólidos: Durante esta etapa los residuos serán descargados en el frente de trabajo de manera ordenada, de manera ágil y eficaz, procurando no interferir en la ruta de los vehículos recolectores.

Para dicha maniobra se debe verificar que no haya personal en el frente de trabajo, que la operación haya sido previamente autorizada, y que el vehículo sea vaciado en su totalidad. El proceso de descarga se realizará desde la base del relleno sanitario, para lo cual se deberá tener en cuenta: Los residuos se descargarán en la base, justo al pie de la pendiente. Una vez los vehículos compactadores dispongan los residuos deberán retirarse de manera inmediata, procurando no causar interferencias en la operación del relleno sanitario.

Formación de la celda -extendido: una vez los residuos son descargados, se procede a realizar la formación de la celda mediante el arrastre y conglomeración de los residuos.

Tabla 5

Especificaciones del bulldozer para el movimiento del material

BULLDOZER D85 LT NEW HOLLAND	
Potencia	84 hp (63 kw) @ 2.000
Peso operativo	13000 kg (28.600 lbs)
Capacidad de la hoja	1,6 m ³ (2,2 y d3)

Nota: Fuente: Adaptado del manual de operaciones del relleno sanitario regional la cortada (EMPOPAMPLONA, 2024).

El extendido se realizará en capas que permitan una adecuada compactación, por lo que estas se realizarán con un grosor entre 0,30 a 0,45 metros, respondiendo a las dimensiones proyectadas y continuo a la disposición de los vehículos recolectores, por lo que se realizará de manera sucesiva hasta alcanzar la altura dimensionada de la celda diaria (1m). No obstante, se debe tener en cuenta que por cada capa de residuos dispuestos se deberá efectuar compactación procurando garantizar como mínimo 3 a 5 pasadas del Bulldozer sobre ellos. El operador del buldócer respetará las dimensiones de la celda diaria proyectada, y esta será ajustada en dado caso de no cumplirse.

Compactación de los residuos: una vez es dispuesta cada capa de residuos, se procede a hacer la compactación de estos, para lo cual se realizará como mínimo 3 a 5 pasadas equivalentes a la energía realizada por un Bulldozer tipo D5 o D4, sobre los montos realizados.

Llenado del Sitio: Para el proceso de llenado se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

Cada vez que se termine un proceso de llenado se deberá hacer cubrimiento con tierra, con un espesor de aproximadamente 0,20m

Para la conformación de las terrazas los taludes externos se construirán en una proporción de 3:1 (H: V), el cual deberá ser cubierto con tierra una vez se haga su conformación.

Programa de manejo de lixiviados

Control de lixiviados

Figura 3

celda de disposición final de los residuos sólidos



Nota: Fuente: Adaptado del Manual de operaciones del relleno sanitario regional la cortada (EMPOPAMPLONA, 2024).

El lixiviado se recolecta mediante un sistema de filtros colocados en el fondo del relleno y en las plataformas de base de disposición final. las celdas se comunican entre sí horizontal y verticalmente a través de filtros construidos entre los residuos, permitiendo el libre flujo de los lixiviados hasta el fondo de la plataforma más cercana donde se encuentran los filtros que vierten al sistema de alcantarillado, a la piscina de lixiviados para su almacenamiento y posterior eliminación.

Debido a que el lixiviado se genera en la biodegradación de los residuos orgánicos, en la consolidación de los desechos sólidos y en la cantidad de agua lluvia que logre infiltrarse en el

relleno, se deduce que es necesario orientar el control a minimizar la infiltración de las aguas lluvias en el relleno. Al cubrir los desechos debe tomarse la precaución de no dejar zonas planas donde puedan formarse encharcamientos de agua lluvia que termine percollando a través del relleno.

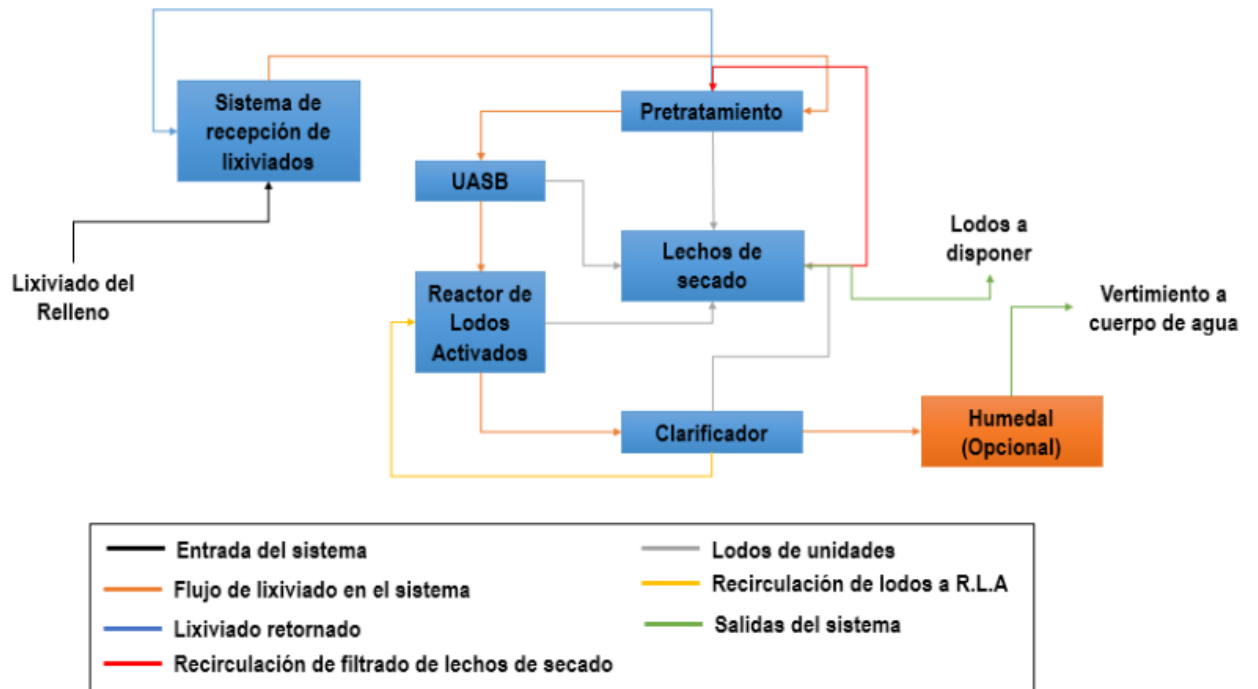
En la zona del fondo se dispone una tubería longitudinalmente a la zona de vertido con una serie de ramificaciones conformando una “espina de pescado”. La tubería, para la recogida de lixiviados, se coloca encima de la geomembrana y las bocas de captación se distribuyen de manera que abarquen toda la zona de disposición. Consiste en una red de tuberías perforadas de HPDE de 6” de diámetro, esta red desemboca en un colector, que conduce los lixiviados por gravedad directamente hasta la piscina para su almacenamiento. La tubería se coloca sobre la lámina de geotextil de forma que recoge el filtrado de la capa de áridos. Los drenajes son tipo dren francés que se instalan sobre el geotextil empleando bolo de río de 2” a 3” pulgadas en promedio con una tubería de 4 pulgadas perforada en su interior, que conducen a un colector principal de 6”. El diámetro exterior que sale de la celda es de 6”, y el sistema cuenta con una pendiente del 2%.

Sistema de recepción y tratamiento de lixiviados

Dentro del sistema de recepción y tratamiento de lixiviados el relleno cuenta con una planta de sistema de tipo biológico, caracterizado por un pretratamiento donde se retiran sólidos sedimentables del sistema (consta de una trampa grasa y un presedimentador) con un sistema secundario que corresponde a un reactor UASB y un reactor de lodos activados (RLA) a continuación se presenta en la Figura 4 el diagrama de flujo y en la figura 4 una fotografía de la planta de tratamiento donde se observa las partes del sistema.

Figura 4

Diagrama de flujo de la planta de lixiviados



Nota: Fuente: Adaptado del Manual de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de lixiviados (EMPOPAMPLONA, 2024)

Figura 5

Sistema de recepción y tratamiento de lixiviados



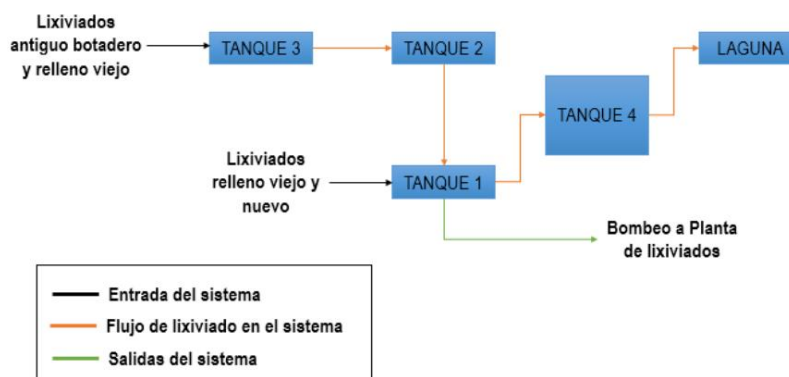
Nota: Fuente: Adaptado del manual de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de lixiviados (EMPOPAMPLONA, 2024).

Recepción de lixiviados

Este sistema este compuesto por 4 tanques de almacenamiento y una laguna. El tanque 1 recibe el lixiviado de la celda de disposición y la que ya está clausurada, conectado a los demás tanques y es el que realiza el bombeo al sistema de tratamiento.

Figura 6

Diagrama de flujo de recepción de lixiviados



Nota: Fuente: Adaptado del manual de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de lixiviados (EMPOPAMPLONA, 2024).

Tratamiento de Lixiviados

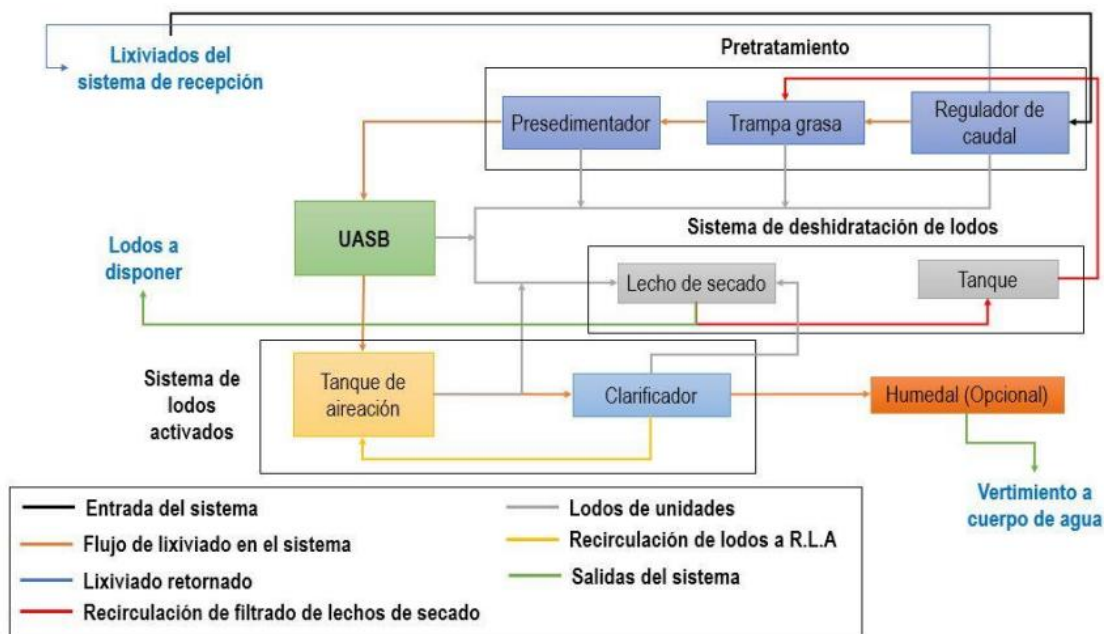
El STL está compuesto por el pretratamiento, un tratamiento biológico anaerobio y aerobio. El primero agrupa las unidades de regulación de caudal, trampa de grasas y presedimentador, el segundo a un Reactor UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) es un reactor anaerobio de flujo ascendente de alta eficiencia.

Finalmente llega a un sistema aerobio de lodos activados compuesto por un tanque de aireación, un sistema de aireación, un clarificador y una bomba de recirculación de lodos.

En la Figura 7 se observa el diagrama de flujo del (Standard Tessellation Language) STL con las líneas de conducción de lixiviado en el sistema, de igual forma en la Figura 8 se presenta una fotografía del (Standard Tessellation Language) STL.

Figura 7

diagrama de flujo sistema de tratamiento de lixiviado



Nota: Fuente: Adaptado del manual de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de lixiviados (EMPOPAMPLONA, 2024).

Figura 8

Sistema de tratamiento de lixiviados



Nota: Fuente: Adaptado del manual de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de lixiviados (EMPOPAMPLONA, 2024).

Caudal de lixiviado promedio actual

Para validar el caudal que ingresa al sistema, se realizan mediciones a la entrada y salida de la unidad de regulación. Este procedimiento se realiza siempre que hay bombeo, se utiliza un balde de 12L, una probeta de 1L y cronómetro. Se mide el tiempo que tarda en llenarse el recipiente seleccionado obteniendo el caudal mientras la bomba está encendida, así mismo, se mide el tiempo que la bomba permanece encendida y apagada, de tal forma se estima el porcentaje de tiempo que bombea lixiviado y por ende el volumen que ingresa al sistema por día, se mide el caudal que ingresa al sistema mientras la bomba está encendida al menos 4 veces por día, se promedia los valores obtenidos para tener mayor precisión y exactitud en las mediciones

Cerca Perimetral

A lo largo de todo el perímetro del sitio se instalará una cerca de malla con alambre de púas en la parte superior con postes cada 5m. Se debe efectuar mantenimiento de la cerca perimetral cada vez que esta lo amerite, por cual se debe realizar inspección una vez al mes de la zona perimetral del área del relleno para garantizar su completo cierre.

Los postes para las cercas son de madera redonda con una longitud de 1,80 m libres, un diámetro mínimo de 10 cm y enterrados en una profundidad de 40 cm. Los postes deben ser de madera sana, rectos, sin partes carcomidas ni rajaduras, o en su efecto de concreto o sintéticos. La distancia entre postes no es mayor de 5m y éstos deben colocarse verticales y alineados por el lado en que vaya a fijarse el alambre de púas.

El alambre debe ser de tres (3) hilos retorcidos, de acero galvanizado calibre 12,5 ASW, con púas de 2 o 4 puntas de alambre de acero galvanizado No. 9 y longitud entre 1.0 y 1.5 pulgadas. En los postes de esquina y de anclaje se deben usar al menos dos grapas para fijar el alambre. Los postes terminales, de esquina y de anclaje deben "arriostrarse".

Canales perimetrales

Las aguas lluvias procedentes del área del relleno que se encuentren parcialmente terminadas, serán descargadas temporalmente a un sistema de zanjas y de allí se conducirán a las afueras de la zona de operación. Se efectuarán las siguientes acciones de mantenimiento sobre ellas:

Deberán ser limpiadas semanalmente de residuos o cobertura vegetal que impida el libre flujo de agua sobre ellas.

Las canales que no cuenten con impermeabilización serán asentadas y reconformadas con pisón de mano a lo largo y ancho de las mismas, una vez al mes en época de verano, y 1 vez semanal en época de invierno.

En los puntos donde se generen encharcamientos se deberá efectuar la nivelación con tierra del mismo relleno, hasta garantizar una pendiente que garantice el óptimo flujo y evacuación del agua superficial.

Se garantizará las medidas de diseño de estas, y el óptimo flujo de agua.

Biogás

El biogás es un combustible renovable generado por la descomposición anaeróbica de la materia orgánica y está compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

Tabla 6

Presentación de las distribuciones porcentuales de los gases

Componente	Porcentaje (base volumen seco)
Metano	45 - 60
Dióxido de carbono	40 - 60
Nitrógeno	2 - 5
Oxígeno	0,1 – 1,0
Amoniaco	0,1 – 1,0
Sulfuros, Disulfuros, mercaptanos, etc	0 - 1,0

Hidrógeno	0 – 0,2
Monóxido de Carbono	0 – 0,2
Cantidades traza	0,01 – 0,6
Características	Valor
Contenido de Humedad	Saturado
Densidad Especifica	1,02 – 1,06

Nota: Fuente: (Tchobanoglous y Kreith, 2002).

El Metano (CH₄)

El metano es un gas altamente inflamable y con un potencial de calentamiento global aproximadamente 28 veces mayor que el dióxido de carbono (Martín, 1997).

Propiedades del metano

Densidad: El metano es más ligero que el aire.

Inflamabilidad: El metano es altamente inflamable y puede arder en presencia de oxígeno.

Poder calorífico: Tiene un alto poder calorífico, lo que hace una fuente de energía eficiente.

Fuentes de metano

Gas Natural: El metano es la principal fuente del gas natural, fuente de energía fósil.

Biogás: La descomposición anaeróbica de materia orgánica, como en los rellenos sanitarios.

Actividades Humanas: La agricultura, gestión de residuos y producción de energía, también pueden generar metano.

Impacto ambiental del metano

Gases de Efecto Invernadero GEI: El metano es un potente gas con un potencial de calentamiento global 28 veces mayor que el dióxido de carbono.

Cambio Climático: La liberación de metano en la atmósfera hace que aumente la temperatura global y los fenómenos climáticos externos.

Aplicaciones del metano

Generación de Energía: Es utilizado como combustible para generar electricidad y calor en centrales térmicas y plantas de cogeneración.

Combustible Vehicular: El metano comprimido (GNC) utilizado para el combustible de vehículos.

Industria: Es usado como materia prima en la industria química y petroquímica.

Dióxido de carbono (CO₂)

El dióxido de carbono es un gas de efecto invernadero que desempeña un papel fundamental en el ciclo del carbono y en el calentamiento global (Arroyo & Ramírez, 2020).

Fuentes de dióxido de carbono

Respiración: La respiración de los seres vivos produce CO₂ como subproducto.

Combustión: La quema de combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo y el gas natural, libera CO₂ en la atmosfera.

Procesos Industriales: Como la producción de cemento y fabricación de productos químicos también emiten CO₂.

Impacto ambiental

Gases de Efecto Invernadero: Contribuye al calentamiento global y cambio climático.

acidificación de los océanos: Al ser absorbido por los océanos puede causar la acidificación del agua, lo que afecta a los ecosistemas marinos.

Aplicación dióxido de carbono

Industria Alimentaria: Se usa para carbonatar bebidas y como conservante.

Industria Química: Es usado como materia prima en la producción de productos químicos, como el carbonato de sodio y el metanol.

Extintores de Incendios: Se utiliza en extintores de incendios debido a su capacidad para desplazar el oxígeno y enfriar.

Factores que intervienen en la generación del biogás

Decimos que la cantidad y calidad del biogás generado por el relleno varía según los factores ambientales como la humedad de los residuos, la composición, las características del sistema de operación, condiciones climáticas, entre otras.

Caracterización y composición de los residuos

La caracterización y composición de los residuos son fundamentales para entender su potencial de generación de biogás. Aspectos clave:

Composición

Residuos orgánicos: Restos de alimentos, frutas y verduras, son ricos en carbono y nitrógeno, ideales para la producción del biogás.

Residuos inorgánicos: Plásticos y vidrio no son biodegradables y no contribuyen a la producción del biogás.

Caracterización

Análisis fisicoquímico: Permite determinar su composición y características, como PH, humedad y contenido de nutrientes.

Potencial de generación del biogás: Depende de su composición y características, como la relación carbono/nitrógeno y el contenido de sólidos volátiles.

Modelo colombiano de generación del biogás

El modelo colombiano de generación de biogás permite estimar la producción de metano en rellenos sanitarios a partir de la cantidad de residuos dispuestos y las condiciones climáticas locales (Andrade, Restrepo, & Tibaquirá, 2018), evalúa el potencial de producción de biogás en distintos rellenos sanitarios del país a partir de los residuos sólidos urbanos. En su estudio, los

autores explican las condiciones necesarias para implementar este modelo y comparan los resultados teóricos con datos experimentales obtenidos en el relleno sanitario La Glorita, en Pereira. A partir de esta evaluación, se identifican alternativas para el aprovechamiento del biogás generado en estos sistemas de disposición final.

Características

Ecuación de degradación: El modelo utiliza la ecuación para estimar la generación de biogás en función del tiempo y la cantidad de residuos dispuestos.

Parámetros específicos: Requiere datos específicos del relleno sanitario, como el año de apertura y clausura, índices de disposición anual y ubicación del sitio.

Estimación de generación de metano: Estima la generación del metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂) en función de la cantidad de residuos dispuestos y la tasa de degradación (Stege, 2010).

Aplicabilidad en Colombia: El modelo está diseñado para ser utilizado en Colombia y tiene en cuenta las condiciones climáticas y de disposición de los residuos del país. (Andrade, Restrepo, & Tibaquirá, 2018).

Ventajas

El modelo proporciona una estimación precisa de la generación de biogás en función de la cantidad de residuos dispuestos y la tasa de degradación.

Puede ser utilizado para evaluar diferentes escenarios de disposición de residuos y estimar el potencial del biogás.

Utiliza herramientas para la toma de decisiones en la planificación y gestión de rellenos sanitarios.

Ecuacion1.

Fórmula Matemática relacionada con los rellenos sanitarios y generación del biogás.

$$Q_{LFG} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0,1}^1 2kL_0 \left[\frac{M_i}{10} \right] (e^{-kt_{ij}})(MCF)(F)$$

Donde:

Q_{LFG} : Flujo de biogás máximo esperado ($m^3/año$);

i : Incremento en tiempo de 1 año;

n : (año del cálculo)- (año inicial de disposición de residuos);

j : Incremento de tiempo en 0.1 años;

k : Índice de generación de metano ($1/año$);

L_0 : Generación potencial de metano (m^3/Mg);

M_i : Masa de residuos dispuestos en el año i (Mg);

t_{ij} : Edad de la sección j de la masa M_i en el año i ;

MCF : Factor de corrección de metano;

F : Factor de ajuste por incendios.

Este modelo se basa en la ecuación de degradación propuesta por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. Environmental Protection Agency-EPA, 2018).

El modelo utiliza información para proyectar los índices de humedad basados en la precipitación anual media en Colombia.

Seco (precipitación < 500 mm/año)

Moderadamente seco (precipitación 500 – 999 mm/año)

Moderadamente húmedo (precipitación 1000 – 1499 mm/año)

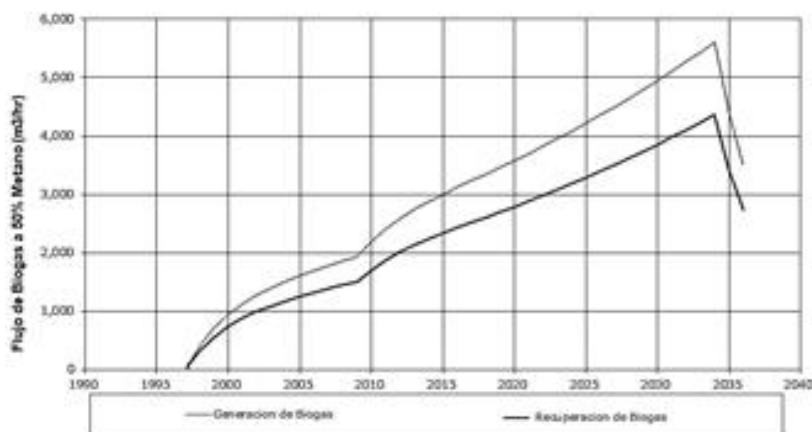
Húmedo (precipitación 1500 – 1999 mm/año)

Excesivamente Húmedo (precipitación > 2000 mm/año)

La generación de biogás total se calcula sumando las cantidades en cada una de las categorías de residuos. Las figuras 11 a la 14 a continuación muestran la evaluación del modelo colombiano de biogás aplicado en algunos rellenos del país.

Figura 9

Generación de biogás relleno sanitario La Glorita, Pereira, Colombia.



Nota: Fuente: (U.S. Environmental Protection Agency, 2018).

La gráfica presenta la evolución temporal del flujo de biogás a 50% de metano, expresado en metros cúbicos por hora (m^3/h), desde aproximadamente 1995 hasta 2040. Se muestran dos curvas:

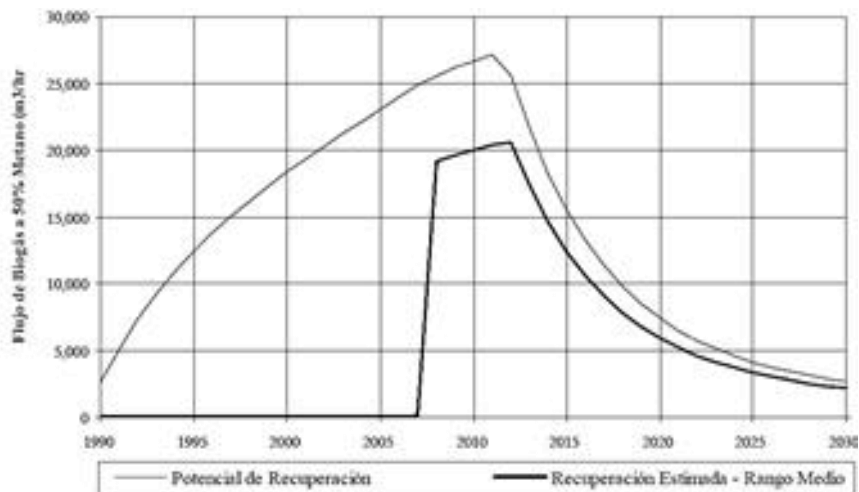
Generación de biogás (línea superior en la mayor parte del intervalo).

Recuperación de biogás (línea inferior).

La diferencia constante entre la línea de generación y la línea de recuperación sugiere que no todo el biogás generado es efectivamente capturado.

Figura 10

Generación de biogás relleno sanitario Doña Juana, Bogotá, Colombia



Nota: Fuente: (U.S. Environmental Protection Agency,2018).

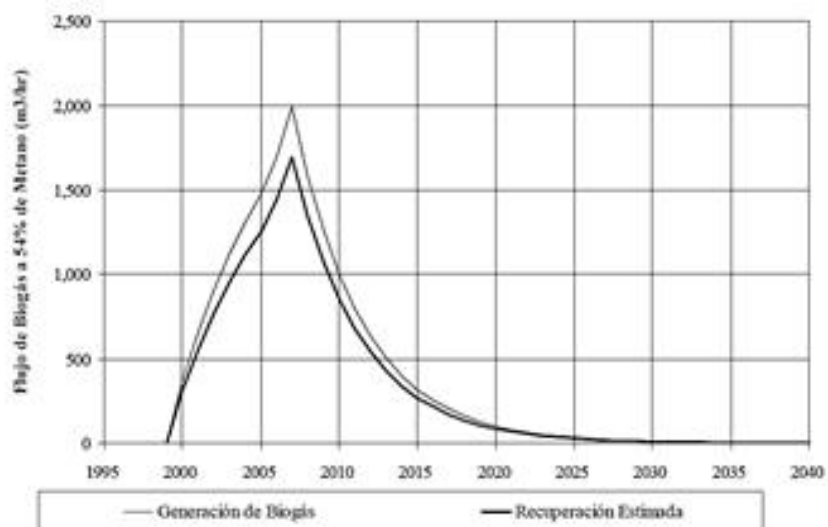
La gráfica muestra la evolución del flujo de biogás al 50 % de metano (m³/h) desde el año 1990 hasta 2030, comparando:

Potencial de recuperación (línea suave y más alta).

Recuperación estimada – Rango medio (línea más gruesa).

Figura 11

Generación de biogás relleno sanitario Don Juanito, Villavicencio, Colombia



Nota: Fuente: (U.S. Environmental Protection Agency,2018).

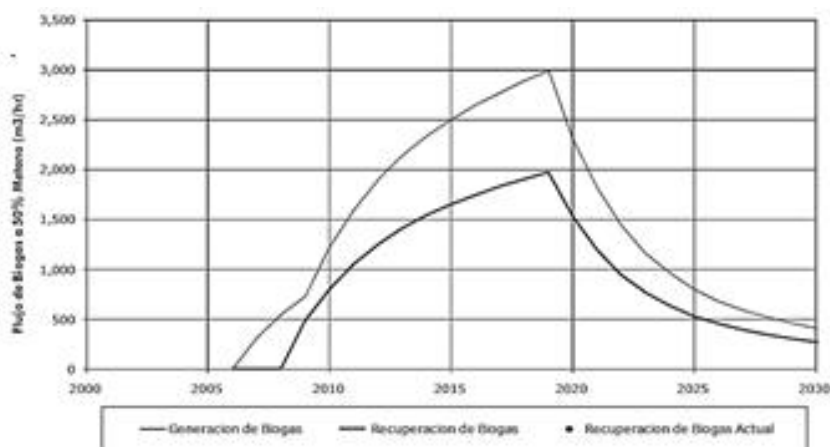
La gráfica presenta la evolución del flujo de biogás al 50 % de metano (m³/h) desde aproximadamente 1998 hasta 2040, mostrando dos curvas:

Generación de biogás (línea más clara).

Recuperación estimada (línea más oscura)

Figura 12

Generación de biogás relleno sanitario Antanas, Pasto, Colombia



Nota: Fuente: (U.S. Environmental Protection Agency,2018).

La imagen muestra una proyección temporal del flujo de biogás (expresado en m³/h) al 50% de metano para un periodo comprendido aproximadamente entre el año 2005 y 2030. El gráfico incluye tres curvas diferenciadas:

Generación de Biogás

Línea más clara.

Inicia cerca del año 2006 con valores muy bajos.

Presenta un crecimiento progresivo hasta alcanzar un pico máximo cercano a los 3.000 m³/h alrededor del año 2019–2020.

Posteriormente desciende de manera marcada hasta estabilizarse por debajo de 500 m³/h hacia 2030.

Recuperación de Biogás

Línea intermedia.

Inicia también alrededor de 2006, con un incremento más gradual que la generación.

Alcanza su pico alrededor de 2.000–2.200 m³/h, entre los años 2018 y 2020.

Después del pico, muestra una disminución progresiva hasta valores inferiores a 500 m³/h hacia 2030.

Recuperación de Biogás Actual

Representada por puntos oscuros.

Estos valores se encuentran visiblemente por debajo de la curva de recuperación proyectada, indicando que la recuperación real es menor a la estimada.

Se ubican alrededor de 1.200 a 1.500 m³/h cerca del año 2020.

Opciones tecnológicas del uso del biogás

Las tecnologías de acondicionamiento y aprovechamiento del biogás se analizaron considerando los lineamientos establecidos en la norma ISO 20675 (International Organization for Standardization, 2018). El biogás es un combustible renovable que se puede utilizar en diversas maneras. La elección tecnológica adecuada dependerá de las necesidades y recursos específicos de la Empresa, es importante considerar factores como la eficiencia, costo y aplicabilidad al ser evaluadas. Las opciones de tecnologías para el uso se presentan a continuación:

Generación de Electricidad

Motores de combustión interna: Se utilizan para generar electricidad a partir del biogás.

Turbinas de gas: Pueden ser usadas para generar electricidad por el biogás.

Generación de Calor

Calderas: Son utilizadas para generar calor a partir del biogás.

Sistemas de cogeneración: Permiten generar electricidad y calor simultáneamente por medio del biogás.

Combustible Vehicular

Biometano: El biogás puede ser purificado y utilizado como combustible vehicular, conocido como biometano.

Inyección a la Red de Gas Natural

El biogás purificado puede ser inyectado a la red de gas natural y utilizado como combustible en hogares e industrias.

Producción de Biocombustibles

La producción de biocombustibles líquidos se puede convertir en biodiesel y el biometano.

Uso Directo de Cocina

El biogás puede ser utilizado directamente en cocinas.

Producción de Hidrógeno

El biogás puede ser reformado para producir hidrógeno, usado en celdas de combustible.

Ventajas

Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Generación de energía renovable

Aprovechamiento de residuos

Desafíos

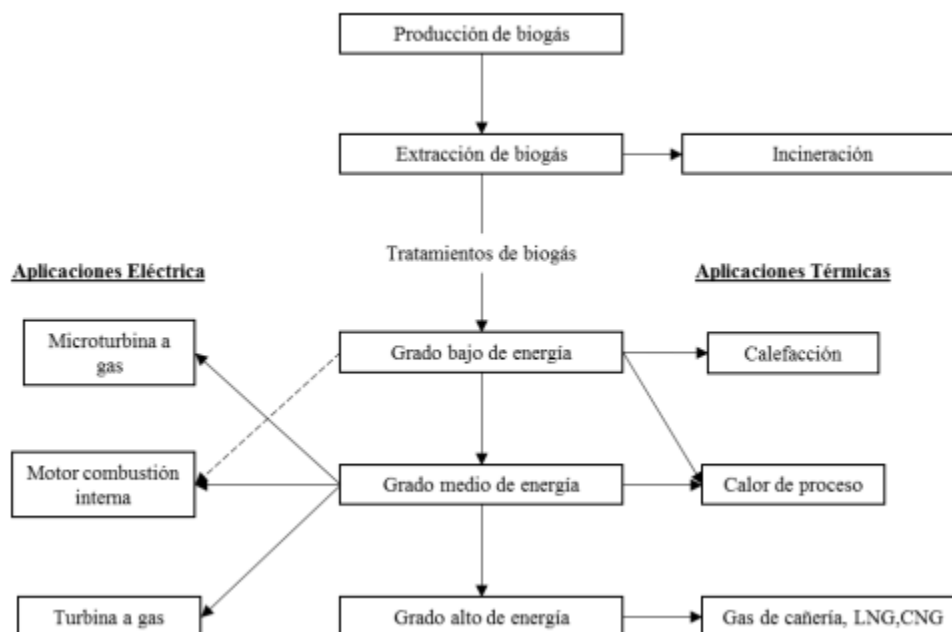
Purificación del biogás

Infraestructura

Educación y conciencia

Figura 13

Usos del biogás según tratamientos



Nota: Fuente: (López, 2016)

Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono

La Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono busca desacoplar el crecimiento económico del aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017). Su objetivo principal es desvincular el crecimiento económico nacional del incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y maximizar la eficiencia de la actividad económica del país.

Análisis del ciclo de vida

Para el análisis del ciclo de vida se desarrolla en cuatro fases de acuerdo con lo establecido en la norma internacional ISO 14040:

Definición del objetivo y el alcance: se establecen los objetivos del análisis y se determinan los límites del sistema a evaluar.

Inventario del ciclo de vida: se recopila información detallada sobre las entradas y salidas de cada etapa del ciclo de vida.

Evaluación del Impacto del ciclo de Vida: Se evalúan los efectos ambientales potenciales asociados con las entradas y salidas identificadas en el inventario.

Interpretación del Ciclo de Vida: se interpretan los resultados para tomar decisiones informadas y minimizar el impacto ambiental.

Marco referencial

Ubicación del Sitio

Figura 14

Relleno Sanitario La Cortada



Nota: Fuente: Google Maps

De acuerdo con Google Maps y el manual de operaciones proporcionado por la empresa de servicios públicos EMPOPAMPLONA S.A.E.S.P. El relleno regional la cortada está ubicado en el sitio conocido como Hacienda Las García, vereda Chichira en el kilómetro 4.2 sobre la vía Panamericana que de Pamplona conduce a Chitaga Departamento Norte de Santander.

La superficie del sitio es distribuida en los siguientes usos:

Zonas de vía de acceso

Zona de pesaje

Zona de clausura

Zona de disposición final

Zonas verdes

Zona de lixiviados

Zona de almacenamiento de materiales

Zona de proyección

Este relleno atiende a la población del municipio de Pamplona, 13 municipios y particulares. Entre los municipios están; Vetas, Matanza, Charta, Surata, Tona y California del municipio de Santander; Toledo, Chitaga, Labateca, Cacota, Silos, Mutiscua, Cucutilla y Pamplonita de Norte de Santander. Así mismo se presta el servicio de disposición final de residuos de entidades temporales. Todos los días en horario diurno se realiza la recolección de residuos en puntos estratégicos de Pamplona tales como; centro de acopio, mercado, la cárcel, hospital, batallón y los residuos de barrido. El servicio de recolección en Pamplona opera de lunes a domingo, los lunes a viernes se manejan unas rutas y los sábados y domingos solo el que está de turno.

Capacidad operativa

La capacidad de disposición final máxima del relleno es de 172936 m³. La cantidad diaria varía con valores entre 40 y 46 ton/día que recibe actualmente. En 2020, al relleno, ingresaron 15940 toneladas de residuos, lo que equivale a 1320 ton/mes y a un promedio de 43.6 ton/día. La

maquinaria con la que se cuenta para el manejo de los residuos es un bulldozer, en cuanto a personal hay un supervisor, un operario de bulldozer, 3 operarios de compactadores y 5 auxiliares del relleno que realizan actividades de mantenimiento y limpieza. El relleno cuenta con un convenio con la Cooperativa Renacer y Nueva CAREP que se encargan de realizar reciclaje en diferentes puntos de acopio del municipio.

El panorama nacional de los rellenos sanitarios regionales evidencia una presión creciente sobre la vida útil de estos sistemas debido al incremento en las tasas de disposición y a la obligatoriedad de permitir el acceso a los municipios que cumplan los requisitos técnicos y normativos vigentes. Este contexto ha llevado a que varios sitios presenten vida útil vencida o se encuentren próximos a alcanzarla, lo cual exige una planeación rigurosa, inversiones oportunas y la transición hacia modelos de economía circular que reduzcan la cantidad de residuos destinados al enterramiento.

En contraste, el relleno sanitario regional analizado presenta una escala operativa considerablemente menor. Su capacidad máxima de disposición es de 172.936 m³ y su tasa de ingreso diario oscila entre 40 y 46 toneladas, con un promedio anual de 43,6 ton/día para el año 2020, lo cual lo ubica muy por debajo de los grandes rellenos regionales del país que reciben más de 400 o incluso hasta 3.000 toneladas por día. Asimismo, atiende una demanda interna que no compromete de manera acelerada su vida útil, especialmente si se compara con casos críticos mencionados como El Carrasco, cuya operación ha estado marcada por sobrecarga, órdenes judiciales y riesgos técnicos.

Vida útil del relleno

El relleno sanitario tiene una vida útil proyectada de 25 años (2010-2034) y actualmente está en el año 15 de operación. Una parte del relleno denominada Relleno viejo ya culminó su vida útil y fue clausurada, actualmente se disponen los residuos en la nueva celda que esta proyecta para 3 a 4 años de uso a partir de la fecha de inicio.

Marco legal

El marco normativo del relleno sanitario se fundamenta en disposiciones legales como la Ley 9 de 1979, que establece medidas sanitarias para la protección de la salud pública, así como la Ley 142 de 1994, que regula el régimen de los servicios públicos domiciliarios en Colombia, incluyendo el servicio de aseo y la gestión de residuos sólidos (Congreso de la República de Colombia, 1979; Congreso de la República de Colombia, 1994).

Estas son algunas de las normativas y leyes relevantes para el proyecto:

Ley 99 de 1993: Crea el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible y establece los principios generales para la gestión ambiental en Colombia.

Ley 1715 de 2014: Regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Tiene como objetivos generales promover la eficiencia energética y la utilización de Fuentes No Convencionales de Energía Renovables (FNCER), en el SIN y en las Zonas No Interconectadas (ZNI), reducir las emisiones de GEI y cumplir acuerdos internacionales.

Decreto 094 de 2017: Modifica el decreto 1076 de 2015 en relación con la gestión integral de residuos sólidos.

Política Nacional de Producción y Consumo Sostenible: Promueve la producción y el consumo sostenible de bienes y servicios.

Estrategia Nacional de Economía Circular: Busca promover la economía circular y el aprovechamiento de residuos en Colombia.

Decreto 1784 de 2017: Por el cual se modifica y adiciona el Decreto 1077 de 2015 en lo relativo con las actividades complementarias de tratamiento y disposición final de residuos, sólidos en el servicio público de aseo; establece dentro de los controles ambientales el monitoreo del biogás, con el fin de tomar medidas de control frente a posibles altas concentraciones en el fondo del relleno y de los índices de explosividad.

CONPES 3874 de 2016: Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos sólidos, articula la visión ambiental con el componente del servicio público domiciliario de aseo, como política nacional de interés social, económico, ambiental y sanitario; esta política se compone de cuatro ejes estratégicos, 1) prevención en la generación de residuos, 2) la minimización de aquellos residuos que van a la disposición final, 3) la promoción de la reutilización, aprovechamiento y tratamiento, 4) evitar la generación de los gases de efecto invernadero.

Decreto 1713 del 2002: Por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994, la Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo, y el Decreto Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993 en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos; en él se define que la generación de biogás es una forma de aprovechamiento de los residuos en el marco de la Gestión Integral de los Residuos Sólidos, y que la actividad de aprovechamiento comprendido dentro de la actividad de disposición final, está sujeta a la CRA y solo abarca la

recolección, transporte y separación de residuos aprovechables, además establece que la responsabilidad por los efectos ambientales y a la salud pública generada por las actividades efectuadas en los diferentes componentes del servicio público de aseo de los residuos sólidos, recaerá en la persona prestadora del servicio de aseo; sin embargo, cuando se realice la actividad de aprovechamiento, dicha responsabilidad será de quien ejecute la actividad.

Ley 629 del 2000: Por medio de la cual se aprueba el Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, hecho en Kyoto el 11 de diciembre de 1997; el objetivo de este Protocolo era reducir las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI), por lo cual las energías renovables se convirtieron en una opción estratégica para Colombia. (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2017)

Decreto 1713 del 2002: Por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994, la Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo, y el Decreto Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993 en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos; en él se define que la generación de biogás es una forma de aprovechamiento de los residuos en el marco de la Gestión Integral de los Residuos Sólidos, y que la actividad de aprovechamiento comprendida dentro de la actividad de disposición final, está sujeta a la CRA y solo abarca la recolección, transporte y separación de residuos aprovechables, además establece que la responsabilidad por los efectos ambientales y a la salud pública generada por las actividades efectuadas en los diferentes componentes del servicio público de aseo de los residuos sólidos, recaerá en la persona prestadora del servicio de aseo; sin embargo, cuando se realice la actividad de aprovechamiento, dicha responsabilidad será de quien ejecute la actividad.

Ley 629 del 2000: Por medio de la cual se aprueba el "Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático", hecho en Kyoto el 11 de

diciembre de 1997; el objetivo de este Protocolo era reducir las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI), por lo cual las energías renovables se convirtieron en una opción estratégica para Colombia. (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2017).

Resolución 2184 de 2019: Implementó la separación de residuos en tres grupos (residuos orgánicos, valorizables y no aprovechables) y busca fortalecer la economía circular mediante la correcta gestión y aprovechamiento de los materiales recuperables en el país.

Resolución 591 de 2024: Adoptó un nuevo manual para la gestión integral de residuos generados en la atención en salud y otras actividades, reemplazando la Resolución 1164 de 2002, con el propósito de actualizar los lineamientos técnicos y sanitarios para garantizar un manejo adecuado y seguro.

Ley 2232 de 2022: Establece medidas para la reducción de plásticos de un solo uso, promoviendo alternativas sostenibles y disminuyendo el impacto ambiental generado por estos residuos.

Antecedentes

El aprovechamiento del biogás en Colombia ha cobrado importancia en los últimos años debido a la creciente conciencia sobre la importancia de la gestión sostenible de los residuos y la necesidad de diversificar la matriz energética del país.

En este contexto, el desarrollo de una estrategia integral para la gestión y aprovechamiento energético del biogás en el relleno sanitario regional La Cortada se presenta como una oportunidad para abordar los desafíos y aprovechar las oportunidades en la gestión de residuos y la producción de energía renovable. De igual manera se vienen implementando muchos proyectos de este tipo en países en vía de desarrollo y en Colombia se viene avanzando al generar las políticas adecuadas para promover inversión y desarrollo de los modelos de negocio de este tipo de tecnologías.

Existen varias tecnologías de eficiencia comprobada para la generación de electricidad a partir de biogás, tales como los motores de combustión interna, que son los más utilizados debido a su alta eficiencia eléctrica y facilidad de operación; las turbinas de gas, recomendadas para caudales mayores y caracterizadas por su capacidad de generar electricidad de manera estable; las microturbinas, adecuadas para operar con bajas concentraciones de metano y por ello útiles en proyectos de pequeña y mediana escala; los motores Stirling, que funcionan mediante un ciclo cerrado que permite el aprovechamiento del biogás con pureza variable; y las celdas de combustible, consideradas una de las alternativas más sofisticadas al convertir directamente la energía química del biogás en electricidad mediante procesos electroquímicos. En el caso colombiano, un ejemplo de aplicación y estudio de estas tecnologías es el análisis de prefactibilidad para la recuperación y utilización de biogás en el relleno sanitario regional la

cortada, ubicado en la ciudad de Pamplona, el cual proyecta un potencial de aprovechamiento energético con un estimado medio en un escenario de 36 meses de vida útil.

Estudios internacionales

A nivel internacional, se han realizado numerosos estudios y proyectos sobre el aprovechamiento del biogás, demostrando su potencial como fuente de energía renovable y sostenible, tales como:

La Unión Europea ha respaldado diversos proyectos de investigación orientados a fortalecer la producción de biogás a partir de residuos orgánicos. En esta línea, la unión europea impulsa activamente el biogás como fuente de energía renovable, con la finalidad de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y reducir la dependencia de los combustibles fósiles (U.S. Environmental Protection Agency, 2018).

El Modelo Internacional de Biogás de LMOP-SCS calcula el potencial de recuperación final del metano (L_0) con base en la constante del índice de descomposición (K) que varía dependiendo del tipo de residuo. Se hicieron monitoreos para la recuperación de biogás, una vez haya sido clausurado el relleno.

Los primeros proyectos energéticos con biogás en Chile fueron en Santiago, un modelo para el diseño de sistemas de captación y aprovechamiento de biogás producido en rellenos sanitarios. realizado en Chile por (López, 2016).

Estudios nacionales

El modelo colombiano de biogás desarrollado por la agencia de (EPA) y aplicado en Colombia, este modelo estima la generación y recuperación de biogás en rellenos sanitarios. Ha sido evaluado en varias ciudades del país y ha demostrado ser una herramienta efectiva para estimar el potencial de generación de biogás.

Este modelo permite cuantificar la generación y recuperación de biogás en rellenos sanitarios, utilizando ecuaciones separadas para calcular la generación de biogás en función de factores como la cantidad y tipo de residuos, clima y prácticas de manejo del sitio.

La ecuación utilizada en el modelo colombiano de biogás para estimar la generación de biogás es de degradación de primer orden, su fórmula es la siguiente:

Ecuación 2:

Estimación de la generación de biogás

$$Q = Q_0 * (1 - e^{-kt})$$

Donde:

Q: Cantidad de biogás generado en un momento dado (m³/año)

Q₀: Potencial de generación de biogás (m³/año)

k: Constante de degradación de primer orden (año⁻¹)

t: Tiempo (años)

e: Base del logaritmo natural (aproximadamente 2,718)

Esto asumiendo que la generación del biogás es proporcional a la cantidad de materia orgánica presente y la tasa de degradación es constante.

El modelo también considera varios parámetros, como: Cantidad de residuos depositados, Composición (orgánicos, inorgánicos, etc.), Profundidad del relleno, clima y temperatura, prácticas de manejo del sitio.

biogás COLOMBIA SAS ESP, es una de las empresas que producen energía eléctrica limpia desde octubre del 2007 han venido desarrollando proyectos importantes aprovechando el biogás resultados de la descomposición de los residuos del relleno Doña Juana en Bogotá, mediante la destrucción térmica y aprovechamiento del metano (CH₄).

Estudios locales

Los estudios locales en Colombia se centran en evaluar el potencial de generación de biogás a partir de residuos orgánicos y su posible utilización como fuente de energía renovable.

La estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia identifica los departamentos con mayor disponibilidad de este recurso, como Cauca, Atlántico, Meta, Valle del Cauca, Santander, Risaralda, Casanare, Cundinamarca, Antioquia y Cesar. Asimismo, establece que el potencial de generación de biogás a partir de biomasa residual es de aproximadamente 10.447 terajulios por año, equivalente a cerca del 8% del consumo de energía por gas natural en 2012 (Unidad de Planeación Minero-Energética & Universidad Nacional de Colombia, 2014).

El análisis de variables que influyen en la producción eficiente del biogás es un estudio realizado en la zona rural de Ocaña, Norte de Santander, el cual analizó factores como temperatura, presión y pH en la producción de biogás a partir de desechos agrícolas, encontrando que el control adecuado de estas variables mejora significativamente la eficiencia del proceso (Sánchez Hernández et al., 2025).

Por otro lado, se analiza la viabilidad económica y ambiental del biogás a partir de residuos orgánicos, incluyendo contextos agroindustriales como la palma de aceite, y evidencia que:

La digestión anaerobia permite generar energía renovable y reducir emisiones de gases de efecto invernadero. Herramientas como VAN, TIR y análisis de ciclo de vida demuestran beneficios económicos y ambientales en estos sistemas (Velásquez-Piñas et al., 2023).

Metodología

La metodología del proyecto se basó en un enfoque mixto, dado que el estudio consta de dos componentes. Por un lado, se caracteriza por ser cuantitativo, ya que mediante el desarrollo del modelo colombiano de biogás se estima la generación y recuperación del gas producido en el relleno sanitario la cortada, con el fin de desarrollar una estrategia de gestión para su aprovechamiento. Por otro lado, presenta un componente cualitativo, identificado como una investigación interpretativa sustentada en la recolección y el análisis de datos que permiten cumplir con los objetivos específicos del estudio.

El alcance del proyecto es de tipo descriptivo, puesto que, permitió a través de este detallar las cualidades y características de un problema específico. El proyecto se desarrolla con el propósito de determinar la generación y el aprovechamiento del biogás estimado mediante el modelo colombiano de biogás, así como establecer la capacidad de energía que puede recuperarse. Con base en estos resultados, se describen los impactos tanto ambientales como sociales asociados.

Se analizó diferentes tecnologías para la captura y tratamiento de gases del relleno sanitario. Con el fin de analizar las tecnologías de captura y tratamiento de gases del relleno sanitario, para poder identificar las opciones más adecuadas para las condiciones operativas y ambientales. Fue necesario contar con información y revisión bibliográfica confiable para dar un diagnóstico ambiental general y actualizado. Para efectos de este proyecto el diagnóstico se divide en dos partes. En la primera parte, se describe la zona de estudio, donde por medio de información proporcionada por la Empresa EMPOPAMPLONA, se conoce la producción diaria que entra al relleno.

Para la segunda parte de este primer objetivo, la zona de estudio, también se especifican las condiciones climatológicas que se tienen en el lugar, el comportamiento del viento mediante la utilización de datos de monitoreo de calidad del aire.

Tabla 7

Descripción de alternativas tecnologías

Tecnología	Descripción	Ventajas	Desventajas	Costo	Eficiencia
Incineración	Quema del gas para producir energía.	Alta eficiencia	Costo alto, emisiones de NOx y CO.	Alto	90-95%
Oxidación Catalítica	Conversión de gases en CO ₂ y H ₂ O	reducción de emisiones.	Costo moderado, requerimiento de catalizadores.	Moderado	80-90%
Biofiltros	Uso de microorganismos para eliminar gases.	Alta eficiencia, baja emisión de NOx.	Requiere mantenimiento, eficiencia variable.	Bajo	70-80%

Sistema de Captura de Gases	Recolección y tratamiento del gas.	Bajo costo, baja emisión de NOx.	Costo alto, requerimiento de infraestructura.	Alto	90-95%
Tecnologías de Membrana	Separación de gases mediante membranas.	Alta eficiencia, reducción de emisiones.	Costo inicial alto, requerimiento de pretratamiento.	Moderado	80-90%
		Alta eficiencia, bajo costo de operación.			

Nota: Fuente: Elaboración propia

Con la información recolectada anteriormente se realizó una matriz DOFA para así determinar aspectos internos y externos que favorezca la estrategia y así traer consigo impactos positivos tanto a la sociedad como al ambiente pues el proyecto tiene como finalidad mitigar la generación de gases de efecto invernadero GEI. Para poder llevar a cabo dicha viabilidad técnica y económica de las tecnologías seleccionadas. Es necesario información como: disposición anual

de años anteriores en toneladas, datos de monitoreo de las chimeneas de las celdas de disposición final.

Proyección de toneladas de disposición final

En Colombia, la proyección de toneladas de disposición final se realiza con base en la generación de residuos sólidos y la capacidad de disposición disponible.

Según el informe nacional de disposición final de residuos sólidos 2021, en Colombia se generaron aproximadamente 11.952.900 toneladas en 2021, de las cuales el 98,74% fueron dispuestas en sitios autorizados y el 1,26% en sitios no autorizados.

Teniendo en cuenta el crecimiento poblacional del municipio de Pamplona se realizó la proyección de toneladas con respecto a la metodología establecida por el reglamento técnico de agua potable y saneamiento básico (RAS) en el Título F, Sistemas de Aseo (2017). Las toneladas dispuestas en los dos últimos años relacionadas por la empresa EMPOPAMPLONA son las siguientes 2023 17.203,08 toneladas y en las 2024 18.004,37 toneladas.

La Guía RAS – 001 establece la metodología para determinar el nivel de complejidad de los proyectos de acueducto, alcantarillado y aseo, así como los métodos de cálculo necesarios para estimar la población futura que se verá beneficiada. En la Tabla 8 se presentan los casos en los que se ha aplicado correctamente alguno de los métodos recomendados por el RAS, de acuerdo con el nivel de complejidad del proyecto y la población proyectada.

Además de la evaluación poblacional, los proyectos deben considerar aspectos clave relacionados con la generación y aprovechamiento de biogás en sistemas de tratamiento de aguas residuales y desechos sólidos.

El volumen de generación se debe estimar el volumen total de biogás producido, considerando las cargas orgánicas entrantes y la eficiencia de digestión anaerobia o procesos similares. Esto permite dimensionar adecuadamente los sistemas de almacenamiento y aprovechamiento energético.

Para el flujo máximo esperado se debe identificar el caudal máximo de biogás esperado en condiciones de operación normal y pico, con el fin de asegurar la seguridad y continuidad en la operación de los sistemas de captura y aprovechamiento.

La determinación de la composición del biogás se realiza mediante el análisis de la concentración de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y contaminantes clave como ácido sulfhídrico (H_2S), amoníaco u otros compuestos volátiles. Esta información es fundamental para el diseño de tecnologías de purificación, protección de equipos y evaluación del potencial energético del biogás.

Teniendo en cuenta la evaluación de tecnologías de aprovechamiento, se debe considerar la selección de tecnologías apropiadas para el uso del biogás, tales como generación de electricidad, cogeneración, producción de calor o inyección a redes de gas existentes. La elección dependerá del volumen y calidad del biogás, así como de la factibilidad técnica y económica de cada alternativa.

Es imprescindible analizar la conexión de los sistemas de aprovechamiento con la infraestructura energética existente, incluyendo redes de distribución de electricidad, gas o calor, así como posibles consumidores industriales, comerciales o residenciales. Esta integración permite maximizar el uso del recurso, mejorar la sostenibilidad del proyecto y generar beneficios económicos y ambientales a nivel comunitario.

En conjunto, la aplicación de la metodología RAS y la consideración detallada de la generación, composición, aprovechamiento e integración del biogás garantizan un diseño robusto y sostenible de los proyectos de acueducto, alcantarillado y aseo, alineado con las necesidades de la población proyectada y la infraestructura disponible.

Tabla 8

Descripción de análisis de parámetros de biogás

Parámetro	Cálculo / Método	Valores típicos	Observaciones / Integración
Volumen de biogás (m ³ /día)	V=DBO entrante ×Fbiogás	0.35–0.6 m ³ /kg DBO removida	Dimensiona digestores y tanques; base para generación de energía o calor

Flujo máximo esperado (m ³ /h)	Q _{max} =V×Factorpico	1.2–1.5 × flujo promedio	Determina válvulas de seguridad y flare; asegura continuidad hacia consumidores
Composición	Análisis químico	CH ₄ : 55–70%, CO ₂ : 30–45%, H ₂ S: 50–5000 ppm	Define purificación; influencia la tecnología de aprovechamiento
Aprovechamiento energético	Comparación técnica y económica	Motores, cogeneración, inyección a red de gas, uso térmico	Integración con planta y redes locales; optimiza eficiencia y beneficios
Integración con infraestructura	Análisis de proximidad y demanda	Red eléctrica, gas, calor, usuarios industriales/comerciales	Minimiza pérdidas, asegura suministro y maximiza impacto ambiental/económico

Nota: Fuente: Elaboración propia basada en APHA, ISO 20675 y APPA Renovables.

Ahora teniendo en cuenta los procesos anteriores se realizó una caracterización física de los residuos para saber la cantidad de residuos que ingresan al relleno, también se hizo medición y monitoreo de las chimeneas de dos celdas del relleno donde se realiza disposición.

Resultados

Los resultados obtenidos en este trabajo se presentarán de acuerdo con el desarrollo de la metodología de cada objetivo específico.

Fase 1

Para el análisis y caracterización de la problemática relacionada con la gestión del biogás en el relleno sanitario regional la cortada, se determinan las oportunidades y limitaciones para su aprovechamiento.

La metodología del análisis del ciclo de vida se realizó tomando como unidad funcional la tonelada, en otras palabras, se conocen los impactos ambientales asociados con la disposición final de una tonelada de residuos dispuestos en el relleno sanitario regional la cortada.

Teniendo en cuenta las actividades de operación como el pesaje en la báscula, el transporte de la puerta de ingreso al patio de disposición, la compactación de los residuos en la celda, el cubrimiento de los residuos y su degradación. Se identifican las partes interesadas en la gestión del biogás en el relleno, como lo es la Empresa EMPOPAMPLONA S.A.E.S.P. Los municipios y entidades que realizan disposición final allí, la comunidad que habita cerca del sitio y las autoridades reguladoras encargadas de su funcionamiento.

El relleno sanitario regional la cortada está ubicada en el sitio conocido como hacienda las García, vereda Chichira en el kilómetro 4.2 sobre la vía panamericana que de Pamplona conduce a Chitaga departamento Norte de Santander.

La vida útil del relleno sanitario regional la cortada es de 20 años según resolución 0222 de 2006- (licencia ambiental-CORPONOR), el 19 de enero del 2021 bajo la Resolución 0026 se realizaron algunas modificaciones de la licencia ambiental.

Con una capacidad total de 172.936 mt³ y capacidad remanente de 46.000 m³.

Teniendo en cuenta la información anterior, en la cortada se dispusieron 103.598,34 toneladas provenientes de Pamplona, municipios y entidades que realizan disposición allí a partir del año 2019 hasta 2024, es decir, para cada año se dispusieron cerca de 47,305 Ton/año, demostrada en la siguiente ecuación.

Ecuación 2.

Producción para el municipio de Pamplona (2019-2024)

$$\text{Producción} = \frac{103.598,34}{6 \text{ años}} * \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} = 47,305 \text{ ton/día}$$

De acuerdo con lo anterior a continuación se presenta figuras suministrado por la EMPOPAMPLONA, en donde se muestran las celdas de disposición final.

Figura 15

Celdas de disposición final y chimeneas del relleno la cortada



Nota: Fuente: (EMPOPAMPLONA, 2024).

Este relleno se considera regional conforme que recibe los residuos sólidos generados en los municipios cercanos al sitio de disposición final, los cuales son: Pamplona, Toledo, Chitaga, Labateca, Cacota, Silos, Mutiscua, Cucutilla, Suratá, Charta, California, Matanza, Tona, Vetas y entidades (EMPOPAMPLONA, 2024).

Los residuos sólidos se clasifican de acuerdo con la fuente productora como: residencial o domésticas, comerciales, comerciales de alimentos, plazas de mercado, industriales, institucional, especiales, barrido de calles y lugares públicos; y de acuerdo con su composición pueden ser: patógenas, tóxicas, combustibles, inflamables, explosivas, radioactivas y volatilizables.

Caracterización de los residuos

De acuerdo con el decreto 1784 de 2017 que reglamenta la disposición final de residuos sólidos, se realiza la caracterización de residuos para determinar las características fisicoquímicas, cualitativas y cuantitativas de los residuos sólidos para identificar el potencial de tratamiento o aprovechamiento.

En el relleno sanitario regional la cortada se realizó una caracterización física de los residuos usando una metodología de clasificación donde se separan los residuos por categorías, como orgánicos, plásticos, papel, etc.

Tabla 9

Clasificación y caracterización de residuos

Tipo de residuo	%caracterización 1	%caracterización 2	%caracterización 3	%caracterización 4	%caracterización 5	%caracterización 6
Residuos de comida y jardín	24,39	23,78	24,39	26,39	22,5	23,82
Productos de papel	6,25	7,46	9,07	10,22	5,2	8,76
Productos de cartón	10,51	6,08	3,5	2,47	7,5	6,55
plástico	4,97	2,79	5,09	3,78	5,31	5,21
Caucho y cuero	4,75	6,19	7,22	8,65	5,73	7,79
Productos metálicos	9,6	6,06	2,66	3,65	10,1	9,23
Vidrio	9,75	9,69	7,53	7,73	12,7	11,23
Textil	5,3	6,29	7,86	7,43	3,6	7,71
Madera	4,99	8,75	4,63	4,87	5,5	3,7
Productos cerámicos, ceniza, rocas, y escombros	2,71	10,63	11,93	8,75	3,75	4,17
Hueso	5,94	7,69	7,78	7,49	4,71	5,83

Otros (papel higiénico, toallas, elementos eléctricos, pañuelos, pastillas vencidas, jabón)	10,84	4,59	8,34	8,57	13,4	6
Total	100	100	100	100	100	100

Las características físicas de los residuos se presentan en la tabla 9, que se muestra a continuación.

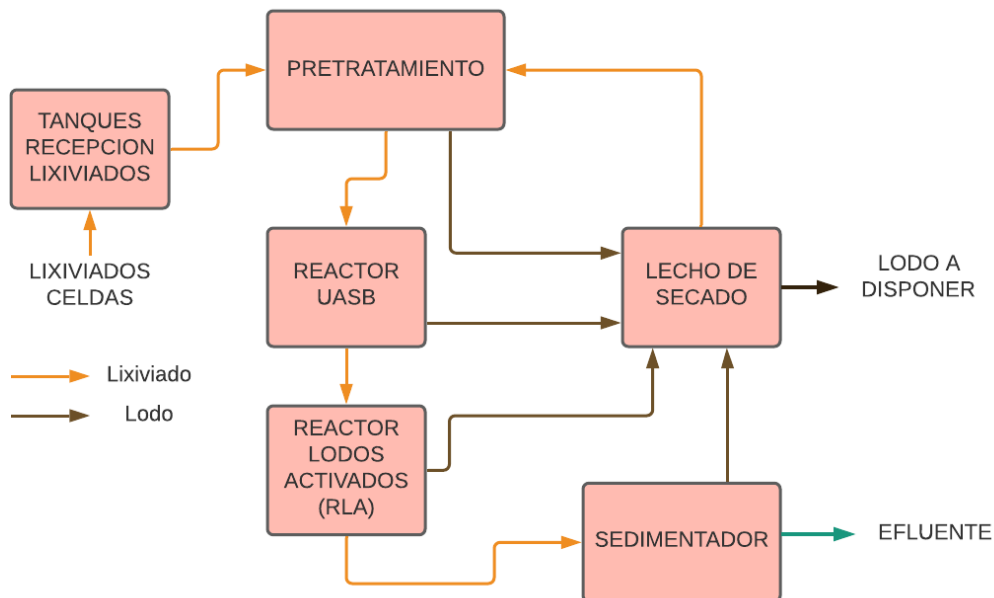
Fuente: (EMPOPAMPLONA, 2024).

Planta de Tratamiento de Lixiviados

Para el manejo de lixiviados la empresa de EMPOPAMPLONA, adquirió y puso en marcha desde el mes de agosto de 2021, una planta de tratamiento de lixiviados, la cual consiste en un pretratamiento, un tratamiento biológico anaerobio y aerobio, el primero agrupa las unidades de regulación de caudal, trampa grasas y presedimentador, el segundo a un reactor UASB donde se producen las reacciones anaerobias del sistema y finalmente llega a un sistema aerobio de lodos activados compuesto por un tanque de aireación, un clarificador y una bomba de recirculación de lodos (EMPOPAMPLONA, 2021)

Figura 16

Diagrama de flujo de la planta de lixiviados



Nota: Fuente: Adaptado del Manual de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de lixiviados (EMPOPAMPLONA, 2024).

Caracterización fisicoquímica del lixiviado en cada etapa a fin de determinar la eficiencia de las unidades.

De acuerdo con el informe suministrado por (EMPOPAMPLONA, 2024) el cual se realiza el muestreo puntual de los lixiviados de acuerdo con el cronograma, se evidencia un comportamiento variable entre los diferentes parámetros analizados entre cada uno de los muestreos, el último muestreo, por ejemplo, con respecto a Nitrógeno y Fósforo presentó valores

bastante bajos con respecto a los iniciales, esto se puede asociar con la presencia de lluvias que diluyen el lixiviado.

Resultados Obtenidos

Tabla 10

Los análisis fisicoquímicos de DQO, nitrógeno y fosforo

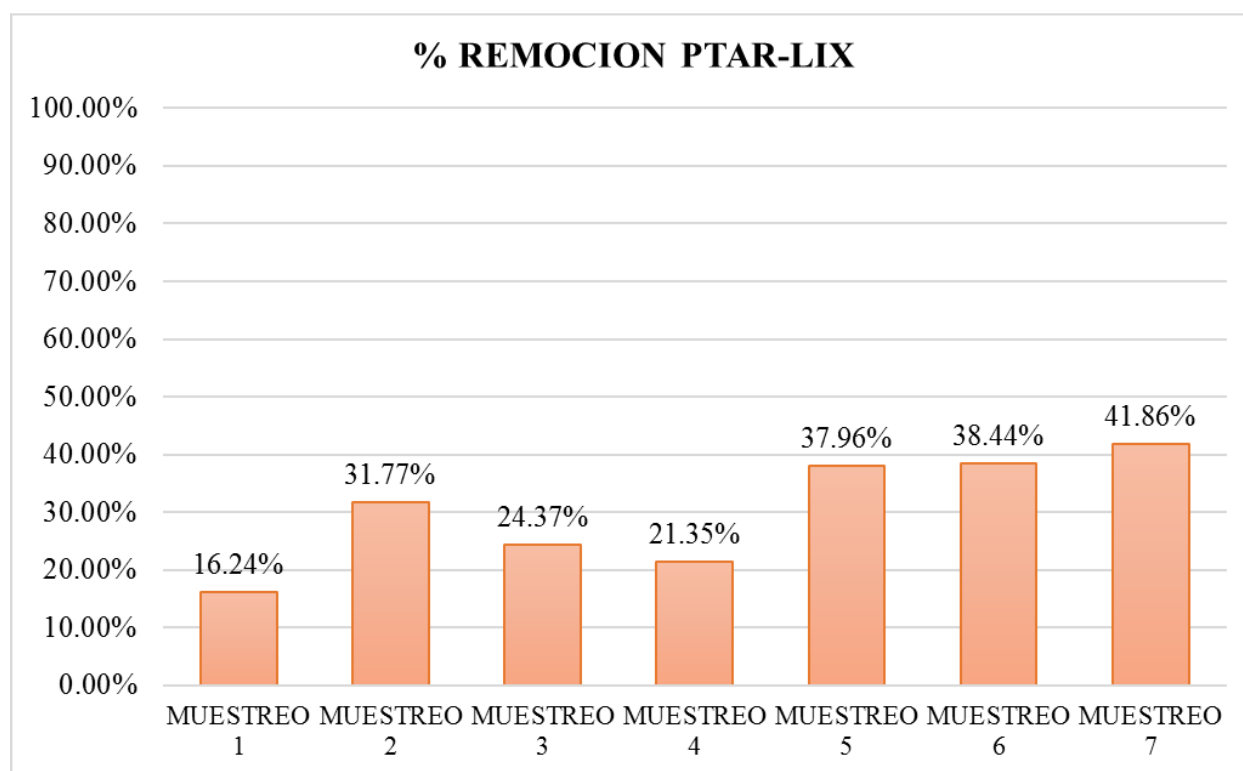
Análisis fisicoquímico PTARLIX				
Fecha	Entrada	Salida		
		UASB	Salida RLA	Sedimentador
3 de abril de 2024				
DQO	4310	3810	3940	3610
Nitrógeno	2025	1740	1275	1395
Fosforo	18.5	15	14	21
17 de abril de 2024				
DQO	3620	2670	2770	2470
Nitrógeno	2145	810	570	510
Fosforo	46	13.25	10.25	8.5
7 de mayo de 2024				
DQO	3579	3360	3370	2700
Nitrógeno	862.5	425	487	362.5
Fosforo	46	16	11	21.5
21 de mayo de 2024				
DQO	3700	3450	3670	2910
Nitrógeno	150	73	101	75
Fosforo	32.6	32.6	32.6	28.4
4 de junio de 2024				
DQO	3820	2960	2870	2370
Nitrógeno	1647	977	785	662
Fosforo	29	24	20	22
18 de junio de 2024				
DQO	3980	2990	2840	2450
Nitrógeno	1680	880	650	590
Fosforo	31.6	18.5	12.3	20.6
9 de julio de 2024				
DQO	3870	3010	2940	2250

Nitrógeno	1680	880	650	590
Fosforo	31.6	17.5	11.3	17.6

Nota: Fuente: Adaptado de (EMPOPAMPLONA, 2024).

Figura 17

Gráfica de remoción de la planta



Nota: Fuente: Adaptado de (EMPOPAMPLONA, 2024).

Manejo de gases

Los gases son producto de la descomposición de los residuos sólidos, salen por las chimeneas, las cuales se encuentran distribuidas en diferentes sectores de la celda, estas chimeneas fueron instaladas e interconectadas entre sí, con la finalidad de garantizar una mayor

eficiencia en el drenaje de lixiviados y permitiendo el flujo del gas de forma vertical entre niveles.

Figura 18

Chimenea de gas



Nota: Fuente: Elaboración propia

Decimos que el tratamiento o manejo de gases y olores consiste en realzar chimeneas para quemar el gas (principalmente dióxido de carbono y metano), este proceso se logra a partir de la construcción de gaviones, utilizando mallas de 1m x 1m x 1m, piedra bola de 4 a 10 pulgadas, tubería perforada.

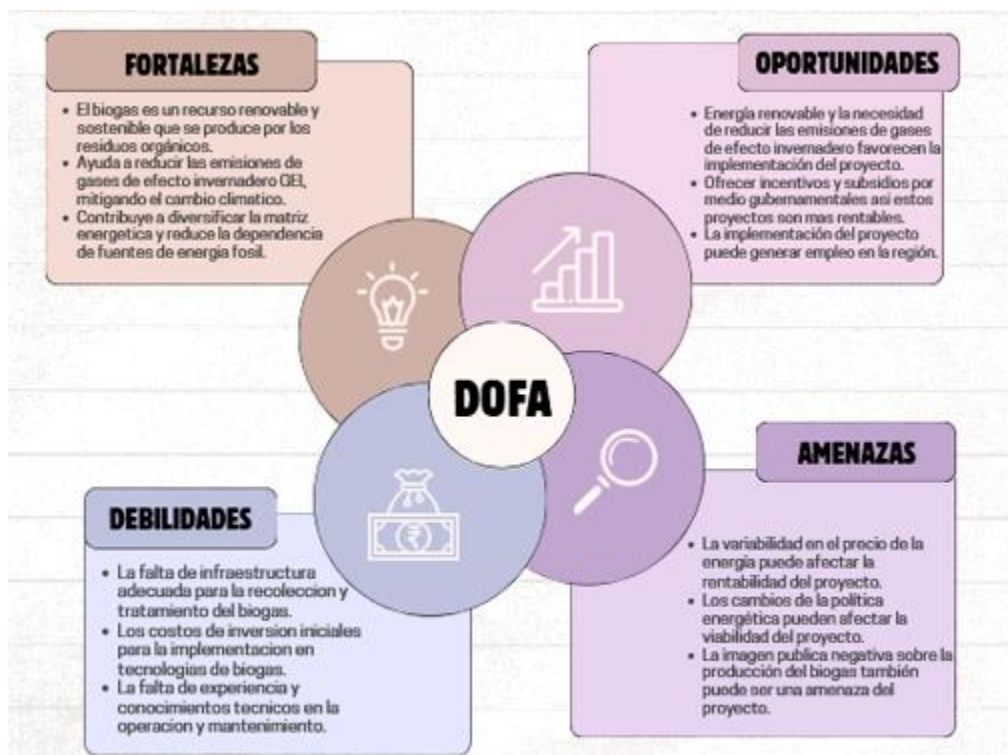
Fase 2

Como se explicó anteriormente en la metodología, la evaluación de la estrategia se realiza mediante la aplicación de una matriz DOFA buscando identificar su eficiencia en caso de implementarse la estrategia.

Matriz DOFA

Figura 19

Descripción de la Matriz DOFA



Nota: Fuente: Elaboración propia

Conociendo la generación de biogás del relleno sanitario regional la cortada se realizó la evaluación técnico ambiental y económica de las tecnologías más usadas para el aprovechamiento del biogás. Para el desarrollo de la evaluación se tuvo en cuenta lo siguiente:

Recopilación de las tecnologías disponibles

Revisión global de los beneficios ambientales

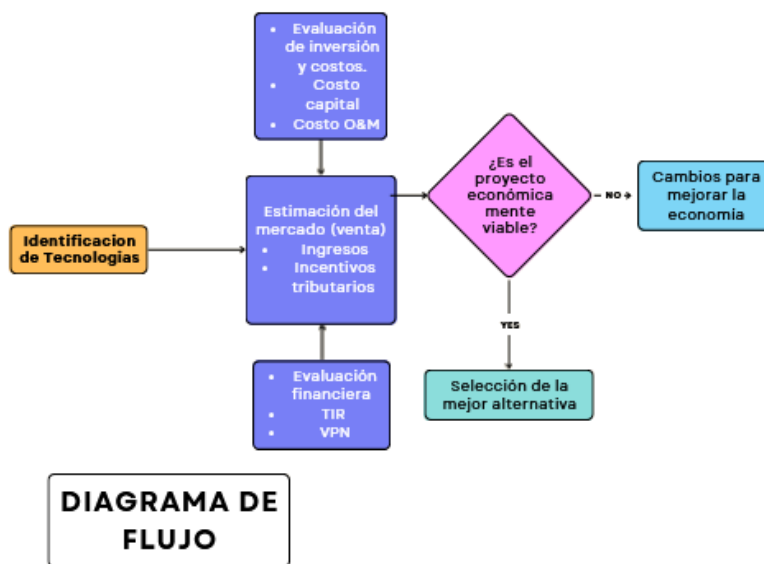
Cuantificación de inversiones, costos e ingresos

Desarrollo legislativo de cada una de las alternativas analizadas y cómo influye los incentivos tributarios en la viabilidad económica.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de flujo de la metodología desarrollada para la evaluación técnico ambiental y económica de las alternativas.

Figura 20

Diagrama de flujo evaluación económica



Nota: Fuente: Elaboración propia

Según el informe de disposición final de residuos sólidos realizado en los años 2019 al 2024, el relleno recibe una cantidad de residuos sólidos de 103.598,34 toneladas. Por consiguiente, se muestran las siguientes tablas donde se evidencia la disposición final de los años 2019 al 2024.

Tabla 11

Toneladas dispuestas de la vigencia 2019

TONELADAS RSU 2019													
MUNICIPIO O ENTIDAD	ENER O	FEBRE RO	MARZ O	ABRIL	MAY O	JUNIO	JULIO	AGOS TO	SEPTIEMB RE	OCTUB RE	NOVIEMB RE	DICIEMB RE	TOTAL
PAMPLONA	1156,00	1173,00	1094,04	1101,70	1203,18	1093,05	1126,60	1055,72	1011,27	1040,68	1002,60	1109,72	13167,56
CACOTA	12,70	8,80	14,61	17,68	14,10	13,30	12,12	18,66	15,00	18,58	19,97	17,38	182,90
CUCUTILLA	35,60	29,80	29,40	29,92	27,00	24,20	28,29	27,83	24,92	30,15	27,12	41,32	355,55
CHITAGA	92,00	67,30	72,19	88,48	68,80	54,00	85,85	96,95	96,44	107,61	89,09	91,03	1009,74
LABATECA	34,40	27,80	23,81	24,20	17,70	16,70	20,39	23,37	20,82	24,93	26,71	25,22	286,05
SILOS	75,10	48,40	71,47	74,61	79,00	64,70	82,92	84,51	74,36	93,65	89,54	84,72	922,98
TOLEDO	127,00	134,60	97,55	88,81	99,50	90,00	95,51	98,56	105,70	100,90	113,67	121,41	1273,21
MUTISCUA	30,50	29,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	60,40
T&J E.S.P.													
S.A.S.	1,27	13,16	3,33	2,42	2,59	2,71	2,91	3,01	4,73	5,90	5,91	11,78	59,71
VETAS	17,20	14,40	14,24	13,70	14,70	12,80	15,28	12,71	16,92	14,18	15,23	17,38	178,74
AUTOVIAS	6,30	6,00	5,11	4,72	2,00	3,00	4,50	1,29	1,14	0,00	1,82	0,00	35,88
SOCIEDAD MINERA DE SANTANDER	4,30	2,80	9,10	2,00	7,40	5,30	9,13	7,56	8,98	7,03	5,59	5,44	74,63
GEENGI SOLUTIONS													
S.A.S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,20	0,20	0,00	0,60
FORESTAL CONSULTORES													
CSS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	1,20
CONSTRUCTORES													
ABIANCO	2,64	1,56	0,20	1,65	3,28	0,50	1,60	0,68	0,47	1,01	0,53	0,00	14,12
CONSTRUCTORES													
PETROCASINOS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30
PETROCASINOS	0,00	4,96	0,34	0,00	0,00	0,46	1,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,01
TOTAL	1595,01	1562,48	1435,38	1449,89	1539,25	1380,82	1485,30	1431,05	1381,15	1445,02	1398,17	1525,60	17630,58

Nota: Fuente: Adaptado de (EMPOPAMPLONA, 2019).

La tabla muestra la cantidad mensual de residuos sólidos urbanos (RSU), medidos en toneladas, generados durante el año 2019 en diferentes municipios o entidades.

Pamplona es el municipio con mayor generación de RSU, con un total anual de 13,167.56 toneladas, mostrando fluctuaciones mensuales, pero manteniendo cifras altas durante todo el año.

Otros municipios como Chitagá, Toledo y Silos presentan cantidades considerablemente menores, con totales anuales en cientos o menos de mil toneladas.

Tabla 12

Toneladas dispuestas de la vigencia 2020

TONELADAS RSU 2020													
MUNICIPIO O ENTIDAD	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	TOTAL
PAMPLONA	1034,35	977,55	1074,64	1002,74	883,44	860,94	863,68	833,30	855,63	880,38	961,17	991,50	11219,32
CACOTA	25,30	15,07	19,93	16,37	19,82	15,55	18,27	20,46	19,57	19,58	17,08	18,62	225,61
CUCUTILLA	41,72	25,55	25,66	26,24	25,44	24,60	28,38	27,27	30,47	28,24	23,05	31,71	338,33
CHITAGA	121,01	84,02	92,75	87,78	84,04	101,79	98,05	97,65	99,91	97,83	100,50	106,84	1172,16
LABATECA	30,96	28,84	27,52	20,56	28,06	29,02	29,62	31,32	35,19	27,19	22,54	37,42	348,24
SILOS	108,71	80,05	79,35	79,81	69,05	81,15	86,19	78,35	94,92	86,98	86,74	98,23	1029,52
TOLEDO	148,95	119,84	105,31	80,84	93,80	102,68	117,35	110,55	107,21	125,01	115,73	119,63	1346,89
T&J E.S.P. S.A.S.	16,26	9,49	8,12	10,29	19,84	16,34	17,54	19,76	24,36	17,25	14,10	17,05	190,39
VETAS	18,64	13,65	18,26	15,48	13,19	14,07	14,98	14,77	17,38	16,88	11,99	25,69	194,98
AUTOVIAS	1,41	2,31	4,54	0,00	0,10	1,32	1,85	0,00	0,79	0,65	1,29	1,30	15,56
SOCIEDAD MINERA DE SANTANDER GEENGI	8,35	9,76	2,30	0,00	2,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,62	5,01	33,54
SOLUTIONS S.A.S	0,20	0,20	0,00	0,00	0,05	0,30	0,20	0,30	0,20	0,20	0,00	0,40	2,05
HOSPICLIN FORESTAL	0,23	0,00	0,00	0,17	0,08	0,10	0,12	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80
CONSULTORES CSS	0,00	0,23	0,26	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,89
CONSTRUCTORES 3Y4	0,51	1,30	0,00	0,36	0,00	0,36	0,40	1,31	1,93	1,10	1,07	0,62	8,96
PETROCASINO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34	0,26	0,00	0,60
TOTAL	1556,60	1367,85	1458,64	1340,63	1239,40	1248,42	1276,63	1235,12	1287,76	1301,63	1361,13	1454,02	16127,82

Nota: Fuente: Adaptado de (EMPOPAMPLONA, 2020).

La tabla muestra la cantidad mensual de residuos sólidos urbanos (RSU), medidos en toneladas, generados durante el año 2020 en diferentes municipios o entidades.

FORESTAL													
CONSULTORES	0,20	0,00	0,00	0,20	0,40	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,23	2,23
CSS													
CONSTRUCTORES													
3Y4	1,34	1,89	0,88	0,00	3,03	0,00	0,00	0,40	0,40	0,00	0,00	2,71	10,65
PETROCASINO	1,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,25
FERRALIA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00	0,20	0,00	0,22	0,00	0,62
CIVILTECH	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,72	0,00	0,00	0,92
	1304,30	1346,45	1554,71	1446,46	1399,59	1360,53	1515,18	#####	1459,60	#####	1517,00	1616,65	17555,60

Nota: Fuente: Adaptado de (EMPOPAMPLONA, 2021).

La tabla muestra la cantidad mensual de residuos sólidos urbanos (RSU), medidos en toneladas, generados durante el año 2021 en diferentes municipios o entidades.

Este análisis es fundamental para la adecuación y optimización de los procesos de recolección, transporte y disposición final, así como para la evaluación de estrategias de aprovechamiento energético y ambiental que respondan a las condiciones actuales.

Tabla 14

Toneladas dispuestas de la vigencia 2022

TONELADAS RSU 2022													
MUNICIPIO / ENTIDAD	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	TOTAL 2022 MUNICIPIO/ENTIDAD
DEPARTAMENTO NORTE DE SANTANDER													
PAMPLONA	1145,75	1051,90	1124,99	1092,90	#####	957,21	#####	928,31	955,92	968,83	990,94	1077,30	12249,40
CACOTA	16,78	9,20	11,93	24,98	10,22	16,96	19,55	13,83	20,20	22,98	19,67	23,62	209,92
CUCUTILLA	22,70	15,85	20,30	18,84	16,00	23,77	21,90	23,41	23,33	23,61	22,63	32,45	264,79
CHITAGA	70,77	65,44	74,41	62,08	68,00	76,05	94,08	102,55	91,03	88,94	104,16	107,33	1004,84
LABATECA	18,25	14,95	20,45	19,38	18,18	20,49	27,68	26,28	22,85	28,16	26,60	31,58	274,85
SILOS	57,10	35,80	39,90	31,52	33,64	44,39	51,45	55,55	53,54	51,20	59,41	56,33	569,83
TOLEDO	111,29	74,93	112,98	99,76	94,95	101,19	#####	115,13	95,10	104,96	97,76	122,66	1231,28
MUTISCUA	23,10	21,40	28,80	21,75	25,70	25,03	23,66	26,28	23,64	28,35	27,29	25,90	300,90

DEPARTAMENTO DE SANTANDER													
VETAS	13,30	11,90	15,64	11,43	11,89	17,13	21,44	16,58	14,26	13,15	14,24	18,29	179,25
TONA	19,23	16,34	25,31	23,10	36,62	26,62	37,13	36,70	31,03	33,85	30,65	33,46	350,04
SURATA	3,09	4,39	4,29	4,05	5,38	5,60	4,39	5,27	3,39	4,78	3,34	5,60	53,57
CHARTA	6,43	5,36	4,80	5,20	5,80	8,36	7,52	8,58	6,75	9,68	8,75	7,38	84,61
CALIFORNIA	5,00	1,25	4,40	2,90	4,05	5,20	7,42	7,49	7,56	9,10	0,00	0,00	54,37
ENTIDADES PRIVADAS													
T&J E.S.P. S.A.S.	21,92	14,14	14,38	14,02	7,88	7,54	14,39	11,14	12,09	16,48	11,33	10,57	155,86
AUTOVIAS	0,00	3,95	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	1,45	2,10	0,00	0,00	0,00	7,75
SOCIEDAD MINERA DE SANTANDER	9,49	10,30	5,20	2,94	6,00	2,45	1,40	2,16	4,54	9,77	21,00	7,40	82,65
GEENGI SOLUTIONS S.A.S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45	0,20	0,00	0,00	0,00	0,65
FORESTAL CONSULTORES	0,00	0,20	0,20	0,00	0,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,90
CSS CONSTRUCTORES 3Y4	0,00	0,00	0,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,95
FERRALIA CASA DE MERCADO	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,04	9,04
TOTAL MENSUAL	1544,70	1357,29	1508,93	1435,10	#####	1337,99	####	1381,15	#####	#####	1437,77	1559,87	17076,89

Nota: Fuente: Adaptado de (EMPOPAMPLONA, 2022).

La tabla muestra la cantidad mensual de residuos sólidos urbanos (RSU), medidos en toneladas, generados durante el año 2022 en diferentes municipios o entidades.

La tabla refleja la distribución mensual de toneladas generadas, destacando municipios con mayor aporte, y proporcionando insumos clave para la toma de decisiones en planificación, inversión y programas ambientales.

Los valores totales anuales consolidan la información para que las autoridades puedan adaptar las estrategias de gestión y aprovechar las oportunidades de reducción, reciclaje y aprovechamiento energético del biogás.

Tabla 15*Toneladas dispuestas de la vigencia 2023*

TONELADAS RSU 2023													
MUNICIPIO / ENTIDAD	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	TOTAL 2023 MUNICIPIO/ENTIDAD
DEPARTAMENTO NORTE DE SANTANDER													
PAMPLONA	934,48	777,32	963,35	981,54	1124,81	1090,56	934,48	984,79	933,30	1049,51	999,57	1051,84	11825,53
CACOTA	18,56	15,25	17,40	20,79	16,22	18,60	19,83	18,85	20,17	18,63	20,68	28,06	233,04
CUCUTILLA	29,19	18,54	23,58	19,95	21,77	20,23	21,66	28,15	26,42	24,42	29,90	34,74	298,55
CHITAGA	104,33	83,70	97,99	72,72	93,38	77,78	99,27	124,22	102,15	111,30	117,16	106,58	1190,58
LABATECA	33,44	29,46	15,97	20,83	21,44	17,75	28,07	28,25	29,05	29,70	27,66	35,46	317,08
SILOS	61,54	46,27	55,06	40,04	50,06	42,10	50,80	66,36	50,26	52,12	65,85	64,62	645,08
TOLEDO	139,65	90,94	114,33	94,05	103,84	98,36	117,30	109,79	122,38	114,38	111,42	136,71	1353,15
MUTISCUA	23,40	19,12	26,79	22,15	26,12	23,99	25,08	26,72	25,53	30,25	30,38	27,59	307,12
DEPARTAMENTO DE SANTANDER													
VETAS	11,77	12,24	14,92	12,13	11,20	15,94	12,08	15,33	10,95	12,00	16,47	12,20	157,23
TONA	33,80	31,72	37,65	33,48	49,47	40,30	43,75	41,09	36,20	47,53	46,33	42,22	483,54
SURATA	8,42	5,33	4,94	3,43	6,44	6,14	7,60	6,60	5,12	10,76	12,15	19,32	96,25
CHARTA	11,18	6,65	7,25	5,60	7,74	7,00	9,68	8,56	7,33	10,83	6,75	12,00	100,57
ENTIDADES PRIVADAS													
T&J E.S.P. S.A.S.	9,67	9,42	13,11	8,36	8,05	8,80	14,46	12,40	15,87	27,53	8,25	3,82	139,72
AUTOVIAS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,44	1,03	0,00	0,40	2,14	4,01
SOCIEDAD MINERA DE SANTANDER	2,81	3,82	4,84	5,22	5,54	4,90	6,25	3,52	3,17	3,38	2,33	1,70	47,48
FORESTAL CONSULTORES	0,00	0,25	0,25	0,00	0,00	0,40	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,30
GLOBAL MINERALS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80	0,40	0,60	0,52	0,53	0,00	0,00	2,85
TOTAL MENSUAL	1422,24	1150,03	1397,43	1340,29	1546,07	1473,65	1391,10	1475,67	1389,44	1542,87	1495,30	1578,99	17203,08

Nota: Fuente: Adaptado de (EMPOPAMPLONA, 2023).

La tabla muestra la cantidad mensual de residuos sólidos urbanos (RSU), medidos en toneladas, generados durante el año 2023 en diferentes municipios o entidades.

Los datos reflejan la evolución de la generación de residuos, mostrando posibles impactos de políticas implementadas, mejoras en la recolección o variaciones en la actividad económica y social de cada municipio.

Este informe es esencial para identificar municipios con mayor demanda de servicios y para impulsar tecnologías y programas que optimicen el manejo de residuos y el aprovechamiento energético, alineándose con objetivos de sostenibilidad y reducción de emisiones.

Tabla 16

Toneladas dispuestas en la vigencia 2024

TONELADAS RSU 2024													
MUNICIPIO / ENTIDAD	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	TOTAL 2024 MUNICIPIO/ENTIDAD
DEPARTAMENTO NORTE DE SANTANDER													
PAMPLONA	#####	926,91	#####	#####	1102,92	#####	####	890,94	917,44	#####	967,48	#####	11885,54
CACOTA	20,56	16,99	21,70	20,63	14,36	#####	####	18,11	17,86	24,37	19,41	25,070	235,32
CUCUTILLA	32,85	22,92	24,62	28,36	17,52	#####	####	30,50	24,80	27,09	32,83	40,030	345,31
CHITAGA	#####	95,28	88,99	104,12	96,52	#####	####	116,24	94,15	#####	98,01	#####	1187,32
LABATECA	34,74	36,89	30,81	29,17	15,44	#####	####	31,26	26,81	30,35	33,03	36,290	342,03
SILOS	70,61	59,29	47,70	46,68	53,30	#####	####	55,89	49,70	58,92	63,26	58,070	663,99
TOLEDO	#####	144,63	#####	136,16	100,73	#####	####	118,42	113,67	99,72	117,31	#####	1394,37
MUTISCUA	33,42	25,29	22,14	24,42	26,77	#####	####	26,05	24,24	32,64	26,53	26,560	320,27
DEPARTAMENTO DE SANTANDER													
VETAS	13,07	10,74	8,39	13,95	19,64	#####	####	15,44	12,53	17,41	15,05	14,070	177,77
TONA	57,98	44,33	40,40	52,72	43,33	#####	####	43,88	48,60	50,25	51,47	57,110	588,69
SURATA	16,44	15,61	8,86	14,32	17,96	#####	####	9,06	13,47	14,00	15,19	10,380	172,21
MATANZA	25,02	18,80	20,22	30,93	20,87	#####	####	26,16	27,70	26,44	30,05	33,440	308,80
CALIFORNIA	11,21	10,04	11,28	12,74	16,29	#####	9,80	9,92	8,36	12,50	12,55	12,110	144,26
CHARTA	13,10	10,35	8,59	11,35	10,06	#####	####	8,71	10,90	8,06	13,15	13,460	131,86
ENTIDADES PRIVADAS													
T&J E.S.P. S.A.S.	4,46	6,75	7,21	7,50	9,45	4,68	4,39	3,33	1,78	3,29	0,86	0,00	53,68
AUTOVIAS	0,00	0,24	0,00	0,00	0,00	0,60	0,00	0,00	0,40	0,55	0,40	0,00	2,19
PROYECTO SOTO NORTE	1,60	2,68	2,72	4,15	4,17	4,49	4,96	2,51	8,40	5,37	0,00	7,320	48,37
FORESTAL CONSULTORES	0,00	0,00	0,40	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80
GLOBAL MINERALS	0,00	0,00	0,00	0,96	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,63
TOTAL MENSUAL	#####	#####	#####	#####	1569,98	#####	####	#####	#####	#####	1496,58	#####	18004,37

Nota: Fuente: Adaptado de (EMPOPAMPLONA, 2024).

La tabla muestra la cantidad mensual de residuos sólidos urbanos (RSU), medidos en toneladas, generados durante el año 2024 en diferentes municipios o entidades.

Finalmente, para 2024, la tabla proyecta o registra la generación mensual de residuos sólidos urbanos, manteniendo la estructura uniforme para facilitar análisis comparativos año a año. La continuidad en el monitoreo y reporte es clave para la gestión eficiente y sostenible de los residuos en la región, apoyando la toma de decisiones basada en datos precisos y actualizados.

Medición y monitoreo del biogás en el campo

El monitoreo y medición de gases es una herramienta esencial para garantizar la seguridad ambiental y la salud pública en áreas de alta concentración de gases nocivos. El relleno sanitario regional la cortada es un sitio de disposición final de residuos sólidos ordinarios; se implementó un sistema de monitoreo y medición de gases donde sus componentes ambientales medibles y abortados nos permiten alcanzar los objetivos y tareas específicas desarrolladas durante la estancia incluyendo la cuantificación y caracterización de la producción de gases en el relleno sanitario y la modelación de estos gases en el área de influencia del relleno, esta actividad contribuye con la mejora de gestión y disposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU).

En la parte económica observamos que aumenta costos en mantenimiento, gestión y restauración, pero es importante para su mejoramiento de la eficiencia y productividad generando empleo; cumpliendo con las normas, evitando sanciones para proteger la empresa. Este proyecto es fundamental para abordar la problemática ambiental y de salud pública asociada al relleno sanitario regional la cortada ya que un buen manejo de residuos agiliza la disposición y

optimiza la vida útil del relleno sanitario mejorando la calidad del servicio a los municipios y entidades beneficiadas.

Por consiguiente, se muestran los resultados de la medición de monitoreo realizado en cada una de las celdas y chimeneas del relleno La Cortada.

Tabla 17

Descripcion dela medicion y monitoreo realizado en las chimeneas del relleno sanitario dia 1

Dia 1																			
CELDA	CHIMENEA	Hora:			Temperatura:			Hora:			Temperatura:			Hora:			Temperatura:		
		CH4 %	CO2 %	CO %	O2 %	H2S Ppm	Nox %	CH4 %	CO2 %	CO %	O2 %	H2S Ppm	Nox %	CH4 %	CO2 %	CO %	O2 %	H2S Ppm	Nox %
1	1	3,7	8	1,7	2,6	0	6,1	3.56	7.68	1.68	2.48	0	6.08	3.36	6.08	0.68	3.84	0	5.92
	2	3,4	6,1	0,7	3,8	0	5,9	3.36	6.08	0.68	3.84	0	5.92	2.24	14.24	0.24	1.36	1	6.64
	3	2,3	14,6	0,3	1,4	1	6,7	2.24	14.24	0.24	1.36	1	6.64	4.32	1.76	5.68	1	1	5.12
	4	4,4	1,8	5,8	1	1	5,2	4.32	1.76	5.68	1	1	5.12	5.04	16.64	0.24	3.12	5.76	0
	5	5,2	16,9	0,3	3,2	6	0	5.04	16.64	0.24	3.12	5.76	0	7.52	15.12	0.24	4.96	2.88	0
	6	7,7	15,5	0,3	5,1	3	0	7.52	15.12	0.24	4.96	2.88	0	3.28	17.76	0.08	3.44	5.76	0
	7	3,4	18,2	0,1	3,5	6	0	3.28	17.76	0.08	3.44	5.76	0	4.08	8.64	3.28	2.84	2	3.64
	8	4,2	8,8	3,3	2,9	2	3,7	4.08	8.64	3.28	2.84	2	3.64	2.84	18.48	0.24	3.52	1.92	0
	9	2,9	18,8	0,3	3,6	2	0	2.84	18.48	0.24	3.52	1.92	0	3.44	17.12	0.16	8.96	3.84	0.72
2	1	3,6	17,4	0,2	9,1	4	0,8	3.44	17.12	0.16	8.96	3.84	0.72	2.16	0.1	0.48	2.64	4.8	2.72
	2	2,2	0,1	0,5	2,7	5	2,8	2.16	0.1	0.48	2.64	4.8	2.72	6.32	19.2	6.8	4.32	5.76	6.8
	3	6,5	19,5	7	4,4	6	7	6.32	19.2	6.8	4.32	5.76	6.8	7.68	17.28	0.16	3.84	6.72	6.12
	4	7,8	17,5	0,2	3,9	7	6,2	7.68	17.28	0.16	3.84	6.72	6.12	8.52	6.64	4.64	5.84	4.8	5.64
	5	8,7	6,7	4,7	5,9	5	5,7	8.52	6.64	4.64	5.84	4.8	5.64	8,7	6,7	4,7	5,9	5	5,7

Nota: Fuente: Adaptado de (EMPOPAMPLONA, 2024).

La tabla incluye parámetros sobre la producción de biogás y su composición (por ejemplo, concentración de metano, dióxido de carbono y contaminantes como ácido sulfhídrico), que son fundamentales para la cuantificación y caracterización mencionadas en el texto.

Esto permite conocer el volumen y calidad de gases generados en las celdas y chimeneas del relleno, base para la modelación de su dispersión en el área de influencia, en el día 1.

Tabla 18

Descripción de la medición y monitoreo realizado en las chimeneas del relleno sanitario día 2

		Día 2																	
CELDA	CHIMENEA	Hora:			Temperatura:			Hora:			Temperatura:			Hora:			Temperatura:		
		CH4 %	CO2 %	CO %	O2 %	H2S Ppm	Nox %	CH4 %	CO2 %	CO %	O2 %	H2S Ppm	Nox %	CH4 %	CO2 %	CO %	O2 %	H2S Ppm	Nox %
1	1	3.4	7.96	1.64	2.44	0	5.78	3.72	7,92	1,68	2.48	0	6.12	3.76	8.24	1,72	2.52	0	6.28
	2	3.28	5.78	0.64	3.76	0	5.84	3.32	6	0,68	3.8	0	5.92	3.36	6.2	0,72	3.76	0	5,96
	3	2.16	14	0.2	1.32	1	6.52	2.28	14.4	0,24	1.32	1	6.68	2.36	4.4	0,24	1.32	1	6.72
	4	4.2	1.68	5.56	1	1	5	4.44	1.8	5.64	1	1	5.12	4.48	1.84	5.72	1	1	5.16
	5	4.84	16.28	0.2	3.04	5.6	0	5.04	16.8	0,24	3.12	5.76	0	5.08	6,96	0,24	3.12	5.72	0
	6	7.24	14.84	0.2	4.88	2.8	0	7.64	15.2	0,24	4,96	2.84	0	7.6	5.16	0,24	4,96	2.84	0
	7	3.2	17.44	0.08	3.36	5.6	0	3.24	17.6	0,08	3.44	5.76	0	3.32	17.8	0,12	3.44	5.72	0
	8	4	8.4	3.2	2.8	2	3.56	4.04	8.6	3.24	2.84	2	3.64	4.12	8.76	3.24	2.84	2	3.68
	9	2.76	18.12	0.2	3.44	1.84	0	2.84	18.44	0,24	3.52	1,92	0	2,88	8.52	0,24	3.52	1,92	0
2	1	3.32	16.8	0.12	8.84	3.72	0.7	3.4	17	0,16	8,96	3.84	0,72	3.48	7.16	0,12	8,96	3.8	0,76
	2	2.04	0.08	0.44	2.56	4.72	2.68	2.12	0.1	0,48	2.64	4.8	2.72	2.16	0.1	0,52	2.64	4.8	2.76
	3	6.24	19	6.72	4.24	5.64	6.72	6.32	19.2	6.8	4.32	5.76	6.8	6.4	9.32	6.8	4.32	5.72	6.84
	4	7.56	17.04	0.12	3.76	6.6	6	7.64	17.24	0,16	3.84	6.72	6.12	7.52	17	0.1	4.24	5.64	6.72
	5	8.4	6.4	4.56	5.72	4.64	5.52	8.52	6.64	4.64	5.84	4.8	5.64	6.3	4.2	3.8	5.7	1.17	2

Nota: Fuente: Adaptado de (EMPOPAMPLONA, 2024).

La tabla incluye parámetros sobre la producción de biogás y su composición (por ejemplo, concentración de metano, dióxido de carbono y contaminantes como ácido sulfhídrico), que son fundamentales para la cuantificación y caracterización mencionadas en el texto.

Esto permite conocer el volumen y calidad de gases generados en las celdas y chimeneas del relleno, base para la modelación de su dispersión en el área de influencia, en el día 2.

Tabla 19

Descripción de la medición y monitoreo realizado en las chimeneas del relleno sanitario día 3

		Día 3																	
CELDA	CHIMENEA	Hora:			Temperatura:			Hora:			Temperatura:			Hora:			Temperatura:		
		CH4 %	CO2 %	CO %	O2 %	H2S Ppm	Nox %	CH4 %	CO2 %	CO %	O2 %	H2S Ppm	Nox %	CH4 %	CO2 %	CO %	O2 %	H2S Ppm	Nox %
1	1	3.5	7.8	1,64	2.48	0	6.08	3.72	8.32	1,76	2.56	0	6.24	3.36	6.24	0,72	3.8	0	5.96
	2	3.36	6.08	0,68	3.84	0	5.92	3.36	6.24	0,72	3.8	0	5,96	2.32	14.48	0.28	1.32	1	6.72
	3	2.24	14.24	0,24	1.36	1	6.64	2.32	14.48	0,28	1.32	1	6.72	4.48	1.84	5.76	1	1	5.16
	4	4.32	1,76	5.68	1	1	5.12	4.48	1,84	5.76	1	1	5.16	5.08	17	0.28	3.16	5.72	0
	5	5.04	16.64	0,24	3.12	5.76	0	5.08	17	0,28	3.16	5.72	0	7.6	15.2	0.24	5	2.84	0
	6	7,52	15.12	0,24	4,96	2,88	0	7.6	15.2	0,24	5	2.84	0	3.32	17.84	0.12	3.48	5.72	0
	7	3.28	17,76	0,08	3.44	5.76	0	3.32	17,84	0,12	3.48	5.72	0	4.16	8.8	3.24	2.88	2	3.68
	8	4.08	8.64	3.28	2.84	2	3.64	4.16	8.8	3.24	2,88	2	3.68	2.88	18.56	0.24	3.56	1.96	0
	9	2.84	18.48	0,24	3.52	1,92	0	2,88	18.56	0,24	3.56	1,96	0	3.52	17.2	0.12	9	3.8	0.76
2	1	3.44	17.12	0,16	8,96	3.84	0,72	3.52	17.2	0,12	9	3.8	0,76	2.2	0.1	0.52	2.64	4.8	2.72
	2	2.16	0.1	0,48	2.64	4.8	2.72	2.12	0.1	0,48	2.64	4.8	2.72	6.32	19	0.28	3.57	1.8	3.5
	3	6.32	19.2	6.8	4.32	5.76	6.8	6.32	19.2	6.8	4.32	5.76	6.8	8.72	8.32	1.76	2.56	0	6.24
	4	6.68	17.28	0,16	3.84	6.72	6.12	7.56	17.04	0.12	3.76	6.6	6	6.4	9.32	6.8	4.32	5.72	6.84
	5	8.52	6.64	4.64	5.84	4.8	5.64	7.52	17	0.1	4.24	5.64	6.72	8.56	15.4	0.12	4.76	4.6	6

Nota: Fuente Adaptado de (EMPOPAMPLONA, 2024).

La tabla incluye parámetros sobre la producción de biogás y su composición (por ejemplo, concentración de metano, dióxido de carbono y contaminantes como ácido sulfhídrico), que son fundamentales para la cuantificación y caracterización mencionadas en el texto.

Esto permite conocer el volumen y calidad de gases generados en las celdas y chimeneas del relleno, base para la modelación de su dispersión en el área de influencia, en el día 3.

Tabla 20

Descripción de la medición y monitoreo realizados en el relleno sanitario día 4

Día 4																									
CELDA	CHIMENEA	Hora:						Temperatura:						Hora:						Temperatura:					
		CH4 %	CO2 %	CO %	O2 %	H2S Ppm	Nox %	CH4 %	CO2 %	CO %	O2 %	H2S Ppm	Nox %	CH4 %	CO2 %	CO %	O2 %	H2S Ppm	Nox %						
1	1	3.64	7,96	1,64	2.48	0	6.08	3.36	6.24	0,72	3.8	0	5,96	3.44	7,96	1,64	2.48	0	6.08						
	2	3.8	6.08	0,68	3.84	0	5.92	2.32	14.48	0,28	1.32	1	6.72	3.28	6.08	0,68	3.84	0	5.92						
	3	2.24	14.24	0,24	1.36	1	6.64	4.48	1,84	5.76	1	1	5.16	2.24	14.24	0,24	1.36	1	6.64						
	4	4.32	1,76	5.68	1	1	5.12	5.08	17	0,28	3.16	5.72	0	4.32	1,76	5.68	1	1	5.12						
	5	5.04	16.64	0,24	3.12	5.76	0	7.6	15.2	0,24	5	2.84	0	5.04	16.64	0,24	3.12	5.76	0						
	6	5.5	15.12	0,24	4,96	2,88	0	3.32	17,84	0,12	3.48	5.72	0	7,52	15.12	0,24	4,96	2,88	0						
	7	2.28	17,76	0,08	3.44	5.76	0	4.16	8.8	3.24	2,88	2	3.68	3.28	17,76	0,08	3.44	5.76	0						
	8	5.08	8.64	3.28	2.84	2	3.64	2.88	18.56	0,24	3.56	1,96	0	4.08	8.64	3.28	2.84	2	3.64						
	9	2.84	18.48	0,24	3.52	1,92	0	8.52	17.2	0,12	6.9	3.8	0,76	2.84	18.48	0,24	3.52	1,92	0						
2	1	3.44	17.12	0,16	8,96	3.84	0,72	7.72	8.32	1,76	2.56	0	6.24	3.44	17.12	0,16	8,96	3.84	0,72						
	2	2.16	0.1	0,48	2.64	4.8	2.72	6.32	19.2	6.8	4.32	5.76	6.8	2.16	0.1	0,48	2.64	4.8	2.72						
	3	6.32	19.2	6.8	4.32	5.76	6.8	7.68	17.28	0.16	3.84	6.72	6.12	6.32	19.2	6.8	4.32	5.76	6.8						
	4	8.68	17.28	0,16	3.84	6.72	6.12	8.52	6.64	4.64	5.84	4.8	5.64	9.8	17.28	0,16	3.84	6.72	6.12						
	5	8.52	6.64	4.64	5.84	4.8	5.64	7,68	17.28	0,16	3.84	6.72	6.12	8.52	6.64	4.64	5.84	4.8	5.64						

Nota: Fuente: Adaptado de (EMPOPAMPLONA, 2024).

La tabla incluye parámetros sobre la producción de biogás y su composición (por ejemplo, concentración de metano, dióxido de carbono y contaminantes como ácido sulfhídrico), que son fundamentales para la cuantificación y caracterización mencionadas en el texto.

Esto permite conocer el volumen y calidad de gases generados en las celdas y chimeneas del relleno, base para la modelación de su dispersión en el área de influencia, en el día 4.

Tabla 21

Descripción de la medición y monitoreo realizado en las chimeneas del relleno sanitario día 5

		Dia 5																	
CELDA	CHIMENEA	Hora:			Temperatura:			Hora:			Temperatura:			Hora:			Temperatura:		
		CH4 %	CO2 %	CO %	O2 %	H2S Ppm	Nox %	CH4 %	CO2 %	CO %	O2 %	H2S Ppm	Nox %	CH4 %	CO2 %	CO %	O2 %	H2S Ppm	Nox %
1	1	3.72	8.32	1,76	2.56	0	6.24	3.56	7,84	1.6	2.4	0	6.16	3.36	6.24	0,72	3.8	0	5,96
	2	3.36	6.24	0,72	3.8	0	5,96	3.4	6.16	0,6	3.8	0	5.92	2.32	14.48	0,28	1.32	1	6.72
	3	2.32	14.48	0,28	1.32	1	6.72	2.2	14.2	0,2	1.36	1	6.64	4.48	1,84	5.76	1	1	5.16
	4	4.48	1,84	5.76	1	1	5.16	4.32	1,76	5.68	1	1	5.12	5.08	17	0,28	3.16	5.72	0
	5	5.08	17	0,28	3.16	5.72	0	5.04	16.64	0,24	3.12	5.76	0	7.6	15.2	0,24	5	2.84	0
	6	7.6	15.2	0,24	5	2.84	0	7.52	15.12	0,24	4.96	2,88	0	3.32	17,84	0,12	3.48	5.72	0
	7	3.32	17,84	0,12	3.48	5.72	0	3.28	17,76	0,08	3.44	5.76	0	4.16	8.8	3.24	2,88	2	3.68
	8	4.16	8.8	3.24	2,88	2	3.68	4.08	8.64	3.28	2.84	2	3.64	2,88	18.56	0,24	3.56	1,96	0
	9	2,88	18.56	0,24	3.56	1,96	0	2.84	18.48	0,24	3.52	1,92	0	3.52	17.2	0,12	9	3.8	0,76
2	1	3.52	17.2	0,12	9	3.8	0,76	3.44	17.12	0,16	8,96	3.84	0,72	2.2	0.1	0,52	2.64	4.8	2.72
	2	2.2	0.1	0,52	2.64	4.8	2.72	2.16	0.1	0,48	2.64	4.8	2.72	6.32	19.2	6			0.72
	3	8.52	6.64	4.64	5.84	4.8	5.64	6.32	19.2	6.8	4.32	5.76	6.8	8.3	4,4	4,6	3,7	8.4	2
	4	6.32	19.2	6.8	4.32	5.76	6.8	6.8	17.28	0,16	3.84	6.72	6.12	6.8	40	3.9	9,3	1.7	1.8
	5	7.2	2.8	6.3	2.9	2	3.7	8.52	6.64	4.64	5.84	4.8	5.64	7.4	4.8	7.3	5.9	4	8.7

Nota: Fuente: Adaptado de (EMPOPAMPLONA, 2024).

La tabla incluye parámetros sobre la producción de biogás y su composición (por ejemplo, concentración de metano, dióxido de carbono y contaminantes como ácido sulfhídrico), que son fundamentales para la cuantificación y caracterización mencionadas en el texto.

Esto permite conocer el volumen y calidad de gases generados en las celdas y chimeneas del relleno, base para la modelación de su dispersión en el área de influencia, en el día 5.

Tabla 22

Descripción de los datos solicitados

Datos	
Temperatura ambiente	20,1°C
Velocidad del viento	3,6 m/s
Velocidad del viento máx.	12,5 m/s
Humedad	71,50%
Dirección del viento	WNW283°

Nota: Fuente: Adaptado de (EMPOPAMPLONA, 2024).

La tabla muestra las condiciones ambientales medidas en el sitio:

La temperatura ambiente es de 20.1 grados Celsius.

La velocidad promedio del viento es 3.6 metros por segundo, con un máximo registrado de 12.5 metros por segundo.

La humedad relativa es del 71.5%, indicando un ambiente bastante húmedo.

El viento sopla desde el oeste-noroeste, con una dirección de 283 grados.

Estos datos son importantes para entender cómo se dispersan los gases en el área y planificar el monitoreo ambiental.

$$A = \pi r^2$$

$$Q = A * v$$

Donde A = área de un círculo

Tabla 23

Descripción de las fórmulas utilizadas

Formulas a utilizar
Area de un círculo: $A=\pi*r^2$
Caudal volumétrico: $Q=A*v$
Donde:
A = Area de la sección transversal de la chimenea
r = Radio de la chimenea
v = Velocidad de los gases
Q = Caudal volumétrico

Nota: Fuente: Adaptado de (EMPOPAMPLONA, 2024).

Estas fórmulas y análisis permiten cuantificar la generación de biogás, determinar su calidad, evaluar cómo aprovecharlo energéticamente y planificar su integración con la infraestructura energética local o regional.

Tabla 24*Datos de la velocidad y dirección de las chimeneas*

CELDA	CHIMENEA	VELOCIDAD DE SALIDA (mph)	VELOCIDAD DE SALIDA (m/s)	TEMPERATURA (C°)	DIAMETRO CHIMENEA	RADIO (m)	AREA TRANSVERSAL	CAUDAL VOLUMETRICO (m³/s)
1	1	1,3	0,58	43	15,24	0,0762	0,0182	0,0106
	2	0,8	0,36	32	15,24	0,0762	0,0182	0,0065
	3	1,4	0,63	38	15,24	0,0762	0,0182	0,0114
	4	0,8	0,36	40	15,24	0,0762	0,0182	0,0065
	5	0,9	0,40	31	15,24	0,0762	0,0182	0,0073
	6	1,5	0,67	39	15,24	0,0762	0,0182	0,0122
	7	0,8	0,36	36	15,24	0,0762	0,0182	0,0065
	8	0,9	0,40	40	15,24	0,0762	0,0182	0,0073
	9	1,3	0,58	38	15,24	0,0762	0,0182	0,0106
2	1	1,4	0,63	39	15,24	0,0762	0,0182	0,0114
	2	1,5	0,67	41	15,24	0,0762	0,0182	0,0122
	3	0,9	0,40	39	15,24	0,0762	0,0182	0,0073
	4	1,3	0,58	38	15,24	0,0762	0,0182	0,0106
	5	1,4	0,63	38	15,24	0,0762	0,0182	0,0114

Nota: Fuente: Adaptado de (EMPOPAMPLONA, 2024).

En el monitoreo de emisiones gases en el relleno sanitario la cortada, las chimeneas son puntos clave para la liberación de biogás y otros gases generados por la descomposición de residuos sólidos. Para evaluar su comportamiento y dispersión, se registran múltiples parámetros físicos.

Clausura del relleno sanitario

La clausura de rellenos sanitarios está regulada por normas y leyes ambientales, como la resolución 1390 de 2005 del ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, que establece directrices y pautas para el cierre y restauración ambiental de sitios de disposición final

de residuos sólidos. El relleno sanitario la cortada este año en el mes de agosto dio clausura a la celda sur que venía trabajando desde el 2021 e inicio en la celda norte donde su vida útil es de 36 meses.

Propuesta de una alternativa de una estrategia integral para el aprovechamiento del biogás

Con respecto a la evaluación de alternativas se seleccionará la propuesta que cumpla con los criterios de viabilidad técnicos, económicos, ambientales y sociales se convierta en la tecnología que permita el desarrollo de una estrategia integral para el aprovechamiento del biogás a fines de valorización energética de los residuos sólidos y represente los beneficios ambientales que contribuyan a la reducción de los gases de efecto invernadero en el relleno sanitario regional la cortada.

De igual manera la estrategia integral seleccionada que se va a proponer deberá ser una estrategia adaptable a cualquier relleno sanitario en Colombia, teniendo en cuenta las políticas públicas en la materia.

Fase 3

En esta sección se establecen los lineamientos para definir la estrategia de gestión para el aprovechamiento del biogás mediante la cual pueda ser recuperado y aprovechado; generando así beneficios socioambientales en la población aledaña al relleno sanitario la cortada.

Tabla 25*Estrategia 1*

<i>Alternativa</i>	<i>Sistema de captura y control del biogás</i>
Objetivo	Reducir la liberación directa de metano y otros gases a la atmosfera.
Fase de aplicación	Construcción y Operación del relleno
Tipo de medida	Compensación
Impactos	Reducción de emisión de GEI y otros gases contaminantes
Acciones	Realizar estudios de factibilidad y evaluación de fuentes de biogás Capacitar al personal en la operación y mantenimiento de los sistemas de recuperación. Establecer un programa de monitoreo y mantenimiento regular de los sistemas.
Lugar de aplicación	Relleno sanitario La Cortada

Nota: Fuente: Elaboración propia

El modelo colombiano de bigas establece un flujo mínimo de 97m³/hr para su funcionamiento efectivo. Por lo tanto, nuestra estrategia se centra en convertir el biogás en biometano para generar energía y comercializarla.

La conversión del biogás del relleno sanitario la cortada en biometano implica un proceso de filtración y purificación que elimina gases no combustibles y aumenta la concentración de metano (CH₄) hasta alrededor del 90%. Según (Souza & Schaeffer, 2013) la utilización de

microorganismos es una opción viable para remover contaminantes, como el sulfuro de hidrógeno, y obtener un biogás de alta calidad.

Durante la purificación del biogás y su conversión en biometano, se elimina el dióxido de carbono para alcanzar un porcentaje de metano similar al del gas natural, lo que permite su uso en aplicaciones finales similares. Para lograr esto, se pueden utilizar varios disolventes, siendo el polietileno glicol (PEG) uno de los más efectivos debido a su alta solubilidad para el dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno (H_2S).

La quema de biogás sin eliminar el sulfuro de hidrógeno puede tener consecuencias ambientales graves, ya que se produce dióxido de azufre (SO_2), un gas que contribuye a la formación de lluvia ácida.

El biogás se comprime y una pequeña parte se utiliza para alimentar los equipos de la planta. Después de la filtración, el biogás se enriquece en metano y se convierte en biometano. Luego, el biometano se comprime y se puede almacenar en cilindros, canalizar a través de ductos para almacenamiento o transporte a largas distancias para su uso en redes de gas natural (Souza & Schaeffer, 2013).

A continuación, se muestra un modelo de planta de compresión y tratamiento de bigas en la siguiente figura.

10. Secador
11. Filtro de CO₂
12. Compresor de biometano
13. Reserva de biometano
14. Equipo generador a biometano
15. Válvula de alivio
16. Refrigeración del agua a biogás
17. Bomba de agua a biogás.
18. Salida de biogás a baja presión (4-10 bar)
19. Salida de biometano a media presión (10-40 bar)
20. Salida de biometano a media y alta presión (10-90 bar).

Tabla 26

Estrategia 2

<i>Alternativa</i>	<i>Aprovechamiento energético del biogás</i>
Objetivo	Generar energía renovable y establecer el uso que se le dará al biogás producido en el relleno
Fase de aplicación	Construcción y Operación del relleno
Tipo de medida	Recuperación Estabilidad del relleno
Impactos	Conflicto con la comunidad Control de emisiones, olores y vectores generados
Acciones	Identificar los sitios que serán beneficiados por la estrategia Dar a conocer los usos de sistema Establecer cálculos a las viviendas que podrían ser iluminadas con la máxima capacidad de energía

Lugar de aplicación	Relleno sanitario y viviendas cercanas al relleno La Cortada
---------------------	--

Nota: Fuente: Elaboración propia

El modelo colombiano de biogás nos permite determinar la capacidad máxima de generación de electricidad de la planta y calcular cuántas viviendas se podrían iluminar con ella. Considerando un consumo promedio de 10 bombillos LED de 9W por vivienda, podemos estimar el número de viviendas que se podrían abastecer. La ecuación siguiente muestra los cálculos detallados:

Ecuación 3.

Cantidad de W por Vivienda

$$9W * 10Bombillos = 90W/Vivienda$$

Es importante destacar que existen varias tecnologías para generar energía eléctrica a partir del biogás, clasificadas en tres categorías principales:

Plantas térmicas con motores de combustión interna (MCI), que alcanzan potencias de hasta 20 MW y rendimientos del 70-80%.

Plantas térmicas de ciclo combinado, que combinan turbinas de vapor y gas con rendimientos del 25-35%.

Plantas térmicas con microturbinas de gas, que utilizan metano de baja calidad y producen 350 kW (0,35 MW) de potencia.

Las plantas de generación de energía con capacidad menor a 10 MW están excluidas del mercado mayorista de electricidad, pero pueden vender su energía a comercializadoras para abastecer el mercado regulado, siempre que se cumpla con la condición de no tener vinculación económica entre las partes, según la resolución 39 de 2001.

Evaluación de la Estrategia

En la metodología anterior se describió que la evaluación de la estrategia ejecuta mediante la matriz DOFA y así determinar la efectividad de la estrategia en caso de aplicarse.

Análisis de resultados

Según los resultados, se puede concluir que el relleno sanitario La Cortada ha estado trabajando de acuerdo con las técnicas adecuadas a lo largo de su vida útil. Pero es importante realizar el aprovechamiento de el biogás para así aumentar su vida útil y generar energía renovable la cual puede ser comercializada a la comunidad o utilizada en el mismo relleno sanitario.

La producción de residuos sólidos en Pamplona ha venido aumentando desde el 2021 significativamente debido al crecimiento poblacional, el consumismo y la falta de prácticas de

reutilización y reciclaje. Además, la producción de residuos sólidos de los municipios que disponen en la cortada hace que aumente la cantidad de toneladas dispuestas.

Durante la investigación, se pudo identificar que la cobertura diaria de los residuos cumple, teniendo en cuenta lo anterior la producción de lixiviados es tratada en la planta así no se generan derrames el sistema de drenaje y recolección se encuentran en buenas condiciones.

La PTLX produce un efluente que cumple con la normativa de vertimientos (Resolución 0631 de 2015), gracias a su eficiente proceso de tratamiento que garantiza parámetros fisicoquímicos dentro de los límites establecidos.

De acuerdo con lo anterior la viabilidad técnica se evaluó considerando factores como la compatibilidad con la infraestructura existente, la complejidad de la implementación, la capacidad de tratamiento y la calidad del efluente generado.

La viabilidad económica se evaluó considerando factores como el costo de inversión, el costo de operación y mantenimiento, el potencial de generación de ingresos. El costo de inversión para su implementación de la tecnología seleccionada es significativo, pero se puede recuperar a largo plazo mediante la reducción de costos de tratamiento, el costo de operación es moderado y se puede manejar con experiencia y recursos adecuados y el potencial de generación de ingresos es significativo, ya que se puede generar un producto de alta calidad y ser reutilizado de manera segura.

El análisis de rentabilidad se usa utilizando indicadores como el valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR): Los resultados indican:

El VPN es positivo, lo que indica que la inversión es rentable a largo plazo.

La TIR es superior al costo de capital, lo que indica que la inversión es rentable.

Como lo venimos diciendo la cuantificación de los beneficios ambientales y económicos de la implementación de las tecnologías propuestas se realizan a través de:

Identificación de indicadores como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la mejora de la calidad del agua y la reducción de residuos.

Se realiza un monitoreo antes y después de la implementación de la tecnología.

Análisis de datos recopilados para determinar la reducción o mejora en los indicadores ambientales.

Las herramientas técnicas usadas son las siguientes:

Análisis del ciclo de vida para evaluar los impactos ambientales y económicos

Utilizar modelos de simulación para evaluar los impactos de la tecnología en diferentes escenarios.

Hacer un análisis de Costo-Beneficio para evaluar la rentabilidad y la inversión de la tecnología.

Al seguir estos pasos se puede obtener una cuantificación precisa y confiable de los beneficios ambientales y económicos de la implementación de la tecnología seleccionada.

Conclusiones

El modelo colombiano de biogás ha permitido estimar la generación de este en el relleno sanitario la cortada, ha sido fundamental para determinar el aprovechamiento; el estudio permitió cuantificar y caracterizar el biogás generado en el relleno, identificando volúmenes significativos de metano y dióxido de carbono, así como contaminantes críticos como ácido sulfhídrico. Esto confirma el potencial del biogás como fuente de energía renovable y como recurso para mejorar la eficiencia energética del relleno.

La implementación de sistemas de monitoreo de gases en celdas y chimeneas ha demostrado ser fundamental para garantizar la seguridad ambiental y la salud pública. El seguimiento de parámetros como velocidad de salida, caudal volumétrico, temperatura y dirección del viento permite evaluar la dispersión de gases y reducir riesgos asociados a emisiones nocivas.

La estrategia integral contribuye a mejorar la gestión de los residuos sólidos urbanos, optimizando la disposición final y prolongando la vida útil del relleno sanitario. Esto se traduce en un servicio más eficiente para los municipios beneficiados y en un manejo más sostenible de los residuos.

Se identificaron oportunidades para integrar la energía generada con redes locales y consumidores industriales o residenciales. Esto facilita la transición hacia una gestión energética más sostenible y promueve el uso de energías renovables en la región.

La estrategia integral asegura el cumplimiento de normas ambientales, evitando posibles sanciones y promoviendo buenas prácticas en la gestión de residuos. Además, contribuye a la

reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, apoyando objetivos de sostenibilidad y mitigación del cambio climático.

Recomendaciones

Es necesario realizar análisis más detallados que permitan determinar la factibilidad de la estrategia 1, considerando los costos asociados a esta tecnología y la posible necesidad de separar los componentes del biogás para optimizar su aprovechamiento.

Para la estrategia 2, el municipio debe contemplar la asignación de recursos destinados a la compra de equipos y maquinaria necesarios para la captura y transformación del biogás en energía.

Para garantizar un uso adecuado del modelo, se requiere contar con información primaria relacionada con la disposición histórica de residuos, lo cual permitirá obtener resultados más precisos.

La metodología utilizada en este estudio puede aplicarse en la formulación de estrategias de gestión ambiental en otros sectores, como el ganadero, forestal o industrial, especialmente aquellos interesados en generar energía a partir del biogás.

Se sugiere establecer convenios estratégicos con empresas del sector energético con el fin de profundizar en la temática y aumentar los ingresos derivados del proyecto.

Referencias bibliográficas

Botero, N. (2020). Aprovechamiento energético mediante cogeneración de biogás obtenido del lacto suero. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y de medio ambiente

<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/34839/nmboterop.pdf?sequen>

Hernández, M. (2018). Generación de biogás a partir del aprovechamiento de residuos sólidos biodegradables en el Tecnológico de Costa Rica, sede Cartago. Tecnología en Marcha, 160 Vol. 31, N.º 2, Abril-Junio 2018.

<https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v31n2/0379-3982-tem-31-02-159.pdf>

Quevedo, G. (2022). Introducción de sistema de captura de biogás en el relleno sanitario de la ciudad de Portoviejo. ingeniería Energética, vol. XLIII, núm. 2, pp. 90-98, 2022.

http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012022000200090

Rincón-Velásquez, N. Y. & Castiblanco-Rozo, C. (2021). Políticas y normas sobre energías renovables para el desarrollo de biogás en Colombia. Una revisión. *Gestión y Ambiente*, 24(1), 98868. <https://doi.org/10.15446/ga.v24n1.98868>

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2018). *Landfill gas emissions model (LandGEM) user's guide*.

<https://www.epa.gov/land-research/landfill-gas-emissions-model-landgem>

Andrade, A., Restrepo, A. y Tibaquirá, J. E. Estimación de biogás de relleno sanitario, caso de estudio: Colombia, *Entre Ciencia E Ingeniería*, vol. 12, No. 23, pp. 40-47, enero-junio, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.31908/19098367.3701>

López Arriaza, D. Á. (2016). *Modelo para el diseño de sistemas de captación y aprovechamiento de biogás producido en rellenos sanitarios* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile].

<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/138545/Modelo-para-el-diseno-de-sistemas-de-captacion-y-aprovechamiento-de-biogas-producido.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDBC)*.

<https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Estrategia-Colombiana-de-Desarrollo-Bajo-en-Carbono-ECDBC.pdf>

Souza, J., & Schaeffer, L. (2013). *Sistema de compresión de biogás y biometano*. Información Tecnológica, 24(6), 3–8. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000600002>

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2016). *Documento CONPES 3874: Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos*.

<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.pdf>

Martín González, S. (1997). *Producción y recuperación del biogás en vertederos controlados de residuos sólidos urbanos: Análisis de variables y modelización* (Tesis doctoral). Universidad de Oviedo. <http://hdl.handle.net/10651/14401>

Tchobanoglous, G y Kreith, F. (2002). *Handbook of solid waste management*. New York :McGraw Hill, 2002. Disponible en: <https://repository.udca.edu.co/handle/11158/3012>

Arroyo, M., & Ramírez-Monroy, A. (2020). *Dióxido de carbono, sus dos caras*. Anales de Química de la RSEQ, 116(2), 81–87.

<https://analesdequimica.es/index.php/AnalesQuimica/article/view/1316/1893>

Stege, A. L. (2010). *Modelos matemáticos para la estimación de la generación de biogás en rellenos sanitarios*. Springer.

<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-13299-7>

Congreso de la República de Colombia. (1979). *Ley 9 de 1979. Por la cual se dictan medidas sanitarias*.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1177>

Congreso de la República de Colombia. (1994). *Ley 142 de 1994. Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones*.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=2752>

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2017). *Consulta de la norma*.

<https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=300>

Unidad de Planeación Minero-Energética, & Universidad Nacional de Colombia. (2014). *Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia*.

https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/Estudios/Estimacion_potencial_biogas_biomasa_colombia.pdf

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 20675: Biogas—Production, conditioning, upgrading and utilization: Terms, definitions and classification scheme*. [Disponible en ISO](#)

Sánchez Hernández, W. A., Arévalo Toscano, J., & Sánchez Hernández, L. (2025). *Análisis de la producción de biogás a partir de desechos agrícolas mediante la supervisión de las variables de temperatura, presión y pH en un biodigestor anaeróbico en la zona rural de Ocaña*. *Revista Ingenio*, 22(1), 1–6. <https://doi.org/10.22463/2011642X.4212>

APPA Renovables. (2023). *Guía de biogás: Producción y valorización energética*.

<https://www.appa.es>

Velásquez-Piñas, J. A., Calle-Roalcaba, O. D., Miramontes-Martínez, L. R., & Alonso Gómez, L. A. (2023). *Evaluación económica y ambiental de las tecnologías de utilización del biogás y perspectivas del análisis multicriterio*. *Revista ION*, 36(1), 29–47.

<https://doi.org/10.18273/revion.v36n1-2023003>

Apéndices

Apéndice A

Dron utilizado para la toma de ubicación de fuentes de emisión de gases



Nota. Dron DJI AIR 2S utilizado para la captura de fotos aéreas del relleno sanitario regional la cortada.

Apéndice B

Equipo de muestreo de gases



Nota. Podemos observar El ALTAIR 4X detector multigas, mide simultáneamente hasta 4 gases de una amplia gama de opciones y sensores XCell.

Apéndice C

Cuadrícula de recorrido de los vuelos con el dron

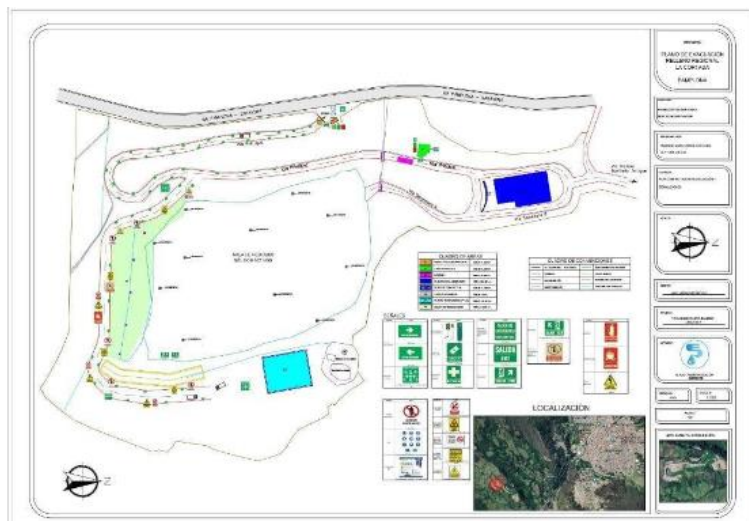


Nota. Esta fotografía muestra el trasado de las rutas de vuelo para el Dron DJI AIR 2S en el relleno sanitario regional la cortada, los puntos rojos indican los controles tomados del GPS.

Fuente. EMPOPAMPLONA S.A. E.S.P. (2024).

Apéndice D

Plano actualizado relleno sanitario la cortada




Nota. Imagen del plano del relleno sanitario donde se observa el área total

Fuente. EMPOPAMPLONA S.A. E.S.P. (2024).

Apéndice E

Formato de entrada RSU al relleno sanitario la cortada

	Entrada de RSU al Relleno Sanitario La Cortada					Código	FAS-05 v.04					
						Página	1 de 1					
Fecha _____												
COMPACTADOR O VEHICULO												
BLANCO DWG- 675 CAMILO T	BLANCO OWG- 882 MIGUEL A.	BLANCO OWG- 883 GERSON L.	CAMIONETA BLANCA OWG-885	CAMIONETA AMARILLA OWG-527	PARTICULARES	PROCEDENCIA	HORA DE ENTRADA	HORA DE SALIDA	CANTIDAD (TON)	Ruta No.	RESPONSABLE	OBSERVACIONES
PESO TOTAL (TON)												
Firma del Responsable _____												

Nota. Esta imagen muestra la entrada de los vehículos compactadores del municipio de pampplona, especificando la placa, hora de entrada, hora de salida, toneladas dispuestas y ruta.

Fuente. EMPOPAMPLONA S.A. E.S.P. (2024).

Apéndice F

Formato de entrada RSU al relleno sanitario

		Entrada de RSU de Otros Municipios al Relleno Sanitario La Cortada			Código	FAS-06 v 02
					Página	1 de 1
Fecha: _____		Municipio: _____				
Fecha Día	Información del Vehículo Modelo Placa		Hora de entrada	Hora de salida	Cantidad Kg	Responsable
PESO TOTAL (Kg)						
<hr/> Supervisor del Relleno Sanitario						

Nota. Esta imagen muestra la entrada de los vehículos compactadores de otros municipios, especificando modelo, placa, hora de entrada, hora de salida, cantidad dispuesta.

Fuente. EMPOPAMPLONA S.A. E.S.P. (2024).

Apéndice G

Muestreo de gas

Muestreo de gases



Nota. En la imagen se observa la actividad de medición de gases por el ingeniero a cargo en una de las chimeneas de la celda 2 la cual se encuentra clausurada.

Apéndice H

Manual de operaciones relleno sanitario

https://unadvirtualedu-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/dagomezgarci_unadvirtual_edu_co/EeG2omvh-iBFk-y3w5t0SKoBkHISDSj49QZ7gX95ow2w?e=A9BXSz

Nota: El enlace muestra el manual de operaciones del Relleno sanitario regional la cortada. Fuente. EMPOPAMPLONA S.A. E.S.P. (2024).

Apéndice I

Manual de operaciones planta

<https://unadvirtualedu->

[my.sharepoint.com/:b:/g/personal/dagomezgarci_unadvirtual_edu_co/EVEtYyFRBoFAoXsxPYcf49gBkW95-2J9_xGDo1il20Yljg?e=rIMaXe](https://unadvirtualedu-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/dagomezgarci_unadvirtual_edu_co/EVEtYyFRBoFAoXsxPYcf49gBkW95-2J9_xGDo1il20Yljg?e=rIMaXe)

Nota. El enlace muestra el manual de operaciones de la planta de tratamiento de lixiviados

Fuente. EMPOPAMPLONA S.A. E.S.P. (2024).