

**METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN Y APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS
EN PROYECTOS MDL: CASO DE ESTUDIO DE PARQUES ECOLÓGICOS EN
COLOMBIA.**

SANTIAGO CAICEDO BOBADILLA

Proyecto integral para optar por el título de

INGENIERO QUÍMICO

DIRECTOR

Ing. Químico, MSc. Juan Camilo Cely Garzón

INGENIERO QUÍMICO

CODIRECTOR

Ing. Químico, Oscar Libardo Lombana Charfuelan

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA INGENIERÍA QUÍMICA

BOGOTÁ D.C.

2024

NOTA DE ACEPTACIÓN

Ing.

Ing.

Bogotá D.C, junio de 2024

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ramiro Augusto Forero Corzo

Vicerrectora de Investigaciones y Extensión

Dra. Susan Margarita Benavides Trujillo

Vicerrectora Académica

Dra. María Fernanda Vega de Mendoza

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano Facultad de Ingenierías

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Director Programa Ingeniería Química

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la Fundación Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dediqué inicialmente a Dios, por darme la inspiración y la fuerza para continuar en este proceso para obtener uno de los anhelos más deseados.

A mis padres Yaneth Bobadilla y Rodrigo Zubieta, cuyo amor incondicional es la fuerza motriz detrás de cada logro. Su guía y sacrificio son la brújula que orienta mi camino. A mi madre, por sus palabras de aliento en los momentos de duda y por enseñarme que la perseverancia es la clave del éxito. A mi padre, por ser el ejemplo de integridad y dedicación, y por enseñarme a afrontar los desafíos con valentía y determinación. Sus esfuerzos y sacrificios son los cimientos sobre los cuales he construido mis sueños.

A mi hermano Matías Zubieta, compañero de aventura cuyas risas y complicidad hicieron ligero cada paso, que con su inocencia logró inspirarme a ser un ejemplo para seguir, y por las innumerables ocasiones en las que sus preguntas y curiosidad me motivaron a aprender más y a ser mejor. Cada momento compartido con él es un tesoro que llevo en mi corazón.

A mis abuelos, quienes con su sabiduría y ternura han sido faros de luz en mi vida. Sus historias y enseñanzas han sido lecciones valiosas que me han guiado y motivado a seguir adelante. A mis tíos y tías, por sus palabras de ánimo y por creer siempre en mi potencial. A toda mi familia extendida, cuyo amor y apoyo han sido un refugio constante en este viaje.

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

A la ciencia, que abre ventanas a mundos desconocidos y nos permite entender la complejidad de nuestro entorno. A la pasión por descubrir, que nos impulsa a cuestionar, a explorar, a innovar.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se lo dediqué inicialmente a Dios, por darme la inspiración y la fuerza para continuar en este proceso para obtener uno de los anhelos más deseados.

A mis padres por ser mi pilar fundamental y haberme apoyado incondicionalmente, pese a las adversidades e inconvenientes que se presentaron ya que con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más.

Agradezco a todos los docentes que, con su acompañamiento, conocimiento y apoyo, me motivaron a desarrollarme como persona y profesional en la Fundación Universidad de América.

Finalmente quiero agradecerles a mi familia y a mi novia Alejandra Tovar por su apoyo moral, gracias al cual me permitió con empeño, dedicación y cariño seguir adelante, y a todos quienes contribuyeron con un granito de arena para culminar con éxito este maravilloso objetivo.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVOS	17
1. GENERALIDADES DE LOS CASOS DE ESTUDIOS DE PROYECTOS DE MECANISMO DE DESARROLLO LIMPIO	18
1.1. Situación actual de emisiones de gases en Colombia	20
1.2. Función y concepto de los gases de efecto invernadero	24
1.3. Condiciones para el manejo de emisiones de gas de efecto invernadero	28
1.4. Metas establecidas para la reducción de gases de efecto invernadero con relación al panel intergubernamental sobre cambio climático	32
1.4.1. Metas desarrolladas por IPCC	32
1.4.2. Objetivos de desarrollo limpio	35
1.5. Denominación de los proyectos tipo mecanismo de desarrollo limpio	36
1.6. Reglamentación para los proyectos tipo mecanismo de desarrollo limpio	38
1.6.1. Niveles económicos y capitales para proyectos tipo mecanismo de desarrollo limpio	43
1.7. Definición y beneficios de los parques ecológicos (PE)	44
1.7.1. Conservación de la biodiversidad	45
1.7.2. Restauración de los ecosistemas degradados	45
1.7.3. Uso de energías renovables	45
1.7.4. Eficiencia energética	46
1.7.5. Gestión adecuada de residuos	46
1.8. Procesos mitigación de contaminación actual desarrollados en Colombia	47
1.9. Composición primaria de los gases generados en los rellenos sanitarios	50
1.9.1. Composición de los rellenos sanitarios y su respectivo proceso para la producción de gas	56
1.10. Sistema de descomposición de los residuos en los rellenos sanitarios	61
1.10.1. Fase 1 – Fase de descomposición inicial (Hidrolisis)	65
1.10.2. Fase 2 – Fase de acidogénesis	67
1.10.3. Fase 3 – Fase de acetogenesis	68
1.10.4. Fase 4 – Fase de metanogenesis	66
1.11. Bonos de carbón aplicado a la reducción de emisiones en vertederos	70
1.12. Métodos y generalidades para la reducción de gases de efecto invernadero	73
1.13. Metodología designada para la captura de gases	75
1.13.1. Mantenimiento de los estándares de cumplimiento ambiental	76
1.13.2. Generación de electricidad a partir de la producción de CO ₂	77
1.13.3. Producción de gas por medio de método BTU	78
1.13.4. Producción de gas natural renovable	78
1.14. Proyectos tipo mecanismo de desarrollo limpio realizados en Colombia	79
1.14.1. Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos por fuentes puntuales en la zona Cali-Yumbo.	79
1.14.2. Informe Final Inventario de Emisiones de Fuentes Industriales	79
1.14.3. Interaseo landfill gas mitigation project	79
1.14.4. La Glorita Landfill Gas Project	80
1.14.5. Project 2794: Bionersis landfill project in Pasto, Colombia	80

1.14.6.	Project 3332: Bionersis LFG project Colombia 2	80
1.14.7.	Project 3715: Bionersis LFG project Colombia 3 (Villavicencio)	81
1.14.8.	Project 3656: Bionersis LFG projects Colombia 4 (Cucuta & Manizales)	81
1.14.9.	Cartagena Landfill Gas Capture and Usage Project	81
1.14.10.	Proactive Presidente landfill gas to energy project	81
1.14.11.	Interia landfill gas recovery and flaring	82
1.14.12.	Centro Industrial del Sur Organic Waste Project	82
1.14.13.	Curva de Rodas and La Pradera landfill gas management project	82
1.14.14.	Dona Juana landfill gas-to-energy project	82
1.14.15.	El Guacal Landfill Gas Flaring Project	83
1.14.16.	Montenegro landfill gas recovery and flaring	83
1.14.17.	The Colomba-Guabal Landfill Gas Project	83
1.14.18.	Los Pocitos Landfill Gas Utilización Project	83
1.15.	gestión de residuos sólidos en rellenos sanitarios	85
1.15.1.	Regulaciones y estándares regidos en Colombia para los rellenos sanitarios	87
2.	TECNOLOGIA Y DESARROLLO UTILIZADO EN LOS RELLENOS SANITARIOS DE PROYECTOS DE MECANISMO DE DESARROLLO LIMPIO TIPO PARQUES ECOLOGICOS	87
2.1.	Tecnologías para la captura de gases de efecto invernadero en rellenos sanitarios	87
2.1.1.	Tecnologías utilizadas en proyecto de mecanismo de desarrollo limpio a nivel Colombia y a nivel internacional	91
2.2.	Tecnología y datos de emisión proporcionados por los proyectos internacionales tipo mecanismos de desarrollo limpio	108
2.2.1.	Bionersis LFG Project Malaysia (Penang)	109
2.2.2.	Bionersis Project Thailand 1	109
2.2.3.	Bionersis project on La Duquesa landfill, Dominican Republic	110
2.2.4.	Bionersis LFG Project Chile 4 (Los Angeles)	110
2.3.	Comparación de emisiones entre proyectos colombianos y proyectos internacionales	111
2.3.1.	Comparación de datos de emisiones entre Colombia y Malasia	113
2.3.2.	Comparación de datos de emisiones entre Colombia y Tailandia	115
2.3.3.	Comparación de datos de emisiones entre Colombia y Republica Dominicana	116
2.3.4.	Comparación de datos de emisiones entre Colombia y Chile	118
3.	HERRAMIENTAS, DATOS Y DIAGNOSTICO DE ANALITICA DE DATOS PARA PROYECTOS DE MECANISMO DE DESARROLLO LIMPIO TIPO PARQUE ECOLOGICO	121
3.1.	Generalidades de la analítica de datos	122
3.2.	Herramientas computacionales	123
3.2.1.	Python	123
3.2.2.	R	124
3.2.3.	SQL (Structured Query Language)	125
3.2.4.	Power BI	125
3.3.	Aplicación de la analítica de datos para la toma de decisiones	125
3.3.1.	Optimización de Procesos	126
3.3.2.	Implementación de sistemas de monitoreo avanzados	126
3.3.3.	Integración de datos	127
3.3.4.	Ejemplos y Casos de Estudio en Ingeniería e Industria	127
3.4.	Descripción de las estrategias para la toma de decisiones en proyectos de mecanismo de desarrollo limpio	128

3.4.1.	Metodología para la planificación de medidas de mitigación	129	
3.5.	Estrategia de analítica de datos de los proyectos		135
3.6.	Variables y parámetros que afectan a los datos en los proyectos de mecanismo de desarrollo limpio en Colombia		136
3.6.1.	Importancia en Proyectos MDL y Parques Ecológicos	137	
3.6.2.	Condiciones meteorológicas y terrenos	137	
3.6.3.	Condiciones meteorológicas y terrenales de la ciudad de Pasto	142	
3.6.4.	Condiciones meteorológicas y terrenales de la ciudad de Bucaramanga	148	
3.6.5.	Condiciones meteorológicas y terrenales de la ciudad de Villavicencio	153	
3.7.	Metodología para la gestión de los datos obtenidos de las bases de datos de los proyectos		159
3.8.	Variables y parámetros que afectan a los datos en los proyectos de mecanismo de desarrollo limpio en Colombia	160	
3.8.1.	Aumento poblacional en ciudades que albergan los casos de estudio	161	
3.8.2.	Estándares económicos y de producto interno bruto	168	
3.8.3.	Crecimiento del área de los rellenos sanitarios		177
3.9.	Diversos escenarios para proyección de los proyectos		178
3.9.1.	Estimación anual de reducción de emisiones reportadas por proyecto		179
3.9.2.	Toneladas métricas producidas y eliminadas reportadas por proyecto		183
4.	ESTRATEGIA ANALITICA DE SOFTWARE Y RELACION PARA TOMA DE DECISIONES EN PROYECTOS FUTUROS		192
4.1.	Modelos matemáticos orientados al proyecto mecanismo de desarrollo limpio		192
4.2.	Modelos predictivos con potencial aplicación a los proyectos de mecanismo de desarrollo limpio para la analítica de datos		202
4.2.1.	Machine learning	202	
4.2.2.	Metodología Random Forest	204	
4.2.3.	Metodología Redes Neuronales	205	
4.3.	Casos de estudio de modelos de métodos estadísticos		208
4.3.1.	Casos de estudio menos conocidos	211	
4.3.2.	Librerías para los Modelos analíticos	214	
4.4.	Descripción de los códigos y herramientas utilizadas por medio de GitHub		215
4.5.	Toma de decisiones basada en datos y resultados de predicción de datos	227	
4.5.1.	Recolección de datos y explicación de modelo estadístico	227	
4.5.2.	Análisis de sensibilidad e interpretación de resultados	229	
5.	CONCLUSIONES		239
	REFERENCIAS		241
	GLOSARIO		268
	ANEXOS		269

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Emisiones de CO ₂ de países latinoamericanos. Climate Watch Historical GHG Emissions (2000-2020).	21
Figura 2. BOLETÍN DE LA OMM SOBRE LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO.	24
Figura 3. Inventario de gases de efecto invernadero - INGEI - Secretaría Distrital de Ambiente.	25
Figura 4. Potencial de calentamiento global de distintos GEI.	30
Figura 5. Contaminantes del aire.	48
Figura 6. Composición de los gases de los rellenos sanitarios.	56
Figura 7. Fuentes de contaminantes tóxicos presentes en los rellenos sanitarios.	57
Figura 8. Tratamiento de lixiviados en un relleno sanitario.	61
Figura 9. Tipos de residuos plásticos presentes en rellenos sanitarios.	63
Figura 10. Conceptos básicos sobre el gas de vertedero.	70
Figura 11. Proyectos de bonos de carbono	73
Figura 12. Producción de energía a partir de gas de vertedero.	77
Figura 13. Estado de los departamentos en relación con la disposición final autorizada de sus municipios.	86
Figura 14. Sistema de recogida y combustión.	90
Figura 15. Proceso de tres etapas para el gas de vertedero.	93
Figura 16. Modelo de proyectos MDL para antorcha de quema de biogás.	95
Figura 17. Modelo actual de antorcha de quema de biogás.	96
Figura 18. Pozo de extracción vertical.	101
Figura 19. Pozo de extracción horizontal.	102
Figura 20. Bomba de extracción de vacío.	104
Figura 21. EPA – Recolección y tratamiento de gas de vertedero.	106
Figura 22. Gráfica de la estimación anual de reducción de emisiones en Colombia	112
Figura 23. Gráfica qqplot de comparación de la estimación anual de reducción de emisiones entre Colombia y Malasia.	114
Figura 24. Gráfica qqplot de comparación de la estimación anual de reducción de emisiones entre Colombia y Tailandia.	116
Figura 25. Gráfica de comparación de la estimación anual de reducción de emisiones entre Colombia y República Dominicana.	117
Figura 26. Gráfica de comparación de la estimación anual de reducción de emisiones entre Colombia y Chile.	119
Figura 27. Rosa de vientos establecida en la ciudad de Bogotá.	141
Figura 28. Rosa de vientos Pasto, Colombia.	144
Figura 29. Terreno y limitaciones de la ciudad de Pasto.	145
Figura 30. Distancia entre la ciudad de Pasto y el relleno sanitario Antanas EMAS.	146
Figura 31. Ubicación del relleno sanitario Antanas EMAS.	147
Figura 32. Rosa de vientos Bucaramanga, Colombia.	149
Figura 33. Terreno y limitaciones de la ciudad de Bucaramanga.	150
Figura 34. Distancia entre la ciudad de Bucaramanga y el relleno sanitario El Carrasco.	151
Figura 35. Ubicación del relleno sanitario El Carrasco.	152
Figura 36. Rosa de vientos Villavicencio, Colombia.	154
Figura 37. Terreno y limitaciones de la ciudad de Villavicencio.	156
Figura 38. Distancia entre la ciudad de Villavicencio y el relleno sanitario parque ecológico Reciclante.	157
Figura 39. Ubicación del relleno sanitario parque ecológico Reciclante.	158
Figura 40. Gráfica de la evolución de habitantes de Pasto.	163
Figura 41. Gráfica de la evolución de los habitantes de Bucaramanga.	165
Figura 42. Gráfica de la evolución de los habitantes de Villavicencio.	167
Figura 43. Gráfica de evolución de PIB del departamento de Nariño.	170

Figura 44. Gráfica de evolución de PIB del departamento de Santander.	173
Figura 45. Gráfica de evolución de PIB del departamento de Meta.	176
Figura 46. Estimación anual de emisiones reducidas en la ciudad de Pasto.	180
Figura 47. Estimación anual de emisiones reducidas en la ciudad de Bucaramanga.	181
Figura 48. Estimación anual de emisiones reducidas en la ciudad de Villavicencio.	183
Figura 49. Cantidades métricas de depósitos en el relleno sanitario de Pasto.	185
Figura 50. Cantidades métricas de depósitos en el relleno sanitario de Bucaramanga.	186
Figura 51. Cantidades métricas de depósitos en el relleno sanitario de Villavicencio.	188
Figura 52. Metodología y técnica de random forest.	205
Figura 53. Lista de métodos que se utilizan comúnmente para desarrollar modelos de previsión de residuos.	213
Figura 54. Carga de librerías.	216
Figura 55. Carga de datos de Excel.	217
Figura 56. Preparación de datos.	217
Figura 57. Carga de datos.	218
Figura 58. Lectura de datos comprimidos.	218
Figura 59. Creación data base.	218
Figura 60. División de datos.	219
Figura 61. Definición del modelo LSTM.	219
Figura 62. Compilación de datos.	220
Figura 63. Entrenamiento de predicción.	220
Figura 64. Función para predicción.	221
Figura 65. Función para múltiples simulaciones.	222
Figura 66. Desnormalización de simulaciones.	222
Figura 67. Lista de años.	222
Figura 68. Plot de figuras.	223
Figura 69. Definición de funciones para colores.	223
Figura 70. Grafica de predicción por simulación.	224
Figura 71. Nombre de ejes para grafica.	225
Figura 72. Ajuste de leyenda para grafica.	225
Figura 73. Ajuste de límites de grafica.	226
Figura 74. Plot de variables.	226
Figura 75. Muestra de grafico final.	226
Figura 76. Predicción para los próximos años en Pasto con 70% de afinidad.	230
Figura 77. Predicción para los próximos años en Pasto con 80% de afinidad.	231
Figura 78. Predicción para los próximos años en Pasto con 90% de afinidad.	232
Figura 79. Predicción para los próximos años en Bucaramanga con 70% de afinidad.	233
Figura 80. Predicción para los próximos años en Bucaramanga con 80% de afinidad.	234
Figura 81. Predicción para los próximos años en Bucaramanga con 90% de afinidad.	235
Figura 82. Predicción para los próximos años en Villavicencio con 70% de afinidad.	236
Figura 83. Predicción para los próximos años en Villavicencio con 80% de afinidad.	237
Figura 84. Predicción para los próximos años en Villavicencio con 90% de afinidad.	238

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tabla con potencial de calentamiento global por los GEI	28
Tabla 2. Fuentes de emisión GEI.	29
Tabla 3. Niveles máximos permisibles para contaminantes a criterio.	49
Tabla 4. Concentración y tiempo de exposición de los contaminantes para los niveles de prevención, alerta y emergencia.	51
Tabla 5. Niveles máximos permisibles para contaminantes.	51
Tabla 6. Componentes típicos del gas de vertedero.	53
Tabla 7. Componentes típicos del gas de vertedero	55
Tabla 8. Comparación de pozo vertical y horizontal.	103
Tabla 9. Evolución de la población de Pasto.	162
Tabla 10. Evolución de la población de Bucaramanga.	164
Tabla 11. Evolución de la población de Villavicencio.	166
Tabla 12. Evolución de la economía de Nariño.	169
Tabla 13. Evolución de la economía de Santander.	171
Tabla 14. Evolución de la economía de Meta.	174
Tabla 15. Evolución de la economía de Meta.	175
Tabla 16. Modelos de métodos estadísticos.	209
Tabla 17. Principales librerías de lenguajes de programación.	214

RESUMEN

El presente trabajo aborda la evaluación y aplicación de tecnologías en proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), con un enfoque particular en parques ecológicos en Colombia. La investigación se centra en la implementación de tecnologías para la captura y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), particularmente el metano y el dióxido de carbono, en rellenos sanitarios y otras instalaciones ambientales. A lo largo del estudio, se analizaron diferentes proyectos, destacando su impacto en la reducción de emisiones y los beneficios ambientales y económicos asociados. Entre los proyectos estudiados se encuentran los proyectos de mecanismo de desarrollo limpio implementados en los rellenos sanitarios EMAS, El Carrasco y el parque ecológico reciclante.

Las conclusiones principales del estudio indican que la implementación de tecnologías avanzadas y la aplicación de modelos predictivos basados en machine learning pueden mejorar significativamente la eficiencia en la captura de GEI y contribuir al cumplimiento de los objetivos globales de reducción de emisiones establecidas por el IPCC. Además, se destaca la importancia del manejo sostenible de la tierra y la transición hacia energías renovables como pilares fundamentales para mitigar el cambio climático. Este trabajo no solo proporciona un análisis detallado de los casos de estudio, sino que también ofrece recomendaciones prácticas para la implementación de estas tecnologías en futuros proyectos MDL, subrayando la necesidad de un enfoque integrado que combine innovación tecnológica y políticas ambientales efectivas, como la capacidad de reducción que puede llegar a ser alcanzada por dichos métodos llegando a ser mayor a 30 mil toneladas de CO₂ equivalente en el relleno de Villavicencio, cerca de 275 mil toneladas para Pasto y cerca de 400 mil toneladas de CO₂ para el relleno ubicado en la ciudad de Bucaramanga; para conseguir dichos alcances se deben tener una tasa más alta de tecnología aumentando a mínimo 17 antorchas de quema para cada uno de ellos así permitiendo aumentar casi 10 veces más las emisiones mitigadas por año.

Palabras clave: Machine Learning, Redes Neuronales, Analítica de datos, Emisiones, Gases de efecto invernadero, Parques ecológicos, Rellenos sanitarios

INTRODUCCIÓN

En Colombia crece el interés y la conciencia sobre los temas ambientales los cuales representan los mayores costos sociales como la contaminación del agua y los desastres naturales, especialmente la contaminación del aire. Según un estudio del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Banco Mundial, la contaminación del aire provoca unas 8.609 muertes prematuras cada año y le cuesta a la salud y mortalidad de un aproximado de 15.400 millones de pesos, o el equivalente al 1,4% del ingreso internos en 2015 o conocido como producto interno bruto (PIB). [1]

El cambio climático es uno de los desafíos más apremiantes de nuestro tiempo y tiene graves consecuencias para el medio ambiente, la economía y la sociedad en general. Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄), han contribuido significativamente al calentamiento global, alterando los ecosistemas y amenazando la vida humana. En respuesta a esta crisis, los proyectos del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) se están convirtiendo en una herramienta clave para mitigar el cambio climático al promover la adopción de tecnologías sostenibles que reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero.

En este trabajo se valora la evaluación y aplicación de tecnología en proyectos de mecanismo de desarrollo limpio en ecoparques en Colombia, donde el país ha demostrado un compromiso activo con la reducción de emisiones y la implementación de medidas sostenibles; la composición de este logra la combinación de análisis de datos históricos, uso de modelos predictivos basados en aprendizaje automático y evaluación del impacto de las tecnologías utilizadas en el medio ambiente y la economía. Al combinar estos enfoques, el objetivo es proporcionar una visión integral de la efectividad y viabilidad de las tecnologías de mitigación del cambio climático en estos entornos. [2]

La base teórica de este trabajo son los informes del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), que proporcionan directrices y objetivos claros para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global. Según el IPCC, limitar el calentamiento global a 1,5°C requiere reducir las emisiones netas de CO₂ en un 45% con respecto a los niveles de 2010 para 2030 y alcanzar emisiones netas cero

alrededores de 2050. Además, la gestión sostenible de la tierra y la transición a fuentes de energía renovables son factores importantes para lograr estos objetivos. Esta investigación incluye estudios de caso detallados de proyectos de mecanismo de desarrollo limpio implementados en los rellenos sanitarios EMAS, El Carrasco y el parque ecológico reciclante, en los que se destaca las condiciones tan favorables que han tendido desde su comienzo, destacando la efectividad de tecnologías avanzadas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero inflacionarias. Estos estudios de caso también consideran el impacto en otros sectores clave, como la industria y el transporte, que desempeñan un papel clave en la transición hacia una economía baja en carbono.

En la primera parte del proyecto, se lleva a cabo una revisión exhaustiva de la literatura científica y técnica relacionada con las emisiones de gases de efecto invernadero del sector de manejo de residuos para parques ecológicos en Colombia, resaltando los casos de estudio y proyectos relacionados. Esto incluye la consulta de artículos científicos, informes técnicos, proyectos de investigación y documentos relacionados con la temática prevista, esta revisión permite obtener un panorama completo de los estudios previos y las metodologías utilizadas, así como identificar posibles brechas de conocimiento. [3]

Posteriormente se establece una recopilación de datos históricos de emisiones y factores de actividad de contaminantes comunes del sector de manejo de residuos en parques ecológicos en Colombia. Estos datos son obtenidos a partir de documentos de proyectos de emisiones existentes, como los mencionados anteriormente, así como de fuentes oficiales y bases de datos relevantes. Dando énfasis a los datos relacionados con los gases de efecto invernadero como CO₂ y CH₄, para ello se tienen diferentes bases de datos de emisiones basados de gas de vertedero producidos por la empresa Bionersis a nivel colombiano, en territorios como Villavicencio, Pasto, Bucaramanga, Manizales y Cúcuta. A Continuación, se observa una interpretación de los resultados obtenidos a través de un análisis exhaustivo de los datos recopilados utilizando técnicas de análisis de datos y aprendizaje automático, incluyendo la exploración de los datos para identificar patrones y tendencias, así como la aplicación de algoritmos de aprendizaje automático para desarrollar un modelo predictivo de las emisiones de gases de efecto invernadero en los parques ecológico utilizando

herramientas y lenguajes de programación adecuados para realizar este análisis, como Python, R, Power BI, entre otros.

En seguida, con la base de resultados obtenidos del análisis de datos, se desarrolla una herramienta digital que permite evaluar y proyectar las emisiones de gases de efecto invernadero del sector de manejo de residuos en parques ecológicos en Colombia. Esta herramienta es precisa y eficiente, ya que permite evaluar diferentes variables y escenarios para obtener predicciones y recomendaciones sobre las emisiones; donde se tiene en cuenta las emisiones estimadas por medio de cálculos y valoraciones obtenidos mediante las metodologías de cálculo de los proyectos estudiados haciendo énfasis en la contaminación en términos de CO₂ de los gases estudiados, para ello, la metodología más adecuada para el desarrollo predictivo es Redes Neuronales con la cual se construye un modelo que combina múltiples formatos de decisión para obtener una predicción precisa y confiable haciendo uso de tecnologías web y de desarrollo de aplicaciones para implementar esta herramienta.

Por último, se realiza una evaluación de diferentes alternativas y escenarios para llevar a cabo una validación de la herramienta desarrollada, comparando sus resultados con datos reales de emisiones en parques ecológicos. Esto evaluar la precisión y confiabilidad de la herramienta junto a realizar ajustes o mejoras si es necesario, finalmente se observa un compendio de los resultados obtenidos de la herramienta desarrollada y la validación realizada, dando como resultado la estimación de reducción para los próximos 20 años de 30 mil toneladas de CO₂ para el relleno sanitario el reciclante y casi 300 mil toneladas de CO₂ para el rellenos EMAS siempre adjuntos al contexto de la problemática planteada donde se examina el impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero en los parques ecológicos en Colombia y se proporcionarán recomendaciones para la mitigación del cambio climático en este sector.

OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar la tecnología y emisiones de GEI en parques ecológicos mediante analítica de datos. Caso de estudio: Parque Ecológico Landfill Gas (PE-LFG) - Proyecto de Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) en Colombia.

Objetivos específicos

- Revisar el estado desarrollo y de tecnología de proyectos tipo PE-LFG.
- Estructurar una estratégica de analítica de datos de los proyectos MDL tipo PE con fines de revisión, diagnóstico y proyección de reducción de emisiones.
- Estructurar la estrategia analítica para la potencial toma de decisiones en futuros proyectos relacionados con PE-LFG.

1. GENERALIDADES DE LOS CASOS DE ESTUDIO DE PROYECTOS DE MECANISMO DE DESARROLLO LIMPIO

El problema por abordar en este proyecto es realizar una herramienta precisa y eficiente para evaluar y proyectar las emisiones de gases de efecto invernadero del sector de manejo de residuos en parques ecológicos en Colombia. Actualmente, la metodología para estimar estas emisiones se basa en factores de actividad estándar, que no siempre reflejan las condiciones y características específicas de las emisiones generadas a lo largo del territorio colombiano, presentando datos de proyectos actuales de Mecanismo Desarrollo Limpio. Esto genera un margen de error en la medición de las emisiones, lo que dificulta la elaboración de políticas y estrategias para la mitigación del cambio climático. [5]

Por lo tanto, el desarrollo de un modelo para análisis de datos con apoyo de documentos de proyectos de emisiones en parques ecológicos permite observar con mayor precisión las emisiones del sector, considerando factores de actividad específicos determinados por la información proporcionada por los mecanismos de desarrollo limpio (CDM) realizados durante los últimos 15 años en diferentes ciudades de Colombia. Para ello, se utilizarán datos históricos de emisiones y factores de actividad de contaminantes comunes de la industria como CO, NO_x, SO_x, CV realizando énfasis en la contaminación generada por gases de efecto invernadero como CO₂ y CH₄ (metano).[6]

Además que se espera que la aplicación de la herramienta para la toma de decisiones sobre la implementación de proyectos a través de aprendizaje automático permita la identificación de patrones y tendencias de datos que no eran evidentes con las técnicas convencionales de modelado para así proporcionar una guía de emisiones con tecnología utilizada en la industria para futuros proyectos además de proponer información adicional sobre las características de las emisiones; con esta herramienta, se espera mejorar la estimación de las emisiones, suministrar una guía para la toma de decisiones más acertada a nivel de tecnología, facilitar la elaboración de políticas y estrategias efectivas para la mitigación del cambio climático en el territorio colombiano.[7]

La emisión de GEI se produce cuando la biomasa se quema o se descompone, liberando CO_2 , CH_4 o CO a la atmósfera. Aunque dichos gases son considerados de efecto invernadero, también se considera como parte del ciclo natural del carbono, porque como por ejemplo las plantas absorben CO_2 a medida que crecen. Por lo tanto, la quema de biomasa puede ser considerada como una fuente de energía renovable, siempre y cuando se gestione de manera sostenible y se evite la deforestación y la degradación del suelo. Resultan ser uno de los sectores de mayor relevancia en la economía colombiana y su impacto en la calidad del aire es significativo. Las emisiones contaminantes asociadas incluyen partículas en suspensión, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, entre otros. Estos contaminantes pueden afectar la salud de las personas que habitan en los territorios donde se encuentren los parques ecológicos, causando problemas respiratorios y cardiovasculares, entre otros.

El proyecto podría contribuir a la ingeniería química al remitir una búsqueda de una nueva alternativa para determinar la polución generada por el manejo de biomasa y residuos generados de parques ecológicos en Colombia, se evaluarán las emisiones contaminantes para poder seguir los parámetros y regulaciones mencionadas anteriores. Además de proporcionar conocimientos adquiridos al largo de la carrera por materias y electivas de aprendizaje tales como Gestión Ambiental, probabilidad, estadística y diseño de experimentos.

Durante los últimos años, la creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) ha llevado a un enfoque renovado en la aplicación de tecnologías sostenibles y prácticas ambientales en diferentes sectores, por ello existen casos específicos y con una mayor atención donde se buscan espacios naturales que ayuden a conservar y proteger el medio ambiente y gracias a esto se ha prestado una mayor atención a los parques ecológicos. [8]

Los parques ecológicos resultan ser una gran alternativa para la mitigación de contaminación del aire debido a su potencial de quema de gas a través de tecnología específica, por ello, el análisis de la tecnología y las emisiones de GEI en parques ecológicos es crucial para evaluar la efectividad de las medidas implementadas y

tomar decisiones informadas sobre la gestión ambiental donde . La analítica de datos desempeña un papel fundamental en este análisis, ya que permite recopilar, procesar y proporcionar grandes volúmenes de información relacionada con el funcionamiento del parque, las emisiones de GEI y el rendimiento de la tecnología utilizada.

En este marco, se explorarán los conceptos clave necesarios para el análisis de la tecnología y las emisiones de GEI en parques ecológicos mediante la analítica de datos. Se abordarán temas como el impacto ambiental de las emisiones de GEI, los desafíos de la medición y monitorización de estas emisiones, los beneficios de la tecnología utilizada para el gas de vertedero y los métodos de análisis de datos aplicados en este contexto.

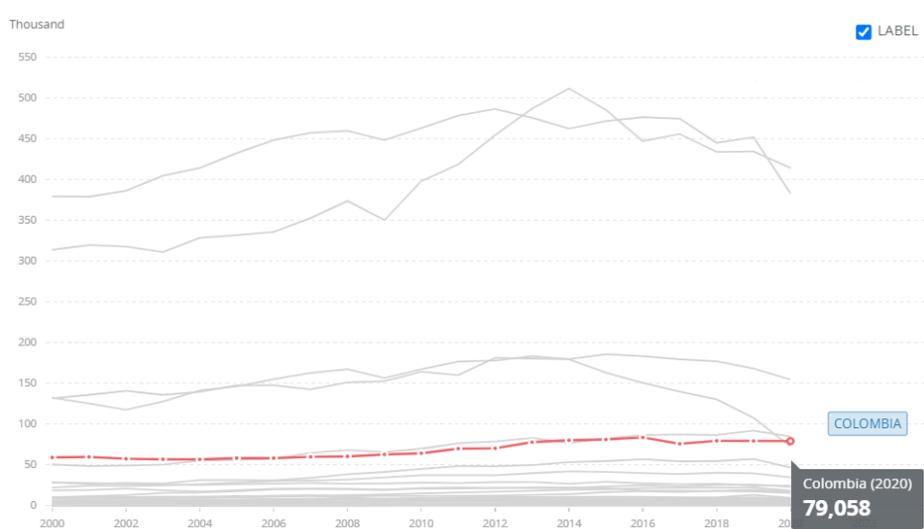
1.1. Situación actual de emisiones de gases en Colombia

Colombia, un país famoso por su riqueza natural y biodiversidad, juega un papel activo en la lucha contra el cambio climático en línea con los objetivos globales establecidos en el Acuerdo de París. En su Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC), Colombia se comprometió a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en un 51% para 2030 respecto de la línea base ("Nivel de Acción", BAU). Este ambicioso compromiso subraya la determinación del país de convertirse en líder en la lucha contra el cambio climático en América Latina.

En la figura 1 se puede observar la dinámica de emisiones de CO₂ en las regiones latinoamericanas a lo largo de los 20 años, es una base de datos expuesta por el banco mundial con la intención de proponer un análisis de aspectos ambientales enfocados en la sostenibilidad. De los últimos años los países que más han contaminado a nivel de CO₂ (los datos son proporcionados en kilotoneladas) son México y Brasil con 383 kilotoneladas y 414 kilotoneladas respectivamente los cuales se pueden destacar fácilmente por su gran cantidad de emisiones, mientras que Colombia se encuentra con una proporción de 79 kilotoneladas en el año 2020 teniendo un régimen y media bastante constante en los últimos años aunque cabe resaltar que en estos se han propuesto objetivos de sostenibilidad y mejora de emisiones a lo largo del país. [9]

Figura 1.

Emisiones de CO₂ de países latinoamericanos. Climate Watch Historical GHG Emissions (2000-2020).



Nota. La figura las emisiones históricas de países latinoamericanos destacando a Colombia. Tomado de: «World Bank Open Data», World Bank Open Data. <https://data.worldbank.org/indicador/EN.ATM.CO₂E.KT?end=2020&locations=CO&start=2000>

Para lograr este objetivo, Colombia ha delineado una serie de estrategias y políticas integrales. En el centro de estos esfuerzos se encuentra la Estrategia de Desarrollo Bajo en Carbono de Colombia (ECDBC). [10] La estrategia tiene como objetivo integrar el desarrollo económico con la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero a través de diversas iniciativas. Un elemento importante del ECDBC es la promoción de la eficiencia energética Colombia ha implementado programas para mejorar la eficiencia de los sectores industrial, comercial y residencial, contribuyendo así a la reducción de emisiones y al ahorro económico. En el sector de las energías renovables, Colombia ha realizado importantes inversiones en energía solar, eólica y biomasa, estos esfuerzos se reflejan en una mayor capacidad instalada de energía renovable. Por ejemplo, en los últimos años la capacidad instalada de energía solar ha superado los 200 MW y la de energía eólica, unos 1.100 MW. [11]

Estos logros son el resultado de incentivos fiscales y regulaciones favorables que han atraído inversiones en el sector de energía limpia. El sector del transporte, uno de los mayores emisores de gases de efecto invernadero en Colombia, también está en el

centro de importantes reformas; el país fomenta el uso de vehículos eléctricos y ha desarrollado planes de movilidad urbana sostenible como en algunas ciudades del país como Bogotá han introducido flotas de autobuses eléctricos en sus sistemas de transporte público, ayudando a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la calidad del aire, además, se han construido más de 400 kilómetros de carriles para bicicletas, fomentando el uso de vehículos no motorizados.

La gestión sostenible de los recursos naturales es otro elemento importante de la estrategia de Colombia ya que el país tiene vastos bosques que sirven como importantes sumideros de carbono.[12] A través de programas forestales y ambientales, Colombia ha restaurado más de 300.000 hectáreas de tierras degradadas con estas actividades no sólo secuestran dióxido de carbono, sino que también ayudan a proteger la biodiversidad y mejorar las condiciones de vida de las comunidades locales. En materia de gestión de residuos, Colombia ha desarrollado iniciativas para mejorar la gestión de residuos sólidos y líquidos donde existen proyectos como la recuperación y utilización de biogás en vertederos y plantas de tratamiento de aguas residuales han demostrado su eficacia. Por ejemplo, el relleno sanitario de Doña Juana en Bogotá ha implementado un sistema de recuperación de metano que ayuda a reducir las emisiones de este poderoso gas de efecto invernadero y generar energía renovable para la ciudad.[13]

El compromiso de Colombia con la lucha contra el cambio climático también se demuestra a través de su participación en proyectos del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), estos proyectos han reducido millones de toneladas de emisiones de CO₂ equivalente y generado importantes beneficios socioeconómicos. Un ejemplo típico es el proyecto de energía de biomasa de las Llanuras Orientales, que no sólo reduce las emisiones, sino que también crea empleos y promueve el desarrollo rural.

Para financiar estas iniciativas, Colombia ha recurrido a fondos climáticos internacionales como el Fondo Verde para el Clima (GCF) y el Fondo de Adaptación de donde los recursos se utilizan para financiar proyectos que ayuden a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y adaptarse al cambio climático, generando así una participación en acuerdos bilaterales y multilaterales de cooperación climática, brindándole acceso a tecnologías avanzadas y conocimientos técnicos necesarios para implementar estas estrategias de reducción de emisiones. [14]

A través de una combinación de eficiencia energética, promoción de energías renovables, gestión sostenible de los recursos naturales y una fuerte cooperación internacional, Colombia avanza hacia un futuro más limpio y resiliente al clima, estas actividades no sólo benefician al medio ambiente, sino que también contribuyen al desarrollo económico y social y mejoran la calidad de vida de los colombianos.

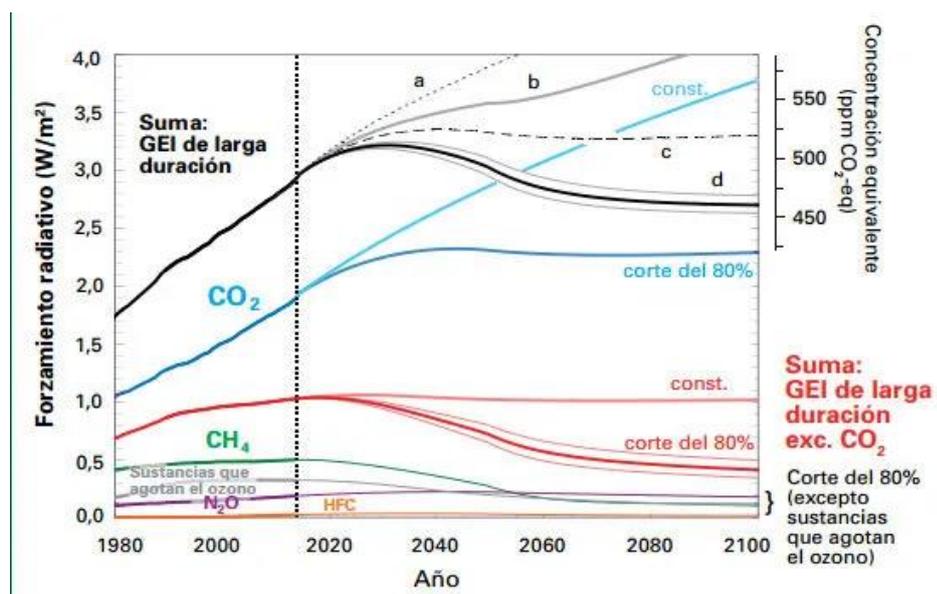
1.2. Función y concepto de los gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero (GEI) son compuestos químicos presentes en la atmósfera que tienen la capacidad de retener el calor del sol en la Tierra. Estos gases permiten que la energía solar llegue a la superficie terrestre, pero también atrapan parte de ese calor, lo que resulta en el fenómeno conocido como efecto invernadero, siendo esencial para mantener la temperatura adecuada en nuestro planeta y hacer posible la vida tal como la conocemos.[15]

Sin embargo, en las últimas décadas, la actividad humana ha aumentado significativamente las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, especialmente dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O). Estos gases se liberan principalmente por la quema de combustibles fósiles (como el carbón, el petróleo y el gas natural), la deforestación y otros procesos industriales y agrícolas; en la figura 2 se representa las emisiones de los gases mencionados observando el forzamiento radiactivo junto con una ilustración sencilla de los efectos de distintos escenarios de reducción de las emisiones durante los próximos 80 años. La Vigilancia de la Atmósfera Global (VAG) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) coordina las observaciones de los principales contribuyentes al cambio climático, los gases de efecto invernadero (GEI) de larga duración.

Figura 2.

Boletín de la omm sobre los gases de efecto invernadero.



Nota. La Vigilancia de la Atmósfera Global (VAG) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) coordina las observaciones de los principales contribuyentes al cambio climático, los gases de efecto invernadero (GEI) de larga duración. Tomado de: BOLETÍN DE LA OMM SOBRE LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO. (2013). Tiempo.com | Meteored. <https://www.tiempo.com/ram/106492/boletin-de-la-omm-sobre-los-gases-de-efecto-invernadero/>

El aumento de las concentraciones de GEI en la atmósfera ha llevado al calentamiento global, un fenómeno que provoca cambios en el clima global y regiones específicas. Los efectos del calentamiento global incluyen el aumento de las temperaturas promedio, el derretimiento de los glaciares y los casquetes polares, el aumento del nivel del mar, los cambios en los patrones de precipitación y la alteración de los ecosistemas naturales. A nivel de reducción de emisiones de GEI se ha convertido en un objetivo prioritario para mitigar los efectos del cambio climático haciendo muchos esfuerzos internacionales que se centran en la adopción de medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, promover fuentes de energía renovable, mejorar la eficiencia energética, fomentar la conservación y restauración de ecosistemas, entre otras acciones.

En el contexto de los parques ecológicos, el análisis de las emisiones de GEI es fundamental para comprender su impacto ambiental y tomar medidas adecuadas para

reducir su huella de carbono. Esto implica evaluar las fuentes de emisiones en el parque, como el transporte, el consumo energético, la gestión de residuos, y desarrollar estrategias para minimizar esas emisiones, por ejemplo, mediante la adopción de tecnologías más limpias y sostenibles.[16]

Para identificar dichas emisiones se deben tener en cuenta la contaminación aérea que genera cada sector industrial en la sociedad como se evidencia en la Figura 3 se presenta el sector más contaminante en Bogotá centrándose en la disposición de residuos viendo que proporciona 5% del total de la ciudad como se observa en la gráfica presentada en la Figura 3 Bogotá asumió retos ambiciosos en materia de cambio climático. En los próximos tres años, la capital del país se comprometió a disminuir la emisión de gases de efecto invernadero en un 15 por ciento, cifra que en 2030 debe llegar al 50 por ciento y en 2050 alcanzar una descarbonización total.

Figura 3.

Inventario de gases de efecto invernadero - INGEI - Secretaría Distrital de Ambiente.



Nota. En los próximos tres años, la capital del país se comprometió a disminuir la emisión de gases de efecto invernadero en un 15 por ciento, cifra que en 2030 debe llegar al 50 por ciento y en 2050 alcanzar una descarbonización total. Tomado de:

(s. f.). Secretaría Distrital de Ambiente.

<https://www.ambientebogota.gov.co/inventario-de-gases-de-efecto-invernadero-ingei> y Semana. (2021, 18 enero). La hoja de ruta de Bogotá para disminuir sus gases de

efecto invernadero a 2050. Semana.com Últimas Noticias de Colombia y el Mundo.

<https://www.semana.com/impacto/articulo/la-hoja-de-ruta-de-bogota-para-disminuir-sus-gases-de-efecto-invernadero-a-2050/56858/>

El estudio de las emisiones de GEI en los parques ecológicos y la aplicación de medidas para reducirlas contribuyen no solo a la mitigación del cambio climático, sino también a la conservación del entorno natural y la protección de la biodiversidad. Además, los parques ecológicos pueden servir como modelos y ejemplos a seguir para otras iniciativas similares, promoviendo prácticas sostenibles y conciencia ambiental en la sociedad en general.

Existen varios tipos de gases de efecto invernadero (GEI) que contribuyen al fenómeno del calentamiento global.[17] Los principales son:

1. Dióxido de carbono (CO_2): Es el gas de efecto invernadero más abundante y se produce principalmente por la quema de combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural. También se emite a través de procesos industriales, la deforestación y el cambio en el uso de la tierra.
2. Metano (CH_4): Es un gas más potente en términos de efecto invernadero que el dióxido de carbono, aunque está presente en cantidades mucho más bajas. El metano se produce en procesos naturales como la descomposición de materia orgánica en vertederos, humedales y en el sistema digestivo de rumiantes, así como en actividades humanas como la producción y distribución de combustibles fósiles, la agricultura y la gestión de residuos.
3. Óxido nitroso (N_2O): Es otro gas de efecto invernadero potente que se produce principalmente por actividades agrícolas y procesos industriales, como el uso de fertilizantes nitrogenados, la quema de biomasa y los sistemas de gestión de residuos.
4. Hidrofluorocarbonos (HFC): Son gases sintéticos utilizados en una variedad de aplicaciones industriales y comerciales, como refrigerantes y aerosoles. Los HFC son extremadamente potentes en términos de efecto invernadero y tienen un tiempo de vida largo en la atmósfera.
5. Perfluorocarbonos (PFC): Son gases sintéticos que se utilizan en la industria, principalmente en la producción de aluminio y semiconductores. También se utilizan en aplicaciones médicas y electrónicas. Los PFC tienen un poder de calentamiento global muy alto y una larga vida útil en la atmósfera.

Estos son solo algunos ejemplos de los gases de efecto invernadero más importantes. También existen otros compuestos menos comunes, como el hexafluoruro de azufre

(SF₆) y el trifluoruro de nitrógeno (NF₃), que también contribuyen al efecto invernadero.

1.3. Condiciones para el manejo de emisiones de gas de efecto invernadero

Es importante tener en cuenta que cada gas de efecto invernadero tiene diferentes características en términos de potencial de calentamiento global y vida útil en la atmósfera, lo que implica diferentes impactos en el cambio climático.

Cómo se mencionó en el anterior apartado el principal gas que causa calentamiento global es el dióxido de carbono (CO₂) aunque no es el único participante, otros gases considerandos GEI al N₂O, CH₄, PFC, HFC y SF₆, siendo los dos primeros los más importantes después del CO₂. por ellos para este estudio se tienen en cuenta su emisión en diversos proyectos de mecanismo de desarrollo limpio.

El efecto de cada gas sobre la atmósfera del planeta depende en primer apartado de la concentración en la que se encuentre en la atmósfera, aunque también de su “potencial de calentamiento global”. [18][19] A mayor potencial de calentamiento mayor efecto tiene el gas liberado, por lo tanto, se deben tener en cuenta condiciones específicas de emisión para cada uno; en cuestión de emisión el CO₂ es el gas con mayor presencia atmosférica además de poseer la mayor concentración, pero no es el gas con mayor potencial de calentamiento global, siendo éste el hexafluoruro de azufre como se observa en la tabla 1.

El potencial de calentamiento global es una base de cálculo estandarizada que presenta constantes actualizaciones debido al cambio persistente en las industrias que generan contaminación, un ejemplo básico es el metano con un valor 28 PCG (2022).

Tabla 1.

Tabla con potencial de calentamiento global por los GEI.

Gas de efecto invernadero	Potencial de calentamiento global
Dióxido de carbono (CO ₂)	1
Metano (CH ₄)	21 – 23
Óxido Nitroso (N ₂ O)	230 – 310
Perfluorocarbonos (PFC)	5700 – 11900
Hidrofluorocarbonos (HFC)	13000 – 14000
Hexafluoruro de carbono (SF ₆)	23000

Nota. El potencial de calentamiento global es una base de cálculo estandarizada que presenta constantes actualizaciones debido al cambio persistente en las industrias que generan contaminación, un ejemplo básico es el metano con un valor 28 PCG (2022). Tomado de: Departamento de medio ambiente y política territorial del gobierno vasco. (2013). *metodologías para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero*. ihobe, Sociedad pública de gestión ambiental. https://www.euskadi.eus/contenidos/documentacion/7metodologias_gei/es_def/adjuantos/7METODOLOGIAS.pdf

La generación de GEI es causa de casi toda actividad humana, generalmente haciendo énfasis en sectores industriales por lo tanto todas las zonas son responsables.[20] Cabe resaltar el sector propuesto donde se realiza la descomposición de materia orgánica en vertederos, incineración y transporte de residuos, donde se generan principalmente CO₂ y CH₄ demostrado en la Tabla 2 aunque no siempre pueden ser controladas si pueden ser mitigadas por diversos procesos u optar por la ayuda de parques ecológicos enfocados en la reducción de emisiones.

Tabla 2.*Fuentes de emisión GEI.*

Sector	Fuente de emisión	GEI
Residencial	Consumo de combustibles y electricidad	CO ₂
Servicios	Consumo de combustibles y electricidad	CO ₂
Industria	Consumo de combustibles y emisiones de proceso	CO ₂ , CFC, HFC, SF ₆
Agrario	Utilización de fertilizantes sintéticos, fermentación entérica del ganado, gestión de estiércoles y uso de maquinaria agrícola	CO ₂ , N ₂ O, CH ₄
Transporte	Consumo de combustible	CO ₂
Residuos	Descomposición de materia orgánica en vertederos, incineración de residuos y transporte	CO ₂ , CH ₄
Sumideros	Cambio de uso en el suelo	CO ₂

Nota. Según un informe de evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), las emisiones de gases de efecto invernadero que provienen de las actividades humanas han contribuido en torno a 1,1 °C al calentamiento global desde principios del siglo XX. Tomado de: Departamento de medio ambiente y política territorial del gobierno vasco. (2013). *metodologías para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero*. ihobe, Sociedad pública de gestión ambiental. https://www.euskadi.eus/contenidos/documentacion/7metodologias_gei/es_def/adjuntos/7METODOLOGIAS.pdf y *Emisiones de gases de efecto invernadero por país y sector (infografía) | Noticias | Parlamento Europeo*. (2018, 3 julio). <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20180301STO98928/emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pais-y-sector-infografia>

Según un informe de evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), las emisiones de gases de efecto invernadero que provienen de las actividades humanas han contribuido en torno a 1,1 °C al calentamiento global desde principios del siglo XX, teniendo en cuenta que muchos GEI se producen naturalmente en la atmósfera la actividad humana contribuye con casi el 72% de generación de estos además se tienen en cuenta las emisiones de gases de efecto invernadero por país y sector. La huella de carbono se mide en una unidad muy particular: gramos de dióxido de carbono equivalentes (gCO₂eq), se calcula mediante la fórmula y estimación demostrada en la Figura 4. Esta unidad permite cuantificar el impacto ambiental de todos los gases de efecto invernadero en un único indicador. Como la huella de carbono se utiliza para medir cuánto contribuye una actividad al calentamiento global, es importante que este valor englobe a todos los gases de efecto invernadero debido a que si no cumple con esos requerimientos no estaría haciendo un cálculo completo. [21] Los GEI que se emiten en mayor proporción a la atmósfera por la contaminación de la industria encargada del manejo de residuos son Dióxido de carbono (CO₂), Metano (CH₄) y Óxido nitroso (N₂O). [21] Estos poseen un potencial de daño a la atmósfera por sus propiedades como se observa a continuación:

Figura 4.

Potencial de calentamiento global de distintos GEI.



Nota. La estructura química de estos gases hace que cada uno pueda absorber más o menos calor del sol. Tomado de: CarbonPlus. (2023, 13 marzo). ¿Qué es y cómo se calcula la huella de carbono? CARBON NEUTRAL.

<https://www.carbonneutralplus.com/que-es-y-como-calcular-la-huella-de-carbono/>

Para calcular la huella de carbono de una empresa, actividad o individuo es necesario aplicar la ecuación 1 que se ajusta a los cálculos globales establecidos:

$$gCO_2eq = Fe * A \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde la nomenclatura corresponde a:

Fe = factor de emisión (gCO₂eq/Wh)

A = actividad (Wh/watt hora)

Una vez planteado el cálculo anterior, se establece una forma estandarizada para la medición del potencial de calentamiento global dado en términos de la huella de carbono ya que se mide en gramos de dióxido de carbono equivalente (gCO₂eq), para poder tener una única unidad de medida que englobe el PCG de todos los GEI. Los gramos de CO₂ equivalente se calculan con la ecuación 2:

$$gCO_2eq = (gCO_2) * PCG(CO_2) + (gCH_4) * PCG(CH_4) + (gN_2O) * PCG(N_2O) \text{ (Ecuación 2)}$$

Donde la nomenclatura corresponde a:

gCO_2eq = huella de carbono

$g(CO_2)$ = gramos de dióxido de carbono

$PCG(CO_2)$ = Potencial de contaminación dióxido de carbono (Figura 4)

$g(CH_4)$ = gramos de metano

$PCG(CH_4)$ = Potencial de contaminación metano (Figura 4)

$g(N_2O)$ = gramos de óxido nitroso

$PCG(N_2O)$ = Potencial de contaminación óxido nitroso (Figura 4)

1.4. Metas establecidas para la reducción de gases de efecto invernadero

En el contexto global actual, la lucha contra el cambio climático y la sostenibilidad ambiental se ha convertido en una prioridad inevitable. La comunidad internacional, a través de diversos acuerdos y compromisos, ha fijado objetivos claros y ambiciosos

para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y minimizar los impactos negativos del calentamiento global.

Estos objetivos apuntan no sólo a proteger el planeta sino también a promover el desarrollo sostenible para garantizar el bienestar de las generaciones actuales y futuras, a través del tiempo estas metas han sufrido algunos cambios y ajustes debido al constante cambio que sufre el mundo día a día, por ello a continuación se explorara los dos enfoques de metas desarrollados durante el último siglo como las metas de reducción de IPCC y los objetivos de desarrollo limpio.

1.4.1. Metas desarrollados por IPCC

En la lucha global contra el cambio climático destacan por su importancia e influencia dos marcos internacionales: el Acuerdo de París y los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero fijados por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) ambas herramientas son pilares fundamentales de los esfuerzos para limitar el calentamiento global y mitigar sus impactos negativos.

El Acuerdo de París, adoptado en 2015, fue un compromiso histórico asumido por casi todos los países del mundo en la cual se destaca su principal objetivo es mantener el aumento de la temperatura global este siglo por debajo de los 2 grados Celsius por encima de los niveles preindustriales y limitar el aumento de la temperatura a 1,5 grados Celsius; para lograr este objetivo, el acuerdo estipula que cada país debe presentar una Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC), que describe los esfuerzos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y adaptarse a los impactos del cambio climático. Estos compromisos se revisan y actualizan periódicamente, lo que ayuda a aumentar la ambición con el tiempo, mientras que por otro lado, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) proporciona una base sólida para la política climática global a través de sus informes científicos. Los informes del IPCC evalúan los conocimientos más recientes sobre el cambio climático, sus impactos y opciones de mitigación. En su informe especial de 2018 sobre el calentamiento global de 1,5 grados Celsius, el IPCC enfatizó la necesidad de reducir las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂) en un 45% para 2030 en comparación con los niveles de 2010 y lograr emisiones netas cero para 2050.

El vínculo entre el Acuerdo de París y los objetivos de reducción de emisiones del IPCC es inherente y se refuerza mutuamente ya que el Acuerdo de París se basa en evidencia científica proporcionada por el IPCC para establecer objetivos y guiar las acciones de los países, mientras que los informes del IPCC brindan el apoyo científico necesario para establecer objetivos de reducción de emisiones específicos y alcanzables, proporcionando una hoja de ruta sobre cómo los países pueden cumplir sus compromisos en virtud del Acuerdo de París.

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) es el principal organismo científico en cuestiones de cambio climático. Su informe proporciona una base importante para comprender los objetivos globales de reducción de gases de efecto invernadero (GEI) necesarios para limitar el calentamiento global y mitigar el cambio climático. [22] Los principales objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero del IPCC se resumen a continuación:

Objetivo 1: Limitar el calentamiento global a 1,5°C

Según el informe especial del IPCC sobre el calentamiento global de 1.5 °C (SR15), para limitar el aumento de la temperatura global a 1.5 °C por encima de los niveles preindustriales, las emisiones netas globales de CO₂ deben reducirse en aproximadamente un 45% desde los niveles de 2010 para el año 2030, y alcanzar emisiones netas cero para alrededor de 2050. [23] Además se tiene una meta de reducción del 2 °C para lograr limitar el calentamiento global a 2 °C, las emisiones netas globales de CO₂ deben reducirse en aproximadamente un 25% desde los niveles de 2010 para el año 2030, y alcanzar emisiones netas cero para alrededor de 2070. [24]

Objetivo 2: Implicaciones de las Metas de Reducción

La necesaria transición energética, la mayoría de los escenarios que limitan el calentamiento a 1.5 °C o 2 °C requieren una rápida y amplia transición en los sistemas energéticos. Esto incluye una reducción drástica del uso de combustibles fósiles y un aumento significativo en la utilización de energías renovables como solar, eólica,

hidroeléctrica y biomasa. Además, se necesita una mejora sustancial en la eficiencia energética.[25]

A nivel de uso de la Tierra y Silvicultura se enfoca en el manejo sostenible de la tierra, incluida la reforestación y la reducción de la deforestación, es crucial para aumentar los sumideros de carbono naturales. El IPCC destaca la necesidad de restaurar y conservar bosques, suelos y otros ecosistemas naturales que absorben CO₂ de la atmósfera.[26]

El despliegue de tecnologías de emisiones negativas, como la captura y almacenamiento de carbono (CCS) y la bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (BECCS), puede ser necesario para compensar las emisiones residuales difíciles de eliminar en sectores como la aviación y la industria pesada.[27]

Las industrias deben adoptar tecnologías de bajas emisiones, mejorar la eficiencia energética y desarrollar procesos industriales más limpios. La descarbonización de sectores como el acero, el cemento y los productos químicos es especialmente desafiante pero esencial. El transporte debe transformarse hacia la electrificación, el uso de biocombustibles sostenibles y la promoción de la movilidad sostenible, incluyendo el transporte público y la infraestructura para bicicletas y peatones.

Existen algunas acciones necesarias para cumplir las metas propuestas las cuales deben ser acogidas por los gobiernos.

A nivel de políticas y regulaciones los gobiernos deben implementar políticas y regulaciones que fomenten la reducción de GEI, como los impuestos al carbono, los sistemas de comercio de emisiones, y los incentivos para energías renovables y eficiencia energética. Para la parte de financiamiento y tecnología es crucial movilizar financiamiento tanto público como privado para apoyar proyectos de mitigación y adaptación al cambio climático. La transferencia de tecnologías limpias y el fortalecimiento de capacidades también son esenciales para que los países en desarrollo puedan cumplir sus metas. [28]

Por último, se debe tener en cuenta una alta participación global que permita la cooperación internacional y el cumplimiento de los compromisos establecidos en el

Acuerdo de París son vitales para alcanzar estas metas. Cada país debe contribuir de acuerdo con sus capacidades y responsabilidades comunes pero diferenciadas.

1.4.2. Objetivos de desarrollo limpio

Entre los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) identificados por Naciones Unidas, dos destacan por su importancia inmediata en este ámbito: el ODS 12, que se centra en la producción sostenible y el consumo responsable, y el ODS 13, que aborda el cambio climático. A continuación, analizamos cómo estos objetivos están interconectados y contribuyen a alcanzar los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero establecidos.

- **Objetivo de desarrollo sostenible 12: Producción y consumo responsables**

El objetivo del ODS 12 es garantizar patrones de consumo y producción sostenibles, este objetivo es fundamental para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero porque promueve el uso eficiente de los recursos y la energía, así como prácticas sostenibles en toda la cadena de valor; se enfoca en proporcionar la idea de reducir la huella de carbono ya que esta no sólo implica minimizar las emisiones directas de la industria, sino también considerar el impacto ambiental de los productos y servicios desde la producción hasta la eliminación. Esto incluye fomentar el reciclaje, reducir el desperdicio de alimentos y promover el uso de materiales y energías renovables. En este sentido, la adopción de tecnologías limpias y la transición hacia una economía circular son estrategias importantes para alcanzar las metas de reducción de emisiones.

- **Objetivo de desarrollo sostenible 13: Acción por el clima**

El ODS 13 tiene como objetivo tomar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus impactos este objetivo quizás esté más directamente relacionado con la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que exige que los países adopten políticas y medidas específicas para limitar el aumento de las temperaturas globales. Las acciones propuestas en el Objetivo de Desarrollo Sostenible 13 incluyen la integración de acciones de cambio climático en políticas,

estrategias y planes nacionales; mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional para mitigar, adaptar y mitigar el cambio climático; y movilizar recursos financieros para apoyar a los países en desarrollo en sus esfuerzos por enfrentar este desafío global. [29]

La cooperación internacional es esencial para lograr estos objetivos porque el cambio climático es una cuestión transfronteriza. Además, invertir en infraestructura sostenible y tecnología avanzada es fundamental para reducir las emisiones y adaptarse al inevitable cambio climático.

Ambos objetivos son establecidos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero están directamente respaldados y reforzados por los Objetivos de Desarrollo Sostenible 12 y 13. Mientras que el ODS 12 promueve cambios en los patrones de producción y consumo hacia una mayor sostenibilidad, el ODS 13 fomenta acciones urgentes y coordinadas para combatir el cambio climático a nivel global, en conjunto, estos objetivos nos acercan a un futuro más sostenible y equitativo, donde el desarrollo económico y social pueda estar en armonía con la protección ambiental.

1.5. Denominación de los proyectos tipo mecanismo de desarrollo limpio

El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) es un instrumento creado en el marco del Protocolo de Kioto, un acuerdo internacional sobre el cambio climático. El objetivo principal de los ODM es ayudar a los países en desarrollo a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y promover el desarrollo sostenible. Los ODM permiten a los países desarrollados cumplir con sus compromisos de reducción de emisiones bajo el Protocolo de Kioto al financiar proyectos de reducción de emisiones en países en desarrollo. Estos proyectos ayudarán a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y brindarán beneficios adicionales como la transferencia de tecnología, la creación de empleos, la mejora de la calidad del aire y el acceso a energía limpia. [30]

Pasos para los procesos de mecanismo de desarrollo limpio

- Identificación de proyectos: identificación de proyectos de mitigación que cumplan con los criterios de los ODM y cumplan con las prioridades de

desarrollo sostenible del país anfitrión. El proyecto puede estar relacionado con las energías renovables, la eficiencia energética, la gestión de residuos, el transporte sostenible, etc.

- Diseño del proyecto: realice una evaluación detallada del proyecto, incluida la estimación de las reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero, la identificación de tecnologías y prácticas apropiadas, el análisis de costos y beneficios y la evaluación de la sostenibilidad del proyecto.
- Verificación y Certificación: Verificación independiente de las reducciones de emisiones producidas por el proyecto. Una Unidad Operativa Designada (EOD) aprobada por el MDL lleva a cabo esta revisión para garantizar que las reducciones sean realistas, incrementales y verificables.
- Registro y emisión de créditos. Una vez que el proyecto haya pasado la verificación, se registrará en el MDL y se emitirán los Certificados de Reducción de Emisiones (SES) correspondientes a las reducciones de emisiones verificadas. Los países desarrollados pueden comprar estos SES para cumplir con sus objetivos de reducción de emisiones.
- Monitoreo y reporte: las reducciones de emisiones son monitoreadas continuamente durante el ciclo de vida del proyecto y los resultados son reportados al Ministerio de Energía y al Mecanismo de Desarrollo Limpio. Esto garantiza la transparencia e integridad del proceso. [31]

El Mecanismo de Desarrollo Limpio ha sido una herramienta importante para promover la cooperación entre países desarrollados y en desarrollo en la lucha contra el cambio climático. Esto ha permitido muchos proyectos de mitigación en áreas como la energía renovable, la eficiencia energética y la gestión de residuos, proporcionando beneficios ambientales y socioeconómicos a los países en desarrollo.

El alcance de los proyectos MDL es amplio y diverso y abarca muchos campos y tecnologías. Los tipos de proyectos más comunes incluyen proyectos que utilizan fuentes de energía renovables, como la generación de electricidad a partir de fuentes eólicas, solares, hidroeléctricas y de biomasa, dichos estudios y/o proyectos no sólo ayudan a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también brindan acceso a energía limpia y confiable a comunidades que antes dependían de combustibles fósiles.

Otra área importante de los proyectos MDL es la eficiencia energética donde las iniciativas de eficiencia energética en la industria, los edificios y el transporte han demostrado ser eficaces no sólo para reducir las emisiones sino también para reducir los costos operativos y aumentar la competitividad económica. Los proyectos que introducen tecnología de cogeneración, sistemas de iluminación eficientes y mejoras de procesos industriales son excelentes ejemplos de cómo la eficiencia puede ser una herramienta poderosa en la lucha contra el cambio climático.

- Eólica: Más de 1,500 proyectos registrados, generando aproximadamente 70,000 GWh de electricidad renovable por año.
- Solar: Alrededor de 1,000 proyectos, con una capacidad instalada superior a 4,000 MW.
- Hidroeléctrica: Más de 2,500 proyectos, principalmente en países como China, India y Brasil, generando cerca de 400,000 GWh anuales.
- Biomasa: Más de 500 proyectos, utilizando residuos agrícolas e industriales para producir energía, con una capacidad instalada de alrededor de 2,000 MW

La gestión de residuos es otra área importante del MDL, ya que una vez realizada la captura se utiliza el metano producido en vertederos y plantas de tratamiento de aguas residuales no solo se hace para permitir y aumentar la reducción drástica de las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también generan energía renovable utilizable a nivel local. Este enfoque integral no sólo resuelve el problema de los residuos, sino que también crea oportunidades económicas y mejora la salud pública.

- Captura y utilización de metano en vertederos: Más de 400 proyectos, evitando la emisión de alrededor de 50 millones de tCO₂e anualmente.
- Proyectos de tratamiento de aguas residuales: Aproximadamente 100 proyectos, con reducciones significativas en emisiones de metano.

Los proyectos de forestación y reforestación, también conocidos como proyectos de uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (LULUCF), también forman parte del MDL. Estas iniciativas tienen como objetivo restaurar ecosistemas degradados y crear nuevos sumideros de carbono mediante la plantación de árboles y la gestión forestal sostenible. Además de secuestrar carbono, estos proyectos

también ayudan a conservar la biodiversidad, mejorar la calidad del suelo y el agua y proporcionar medios de vida sostenibles a las comunidades locales.[32]

- Reforestación y forestación: Cerca de 100 proyectos, que cubren más de 1 millón de hectáreas de tierras degradadas, capturando millones de toneladas de CO₂ a lo largo de la vida útil del proyecto.

El impacto de los proyectos MDL va más allá de la reducción de emisiones, conocidos como beneficios, que incluyen la creación de empleo, la transferencia de tecnología, la mejora de la salud pública y la reducción de la pobreza. Al brindar acceso a tecnologías limpias y sostenibles, se ayuda a desarrollar la capacidad local y promover un desarrollo económico más equitativo y sostenible.[33]

- Reducción de Emisiones: Hasta la fecha, los proyectos MDL han generado más de 2 mil millones de Certificados de Reducción de Emisiones (CERs), equivalentes a 2 mil millones de toneladas de CO₂eq evitadas. Los CERs generados por los proyectos pueden ser comercializados en mercados de carbono internacionales, proporcionando un incentivo económico para la implementación de tecnologías limpias.
- Geografía: Más de 8,000 proyectos registrados en 111 países, con una concentración significativa en China, India, Brasil y México.
- Beneficios Económicos y Sociales: Creación de millones de empleos directos e indirectos, mejora de la infraestructura local, y promoción del desarrollo económico sostenible en comunidades anfitrionas.
- Transferencia de Tecnología: Facilitación de la transferencia de tecnologías limpias y sostenibles, mejorando las capacidades tecnológicas locales y fomentando la innovación.

En lo que respecta a la gobernanza, el MDL es supervisado por el Consejo del MDL, que garantiza que los proyectos cumplan criterios estrictos de adicionalidad, sostenibilidad y diligencia debida. Este riguroso proceso de evaluación y seguimiento garantiza que las reducciones de emisiones sean reales, mensurables y adicionales a las que se habrían producido sin el proyecto.[34] Los proyectos MDL están sujetos a un riguroso proceso de validación, registro, monitoreo y verificación por la Junta Ejecutiva de la OMS y entidades designadas operacionales. Cada proyecto debe

demostrar adicionalidad, asegurando que las reducciones de emisiones son adicionales a las que habrían ocurrido en ausencia del proyecto.

1.6. Reglamentación para los proyectos tipo mecanismo de desarrollo limpio

Un proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpio debe cumplir una serie de requisitos y oportunidades claramente definidos para ser aprobado y contribuir eficazmente a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Estos criterios garantizan que los proyectos no sólo mitiguen eficazmente el cambio climático, sino que también contribuyan al desarrollo sostenible en el país anfitrión. Estos requisitos se describen detalladamente a continuación [35]:

- Requisitos y oportunidades para proyectos MDL: Uno de los principios básicos del MDL es la complementariedad. Para que un proyecto se considere incremental, debe demostrar que las reducciones de GEI logradas no habrían sido posibles sin el proyecto. Esto significa que el proyecto debe ir más allá del escenario básico (Business As Usual, BAU) como, por ejemplo, si una instalación de energía renovable quiere registrarse como proyecto MDL, debe demostrar que sin ingresos adicionales por la venta de certificados de reducción de emisiones (CRE), la instalación no es financieramente viable o no se construirá.
- Contribuir al desarrollo sostenible: Cada país anfitrión determina sus propios criterios de sostenibilidad, y los proyectos MDL deben cumplir esos criterios para ser aceptados. A nivel colombiano, se espera que los proyectos MDL mejoren la calidad del aire, creen empleos y transfieran tecnología limpia, un ejemplo claro de esto se puede ver en el proyecto de parque eólico en la región de La Guajira ya que no sólo reduce las emisiones de CO₂ al reemplazar la generación de electricidad con combustibles fósiles, sino que también crea empleos locales y mejora la infraestructura pública. [36]
- Las reducciones de emisiones son mensurables y verificables: Es necesario medir y verificar las reducciones de las emisiones de gases de efecto

invernadero ya que se debe utilizar métodos aprobados por el Consejo del MDL para garantizar una medición precisa de las reducciones de emisiones, siendo un claro ejemplo de ello un proyecto de recuperación de metano realizado en el vertedero de Doña Juana en Bogotá donde existe un método específico para medir y reportar la cantidad de metano capturado y convertido en electricidad.

- Aprobación nacional: El proyecto debe recibir la aprobación de la autoridad nacional designada del país anfitrión. En Colombia, esta función la desempeña el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible quien se encarga de evaluar si el proyecto contribuye al desarrollo sostenible del país y si es consistente con las prioridades y políticas del país. Esta aprobación es un paso importante para garantizar que el proyecto cumpla con los objetivos nacionales de sostenibilidad.
- Participar voluntariamente: La participación en proyectos MDL debe ser voluntaria para todas las partes interesadas, incluido el país anfitrión, los países participantes y las organizaciones de desarrollo de proyectos. Este principio garantiza que todas las partes estén de acuerdo sobre la implementación del proyecto y sus consecuencias.
- Autenticación y registro: Antes de su implementación, debe ser aprobado por la Agencia Ejecutiva Designada, un organismo independiente reconocido por la CMNUCC. [37] La validación implica un examen cuidadoso del documento de diseño para garantizar que cumpla con todos los requisitos del CDM, una vez aprobado, el proyecto debe ser registrado por la Junta Directiva del MDL como los proyectos de energía solar en la provincia de Antioquia debieron pasar por un proceso de verificación y registro para garantizar que cumple con los criterios.
- Monitoreo y verificación: Una vez implementadas, las reducciones de emisiones deben ser monitoreadas y verificadas periódicamente por el Departamento de Energía. Este proceso garantiza que la reducción reportada sea realista y consistente con la metodología aprobada.

- Emisión de certificados de reducción de emisiones (ERC): Una vez que se verifican las reducciones de emisiones, el Consejo del MDL emite certificados de reducción de emisiones (ERC), que pueden venderse en el mercado de emisiones cada certificado representa una tonelada de CO₂ equivalente reducida. Esto proporciona incentivos económicos adicionales a los proyectos, aumentando su viabilidad financiera.

Algunos ejemplos recientes de proyectos de MDL en Colombia, de estos ninguno se enfoca en la reducción de emisiones para rellenos sanitarios, pero sí son válidos por los métodos y aprobaciones que requieren para su funcionamiento:

- Energías renovables: Proyectos como el parque eólico Jepirachi en La Guajira no sólo ayudan a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también contribuyen al desarrollo económico y social de la región al crear empleos y mejorar la infraestructura de capa local.[38]
- Eficiencia energética: Iniciativas en el sector industrial, como la mejora de la eficiencia energética de la planta de cemento Argos en Cartagena, reducen el consumo energético y las emisiones de CO₂, así como los costes operativos.[39]
- Captura de metano: Los proyectos de captura de metano en vertederos como Doña Juana en Bogotá no solo reducen las emisiones de este poderoso gas de efecto invernadero, sino que también producen energía renovable a partir del biogás. [40]
- Repoblación forestal: Los programas de reforestación en áreas degradadas de la Amazonia y la Orinoquia fortalecen los sumideros de carbono, ayudan a mitigar el cambio climático y proteger la biodiversidad.

Para evaluar y diseñar el mecanismo de desarrollo limpio (MDL), es extremadamente importante tener en cuenta una variedad de datos económicos. Estos datos garantizan que el proyecto no sólo será beneficioso para el medio ambiente sino

también financieramente viable y sostenible a largo plazo. Estos son los datos económicos clave a considerar:

1.6.1. Niveles económicos y capitales para los proyectos tipo mecanismo de desarrollo limpio

En cuanto al costo de instalación se incluye el costo de compra de equipos, maquinaria y tecnología necesarios para llevar a cabo el proyecto. En relación con los costos de construcción son asociados con la construcción e instalación de la infraestructura necesaria en el caso de los parques eólicos, esto incluiría la construcción de los cimientos de las turbinas eólicas y su instalación. Además, se deben tener en consideración intereses y tarifas relacionados con préstamos y financiamiento obtenidos para cubrir los costos iniciales. Es importante que se familiarice con los términos de financiación y las tasas de interés aplicables. [41]

a. Costos de operación y mantenimiento

Las operaciones diarias son costos recurrentes necesarios para mantener un proyecto, como salarios de empleados, costos de energía (para algunos tipos de proyectos) y otros, también se debe tener el dinero de mantenimiento y reparación de infraestructura y equipos. Por ejemplo, un proyecto de biogás requerirá costos recurrentes para mantener el sistema de recuperación y conversión de gas en buenas condiciones. [42]

b. Ingresos y ganancias

La parte de ingresos obtenidos por la venta de electricidad producida (en proyectos de energías renovables) o productos derivados (por ejemplo, fertilizantes en proyectos de biogás) se suma con la venta de CER, ya que son ingresos por la venta de certificados de reducción de emisiones (CER) en el mercado de carbono, recordando que cada unidad CER representa una tonelada de abatimiento equivalente de CO₂ y tiene un valor de mercado que puede variar. También existen los créditos e incentivos fiscales, donde se generan unos incentivos económicos proporcionados por gobiernos u organizaciones internacionales para promover proyectos de energía limpia y reducir emisiones.

La tasa interna de retorno (TIR) es un indicador financiero que calcula la rentabilidad de un proyecto. Una TIR alta muestra que el proyecto es una buena inversión. De igual manera, el valor presente neto (VPN) se calcula considerando el valor presente de los flujos de efectivo futuros generados por el proyecto, descontados utilizando una tasa de descuento específica; un VPN positivo indica que el proyecto es o será rentable. Por último, a nivel económico se deben tener en consideración los riesgos económicos, como las fluctuaciones del precio del CER. Estos precios pueden variar debido a la oferta y la demanda en el mercado de carbono, las políticas gubernamentales y los acuerdos internacionales. También existe un riesgo financiero por los cambios en las condiciones económicas globales, que pueden afectar las tasas de interés y los términos de financiamiento disponibles. Además, se deben incluir los posibles problemas técnicos, daños a los equipos y cambios en los costos operativos.

La evaluación de un proyecto se hace desde diferentes aspectos. Al evaluar el proyecto de Bionersis realizado en Cúcuta y Manizales, Colombia, se tienen los siguientes datos:

- Costos Iniciales: USD 50 millones para la instalación de 20 turbinas.
- Costos Operativos Anuales: USD 2 millones para operación y mantenimiento.
- Ingresos Anuales por Venta de Energía: USD 10 millones.
- Ingresos Anuales por Venta de CER: USD 1 millón (asumiendo un precio de USD 10 por CER y la generación de 100,000 CER al año).
- Subsidios Gubernamentales: USD 2 millones anuales durante los primeros 5 años.
- TIR Estimada: 12%.
- VPN Estimado: USD 15 millones (con una tasa de descuento del 8%).
- Período de recuperación: 7 años.

Los datos económicos indican que el proyecto no solo es viable, sino también rentable, con una TIR atractiva y un VPN positivo. Además, la generación de ingresos adicionales por la venta de CER y los subsidios gubernamentales ayudan a mejorar la rentabilidad del proyecto. [43]

1.7. Definición y beneficios de los parques ecológicos (pe)

Un parque ecológico utilizado para la mitigación de emisiones es un área protegida diseñada y gestionada de manera sostenible para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover la conservación del medio ambiente. Estos parques se establecen con el objetivo de compensar o contrarrestar las emisiones generadas por actividades humanas, como la industria, el transporte o el manejo de residuos. Suelen ser recomendados para la mitigación de emisiones donde además se suele incluir una combinación de características y estrategias que contribuyen a reducir la huella de carbono y fomentar la absorción de carbono de la atmósfera. [44] Algunas de estas características y estrategias pueden incluir:

1.7.1. Conservación de la biodiversidad

Los parques ecológicos protegen y preservan áreas naturales ricas en biodiversidad, lo que ayuda a mantener los ecosistemas saludables y a preservar la diversidad de especies. La conservación de la biodiversidad contribuye a la mitigación del cambio climático al proteger los sumideros de carbono, como los bosques y los humedales.[45]

1.7.2. Restauración de ecosistemas degradados

La restauración de ecosistemas degradados, como la reforestación de áreas deforestadas o la recuperación de zonas costeras afectadas por la erosión. Estas acciones ayudan a recuperar la capacidad de los ecosistemas para capturar y almacenar carbono.

1.7.3. Uso de energías renovables

Son partidarios de incluir sistemas de energía renovable, como la energía solar o eólica, para abastecer sus necesidades energéticas. Esto reduce la dependencia de combustibles fósiles y disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la generación de energía.

1.7.4. Eficiencia energética

Pueden llegar a adoptar medidas de eficiencia energética en sus instalaciones, como el uso de iluminación LED, equipos de bajo consumo energético y sistemas de gestión inteligente de energía. Estas acciones reducen el consumo de energía y, por lo tanto, las emisiones asociadas.

1.7.5. Gestión adecuada de residuos

Se implementan prácticas de gestión adecuada de residuos, como la separación y reciclaje de materiales, el compostaje de residuos orgánicos y la minimización de residuos mediante la educación y concienciación ambiental. Esto ayuda a reducir las emisiones generadas por la disposición inadecuada de residuos y promueve la economía circular. Por lo que suelen ser utilizados para la mitigación de emisiones es un espacio natural gestionado de manera sostenible que busca reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuir a la conservación del medio ambiente a través de diversas estrategias, como la conservación de la biodiversidad, la restauración de ecosistemas, el uso de energías renovables, la eficiencia energética y la gestión adecuada de residuos.

1.8. Procesos de mitigación de contaminación actual desarrollados en Colombia

La implementación de estrategias y políticas destinadas a reducir las emisiones de sustancias que contribuyen al cambio climático en Colombia, esta tarea adquiere matices específicos al considerar el contexto de las diferentes áreas contaminadas, definidas por las concentraciones de contaminantes y las condiciones naturales o de fondo de cada región. El marco regulatorio de Colombia clasifica los sitios contaminados en cuatro categorías: Clase I, Clase II, Clase III y Clase IV, cada una con sus propias características y necesidad de intervención. Esta clasificación es esencial para determinar medidas apropiadas de mitigación y adaptación, así como para formular políticas públicas efectivas que ayuden a reducir las emisiones y proteger el medio ambiente. En este contexto, es fundamental adoptar un enfoque integrado para la reducción de gases de efecto invernadero en Colombia, tomando en cuenta la especificidad de cada zona contaminada y desarrollando programas específicos adaptados a las necesidades y desafíos de cada región. Esto significa implementar medidas de emergencia, limitar la creación de nuevas fuentes de emisión

y adoptar programas de reducción de la contaminación con diferentes plazos y objetivos según la clasificación de las zonas contaminadas.

Clase I: Áreas de contaminación alta: aquellas en que la concentración de contaminantes, dadas las condiciones naturales o de fondo y las de ventilación o dispersión, excede con una frecuencia igual o superior al setenta y cinco por ciento (75%) de los casos de la norma de calidad anual. En estas áreas deberán tomarse medidas de contingencia, se suspenderá el establecimiento de nuevas fuentes de emisión y se adoptarán programas de reducción de la contaminación que podrán extenderse hasta por diez (10) años.[46]

Clase II: Áreas de contaminación media: aquellas en que la concentración de contaminantes, dadas las condiciones naturales o de fondo y las de ventilación y dispersión, excede con una frecuencia superior al cincuenta por ciento (50%) e inferior al setenta y cinco por ciento (75%) de los casos la norma de calidad anual. En estas áreas deberán tomarse medidas de contingencia, se restringirá el establecimiento de nuevas fuentes de emisión y se adoptarán programas de reducción de la contaminación que podrán, extenderse hasta por cinco (5) años.[46]

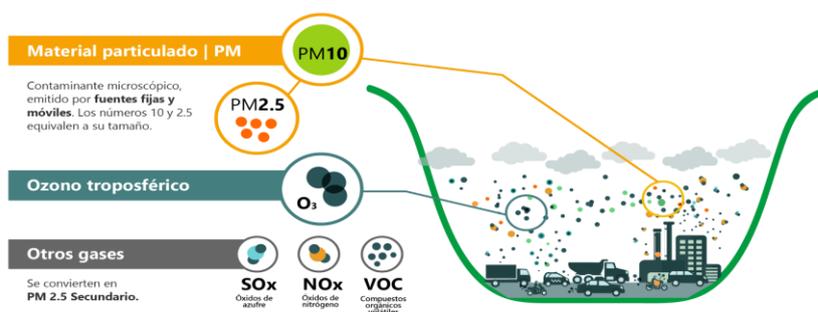
Clase III: Áreas de contaminación moderada: aquellas en que la concentración de contaminantes, dadas las condiciones naturales o de fondo y las de ventilación y dispersión, excede con una frecuencia superior al veinticinco por ciento (25%) e inferior al cincuenta por ciento (50%) de los casos la norma de calidad anual. En estas áreas se tomarán medidas dirigidas a controlar los niveles de contaminación y adoptar programas de reducción de la contaminación, que podrán extenderse hasta por tres (3) años. [47]

Clase IV: Áreas de contaminación marginal: aquellas en que la concentración de contaminantes, dadas las condiciones naturales o de fondo y las de ventilación y dispersión, excede con una frecuencia superior al diez por ciento (10%) e inferior al veinticinco por ciento (25%) de los casos la norma de calidad anual. En estas áreas se tomarán medidas dirigidas a controlar los niveles de contaminación que permitan la disminución de la concentración de contaminantes o que por lo menos las mantengan estables.[47]

Luego de definir acciones específicas para cada clase de sitios contaminados, es necesario considerar la importancia de la cooperación entre el gobierno, la industria, la sociedad civil y otros actores relevantes para lograr resultados importantes en la reducción de gases de efecto invernadero en Colombia. Se debe fortalecer la capacidad institucional y la coordinación intersectorial es esencial para garantizar la implementación efectiva de políticas y programas de mitigación. Además, la activa participación de la comunidad y la educación ambiental son esenciales para concienciar sobre la importancia de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y fomentar cambios en el comportamiento individual y colectivo. Teniendo en cuenta las clases de áreas, ellas representan una amenaza para la salud humana porque, dependiendo de su tamaño (entre más pequeñas, mayor riesgo), pueden afectar a la humanidad especialmente a el sistema respiratorio en general, siendo más vulnerables las personas con enfermedades cardíacas y pulmonares preexistentes. Debido al impacto de la contaminación del aire en la salud de los ciudadanos, especialmente de los que viven en las ciudades, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha publicado directrices sobre los niveles de contaminantes del aire. Para identificar los GEI que se pueden abordar en un parque ecológico se puede comparar con los gases generados en las ciudades cercanas como se puede observar en la figura 5, ya que este puede ayudar a contribuir a su expansión. [48]

Figura 5.

Contaminantes del aire.



Nota. La figura presenta los mayores contaminantes de material particulado en Colombia. Tomado de: «Contaminantes del aire», *Metropol*, 2019. https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/PublishingImages/Paginas/Generalidades/Principales-contaminantes/02-IMG_contaminantes.png

Desarrolladas para proteger la salud humana y conservar el medio ambiente natural, estas normas son un punto de referencia importante para evaluar el impacto ambiental de un proyecto determinado y para garantizar la integridad del ecosistema circundante. En este contexto, es necesario verificar los niveles límite permisibles de contaminantes atmosféricos como dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, polvo fino y monóxido de carbono, establecidos en la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia.

Estos valores son fundamentales para la evaluación y monitoreo de la calidad del aire alrededor del parque ecológico para garantizar el cumplimiento de los estándares ambientales y proteger la salud de la comunidad y los visitantes. Como se puede mostrar en las tablas 3, 4 y 5 donde se establecieron unos estándares de calidad del aire permisibles para su exposición:

Tabla 3.

Niveles máximos permisibles para contaminantes a criterio.

Contaminante	Unidad	Límite máximo permisible	Tiempo de exposición
PST	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	100	Anual
		300	24 horas
PM ₁₀	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	70	Anual
		150	24 horas

Tabla 3.*Continuación*

Contaminante	Unidad	Límite máximo permisible	Tiempo de exposición
SO ₂	ppm (µg/m ³)	0.031 (80)	Anual
		0.096 (250)	24 horas
		0.287 (750)	3 horas
NO ₂	ppm (µg/m ³)	0.053 (100)	Anual
		0.08 (150)	24 horas
		0.106 (200)	1 horas
O ₃	ppm (µg/m ³)	0.041 (80)	8 horas
		0.061 (120)	1 horas
CO	ppm (µg/m ³)	8.8 (10)	8 horas
		35 (40)	1 horas
Nota: µg/m ³ a las condiciones de 298.15 K y 101.325 Kpa. (25 C y 760 mmHg)			

Nota. Se presentan los niveles permisibles para la contaminación de contaminantes en Colombia. Tomado de:

https://www.corpamag.gov.co/archivos/normatividad/Resolucion601_20060404.htm

Tabla 4.

Concentración y tiempo de exposición de los contaminantes para los niveles de prevención, alerta y emergencia.

Contaminante	Tiempo de exposición	Unidades	Prevención	Alerta	Emergencia
PST	24 horas	ppm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	375	625	875
PM ₁₀	24 horas	ppm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	300	400	500
SO ₂	24 horas	ppm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.091 (500)	0.382 (1000)	0.612 (1600)
NO ₂	1 hora	ppm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.212 (400)	0.425 (800)	1.064 (2000)
O ₃	1 hora	ppm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.178 (350)	0.356 (700)	0.509 (1000)
CO	8 horas	ppm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	14.9 (17)	29.7 (34)	40.2 (46)
Nota: $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las condiciones de 298.15 K y 101.325 Kpa. (25 C y 760 mmHg)					

Nota. Se presentan los niveles permisibles para la contaminación de contaminantes en Colombia en un tiempo estimado. Tomado de: https://www.corpamag.gov.co/archivos/normatividad/Resolucion601_20060404.htm

Tabla 5.

Niveles máximos permisibles para contaminantes.

Contaminante	Unidad	Directrices OMS	Límite máximo permisible	Tiempo de exposición
PST	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	100	Anual
		-	300	24 horas
PM ₁₀	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	20	70	Anual
		50	150	24 horas

Tabla 5.*Continuación*

Contaminante	Unidad	Directrices OMS	Límite máximo permisible	Tiempo de exposición
PM _{2.5}	ppm (µg/m ³)	10	25	Anual
		25	50	24 horas
SO ₂	ppm (µg/m ³)	80	0.031	Anual
		250	0.096	24 horas
		750	0.287	3 horas
NO ₂	ppm (µg/m ³)	100	0.053	Anual
		150	0.08	24 horas
		200	0.106	1 horas
O ₃	ppm (µg/m ³)	80	0.041	8 horas
		120	0.061	1 horas
CO	ppm (µg/m ³)	10	8.8	8 horas
		40	35	1 horas
Nota: µg/m ³ a las condiciones de 298.15 K y 101.325 Kpa. (25 C y 760 mmHg)				

Nota. La figura referencia a normativa de niveles permisibles para emisiones durante el 2015. Tomado de: U. Eafit, «Una oportunidad para mejorar la calidad del aire en Colombia. Revista Universidad EAFIT edición 170. Universidad EAFIT», www.eafit.edu.co. <https://www.eafit.edu.co/investigacion/revistacientifica/edicion-170/Paginas/colombia-aire-oportunidades.aspx>

1.9. Composición primaria de los gases generados en los rellenos sanitarios

El gas que llega a la unidad de combustión o recuperación es una mezcla de biogás, aire y compuestos orgánicos volátiles. Está compuesto por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), oxígeno (O_2) y nitrógeno (N_2), además de trazas de diversos compuestos.

El ajuste del soplador afecta directamente la cantidad de aire contenida en el gas. Cuanto más fuerte sea la succión, más aire podrá pasar a través de las imperfecciones del sistema de recolección. Las condiciones climáticas también juegan un papel importante: la humedad y la temperatura elevadas estimulan la actividad bacteriana y la producción de biogás.

Los cambios en la presión atmosférica también tienen un impacto directo en el contenido de oxígeno del gas del vertedero.

El porcentaje de cada uno de estos gases varía de un lugar a otro, dependiendo del tipo de residuo almacenado, el avance del proceso de fermentación y factores externos, para ello se tienen los siguientes porcentajes de componentes presentados en la Tabla 6 que son liberados en la quema de biogás en los rellenos sanitarios [49]:

Tabla 6.

Componentes típicos del gas de vertedero.

COMPONENTE	PORCENTAJE POR VOLUMEN	CARACTERÍSTICAS
Metano	45 - 60	El metano es un gas natural. Es incoloro e inodoro. Los vertederos son la mayor fuente de emisiones de metano provocadas por el hombre.

Tabla 6.*Continuación*

COMPONENTE	PORCENTAJE POR VOLUMEN	CARACTERÍSTICAS
Dióxido de carbono	40 - 60	El dióxido de carbono se encuentra naturalmente en pequeñas concentraciones en la atmósfera (0,03%). Es incoloro, inodoro y ligeramente ácido.
Nitrógeno	2 - 5	El nitrógeno constituye aproximadamente el 79% de la atmósfera. Es inodoro, insípido e incoloro.
Oxígeno	0,1 - 1	El oxígeno constituye aproximadamente el 21% de la atmósfera. Es inodoro, insípido e incoloro.
Amoniaco	0,1 - 1	El amoníaco es un gas incoloro con un olor acre.
NMOC (compuestos orgánicos distintos del metano)	0,01 - 0,6	<p>Los NMOC son compuestos orgánicos (es decir, compuestos que contienen carbono). (El metano es un compuesto orgánico, pero no se considera un NMOC).</p> <p>Los NMOC pueden ocurrir naturalmente o formarse mediante procesos químicos sintéticos. Los NMOC que se encuentran con mayor frecuencia en los vertederos incluyen acrilonitrilo, benceno, 1,1-dicloroetano, 1,2-cis-dicloroetileno, diclorometano, sulfuro de carbonilo, etilbenceno, hexano, metiletilcetona, tetracloroetileno, tolueno, tricloroetileno, cloruro de vinilo y xilenos.</p>

Tabla 7.*Componentes típicos del gas de vertedero*

COMPONENTE	PORCENTAJE POR VOLUMEN	CARACTERÍSTICAS
Sulfuros	0 - 1	Los sulfuros (por ejemplo, sulfuro de hidrógeno, sulfuro de dimetilo, mercaptanos) son gases naturales que dan a la mezcla de gases del vertedero su olor a huevo podrido. Los sulfuros pueden provocar olores desagradables incluso en concentraciones muy bajas.
Hidrogeno	0 - 0,2	El hidrógeno es un gas inodoro e incoloro.
Monóxido de carbono	0 - 0,2	El monóxido de carbono es un gas inodoro e incoloro.

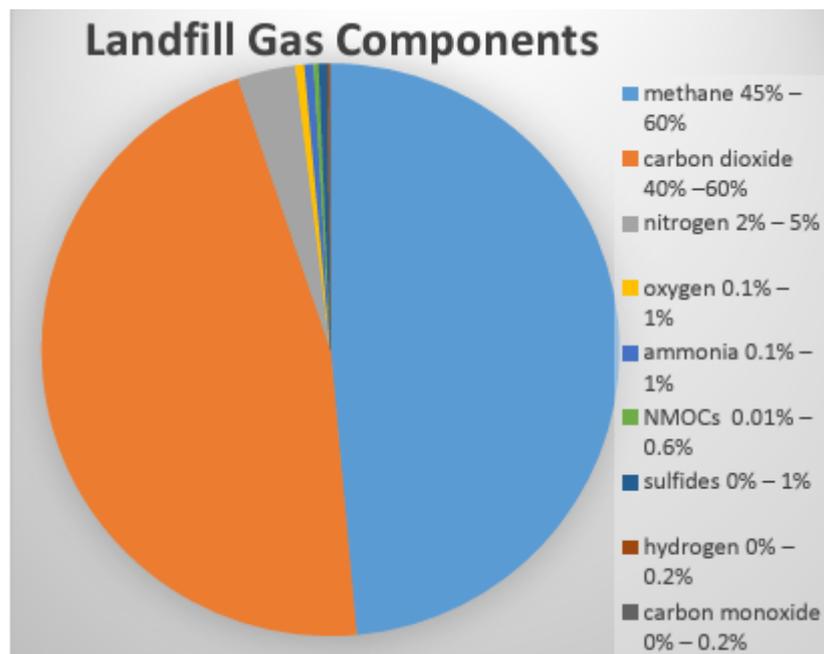
Nota. Estas tablas muestran los componentes típicos de los gases de efecto invernadero. Tomando de: González., «Alternativas de captación y tratamiento del biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba, Argentina.», *UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA. FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FISICAS y NATURALES.*, 2014.

<https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/1635/Alternativas%20de%20captaci%C3%B3n%20y%20tratamiento%20del%20biogas%20en%20el%20vertedero%20de%20Piedras%20Blancas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Dichos porcentajes son mejor representados en la siguiente Figura 6 en donde se obtiene la mayor cantidad de metano en la composición de los gases, mientras que el dióxido es el segundo compuesto presente con mayor proporción mientras que los demás compuestos no alcanzan a representar ni el 5% general de composición [50] [51] [52].

Figura 6.

Composición de los gases de los rellenos sanitarios.



Nota. Se presenta una gráfica pastel para diferenciar de mejor manera los porcentajes de los gases. Tomado de: S. Tuset, «Tratamiento de lixiviados de vertedero | Condorchem Enviro Solutions», *Condorchem Enviro Solutions*, 6 de noviembre de 2023. <https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-de-lixiviados-de-vertedero/>, <https://www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/html/ch1.html>, <https://www.oregon.gov/deq/Regulations/rulemaking/RuleDocuments/lfg2021ac1primer.pdf>

1.9.1. Composición de los rellenos sanitarios y su respectivo proceso para la producción de gas

Los residuos de los vertederos impactan el medio ambiente incluso si se eliminan de manera controlada. Además de la contaminación visual provocada por las crecientes pilas de residuos; Estos lugares contribuyen al calentamiento global, afectando la naturaleza y la vida silvestre resultando una fuente importante de contaminación.

Los residuos depositados en vertederos se descomponen muy lentamente, lo que crea un problema a largo plazo para nosotros y las generaciones futuras. Los principales problemas medioambientales provocados por el almacenamiento de

residuos son las toxinas, los lixiviados y los gases de efecto invernadero, estos últimos resultan un caso específico ya que no se pueden finiquitar sino mitigar para que su impacto ambiental no resulte muy grande. [53] En cuanto a las toxinas y lixiviados que se pueden llegar a generar se debe tener en consideración que para las toxinas existen demasiados materiales que terminan como desechos que pueden llegar a contener sustancias tóxicas o sustancias que por reacciones y/o condiciones químicas reaccionen y terminen creando concentraciones tóxicas para el ambiente, los desechos electrónicos son un buen ejemplo.

Los desechos como televisores, computadoras y otros aparatos electrónicos contienen una larga lista de sustancias peligrosas, como mercurio, arsénico, cadmio, PVC, solventes, ácidos y plomo, estos además no solo suelen provenir de los electrodomésticos sino también de otras fuentes como las expuestas en la Figura 7. [54]

Figura 7.

Fuentes de contaminantes tóxicos presentes en los rellenos sanitarios.



Nota: Se presentan de manera gráfica las fuentes de contaminantes tóxicos en los rellenos sanitarios. Tomando de: <https://dkv.es/corporativo/blog-360/medioambiente/reciclaje/tipos-de-plasticos-clasificacion-reciclaje>

Con el tiempo, estas toxinas se filtran al subsuelo y pueden llegar a las aguas subterráneas, convirtiéndose en peligros ambientales por años.

Teniendo en cuenta que no solo existen las sustancias tóxicas sino también los lixiviados que se generan durante el depósito, albergue y quema de los residuos ya que son un líquido que se forma cuando los desechos se descomponen en el vertedero y el agua se filtra a través de esos desechos. Este líquido es altamente tóxico y puede contaminar la tierra, las aguas subterráneas y los cuerpos de agua,

por lo tanto, también es necesario entender los principales puntos que influyen en su composición:

- a. Tipo de vertedero: Este se ve afectado por las tecnologías que posea el vertedero más enfáticamente en los pozos de extracción, siendo más sencillo cuando se tiene un tipo de instalación de pozo vertical para así controlar de manera sencilla los residuos presentes.
- b. Agua pluvial: Se hace referencia a cuando la cantidad de aguas pluviales que se infiltran en el vertedero es elevada, la carga contaminante de los lixiviados (incluyendo sales) es más baja, aunque el caudal total a tratar sea superior.
- c. Período de explotación: En los lixiviados de vertederos jóvenes (1-2 años) el pH es bajo (4,5-7,5) y las concentraciones de DQO, DBO5, nutrientes y metales pesados son altas. Por otro lado, en los vertederos maduros (más de 3 años), se observa que los lixiviados tienen un pH en el rango (6,5-7,5) con valores de DQO, DBO5 y nutrientes reducidos sustancialmente. Otra constante es la presencia elevada de nitrógeno amoniacal y de sales disueltas (sulfatos, cloruros, bicarbonatos, etc.) y también en algunas ocasiones una significativa concentración de metales pesados. [55]

Un relleno sanitario puede tardar uno o más años en llenarse dependiendo del tiempo durante el cual los contenidos están expuestos naturalmente a la lluvia. El agua de lluvia que se filtra a través del vertedero se disuelve y elimina del 5 al 7 por ciento de las toxinas para crear un licor maloliente, conocido como lixiviado, que contiene amoníaco y varias sales tóxicas.

Dependiendo de la cantidad de lluvia, un solo relleno puede llenar fácilmente varias piscinas olímpicas con lixiviado cada año. Los desechos orgánicos son producidos por bacterias que los descomponen, cuando los desechos se descomponen, producen sustancias químicas ligeramente ácidas que se combinan con los fluidos residuales para formar gases alcalinos y tóxicos, a su vez también existen efectos secundarios menores, como olores, apariencia y plagas desagradables.

En general, los procesos más utilizados para tratar los lixiviados generados durante un periodo de tiempo en los vertimientos suelen estar compuestos por diversas

combinaciones de tratamientos biológicos y fisicoquímicos, donde a su vez se deben considerar varios factores para la selección adecuada del proceso de gestión de aguas residuales de vertedero más apropiado.

a. Extracción mediante fuerza del agua

Procesos fisicoquímicos: Los lixiviados maduros (3 años o más) deben tratarse mediante procesos fisicoquímicos, ya que la biodegradabilidad (relación DBO5/DQO) disminuye con la edad del lixiviado.

Proceso biológico: Adecuado para el tratamiento de lixiviados jóvenes (1-2 años) por su alta biodegradabilidad.

b. Extracción mediante caudal tratado, carga contaminante y límites reglamentarios.

Estos parámetros determinan en última instancia si el proceso biológico existente es suficiente o si después del proceso biológico se debe utilizar un método más completo, como por ejemplo un proceso de filtración mediante membranas de ósmosis inversa. En este caso, existen métodos sostenibles que pueden reducir eficazmente la cantidad de residuos generados durante el procesamiento, como el paso de evaporación-concentración al vacío. [56]

En cuanto a los tratamientos presentes en los rellenos tienen una tendencia a utilizar tecnologías avanzadas para el tratamiento de los residuos generados en el vertedero. Estas tecnologías, como cualquier adición a los sistemas de vertederos suponen un coste más elevado tanto en inversión como en operación que procesos ya que resultan más eficaces que los tratamientos más convencionales, ya que estos suelen provocar que los mecanismos de infiltración del agua de lluvia sean mínimos.

Por lo general, los lixiviados de un relleno sanitario suelen contener una alta concentración de materia orgánica, sólidos suspendidos totales, alto contenido de nitrógeno y fósforo y bajas concentraciones de metales pesados, por ello, se dispone

de diferentes sistemas y tipos de tratamientos los cuales pueden estar conformados por una o varias etapas, entre los más comunes y exitosos se encuentran:

1. Planta de Tratamiento de Lixiviados MBR (Membranas Bio-Reactores) y Sistemas de Ósmosis Inversa.
2. Planta de Tratamiento de Lixiviados VSEP (Sistema de Ósmosis Vibratoria)
3. Planta de Tratamiento de Lixiviados PTL (Planta de tratamiento físico químico de lixiviado).[57]

Para el siguiente sistema se tiene la Figura 8 en la cual se puede observar dos métodos de tratamiento utilizados por la empresa europea ENVIRO SOLUTIONS siendo de los más eficaces

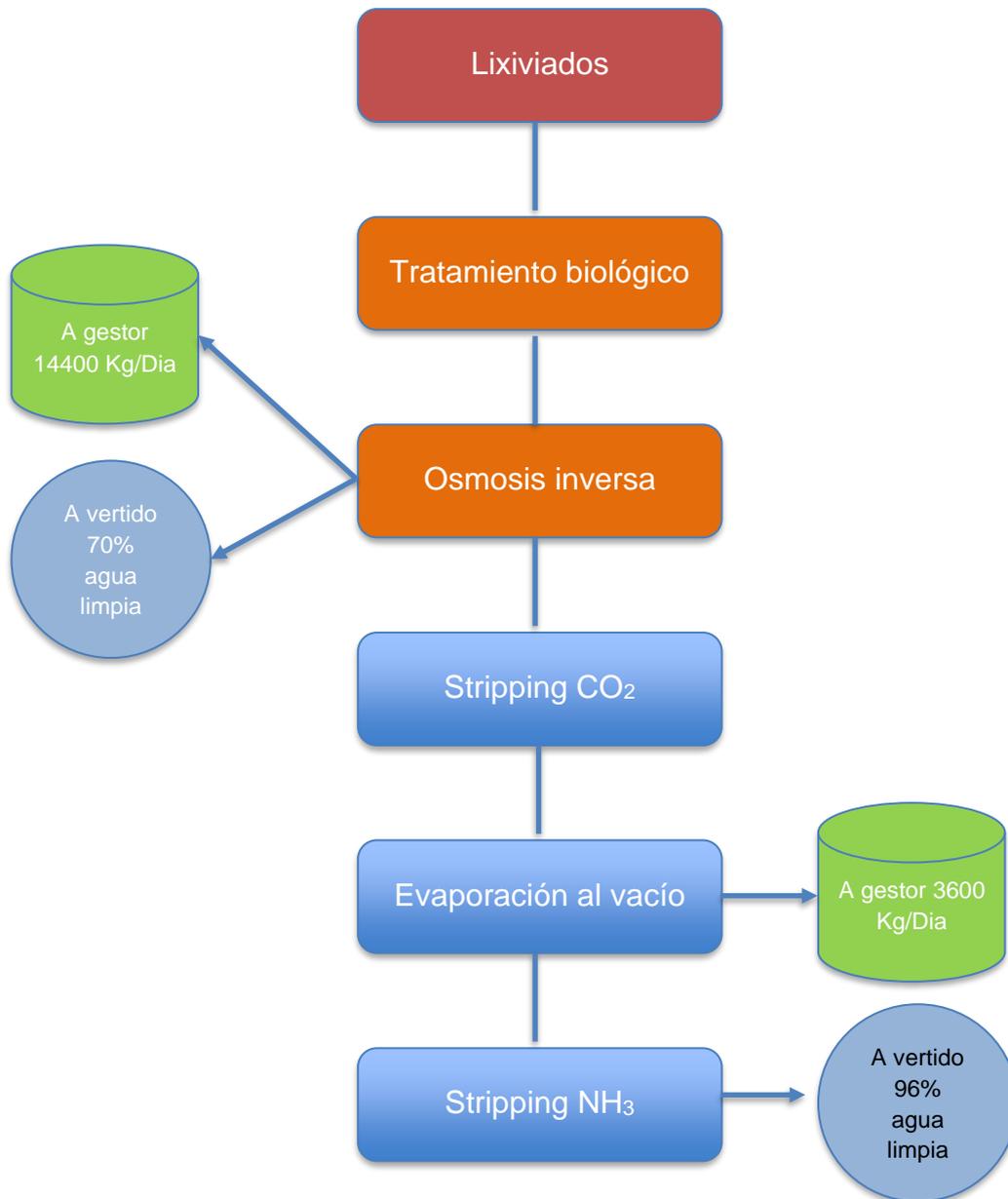
Sistema biológico (Sistemas Secuenciales (SBR) o Reactores a membranas (MBR)) con Ósmosis inversa mediante la cual se produce un efluente de elevada calidad generando un balance con las membranas, que se gestiona externamente, a menudo acostumbra a generar unos sobrecostos elevados.

Evaporación al vacío junto con Stripping esta opción permite reducir considerablemente los costos de producción, consiste en que se puede lograr alcanzar un residuo prácticamente seco para conseguir depositar en algunos casos en la celda de “residuos impropios” del vertedero. A su vez la evaporación al vacío permite obtener un porcentaje de destilado mucho mayor y más limpio que otras tecnologías, como el tratamiento biológico o la ósmosis inversa. [58]

Por último, se tiene la posibilidad de realizar la combinación de los métodos anteriores los cuales permiten recuperar una cantidad mucho mayor de agua limpia, que puede ser vertida cumpliendo con las normativas. Además, se obtiene un concentrado de residuos mucho más pequeño, lo cual se traduce en grandes ahorros en la gestión de los residuos.

Figura 8.

Tratamiento de lixiviados en un relleno sanitario.



Nota. Representa un esquema del tratamiento de lixiviados en Ecuador. Tomado de: S. Tuset, «Tratamiento de lixiviados de vertedero | Condorchem Enviro Solutions», *Condorchem Enviro Solutions*, 6 de noviembre de 2023. <https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-de-lixiviados-de-vertedero/>

c. **Composición promedio de lixiviados de vertederos**

Para comprender los lixiviados en toda su composición se deben tener en cuenta algunos datos y análisis con más detalle de estos, la importancia de las etapas de vertido puede llegar a provocar algunos cambios significativos de composición.

Los contaminantes contenidos en los lixiviados de los vertederos de residuos sólidos se pueden dividir en cuatro grupos:

- Materia orgánica disuelta, la cual se puede cuantificar o clasificar como demanda química de oxígeno (**DQO**) o carbono orgánico total (**TOC**), ácidos grasos volátiles (se acumulan durante la fase ácida de estabilización de residuos) y otros compuestos refractarios como los del tipo fúlvico-Hume.
- Macronutrientes inorgánicos: Calcio (**Ca₂**), magnesio (**Mg₂**), sodio (**Na**), potasio (**K**), amonio (**NH₄**), hierro (**Fe₂**), manganeso (**Mn₂**), cloruro (**Cl⁻**), sulfato (**SO₄²⁻**) y bicarbonato (**HCO₃⁻**).
- Metales pesados: cadmio (**Cd₂**), cromo (**Cr₃**), cobre (**Cu₂**), plomo (**Pb₂**), níquel (**Ni₂**) y zinc (**Zn₂**).
- Los compuestos orgánicos xenobióticos (XOX) proceden de productos químicos domésticos e industriales y existen en concentraciones relativamente bajas (normalmente menos de 1 mg/l de compuestos individuales). Estos compuestos incluyen, entre otros, hidrocarburos aromáticos, fenoles, compuestos alifáticos clorados, pesticidas y plastificantes. [59]

Otros compuestos que se pueden encontrar en los lixiviados de los vertederos incluyen boruros, sulfuros, arseniato, selenito, bario, litio, mercurio y cobalto. Sin embargo, en general estos compuestos se encuentran en concentraciones muy bajas y sólo tienen una importancia secundaria. La composición del lixiviado también puede caracterizarse mediante diversas pruebas de toxicidad, que indirectamente proporcionan información sobre el contenido de contaminantes que pueden ser perjudiciales para un organismo en particular. [59]

Los rellenos sanitarios suelen contener grandes cantidades de sustancias nocivas para el medio ambiente entre ellos están los plásticos como el PVC y otros materiales que filtran sustancias químicas tóxicas a medida que se descomponen. En la gama de los plásticos pueden contener una gran variedad y presencia en los vertimientos, ya que se desechan desde productos de plástico básicos como botellas y bolsas hasta residuos médicos como envases de medicamentos, equipo médico desechable, suministros de laboratorio y otros productos relacionados con la atención médica. Algunos de los plásticos comunes presentes en los rellenos son representados en la Figura 9. [60]

Figura 9.

Tipos de residuos plásticos presentes en rellenos sanitarios.



Nota. Tipos de residuos plásticos presentes en rellenos sanitarios. Tomado de: «Tipos de plásticos: clasificación y reciclaje», DKV Seguros, 29 de abril de 2024. <https://dkv.es/corporativo/blog-360/medioambiente/reciclaje/tipos-de-plasticos-clasificacion-reciclaje>

1.10. Sistema de descomposición de los residuos en los rellenos sanitarios

Una vez explicadas las sustancias que se suelen generar por el vertimiento de los desechos, se logra entender por qué se generan sustancias tóxicas, lixiviados además de tener una gran cantidad de plásticos y residuos no orgánicos. Cuando se hace referencia al material orgánico, como restos de comida y desechos verdes, se deposita con los demás residuos, generalmente se compacta y se cubre. Estos se encargan de eliminar el oxígeno y hace que estos residuos se descomponen en un proceso anaeróbico.

Eventualmente, este proceso libera metano, un gas de efecto invernadero que es unas 25 veces más potente que el dióxido de carbono. El gas de los rellenos se compone de 35 a 55% de metano y de 30 a 44% de dióxido de carbono donde además el metano siendo un gas inflamable que puede volverse peligroso si se permite que se acumule en gran concentración. [61]

La siguiente gráfica (Figura 10) ilustra los cambios en la composición típica de los gases de efecto invernadero después de la colocación de los desechos en los rellenos. Las bacterias descomponen los residuos de los vertederos en cuatro fases. La composición del gas cambia con cada fase y los residuos en un vertedero pueden estar pasando por varias fases de descomposición a la vez durante una escala de tiempo después de la colocación (donde se examina el tiempo total y la duración de la fase) varía según las condiciones del vertedero. [62]

Por ello es importante destacar cómo la transición entre estas fases puede ser dinámica y compleja. Como se mencionó anteriormente, los residuos en un vertedero pueden estar experimentando múltiples fases de descomposición simultáneamente debido a las variadas condiciones ambientales y la diversidad de materiales presentes.

Esta coexistencia de fases puede generar un panorama único de composición de gases en diferentes áreas del vertedero. Por ejemplo, en las zonas más superficiales donde hay más oxígeno disponible, es probable que se encuentren en la fase inicial o aeróbica, mientras que, en las capas más profundas, donde la disponibilidad de

oxígeno es limitada, se estaría llevando a cabo la fase anaeróbica; en cuanto a un aspecto más dinámico y específico se observa cómo afecta la duración total del proceso de descomposición. La velocidad a la que los residuos atraviesan cada fase puede variar ampliamente según la composición del vertedero, la temperatura, la humedad y otros factores ambientales.

En algunos casos, la descomposición puede acelerarse, mientras que en otros puede prolongarse significativamente, además, es importante considerar el papel de la gestión del vertedero en este proceso donde las prácticas de gestión, como la compactación de los residuos, la cobertura diaria y el control de la humedad, pueden influir en la velocidad y la eficiencia de la descomposición, así como en la producción y liberación de gases. [63]

Teniendo en cuenta la explicación y descripción anteriores relacionadas con la descomposición de los residuos en los vertederos es un proceso dinámico y multifacético que está influenciado por una variedad de factores; la composición de los gases de escape cambia en cada una de las cuatro etapas de descomposición además que generalmente en los rellenos sanitarios suelen contener residuos durante 20 a aproximadamente 35 años, por lo que los residuos pueden pasar por varias etapas de descomposición al mismo tiempo.

Esto significa que los residuos más antiguos de una zona pueden encontrarse en un estado de descomposición diferente al de los residuos recientemente enterrados en otra zona, por lo tanto, es necesario conocer de mejor manera las fases de descomposición [64].

1.10.1. Fase 1 - Fase de descomposición inicial (hidrólisis)

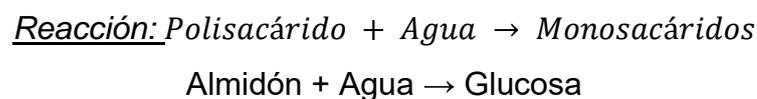
En esta fase, la materia orgánica como restos de comida, residuos de jardín y otros materiales biodegradables se depositan en el vertedero. Inicialmente, las bacterias aerobias descomponen los compuestos orgánicos complejos en moléculas más simples mediante un proceso denominado hidrólisis. Las enzimas liberadas por las bacterias descomponen moléculas grandes, como carbohidratos, proteínas y grasas, en moléculas más pequeñas, como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos.

La presencia de humedad es esencial para que la hidrólisis se produzca eficazmente. Los niveles de oxígeno pueden seguir siendo relativamente altos en esta fase, lo que permite que prosperen las bacterias aerobias.

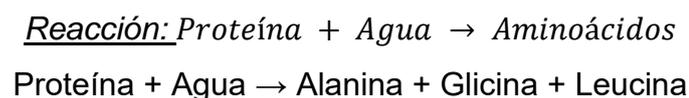
En la primera etapa de descomposición, las bacterias aeróbicas (que viven sólo en presencia de oxígeno) consumen este mismo rompiendo las largas cadenas moleculares de carbohidratos, proteínas y lípidos que forman los desechos orgánicos. El principal producto de este proceso es el dióxido de carbono. El contenido de nitrógeno es ligeramente alto al comienzo de esta etapa, pero disminuye a medida que la regeneración avanza a través de las cuatro etapas. [65].

La etapa 1 continúa hasta que se agota el oxígeno disponible. La descomposición puede tardar días o meses, dependiendo de la cantidad de oxígeno presente en la pila. Los residuos se vierten en los rellenos sanitarios donde las cantidades y niveles de oxígeno dependen de factores como qué tan sueltos o comprimidos estaban los desechos cuando se quemaron.

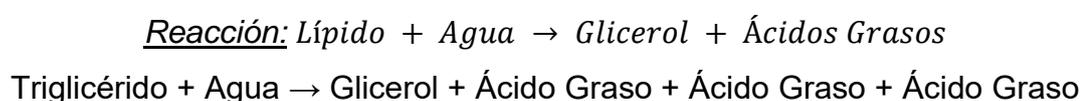
a. Hidrólisis de Carbohidratos:



b. Hidrólisis de Proteínas:



c. Hidrólisis de Grasas (Lípidos):



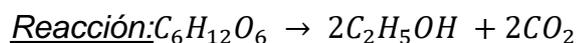
1.10.2. Fase 2 - Fase de Acidogénesis

A medida que la materia orgánica continúa descomponiéndose, las bacterias anaeróbicas toman el control en esta fase. Estas bacterias fermentan las moléculas más simples producidas en la fase de hidrólisis, lo que conduce a la producción de ácidos orgánicos, alcoholes y ácidos grasos volátiles. Este proceso de fermentación se conoce como acidogénesis.

La descomposición de la etapa 2 comienza después de que se agota el oxígeno del vertedero. Mediante procesos anaeróbicos (procesos que no requieren oxígeno), las bacterias convierten los compuestos obtenidos por las bacterias aeróbicas en ácido acético, ácido láctico, ácido fórmico y alcoholes como metanol y etanol. Cuando el ácido se mezcla con la humedad del vertedero, disuelve ciertos nutrientes, lo que hace que el nitrógeno y el fósforo estén disponibles para diferentes tipos de bacterias en el vertedero.

Los subproductos gaseosos de estos procesos son dióxido de carbono e hidrógeno. Si el vertedero se altera u oxigena de alguna manera, el proceso microbiano regresa al paso 1.

a. Fermentación de azúcares(glucosa)



Etanol y dióxido de carbono

b. Fermentación de ácidos grasos



Producción de metano y dióxido de carbono

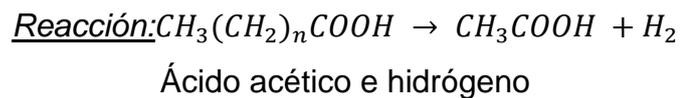
Durante la fermentación de azúcares, la glucosa se convierte en etanol y dióxido de carbono. En la fermentación de ácidos grasos, estos se descomponen en metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), siendo el metano un producto clave en la producción de gas de vertedero.

1.10.3. Fase 3 - Fase de Acetogénesis

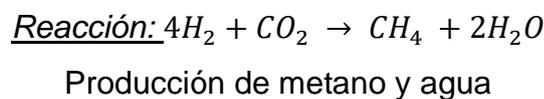
En esta fase, las bacterias acetogénicas descomponen aún más los productos de la acidogénesis, especialmente los ácidos grasos volátiles, en compuestos como ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.

La descomposición de la etapa 3 comienza cuando ciertos tipos de bacterias anaeróbicas consumen los ácidos orgánicos producidos en la etapa 2 y producen el acetato de ácido inorgánico. Este proceso convierte al vertedero en un ambiente neutral donde comienzan a formarse bacterias productoras de metano. Existe una relación simbiótica o mutuamente beneficiosa entre el metano y las bacterias productoras de ácido. Las bacterias productoras de ácido producen compuestos que pueden consumir bacterias metanogénicas. Las bacterias metanogénicas consumen dióxido de carbono y acetato, cuyo exceso es tóxico para las bacterias formadoras de ácido. [66]

- a. Producción de ácido acético



- b. Producción de hidrogeno



Durante la producción de ácido acético, los ácidos grasos se convierten en ácido acético y liberan hidrógeno. La producción de hidrógeno se realiza a partir de una reacción de reducción que involucra hidrógeno y dióxido de carbono, generando metano como producto principal.

1.10.4. Fase 4 - Fase de Metanogénesis

Las bacterias metanogénicas, que prosperan en condiciones anaeróbicas, metabolizan los compuestos orgánicos restantes de las fases anteriores para producir

metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂). Esta fase es crucial para la generación de gas de vertedero, que está compuesto principalmente de metano.

La decadencia de la etapa IV comienza cuando la composición del gas del yacimiento y las tasas de producción son relativamente constantes.

El gas de yacimiento de la etapa 4 normalmente contiene aproximadamente entre un 45 % y un 60 % de metano, entre un 40 % y un 60 % de dióxido de carbono y entre un 2 % y un 9 % de otros gases, como los sulfuros, en volumen.

En la etapa 4, el gas se produce a un ritmo constante, normalmente durante unos 20 años. Sin embargo, las emisiones de gases persisten durante más de 50 años después de su eliminación. Por ejemplo, los vertederos que procesan desechos domésticos comunes pueden tardar más en producir gas si los desechos contienen más materia orgánica.

a. Producción de metano y agua



Producción de metano y agua

b. Producción alterna de metano

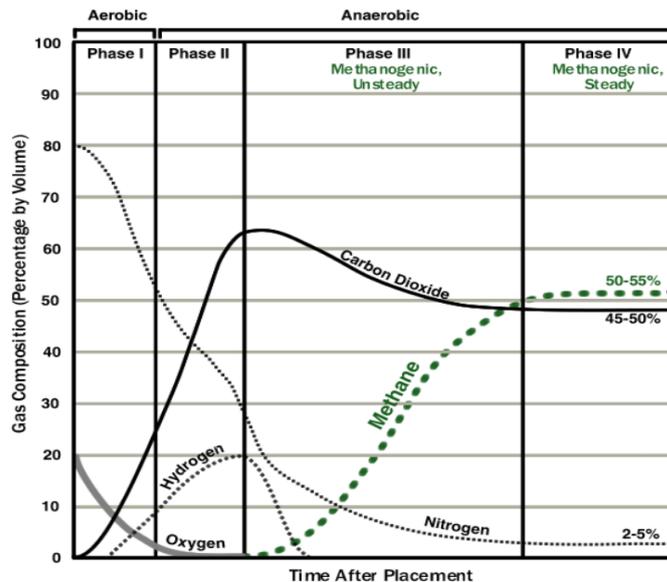


Producción de metano y dióxido de carbono

Durante la metanogénesis, el hidrógeno y el dióxido de carbono se combinan para formar metano y agua. Además, el ácido acético también puede ser convertido en metano y dióxido de carbono por bacterias metanogénicas.

Figura 10.

Conceptos básicos sobre el gas de vertedero.



Nota. Figura adaptada de ATSDR 2008. Capítulo 2: Conceptos básicos sobre el gas de vertedero. Tomado de: «ATSDR - Landfill Gas Primer - Chapter 2: Landfill Gas Basics».

<https://www.atsdr.cdc.gov/hac/landfill/html/ch2.html>,
https://www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/PDFs/Landfill_2001_ch2mod.pdf

Dentro de los primeros 20 años de emisión, el efecto invernadero del metano es mucho peor, entre 84 y 100 veces más potente que el dióxido de carbono. Y cuando se trata de cambiar el rumbo de las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que realmente cuenta es lo que suceda durante los próximos 10 a 20 años. Las implicaciones para el calentamiento global y el cambio climático son enormes. Por lo tanto, el compostaje de los restos de comida y desechos verdes en un contenedor de compost ayuda a disminuir muchos de estos problemas. [67]

1.11. Bonos de carbono aplicado a la reducción de emisiones en vertederos

Los bonos de carbono, también conocidos como créditos de carbono, son instrumentos financieros que representan una tonelada de dióxido de carbono (CO₂) o su equivalente en otros gases de efecto invernadero (GEI) que ha sido reducido, eliminado o evitado. Estos bonos se utilizan como una herramienta en los mercados de carbono para ayudar a mitigar el cambio climático, incentivando la reducción de

emisiones de GEI de manera económicamente eficiente. Los créditos de carbono son un método de compensación de dióxido de carbono (CO₂) que permite tanto a empresas como a particulares reducir el impacto de sus emisiones de carbono donde cualquiera puede comprar estos bonos, pero normalmente los compran empresas.

La compra se realiza para compensar, entre otras cosas, las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por la empresa, es el resultado del proceso de fabricación. Gracias a su popularidad en los últimos años, cada vez existen más formas de conseguir créditos de carbono. Al mismo tiempo, se ha vuelto más fácil comprar estos bonos de manera segura.[68] A continuación se presentan los tipos de bonos de carbono más utilizados en las industrias para promover el desarrollo y compensación de huella de carbono reducida:

- **Bonos de Carbono Voluntarios:** Se negocian en mercados voluntarios donde empresas y particulares compran bonos para compensar sus emisiones de manera voluntaria. Ejemplos incluyen el mercado voluntario de bonos de carbono en EE. UU. o la Iniciativa Gold Standard.[69]
- **Bonos de Carbono Regulados:** Se negocian en mercados regulados bajo esquemas de comercio de emisiones establecidos por gobiernos o entidades internacionales. El ejemplo más conocido es el Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea.[70]

Los bonos de carbono se generan a través de proyectos que reducen o eliminan emisiones de GEI estos pueden incluir energía renovable (eólica, solar, hidroeléctrica), eficiencia energética, reforestación, captura y almacenamiento de carbono, entre otros; dichos proyectos deben ser validados y verificados por terceros independientes para asegurar que las reducciones de emisiones son reales, medibles y adicionales a las que se habrían producido de otra manera.

Los bonos de carbono pueden ser comprados y vendidos en mercados de carbono. Empresas que excedan sus límites de emisiones pueden comprar bonos para cumplir con sus obligaciones reglamentarias, mientras que aquellas que tienen emisiones por

debajo de sus límites pueden vender sus bonos excedentes. Proporcionan flexibilidad a las empresas para cumplir con las normativas de emisiones de manera económicamente eficiente. Las empresas pueden decidir si es más rentable reducir sus propias emisiones o comprar bonos de carbono, a menudo los proyectos financiados por bonos de carbono generan beneficios adicionales, como la creación de empleo, transferencia de tecnología, y mejoras en la calidad de vida de las comunidades locales. Una vez validados, los bonos de carbono son registrados y certificados por entidades acreditadas. Este proceso asegura la transparencia y credibilidad del bono. [71]

En Colombia, los bonos de carbono están regulados bajo un marco legal que incluye normativas nacionales y alineación con estándares internacionales, como los establecidos por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.[72] Algunas de las principales regulaciones y marcos incluyen:

Ley 1931 de 2018: Esta ley establece directrices para la gestión del cambio climático en Colombia y promueve el desarrollo de proyectos de mitigación de GEI, incluidos los proyectos de bonos de carbono.

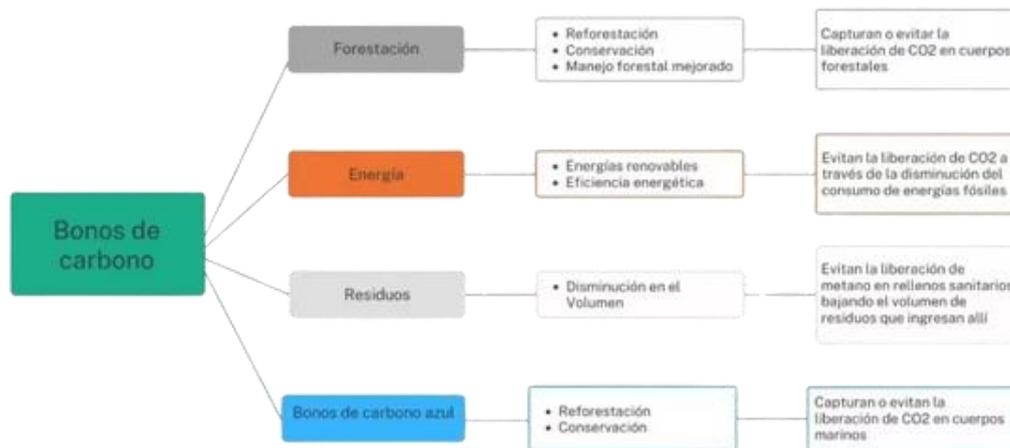
Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático: Define las estrategias y acciones para reducir las emisiones de GEI y promover la resiliencia al cambio climático. En Colombia, la autoridad nacional designada para este tipo de procesos es el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que es responsable de la aprobación y supervisión de proyectos de bonos de carbono. [73]

En Colombia el precio del bono de carbono está fijado por el impuesto nacional al carbono, que para 2023 es de \$20.500 por tonelada de carbono equivalente, que son aproximadamente US\$5 [74], según la Ley 926 de 2017, los bonos de carbono son resultantes de los proyectos o actividades desarrolladas a nivel nacional, regional o local cuyo objeto es la reducción, remoción y captura de gases de efecto invernadero, ya que cada unidad del bono representa una tonelada de CO₂ se permite a cualquier entidad compensar esas emisiones sin la necesidad de tener responsabilidades sociales o corporativas evitando la obligación legal del asunto. Al comprar o vender créditos de carbono, una empresa puede compensar las emisiones de carbono

generadas por sus operaciones también dichas empresas se pueden volver “empresas neutras” en carbono contando con un historial de emisiones netas de cero.[75] La Figura 11 muestra un breve ejemplo de algunas de las situaciones o sectores donde los créditos de carbono están disponibles para proyectos a nivel regional en Colombia:

Figura 11.

Proyectos de bonos de carbono



Nota. Se presenta un esquema de los posibles bonos de carbono existentes. Tomado de: <https://www.carbonneutralplus.com/proyectos-de-bonos-de-carbono-cuales-son-que-tipos-hay/#:~:text=Los%20proyectos%20de%20bonos%20de,que%20gen>

1.12. Métodos y generalidades para la reducción de gases de efecto invernadero

En la gestión moderna de residuos, la recogida y utilización de gases de vertedero como el metano y el dióxido de carbono se ha convertido en un campo cada vez más importante. Estos gases, producidos por la descomposición de la materia orgánica en los vertederos, suponen una amenaza por sus posibles efectos sobre el calentamiento global y porque son una valiosa fuente de energía renovable. Por lo tanto, comprender la eficiencia de la recolección de gas y las prácticas de uso actuales es esencial en el contexto de la gestión de residuos y la transición hacia una economía más sostenible. para ello se debe revisar el estado actual de la recolección de gases de vertedero,

observar y entender que afecta a una buena producción en un relleno sanitario, evaluando su efectividad y explicando las diferentes formas en que se puede utilizar este recurso para generar energía limpia y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Los residuos suelen tener una serie de aspectos que los afectan de manera directa o indirecta lo cual puede llegar a afectar la eficiencia y calidad de los mismos a la hora de producir gas; la tasa y la cantidad de gas residual producido en un lugar determinado depende de las características de los residuos (composición y síntesis) y de una variedad de factores ambientales, por ello se exploran diversos casos y ejemplos teniendo como principales la disponibilidad de oxígeno, humedad, composición y edad de residuos y temperatura en el relleno. [76]

La composición de los residuos se determina cuantos más desechos orgánicos haya en un vertedero, más bacterias producirán gases de vertedero (como dióxido de carbono, metano, nitrógeno y sulfuro de hidrógeno) durante la descomposición. Cuantos más productos químicos se almacenen, más probable será que se formen NMVOC (compuestos orgánicos distintos del metano) y otros gases mediante volatilización o reacciones químicas. Cuantos más residuos orgánicos hay en un vertedero, más gases se producen debido a la descomposición bacteriana. Algunos tipos de desechos orgánicos contienen nutrientes como sodio, potasio, calcio y magnesio que permiten el crecimiento de bacterias. La presencia de estos nutrientes aumenta la producción de gas de vertedero, alternativamente, algunos desechos contienen compuestos que matan las bacterias y reducen la producción de gas. Por ejemplo, las altas concentraciones de sal en los desechos pueden inhibir las bacterias metanogénicas. [77]

En cuanto a la edad de los residuos, suele ser en general los desechos depositados recientemente (depositados hace menos de 10 años o máximo 15 años atrás) producen más gases de vertedero a través de descomposición bacteriana, volatilización y reacciones químicas que los desechos más antiguos (depositados hace más de 15 años). La producción máxima de gas suele producirse entre 5 y 7 años después de la eliminación de residuos, donde la disponibilidad de oxígeno en los vertederos se debe tener en cuenta que el metano sólo se produce cuando no hay oxígeno en un vertedero.

En cuanto a la humedad, la presencia de esta presenta condiciones (condiciones no saturadas) en los vertederos que favorecen a la descomposición bacteriana y por tanto aumenta la producción de gas a su vez viendo como la humedad también acelera las reacciones químicas que producen gases. Por último, la temperatura tiene aspectos más específicos ya que entre más altas temperaturas posee los vertederos provocan una mayor actividad bacteriana, lo que aumenta la producción. A medida que aumenta la temperatura, pueden aumentar la volatilidad y las velocidades de reacción química, la actividad bacteriana en general disminuye rápidamente por debajo de los 50°F (10°C), cuando la producción es procedente de rellenos poco profundos se ve mucho más afectada por el cambio climático. En comparación con los rellenos más profundos, donde una gruesa capa de tierra cubre los residuos, las bacterias no están protegidas de los cambios de temperatura. Los rellenos más protegidos y/o cerrados suelen mantener una temperatura constante para maximizar la producción de gas donde la actividad bacteriana libera el calor que estabiliza las temperaturas de los vertederos entre 77°F (25°C) y 113°F (45°C), aunque también se han observado temperaturas de hasta 158°F (70°C) debido a los cambios de temperatura globales. El aumento de temperatura también favorece la volatilización y las reacciones químicas. Normalmente, las emisiones de NMVOC (compuestos orgánicos distintos del metano) se duplican por cada aumento de 18°F en la temperatura.

1.13. Metodología designada para la captura de gases

Cuando los gases se encuentran debajo de la superficie de un vertedero, generalmente se alejan del vertedero. Los gases tienden a expandirse y llenar el espacio disponible moviéndose o "migrando" a través del espacio poroso confinado en los desechos de los vertederos y la cubierta del suelo. Los gases de vertedero más ligeros que el aire, como el metano, tienen una tendencia natural a elevarse, normalmente hasta la superficie del vertedero. Los desechos densos y compactados o los materiales de cobertura de vertederos (como cubiertas y tapas de suelo diarias) pueden inhibir el movimiento ascendente de los gases de vertedero. Si el movimiento ascendente se retrasa, el gas tiende a migrar horizontalmente a otras áreas del vertedero o a lugares fuera del vertedero donde puede reanudar su trayectoria ascendente. Básicamente, el gas sigue el camino de menor resistencia. Algunos

gases, como el dióxido de carbono, son más densos que el aire y pueden acumularse en zonas subterráneas como los corredores de comunicación. Hay tres factores principales que afectan la migración del gas del vertedero: difusión (concentración), presión y permeabilidad.

En Colombia existen alrededor de 65 vertederos regionales donde el uso energético de sus emisiones no es notable. Los vertederos siguen emitiendo biogás incluso 30 años después de su cierre, lo que los convierte en una importante fuente de energía y uso económico. Dependiendo del propósito del biogás, el tratamiento primario se usa para eliminar vapor, condensado, partículas sólidas y espuma, o el tratamiento secundario se usa para eliminar sulfuro de hidrógeno, siloxanos y otras sustancias contaminantes como amoníaco, halógeno y otros contaminantes [78]. Estos son algunos de los objetivos más importantes que normalmente se logran al depositar residuos en vertederos:

1.13.1. *Mantenimiento de los estándares de cumplimiento ambiental*

En los vertederos, sólo se puede utilizar para cumplir con los requisitos federales, estatales y/o locales relacionados principalmente con la captura de gas, el control de la migración de gas y la reducción de emisiones y olores. Estas instalaciones tienen como objetivo maximizar la recolección, pero esto a menudo resulta en un exceso de presión de vapor negativa en los colectores de gas de vertedero cuando el aire atmosférico ingresa al colector, generalmente a través de la tapa. El flujo de aire excesivo (infiltración de aire ambiente) hace que las concentraciones de nitrógeno u oxígeno en el gas del vertedero sean más altas de lo que ocurrirían de otra manera.

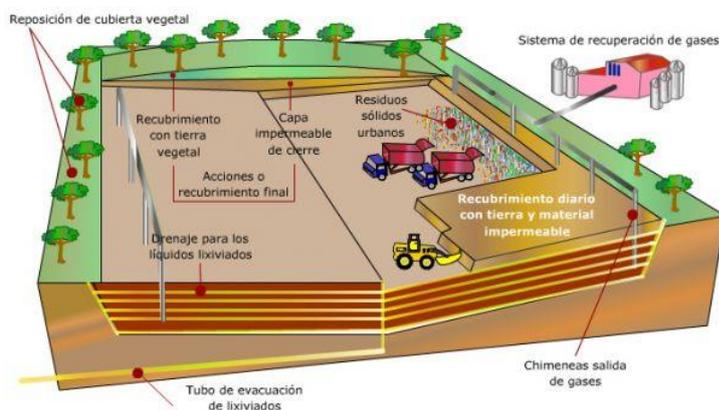
Mientras las concentraciones de oxígeno permanezcan en niveles que puedan causar oxidación bajo tierra, el porcentaje específico de la composición del gas de vertedero en un vertedero es menos importante para fines de cumplimiento normativo. Para controlar los costos, a menudo es posible utilizar sistemas compatibles con espaciamientos entre pozos relativamente más cortos y, por lo tanto, menos pozos, y al mismo tiempo usar un vacío ligeramente mayor para lograr una mayor cobertura.[78]

1.13.2. **Generación de electricidad a partir de la producción de CO₂**

Los vertederos que utilizan gas de vertedero para la generación de energía se preocupan por utilizar suficiente gas de vertedero para garantizar la máxima eficiencia de la planta. A diferencia de las plantas que cumplen con las normas, las plantas que utilizan gas de vertedero para generar electricidad prestan atención a la composición del gas de vertedero, estos poseen una variación de niveles bajos de oxígeno que no resultan ser un problema para los equipos eléctricos, pero demasiado oxígeno puede ser extremadamente dañino para los equipos, un ejemplo sencillo es el demostrado en la figura 12 donde se demuestra las diferentes variaciones para controlar el contenido de oxígeno y los costos asociados de generación de energía, los sistemas de generación de energía generalmente se implementan con un espaciamiento entre pozos ligeramente más estrecho (es decir, un espaciamiento más denso y más pozos) que los sistemas LFG especialmente diseñado para satisfacer sus necesidades dado que el sistema del proyecto energético garantice una recuperación limitada de gas de vertedero. [79]

Figura 12.

Producción de energía a partir de gas de vertedero.



Nota. La imagen presenta un vertedero designado al aprovechamiento del biogás (50% metano) para recuperar el gas para producir energía. Tomado de: P. S. Yuste, «Generación de energía a partir de la basura ¿Energía 100% limpia?» <https://www.certificadosenergeticos.com/generacion-energia-basura-energia-100-limpia>

1.13.3. Producción de gas por medio de método BTU

Debido a que el gas de vertedero tiene aproximadamente un 50% de metano, su contenido energético es sólo la mitad que el del gas natural. Por lo tanto, los proyectos que utilizan una cantidad mínima de gas de vertedero como sustituto de los combustibles fósiles a menudo se denominan proyectos de 'media BTU' (Unidad Térmica Británica).

Los usos finales del gas de vertedero de medio BTU incluyen muchas tecnologías como calderas, invernaderos, hornos, secadoras y calentadores. Los propietarios u operadores de LFG que producen gas en BTU promedio están principalmente preocupados por producir volúmenes suficientes de GLP para satisfacer las necesidades de los consumidores de gas intermedios. Debido a que el gas de vertedero normalmente requiere una preparación mínima para su uso como gas de BTU medio, el rendimiento de estos sistemas depende en gran medida de las necesidades de combustible del usuario final.

1.13.4. Producción de gas natural renovable

Los vertederos que procesan gas de vertedero para producir gas natural renovable (GNR) se centran en recuperar suficiente gas de vertedero para mantener las instalaciones de GNR funcionando a plena capacidad con la menor cantidad de pasos de procesamiento posible. A diferencia de los vertederos que operan cumpliendo con las regulaciones o generan electricidad, los vertederos que actualizan el gas de vertedero prestan más atención a la composición del gas de vertedero.

Eliminar oxígeno y nitrógeno en grandes cantidades puede resultar extremadamente difícil y costoso. Para controlar la composición del gas de vertedero y minimizar los costos de los equipos, estos sistemas generalmente se implementan con espacios entre pozos mucho más estrechos (es decir, espacios más densos y más pozos) que el gas de vertedero para fines de generación de energía o cumplimiento. Esto permite que el gas de vertedero generado por el proyecto recolecta gas de vertedero que tiene un contenido limitado de oxígeno o nitrógeno debido a la sobreexplotación. [80]

1.14. Proyectos tipo mecanismo de desarrollo limpio realizados Colombia

Para este trabajo se tuvieron en cuenta algunos de los proyectos más relevantes e importantes a nivel Colombia, las siguientes revisiones bibliográficas como referencia a material de investigación a nivel nacional donde varios autores aportan información sobre las emisiones proporcionadas por industrias encargadas del manejo y gestión de residuos además teniendo en consideración las valoraciones contaminantes, económicas y técnicas para el tratamiento de estas.

1.14.1. *Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos por fuentes puntuales en la zona Cali-Yumbo.*

En este trabajo se calculan las emisiones de contaminantes atmosféricos convencionales (COV, MP₁₀, CO, NO_x y SO_x) por fuentes puntuales para Cali Yumbo (Colombia). La información se obtuvo de 108 declaraciones entregadas a las autoridades ambientales. [81]

1.14.2. *Informe Final Inventario de Emisiones de Fuentes Industriales.*

En este documento se presentan los resultados del inventario de emisiones de fuentes fijas para la jurisdicción de CORANTIOQUIA, en el cual se establecen las variables como el dominio, los contaminantes, los procesos contaminantes y la metodología. Al finalizar la actualización, se reportan los sectores con mayor contribución de contaminantes a la atmósfera en la región estudiada. [82]

1.14.3. *Interaseo landfill gas mitigation project*

Este proyecto de CDM está basado en la empresa INTERASEO S.A. E.S.P. que realiza gestión y disposición de residuos sólidos de propiedad y operación privada, opera con múltiples vertederos a lo largo de Colombia. Contrató al Centro Andino de Economía Ambiental para evaluar el potencial de aplicación del MDL en 8 de sus rellenos sanitarios a fin de generar ingresos adicionales por el servicio de mitigación de gases de efecto invernadero, de los cuales 4 son vertederos elegibles para

desarrollar y mitigar el biogás adicionalmente con suficiente metano de emisiones para ameritar las inversiones requeridas para capturar y mitigar los GEI. [83]

1.14.4. La Glorita Landfill Gas Project

Para este documento se realiza un proyecto que tiene la intención de capturar el gas de vertedero (LFG) de una manera eficiente teniendo en cuenta cómo se genera y su emisión en el Relleno Sanitario La Glorita ubicado en el Municipio de Pereira en Colombia. La actividad es construir, operar y mantener un vertedero de recolección de gas y para destruir el gas metano. [84]

1.14.5. Project 2794: Bionersis landfill project in Pasto, Colombia

La actividad del proyecto es a pequeña escala concentrando en construir, operar y mantener un sistema de recolección y quema de gas de vertedero en el relleno sanitario de Antanas en Pasto, Colombia. Se trata de un vertedero de gestión anaeróbica, propiedad del municipio de Pasto y administrado por EMAS. El vertedero inició operaciones en abril de 2001, desde su apertura, el vertedero ha recibido aproximadamente 600,000 toneladas de residuos sólidos del municipio de Pasto y vecinos municipios además actualmente recibe 220 toneladas de residuos al día. [85]

1.14.6. Project 3332: Bionersis LFG project Colombia 2

En este documento se describe un proyecto que prosigue al anterior ya que construye, opera y mantiene un sistema de recolección y quema de gases de vertedero en El Carrasco en Bucaramanga, es un relleno sanitario de manejo anaeróbico, propiedad y administrado por EMAB. El vertedero inició operaciones en 1977 y se estima que el relleno sanitario ha recibido aproximadamente 2.800.000 toneladas de residuos sólidos del municipio de Bucaramanga y municipios vecinos, con una tasa de disposición es de aproximadamente 700 toneladas de residuos por día. [86]

1.14.7. Project 3715: Bionersis LFG project Colombia 3 (Villavicencio)

El presente documento propone otra construcción a pequeña escala de un sistema de recolección y quema de gas de vertedero para “Parque Ecológico Reciclante” (PER) en Villavicencio, el vertedero inició operaciones en 2007 y cerrará en 2040. Desde su apertura, el relleno sanitario ha recibido aproximadamente 300,000 toneladas de residuos sólidos tiene una recepción de 300 toneladas por día. [87]

1.14.8. Project 3656: Bionersis LFG projects Colombia 4 (Cucuta & Manizales)

Como continuación de los últimos tres proyectos propuestos, todos son realizados por la misma empresa, en este caso el proyecto propone un sistema de recolección y quema de gas de vertedero en “El Guayabal” en Cúcuta y “La Esmeralda” en Manizales además tiene equipos que contribuyen a la propuesta como un colector de gas red, una estación de extracción y quema que incluye antorchas cerradas de alta temperatura y monitoreo y sistemas de control. En una etapa posterior, el gas de vertedero recolectado puede usarse como combustible para la generación de electricidad. [88]

1.14.9. Cartagena Landfill Gas Capture and Usage Project

El propósito de este proyecto es capturar de manera eficiente el gas de vertedero (LFG) y la destrucción de metano ya sea por quema y/o uso en la producción de energía térmica en industrias cercanas para generación de energía eléctrica. El vertedero se utiliza para la disposición de los residuos sólidos urbanos generados por los habitantes de Cartagena. Se inauguró en 2005, y se prevé que tenga una vida útil de 20 años con una eliminación diaria de desechos de aproximadamente 830 toneladas de las cuales el 77,6 % son residuos alimentarios y de jardinería. [89]

1.14.10. Proactive Presidente landfill gas to energy project

El proyecto ubicado en San Pedro, Valle del Cauca, se enfoca en la captura, tratamiento y uso de gas de vertedero para la producción de energía en el municipio, Se proporciona una solución sólida para la eliminación de un promedio de 550

toneladas de desechos domésticos por día, generado por 17 municipios del Valle del Cauca. [90]

1.14.11. *Montería landfill gas recovery and flaring*

El documento presenta una serie de intentos y programas para la captura y destruir el contenido de metano generado por la actividad de disposición final de residuos sólidos en Montería, se han logrado evitar 270.000 de CO₂ emitidas a la atmósfera en un periodo de 7 años a partir del 2011. [91]

1.14.12. *Centro Industrial del Sur Organic Waste Project*

El Proyecto es propuesto por la empresa de Residuos Orgánicos del Centro Industrial del Sur (CIS) la cual tiene como objetivo establecer una planta de compostaje que brindar un proceso de tratamiento a una parte de los residuos sólidos actualmente dispuestos en el relleno sanitario La Pradera ubicado a 64 km de Medellín, la planta de compostaje posee una capacidad de tratamiento de 90 t/hora de residuos lo cual equivale al 37% del total de residuos dispuestos del relleno sanitario propuesto. [92]

1.14.13. *Curva de Rodas and La Pradera landfill gas management project*

En el documento se explica un proyecto para un sistema de control de captura y quema de metano generado por los vertederos de Curva de Rodas y La pradera para lograr reducir la emisión de gases de efecto invernadero. Aproximadamente 8.5 millones de toneladas de residuos sólidos han sido destinados al relleno sanitario durante su operación desde el año 1984 hasta el año 2003, año de su cierre. El otro sitio del proyecto, relleno sanitario La Pradera, ha estado en funcionamiento desde el año 2003. [93]

1.14.14. *Dona Juana landfill gas-to-energy project*

El proyecto se encuentra ubicado en el Bogotá- Colombia, involucra la captura de gas de vertedero para su quema y uso en motores reciprocantes en el Relleno Sanitario Doña Juana y uso para energía térmica para la producción en industrias cercanas. Se

plantea una solución para desechar una media de 2 millones de toneladas de residuos domésticos al año. [94]

1.14.15. *El Guacal Landfill Gas Flaring Project*

El propósito de esta actividad de proyecto es capturar eficientemente el gas de vertedero (LFG) emitido en el vertedero el Guacal en Medellín. El relleno sanitario el Guacal está en operación desde el 1 de julio de 2006, y está dividido en 3 tramos: norte, centro y sur. El área total del vertedero es de 26,96 hectáreas con una capacidad potencial de alrededor de 5.740.203 toneladas según las licencias ambientales aprobadas, además de un plan de acción como límite 20209 con una reducción de residuos de 1200 toneladas anuales. [95]

1.14.16. *Montenegro landfill gas recovery and flaring*

El Proyecto se enfoca en la recuperación y quema de gas del Relleno Sanitario de Montenegro, se plantea un sistema de quema de biogás y eliminar el metano que actualmente se libera a la atmósfera. Se espera que se eviten unas 244.000 toneladas de CO₂ emitidas a la atmósfera en un periodo de 7 años a partir de 2011. [96]

1.14.17. *The Colomba-Guabal Landfill Gas Project [97]*

El propósito del proyecto es proponer un sistema para la captura eficientemente del gas de vertedero, emitido en la zona Guabal, Cali. Con un comienzo de operación en 2008 con una expectativa de 31.2 años de funcionamiento, además de eliminar el gas metano producido para reducir las emisiones de GEI.

1.14.18. *Los Pocitos Landfill Gas Utilización Project*

El documento plantea un proyecto de aprovechamiento de gas generado por el vertedero los Pocitos tiene como objetivo captar el gas de relleno sanitario producido por la descomposición de los residuos orgánicos dispuestos en el relleno sanitario Parque Ambiental Los Pocitos para ser quemados bajo condiciones controladas. Implica invertir en un sistema de recolección de biogás, un sistema de quema y equipo

adicional para el monitoreo como los principales componentes son el metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂).[98]

1.15. Gestión de residuos sólidos en rellenos sanitarios

Los residuos sólidos se gestionan a través de la clasificación en fracciones, el aprovechamiento de materiales inorgánicos y orgánicos, y el tratamiento de los residuos orgánicos mediante compostaje. En el proceso de compostaje, los residuos orgánicos se descomponen de forma controlada para producir abono. Además, se recircula el lixiviado para regular el pH y se realizan controles de calidad para cumplir con la normativa vigente en la disposición final de los residuos.

La gestión de residuos sólidos en vertederos es un proceso importante para gestionar adecuadamente los residuos municipales, minimizando su impacto en el medio ambiente y la salud. La complejidad de este sistema combina muchas etapas y tecnologías diferentes para garantizar un tratamiento de residuos finales eficiente y sostenible.[99]

Todo comienza con una cuidadosa selección de la ubicación. Los criterios geológicos son muy importantes; se estandariza un modelo de suelo específico que luego es adecuado además debe tener una serie capas de arcilla o material de baja permeabilidad que actúen como barrera natural para evitar la entrada de lixiviados, que es el líquido que resulta de la descomposición de los residuos.

Además, se evalúan cuidadosamente las distancias desde las zonas residenciales para evitar molestias y riesgos para la salud pública junto a la disponibilidad de terrenos también es importante para garantizar una logística eficiente del transporte de residuos. Para el diseño del vertedero se tiene en cuenta la planificación de las celdas de almacenamiento dichas celdas son compartimentos especiales donde se acumulan los desechos donde cada celda se cubre diariamente con una capa de tierra u otro material inerte, lo cual es esencial para controlar los olores, prevenir la propagación de vectores de enfermedades como insectos y roedores, y al mismo tiempo reducir el riesgo de incendio. Al mismo tiempo, instalar un sistema de drenaje de lixiviados para recolectar y tratar estos líquidos para evitar la contaminación de las

aguas superficiales y subterráneas. Los controles de acceso garantizan que solo los residuos aprobados entren a las instalaciones para algunos casos específicos, se realiza mediante una pre clasificación para separar materiales reciclables o peligrosos, optimizando así su disposición final, la compactación de los residuos es un paso importante por lo que se utiliza maquinaria pesada, los residuos se compactan para reducir su volumen, lo que no sólo prolonga la vida útil del vertedero sino que también minimiza los huecos donde se pueden acumular lixiviados y gases. Esta medida se complementa con el uso diario de cultivos de cobertura para controlar los olores, prevenir la propagación de vectores y reducir las emisiones donde para lograr verificar e identificar posibles escenarios, se toman mediciones periódicas de la calidad del aire, el agua y el suelo alrededor de la planta teniendo como ejemplo los contaminantes, donde además de evitar la acumulación y liberación de estos gases, se instala un sistema de captura para recolectarlos a través de pozos perforados en la cámara.[100]

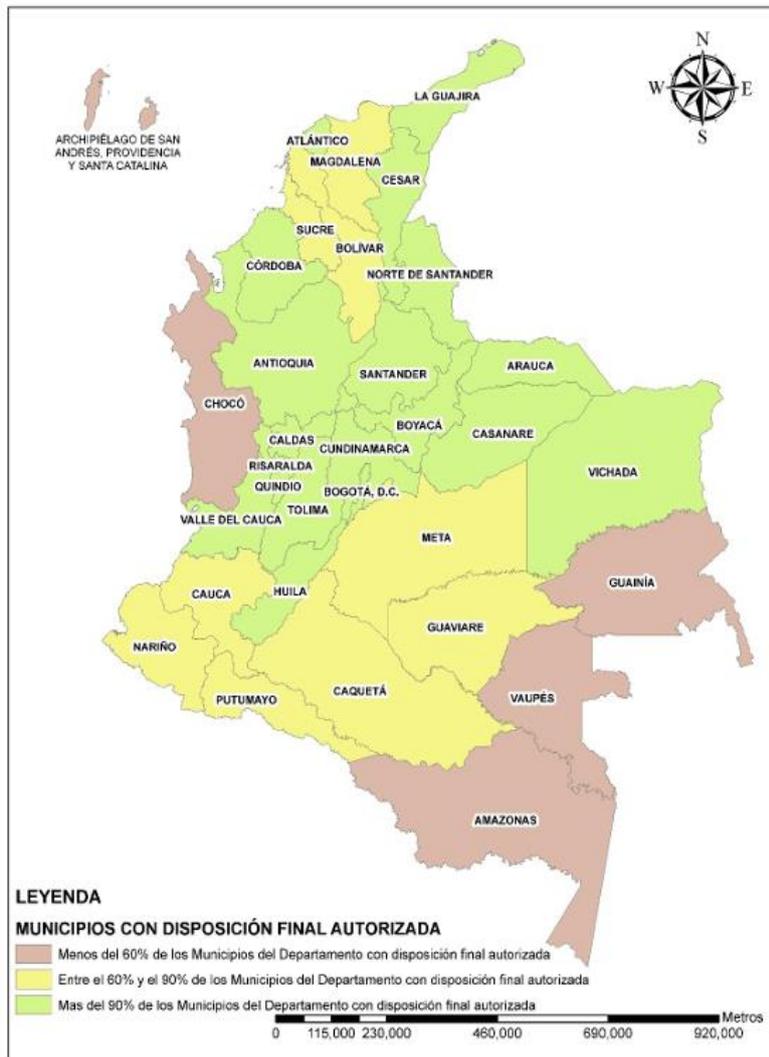
Un estudio reciente del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) indicó que el 45% de los rellenos sanitarios del país no cumple con todos los requisitos técnicos establecidos por la normativa ambiental con esto se subraya la necesidad de fortalecer la capacidad técnica y financiera de las autoridades locales para mejorar la gestión de residuos. La gestión de residuos sólidos en Colombia es un tema de gran relevancia debido al impacto ambiental y social que este conlleva. En 2023, Colombia generó aproximadamente 12 millones de toneladas de residuos sólidos, con una tasa de reciclaje que ronda el 17%, según datos del Departamento Nacional de Planeación, a través del cual se evidencia tanto avances como desafíos significativos en el manejo de residuos.

El estado de los departamentos en relación con la disposición final autorizada de sus municipios es un tema de gran relevancia para entender cómo se gestionan los residuos sólidos a nivel regional y local en Colombia. Esta situación refleja no solo la infraestructura y capacidades técnicas de los rellenos sanitarios, sino también las políticas públicas y la gobernanza ambiental en cada departamento. A continuación, en la Figura 13 se logra observar un mapa de los departamentos que tienen autorización para la disposición final de residuos donde la mayoría de los municipios tienen este permiso. Destacando los municipios de Nariño, Meta y Santander ya que

son en estos los municipios donde se ubican los rellenos sanitarios de las bases de datos obtenidas. [101]

Figura 13.

Estado de los departamentos en relación con la disposición final autorizada de sus municipios.



Nota. La imagen presenta el mapa de Colombia con el porcentaje de disposición de residuos por departamentos. Tomado de: «INFORME NACIONAL DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS 2020», Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios Colombia, 2021.

https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/informe_df_2020%20%281%29.pdf

Al ser un proceso que involucra un intrincado entramado de políticas públicas, regulación, gobernanza y participación ciudadana, elementos esenciales para asegurar que los desechos se manejen de manera sostenible y responsable. En Colombia, la gestión de residuos sólidos es guiada por un marco legislativo y normativo robusto, diseñado para enfrentar los desafíos ambientales y de salud pública asociados con la disposición de desechos.[102]

La base de la gestión de residuos sólidos es el desarrollo de políticas gubernamentales apropiadas, a nivel de Colombia, la Ley N° 1259 de 2008, conocida como “Ley Residuos Cero”, estipula que las entidades territoriales deben implementar programas integrales de gestión de residuos sólidos, esta ley promueve la reducción, reutilización y reciclaje de residuos antes de considerar su disposición final en vertederos.

De manera similar, la Ley No. 142 de 1994 regula los servicios públicos, incluida la recolección y el tratamiento de residuos sólidos, y enfatiza la necesidad de brindar estos servicios de manera eficiente y sostenible. Además, el Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos describe estrategias y acciones nacionales para gestionar adecuadamente los residuos, promover una economía circular y reducir la cantidad de residuos producidos. A nivel de ciudad, el Plan de Gestión Integrada de Residuos Sólidos se adapta a las condiciones y necesidades locales de acuerdo con las directrices para garantizar una gestión coherente y eficaz en todo el país.

1.15.1. Regulaciones y estándares regidos en Colombia para los rellenos sanitarios

La regulación de los rellenos sanitarios en Colombia se basa en normas técnicas precisas, como las del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS). Este reglamento incluye especificaciones técnicas para el diseño, construcción y operación de vertederos para garantizar altos estándares de seguridad y sostenibilidad. Además, es importante introducir instrumentos económicos, como tarifas y precios de recolección de residuos, que reflejen los costos de operación y mantenimiento.

Estas herramientas no sólo financian la infraestructura necesaria, sino que también ayudan a reducir el desperdicio, sino que también promueven la participación en el mercado de carbono mediante la venta de derechos de emisión de gases de efecto invernadero resultantes de la captura y el uso de biogás de los vertederos proporciona una fuente adicional de ingresos y contribuye a la mitigación del cambio climático. [103]

La gestión de residuos sólidos es una tarea común de muchas organizaciones diferentes como el ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible es la autoridad nacional responsable de desarrollar políticas ambientales y supervisar su implementación también se realiza a través de la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), donde los vertederos deben solicitar permisos y son monitoreados para garantizar que operen de acuerdo con las regulaciones ambientales.

Las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) gestionan y regulan los recursos naturales y el medio ambiente a nivel regional, desempeñando un papel importante en la supervisión de los vertederos. A nivel local, las ciudades y cantones son responsables de la recolección, transporte, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos donde se debe desarrollar e implementar gestiones y argumentos que aseguren la operación eficiente y sustentable de los vertederos en su área. La participación ciudadana es el principio básico de la gestión de residuos sólidos.

Antes de construir nuevos vertederos, se realizan consultas públicas para evaluar y mitigar los posibles impactos sociales y ambientales, para este proceso se permite a las comunidades expresar sus inquietudes y contribuir a la toma de decisiones, promoviendo una mayor transparencia y aceptación pública. [104]

2. TECNOLOGIA Y DESARROLLO UTILIZADOS EN LOS RELLENOS SANITARIOS DE PROYECTOS DE MECANISMO DE DESARROLLO LIMPIO TIPO PARQUES ECOLÓGICOS.

El desarrollo económico e industrial de nuestra sociedad va acompañado de un notable aumento del consumo de energía primaria. La producción mundial de energía se basa en un modelo energético que se centra en el uso de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural.

Este proceso de combustión de combustible produce compuestos químicos nocivos como óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno. Además, el proceso de combustión también libera una gran cantidad de CO₂, donde se debe tener en cuenta que el CO₂ es considerado uno de los principales gases causantes del llamado efecto invernadero.

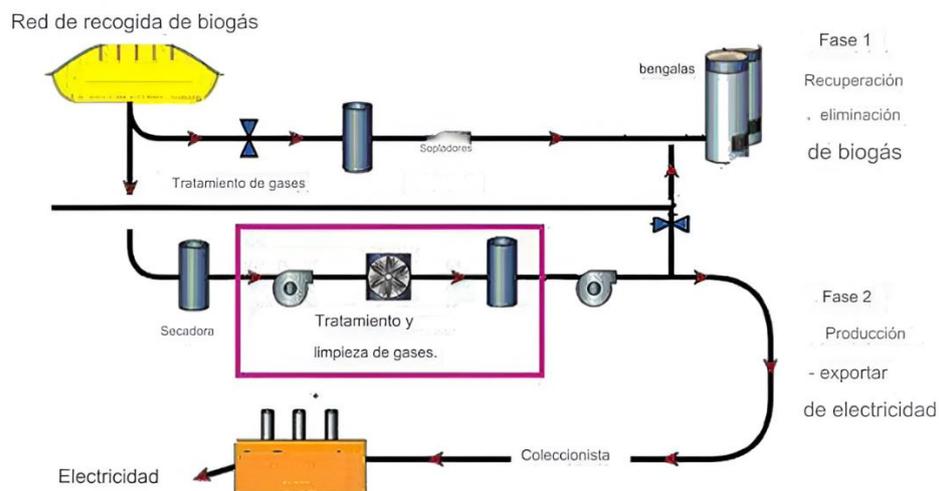
Actualmente, muchos científicos vinculan el aumento de temperatura en el planeta con la liberación accidental de estos gases a la atmósfera y se destaca el vínculo entre el aumento de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera y el aumento de las temperaturas globales del planeta.

2.1. Tecnologías para la captura de gases de efecto invernadero en rellenos sanitarios

Se destacarán ejemplos de proyectos exitosos y se discutirá el papel crucial que desempeñan estas tecnologías en la mitigación del cambio climático y el impulso del desarrollo sostenible a nivel global, en la figura 14 se muestra un sistema simple planteado para uno de los proyectos propuesto en los antecedentes [105][106].

Figura 14.

Sistema de recogida y combustión.



Nota. Sistema de la empresa bionersis para la recogida y combustión de gas en los proyectos MDL. Tomado de: United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: Bionersis LFG project Colombia 2». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SGS-UKL1264777801.97/view>

La combustión y sistema de recogida se muestra de manera sencilla, pero posee diversos equipos y procesos adicionales que se presentan en el proyecto Bionersis para gas de vertedero ubicado en Bucaramanga. [107] La instalación y operación de un sistema activo de recolección y destrucción de gas de vertedero que comprende una red de tuberías de recolección y transporte junto a la instalación de una estación activa y eficiente de quema mediante antorchas cerradas de alta temperatura. [108]

La mayoría de los proyectos de rellenos sanitarios que han optado por la instalación de sistemas activos de extracción de biogás, la mayoría lo emplea simplemente en combustión en antorcha. [109]. Para promover la destrucción del metano a través de la recogida y destrucción del LFG con un alto índice de eficiencia, se han instalado pozos activos (forzados) de recogida de LFG como parte de la actividad del proyecto. El sistema de vertederos consiste en una serie de pozos de extracción verticales y horizontales interconectados mediante colectores dichos pozos están interconectados por tuberías de cabecera.

En un sistema de recolección activo, el gas se extrae del vertedero mediante la aplicación de succión o vacío a una serie de pozos ubicados en el vertedero. El sistema de extracción más común se basa en tuberías verticales perforadas. [110] Estos tubos perforados, instalados en zanjas (como en el caso de los colectores horizontales), se rellenan con materiales de diferentes granulometrías para evitar la entrada de aire en el relleno y así facilitar la extracción del biogás.

2.1.1. *Tecnologías utilizadas en proyecto de mecanismo de desarrollo limpio a nivel Colombia y a nivel internacional*

En esta sección, se presentarán las tecnologías clave que se emplean en los proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL). Estas tecnologías desempeñan un papel fundamental en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y en la promoción del desarrollo sostenible en países en vías de desarrollo, siendo uno aspecto esencial y crítico para asegurar su viabilidad y efectividad. Se requiere un análisis exhaustivo de las opciones disponibles, considerando factores como el potencial de reducción de emisiones, la viabilidad técnica y económica, y el impacto social y ambiental.

Entre las tecnologías comúnmente utilizadas se encuentran las energías renovables, como la energía solar, eólica e hidroeléctrica. Estas tecnologías sustituyen fuentes de energía convencionales basadas en combustibles fósiles, reduciendo así las emisiones de gases de efecto invernadero. Otras incluyen mejoras en la eficiencia energética, como la implementación de sistemas de iluminación, sistemas de quema, bombeo, resaltando que son equipos de alta eficiencia; además, se pueden utilizar tecnologías de captura y almacenamiento de carbono, así como proyectos de reforestación y conservación de bosques, que contribuyen a la absorción de carbono de la atmósfera. [111]

Los parques ecológicos de vertimiento de gas, también conocidos como vertederos de biogás, son consideradas instalaciones diseñadas para recolectar y gestionar los gases de vertedero generados a partir de la descomposición de residuos orgánicos. Estos gases, compuestos principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), se producen como resultado del proceso natural de descomposición

anaeróbica de los residuos orgánicos en los vertederos. A continuación, se muestran algunas técnicas comunes utilizadas en estos parques ecológicos:

- Extracción y combustión de biogás: Esta es una de las tecnologías más básicas y utilizadas en los vertederos. Esto implica instalar sistemas de recolección de biogás, como pozos de producción y sistemas de tuberías, para capturar los gases liberados cuando los desechos se descomponen, el biogás recogido se quema o se utiliza para generar electricidad y calor.
- Producción de electricidad: Muchos parques de gases residuales ecológicos utilizan el biogás recogido para generar electricidad mediante motores de combustión, turbinas de gas o calderas. Esta electricidad puede utilizarse para alimentar vertederos o venderse a la red como energía renovable.
- Inyección de biogás en redes de gas natural: En algunos casos, el biogás recolectado de los vertederos se purifica y se inyecta en redes de gas natural para su uso como combustible en hogares, negocios e industria. Este proceso requiere un procesamiento adicional para eliminar impurezas y aumentar el contenido de metano del biogás. [111]
- Digestión anaeróbica: Haciendo uso de sistemas de digestión anaeróbica se logra acelerar la descomposición de los desechos orgánicos y aumentar la producción de biogás. El proceso implica la descomposición controlada de residuos en ausencia de oxígeno para aumentar la producción de metano.
- Monitoreo y gestión de emisiones: Los parques ecológicos también suelen implementar sistemas de monitoreo continuo para medir y gestionar las emisiones de GEI, haciendo mayor énfasis en el metano y el dióxido de carbono. Esto puede incluir la instalación de sistemas de detección de fugas, monitoreo de la calidad del aire y control de gases.

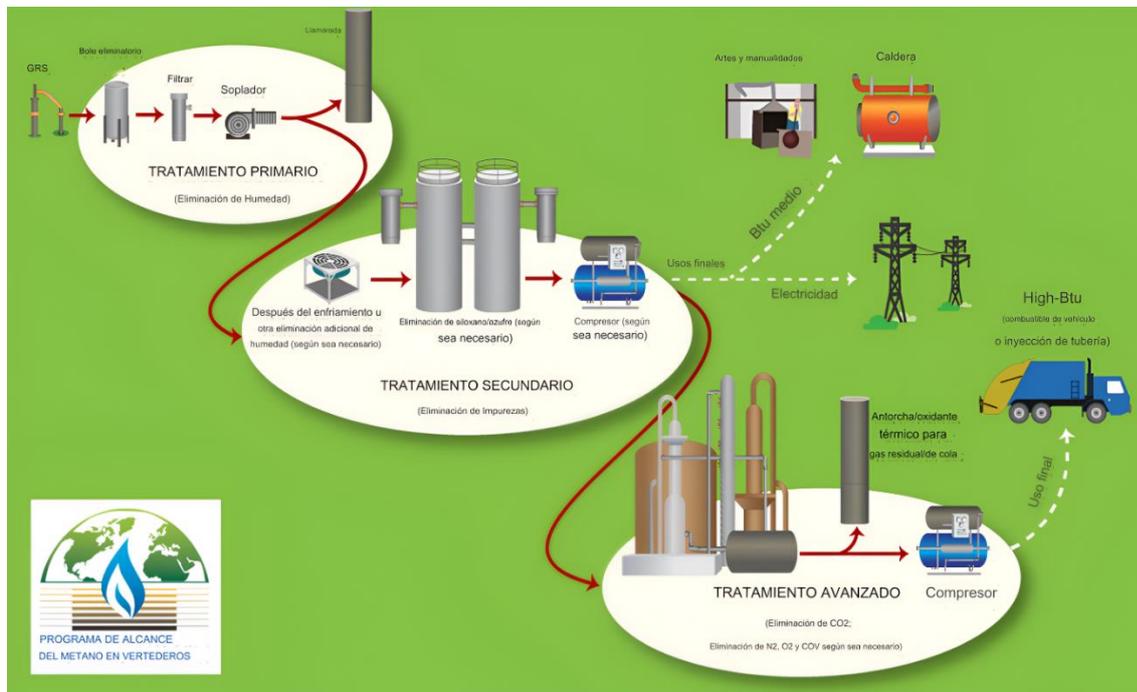
En la figura 15 se puede observar el proceso completo por etapas del gas generado en el vertedero y su funcionamiento tecnológico representado en tres etapas de

procesamiento LFG del sistema utilizado por la EPA en Estados Unidos. El procesamiento básico se moderniza y el gas pasa a través del contenedor, el filtro y la ventilación. El tratamiento continúa hasta una etapa secundaria donde se incluye el uso posterior de un enfriador u otro sistema de deshumidificación adicional (si es necesario), seguido de siloxano/desulfuración y compresión (si es necesario).

Una vez que se eliminan las impurezas en un paso de procesamiento secundario, el biogás se puede utilizar para generar electricidad, para artesanías o como combustible de medio BTU para calderas. El Tratamiento Avanzado elimina impurezas adicionales (CO_2 , N_2 , O_2 y COV) y comprime el LFG en un gas de alto BTU que puede utilizarse como combustible para vehículos o inyectarse en un gasoducto, el gas residual/de cola se envía a una antorcha o a un oxidado térmico. [111]

Figura 15.

Proceso de tres etapas para el gas de vertedero.



Nota. Etapas del proceso para los gases de vertedero. Tomado de: «Basic Information about Landfill Gas | US EPA», US EPA, 25 de abril de 2024. <https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas#:~:text=LFG%20is%20extracted%20from%20landfills,ultimate%20use%20for%20the%20gas.>

Con la descripción anterior se deben tener en cuenta las tecnologías y mecanismos que son usados en las diferentes plantas y vertederos de gas en diferentes partes del mundo para los proyectos de mecanismo de desarrollo limpio (MDL) con los siguientes apartados como principales fuentes a tener en consideración:

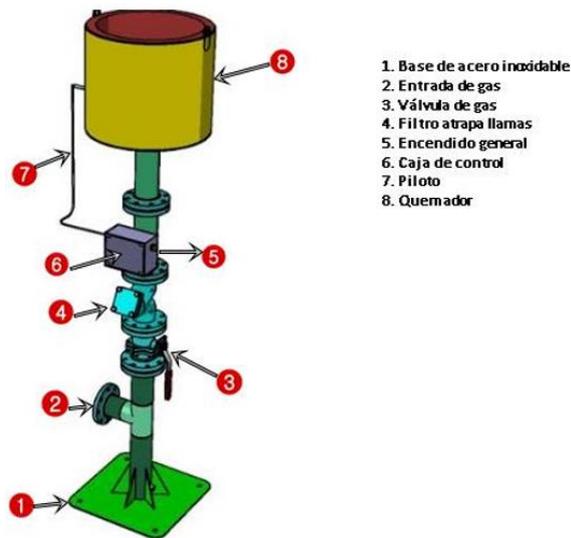
a. Antorcha para quema de LFG

Las "antorchas de biogás" se utilizan a menudo para quemar el exceso de biogás producido durante el proceso de digestión anaeróbica en las plantas de biogás. Estas ayudan a controlar la liberación de metano, un potente gas de efecto invernadero, a la atmósfera. Básicamente, son dispositivos de combustión diseñados para quemar biogás de forma segura y eficiente, convirtiéndose en sustancias menos nocivas como dióxido de carbono y vapor de agua. En los proyectos desempeñan un papel vital para garantizar la sostenibilidad ambiental de la producción de biogás al prevenir la liberación incontrolada de metano, que puede contribuir al cambio climático. Además, ayudan a mitigar los olores asociados con la producción de biogás y proporcionan una indicación visual del funcionamiento del sistema. [112]

En general, las quemas de biogás son un componente importante de seguridad y gestión ambiental de las plantas de biogás, ya que ayudan a minimizar el impacto ambiental y maximizar el uso de energía renovable. Las antorchas de biogás suelen consistir en un quemador conectado a una chimenea. El quemador enciende el biogás a medida que fluye y el proceso de combustión tiene lugar dentro de la chimenea además que la altura de la antorcha está diseñada para asegurar una correcta combustión y dispersión de los productos de combustión; a continuación, se presenta en la figura 16 el modelo utilizado en los proyectos de MDL para las antorchas de combustión con sus distintivas partes:

Figura 16.

Modelo de proyectos MDL para antorcha de quema de biogás.



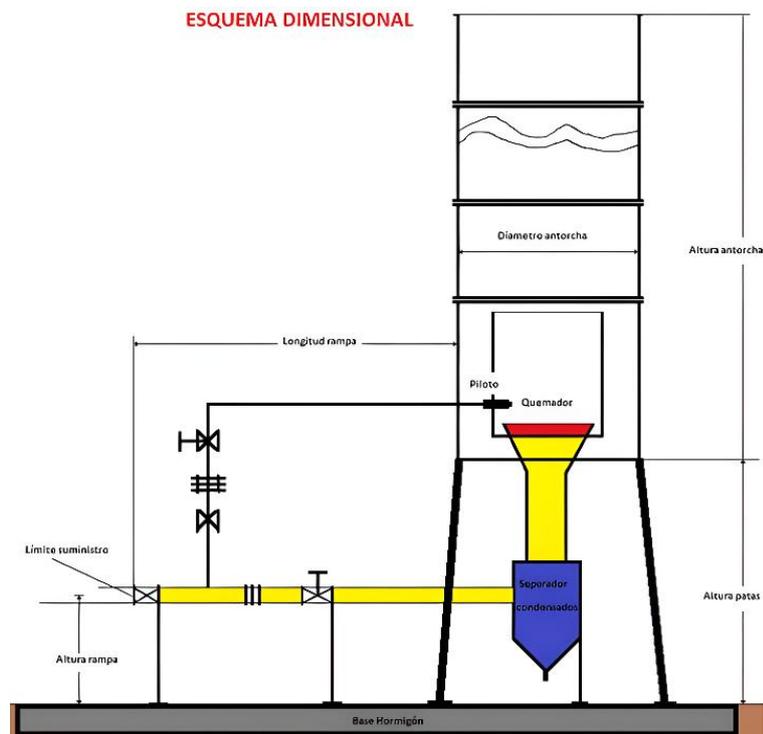
Nota. Antorcha para quema de biogás. Tomado de: United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: Bionersis LFG project Colombia 2». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SGS-UKL1264777801.97/view>

Hay dos tipos de antorchas de llama abierta y de llama cerrada. En una llama abierta, los gases arden libremente en la atmósfera, mientras que en una llama cerrada la combustión se produce en una cámara rota. El tipo de equipo de combustión depende de los límites de emisión a garantizar además del tipo de emisión (emergencia continua). La simple combustión con llama abierta puede no ser suficiente debido a las limitaciones ambientales locales y a las características no gaseosas.[112] Para lograr medir, controlar y reducir las emisiones, los gases de escape deben quemarse en equipos con temperatura controlada, como cohetes de llama cerrada controlados termostáticamente. En este tipo de combustión, la combustión se realiza en una cámara controlada independientemente de las condiciones ambientales que controlen adecuadamente las temperaturas de combustión. Como estos cohetes son en realidad dispositivos de combustión, las emisiones se pueden monitorear y medir continuamente. Teniendo en cuenta el modelo presentado anteriormente se debe tener en consideración las piezas aledañas que posee la antorcha de quema como el modelo de la figura 17 ya que por lo general se debe mantener en un rango de temperatura establecido en donde no debe superar los 850 ° C para evitar la formación de NO_x, así evitando un cambio de la temperatura de combustión además

que no debe ser inferior a los 600 ° C ya que también podría verse afectada la quema del gas debido a la baja contribución y ajuste de la combustión y la mezcla; resaltando que la temperatura máxima de la llama depende de la composición del gas. Su poder calorífico permite calentar el aire necesario para la combustión y también añadir proporciones adecuadas para mantener el contenido de oxígeno del gas obtenido en un 6% a una temperatura determinada por las leyes de la física. La normativa permite reducirlo, pero nunca aumentarlo, a menos que se reduzca el contenido de oxígeno del gas o se utilice aire de combustión enriquecido. El uso de catalizadores en quemadores es una forma de prolongar la vida útil del equipo al reducir el contenido no combustible a temperaturas más bajas. El tiempo de residencia de la llama en la cámara de combustión es otro factor que ayuda a reducir los contaminantes donde además se debe respetar un tiempo mínimo de 1 segundo.[113]

Figura 17.

Modelo actual de antorcha de quema de biogás.



Nota. Modelo estándar de antorcha para quema de biogás en proyectos europeos. Tomado de: E. Works, «Aguaresiduales.info | Líderes en Información para el Sector del Tratamiento del Agua». <https://www.aguasresiduales.info/>, <https://www.aguasresiduales.info/media/images/ckfinder/userfiles/images/image005.gif>

Las antorchas para la quema de biogás pueden variar en diseño y configuración dependiendo de diversos factores, como el tamaño de la planta de biogás, la cantidad de biogás producido y los requisitos específicos de seguridad y regulación. Sin embargo, en los proyectos de Bionersis existe una descripción general de las partes comunes que se encuentran en estas antorchas utilizadas en los proyectos realizados en Colombia [114]:

- Chimenea o campana de combustión: Es la estructura que rodea al quemador y proporciona un espacio donde se produce la combustión del biogás. La chimenea está diseñada para contener y dirigir los productos de la combustión hacia arriba y hacia afuera de la antorcha.
- Sistema de encendido: Este componente es esencial para iniciar la combustión del biogás. Puede incluir un sistema de encendido automático o manual que genera una chispa eléctrica o una llama piloto para iniciar la ignición del biogás.
- Sistema de control de llama: Algunas antorchas pueden estar equipadas con un sistema de control de llama que monitorea y regula la altura y la estabilidad de la llama. Esto puede incluir dispositivos como sensores de temperatura y presión, válvulas de control de gas y sistemas de control automatizado.
- Sistema de suministro de biogás: Se encarga de alimentar el biogás desde la fuente hasta el quemador. Puede incluir tuberías, válvulas de control y dispositivos de seguridad, como válvulas de cierre de emergencia para detener el flujo de biogás en caso de emergencia.
- Sistema de ventilación: Para asegurar una combustión adecuada y la dispersión de los productos de la combustión, algunas antorchas pueden estar equipadas con sistemas de ventilación que proporcionan un flujo de aire adecuado a través de la chimenea.
- Sistema de monitoreo y control: Para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente, muchas antorchas están equipadas con sistemas de monitoreo y

control que supervisan diversos parámetros, como la temperatura, la presión y el flujo de gas. Estos sistemas pueden incluir paneles de control y dispositivos de alarma para alertar sobre condiciones anormales o problemas operativos.

- Quemador: Esta es la parte donde se quema el biogás. Puede ser un quemador de llama abierta o un quemador más sofisticado, como un quemador de turbulencia o un quemador de mezcla previa, diseñado para una combustión más eficiente y completa del biogás. [115]

El quemador resulta ser uno de los componentes más esenciales para la antorcha debido a sus capacidades de ayuda y mejora constante que se genera en la industria, ya que además existen algunos tipos de quemadores o calentadores, donde la turbulencia y mezcla de aire son importantes para el éxito de la operación; además existen algunos quemadores/calentadores de cerámica los cuales poseen catalizadores de cloruro de platino - sodio que logran ser más eficientes en la combustión completa de gas, además podría tener y sobrellevar algunos de los siguientes factores específicos que ayudan a su beneficios:

- Los hidrocarburos se degradan por completo debido a la incineración
- Tener un pequeño nivel de emisión
- El producto de combustión puede llegar a tener un rendimiento mayor al 99.99% del rango operativo
- Cambios en la calidad de la corriente de combustión y los gases que son homogéneos y optimizados
- Falta de radiación e inexistencia de llamas peligrosas o luminosas
- Reducción del tiempo de puesta en marcha

b. Sello del pozo

Un tapón de pozo es un tapón alrededor del casco, por donde salen las aguas residuales y el casco, para evitar que, entre aire y líquidos de la atmósfera al pozo, la cantidad de vacío que se puede aplicar al colector, así como el rendimiento general del pozo, pueden verse limitados por el rendimiento del sellado. Hay varios métodos

o materiales disponibles para impermeabilizar un pozo, incluidos los que se enumeran a continuación:

Bentonita. La bentonita es una familia de compuestos de arcilla que se expande cuando se moja para servir como un sello eficaz, Un sello de bentonita suele tener un grosor de entre 1,5 y 1,5 metros y se coloca sobre el relleno granular del colector logrando minimizar la infiltración de aire de la superficie al interior del pozo; además se puede aplicar como una lechada que mejora el sellado rellenando los huecos por los cuales se puede llegar a filtrar. [116]

Tapón de espuma. Hace uso la espuma líquida la cual se expande a medida que disminuye la temperatura de está permitiendo expandir de manera recurrente los vacíos. [117]

El espaciamiento entre pozos es la distancia entre un pozo y un pozo adyacente, generalmente de 150 a 300 pies. El espaciamiento de los pozos depende del radio (o zona) de influencia efectiva que cada pozo puede alcanzar con ello las zonas de amortiguamiento a menudo se superponen con pozos adyacentes para proporcionar cobertura de vertedero y recolección de gas de vertedero.

c. Pozo de extracción vertical

Son el tipo de pozo más popular debido a su capacidad para instalarse en la mayoría de los vertederos y funcionan de manera efectiva para cumplir con una variedad de objetivos operativos. Los pozos verticales tienen la ventaja de iniciar operaciones inmediatamente después de la instalación y son más efectivos para controlar las emisiones superficiales que los colectores horizontales, además se pueden ajustar para cumplir con una variedad de requisitos operativos, incluido el cumplimiento normativo y diversas aplicaciones, así como para agregar capacidades de recuperación de líquidos. Una desventaja es que el operador debe compactar continuamente los residuos alrededor de los pozos verticales instalados en el área de producción del vertedero, y los pozos deben ampliarse o volverse a perforar a medida que se depositan los residuos.

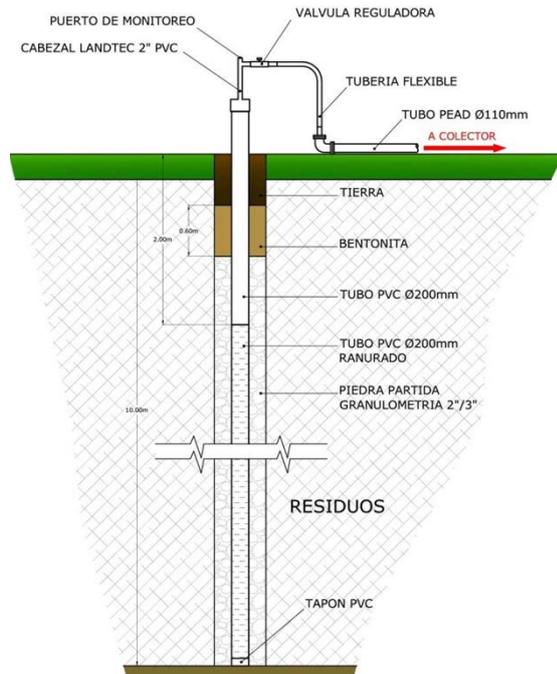
En cuanto a la perforación, el diámetro de un pozo vertical suele ser de 24 a 36 pulgadas. Los pozos de mayor diámetro aumentan la superficie alrededor del perímetro del pozo, lo que a su vez puede aumentar la acumulación de gas de vertedero, por lo tanto, los lugares más grandes también proporcionan espacio adicional para el relleno de grava, lo que puede evitar que las partículas finas de los escombros vecinos obstruyan las perforaciones del revestimiento. [118]

En general, no se recomienda perforar menos de 24 pulgadas de diámetro porque proporciona menos filtración entre la masa de desechos y la carcasa y puede requerir el uso de una carcasa más pequeña. Las sartas de revestimiento más pequeñas reducen la integridad estructural y limitan la capacidad de eliminar fluidos de un pozo de producción. Las tuberías de pozos verticales suelen tener de 4 a 8 pulgadas de diámetro. Además de almacenar más gas de vertedero, los revestimientos de pozos de mayor diámetro pueden reducir la probabilidad de colapso y atascos.

Las tuberías de pozo que tengan al menos 4 pulgadas de diámetro también pueden permitir la instalación de bombas en áreas que puedan requerir deshidratación en el futuro. cloruro de polivinilo (PVC) con un margen de temperatura para gas elevado 82 °C o polietileno de alta densidad (HDPE) con un margen para la temperatura de hasta 60 °C, además algunos vertederos de alta temperatura utilizan cloruro de polivinilo clorado (CPVC) o tuberías de acero inoxidable porque son más resistentes a temperaturas más altas, [119] a continuación se presenta la figura 18 en donde se observa las partes del pozo de extracción mencionado:

Figura 18.

Pozo de extracción vertical.



Nota. En un sistema de recolección activo, el gas se extrae del vertedero mediante la aplicación de succión o vacío a una serie de pozos ubicados en el vertedero. El sistema de extracción más común se basa en tuberías verticales perforadas. Tomado de: A. F. CARMONA CARMONA y A. S. AGUDELO CASTAÑEDA, «METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS PROVENIENTE DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS», UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA, 2020. https://www.globalmethane.org/documents/events_land_20110627_weih2.pdf

d. Pozo de extracción horizontal

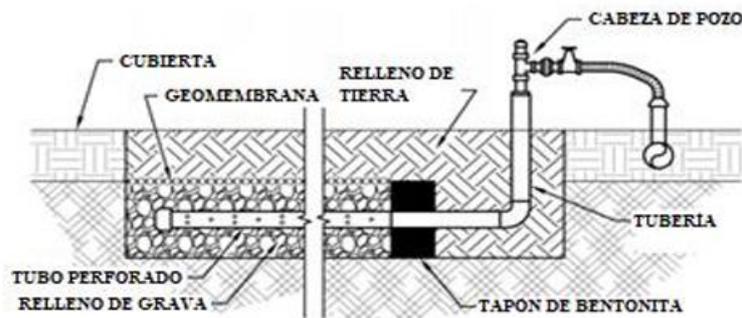
Los pozos horizontales a menudo se construyen de la misma manera que los pozos verticales, pero se pueden construir utilizando equipos de movimiento de tierras convencionales en lugar de equipos de perforación especializados. Se suelen utilizar a menudo como una solución temporal para capturar el gas del vertedero inmediatamente después de completar el relleno y posiblemente mientras quede relleno adicional. Para que los canales horizontales sean efectivos, se debe colocar suficiente agua residual (hasta 30 pies) encima de ellos para permitirles operar sin una infiltración significativa de aire desde la superficie del vertedero. La frecuencia,

longitud y ubicación de los receptores horizontales generalmente se eligen en función de los objetivos de la instalación del receptor, como minimizar los problemas de migración fuera del sitio. Los receptores horizontales pueden resultar difíciles de manejar, especialmente si son largos.

No es raro que estos pozos horizontales tengan más de 500 pies de largo, generalmente penetran la tapa del aliviadero en dos puntos e instalan una boca de pozo en cada extremo incluyendo una boca de pozo en cada extremo, donde se controla la presión negativa ya que en un colector horizontal puede resultar difícil. Esto se puede hacer más fácilmente variando el espaciado o el diámetro de los orificios a lo largo del colector horizontal, pero esto no garantizará una distribución uniforme de la presión negativa ni una recuperación uniforme del gas de vertedero, a continuación, se presenta la figura 19 en donde se observa las partes del pozo de extracción mencionado:

Figura 19.

Pozo de extracción horizontal.



Nota. Estos tubos perforados, instalados en zanjas (como en el caso de los recolectores horizontales), se rellenan con materiales de diferentes granulometrías para evitar la entrada de aire en el relleno y así facilitar la extracción del biogás. Tomado de: A. F. CARMONA CARMONA y A. S. AGUDELO CASTAÑEDA, «METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS PROVENIENTE DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS», UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA, 2020. <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/26d73448-1ad5-412f-909c-de98b3ed6a44/content>

En la tabla 8 se realiza una comparación entre los dos diferentes tipos de pozos de extracción visualizando cual posee mayor capacidad y ventajas para su uso en los proyectos denominados.

Tabla 8.

Comparación de pozo vertical y horizontal.

Pozo vertical		Pozo horizontal	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Es eficaz para controlar los gases de efecto invernadero en su radio de influencia.	Se pierde la recogida rápida de gas si no se tiene una instalación temprana.	Opción más económica. Permite la recogida temprana de gas	Difícil su ejecución debido a la longitud del tubo. Susceptible a daños o problemas por insuficiencia de protección.
Se ajusta al adaptarse a la generación del gas permitiendo un equilibrio en el tiempo. Puede tener instalación en diversas zonas del vertimiento y puede ser ampliado a un recolector adicional.	Mejor y mayor funcionamiento si está supervisada en zonas activas. Son necesarias nuevas perforaciones periódicas a medida que aumente el espesor del relleno o afectación de líquidos.	Pueden ser instalados a medida que avanza las obras en las zonas activas. No son necesarios equipos de perforación especializados.	Susceptible de inundación si no tiene un buen sistema de drenaje.

Nota. Tabla comparativa de ventajas y desventajas de los pozos de extracción de rellenos sanitarios.

e. Estación de bombeo

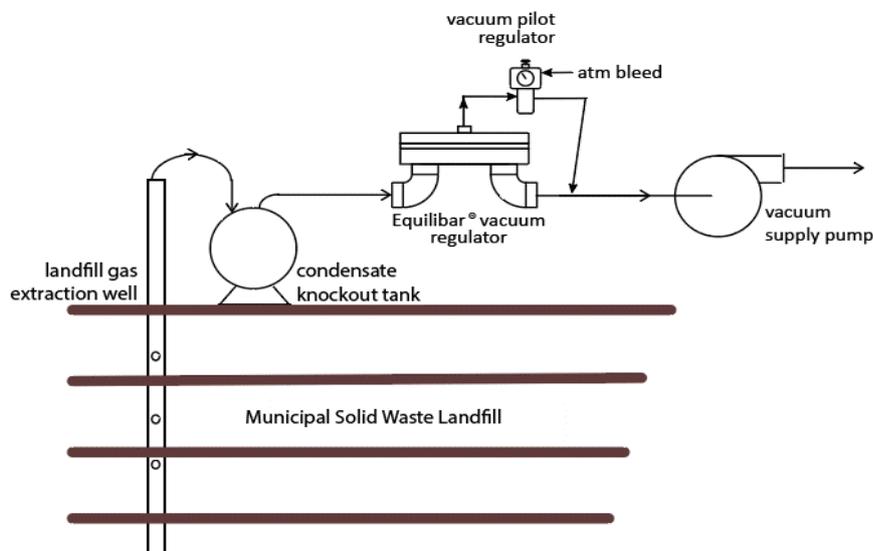
Algunos sistemas tienen un controlador de frecuencia variable en la bomba de vacío conectado a un circuito de retroalimentación que controla la presión de vacío. Este tipo de sistema requiere mucho tiempo para configurarse y si hay grandes fluctuaciones de presión en el sistema de vacío, puede afectar la presión de vacío en el pozo. Para algunos casos, se suele utilizar un regulador de vacío de igual presión (EVR) para mejorar el control del vacío. El EVR se puede instalar aguas arriba de la

bomba de vacío para mantener un vacío constante en el pozo receptor de gas independientemente de la fuente de vacío o la presión del sistema.

El sistema de vacío de recuperación de gas del vertedero mostrado en la figura 20 se controla con mucha precisión hasta cada centímetro de agua (inWC). El objetivo es crear suficiente vacío para obtener la máxima cantidad de gas del pozo sin tanto vacío que el O₂ ingrese al sistema de extracción, al mismo tiempo que requiere una ventana de control de vacío muy estrecha, lo que complica el proceso de configuración del proceso. [120]

Figura 20.

Bomba de extracción de vacío.



Nota. Sistema de bomba de vacío de proyectos MDL. Tomado de: Equilibar, «Landfill gas extraction - equilibar vacuum regulators», *Equilibar*, 9 de junio de 2022.

<https://www.equiblar.com/application/landfill-gas-extraction/>

La Bomba resulta apoyar más como un regulador de vacío independiente que regula el flujo entre la bomba de vacío y el sistema del pozo para controlar con precisión el vacío del sistema hasta un punto de ajuste específico además permite regular el vacío controlado, por lo que el punto de ajuste lo establece el regulador de vacío donde se mantiene un nivel de vacío de 1:1.

f. Caudalímetro

Un caudalímetro registra la velocidad del gas que lo atraviesa y calcula el caudal en función de esta velocidad y del diámetro de la tubería. El medidor de flujo se utiliza para medir la cantidad de gas que fluye a través de una tubería en un tiempo determinado. En el caso de las instalaciones de almacenamiento, los caudalímetros permiten controlar la cantidad de gas producido y extraído del vertedero. Los tipos más comunes son los caudalímetros ultrasónicos, electromagnéticos o de área variable se pueden utilizar para aplicaciones de gas de vertedero. Estos caudalímetros proporcionan mediciones precisas y pueden funcionar en condiciones difíciles.

Resulta ser de gran importancia por su clara necesidad de un medidor de flujo para controlar el flujo de gas y optimizar la producción de biogás en el vertedero, al mismo tiempo que le permite monitorear el rendimiento del sistema. [121]

g. Medidor de temperatura

Los medidores de temperatura se utilizan para monitorear la temperatura del gas en varios puntos durante una instalación. En una instalación de almacenamiento es extremadamente importante mantener un control preciso de la temperatura para garantizar la eficiencia de las reacciones biológicas que producen el biogás.

Dependiendo de la precisión requerida y las condiciones ambientales, se pueden utilizar termopares, termómetros de resistencia (como sensores de resistencia), termistores o medidores de infrarrojos. Estos medidores registran la temperatura y la convierten en una señal eléctrica que puede mostrarse en un panel de control o guardarse para un análisis posterior. [122]

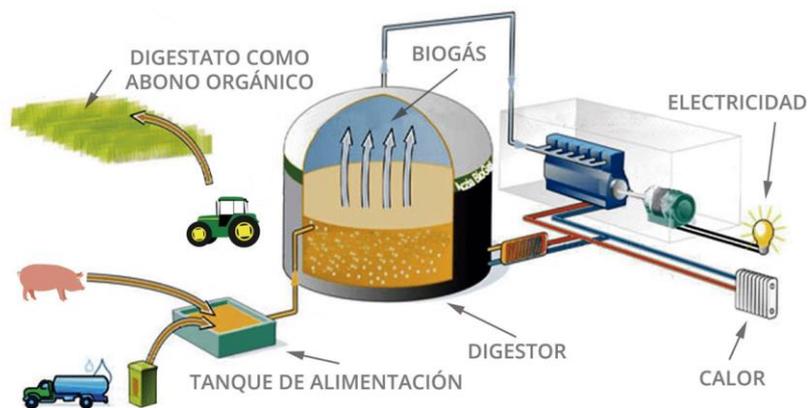
h. Medidor de presión

Los manómetros se utilizan para medir la presión del gas en diferentes puntos de la instalación. En una instalación de almacenamiento de gas de vertedero, el control de la presión es necesario para garantizar la seguridad operativa y evitar fugas o daños

a las tuberías. Dependiendo de sus necesidades específicas de medición y monitoreo, se pueden utilizar manómetros, transmisores de presión o manómetros diferenciales. Estos dispositivos registran la presión del gas y convierten esa información en lecturas que el personal del vertedero puede interpretar, en la figura 21 se observa cómo funciona los modelos de recolección en el que además el monitoreo continuo de la presión del gas permite la identificación y corrección oportuna de problemas operativos, garantizando la integridad del sistema y la seguridad de los empleados.[123], [124]

Figura 21.

EPA – Recolección y tratamiento de gas de vertedero.



Nota. Modelo simple de función del gas de vertedero. Tomado de: «Biogás de residuos orgánicos como fuente de energía renovable», Maestría de Investigación en Cambio Climático, Sustentabilidad y Desarrollo, Universidad Andina Simón Bolívar, 2021. [En línea]. Disponible en:

<https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/8410/1/T3670-MCCSD-Espinosa-Biogas.pdf>

i. Medidas de drenaje de biogás: Activo y Pasivo

Este método de captura de biogás activo se basa en el uso de sopladores conectados mediante tuberías a un sistema de pozos de recolección en el vertedero, su objetivo principal es crear un vacío para desplazar los gases. La instalación para el drenaje de biogás debe incluir los siguientes elementos:

- Receptor de gas, incluidos los pozos receptores y las tuberías horizontales que los conectan.
- Se dirigirán a los puntos de entrada del biogás aspirado.
- Pueden ser tuberías o tanques. Puede ser parte del agua que contiene el gas.
- El separador de agua separa el líquido con el flujo de aire
- Las pajitas de aire lo suministran al soplador
- Un ventilador produce absorción. De esta forma extrae los gases y los entrega a plantas de combustión o puntos de recogida.

Cabe señalar que la aspiradora del soplador debe poder actuar sobre el cuerpo de escombros, además, a la hora de preparar el vertedero, se deberán instalar tuberías horizontales en diferentes niveles de los residuos almacenados con lo cual se puede recoger el gas de forma eficaz. [125]

Mientras tanto el drenaje pasivo son sistemas de drenaje sin pozos de recolección, el biogás se mueve horizontalmente entre las capas de hojarasca, convirtiendo las pendientes y el mantillo en biofiltros. Este método permite que el gas se mezcle con la atmósfera y lo diluya, evitando así la contaminación del aire. Para evitar fugas y garantizar la seguridad, diariamente se añade una capa de tierra sobre los escombros.

La deshidratación pasiva mediante pozos colectores implica la instalación de pozos verticales en el vertedero para capturar y descargar de forma controlada el biogás. Estos pozos deben tener una alta permeabilidad para crear condiciones favorables para la producción de gas. Los pozos de basura se pueden construir con una variedad de materiales, como malla de alambre y espaciadores de madera llenos de piedras o grava, o tuberías perforadas con componentes similares en su interior.

Se debe tener la infraestructura adecuada, incluidos pozos de recolección eficientes, es fundamental para garantizar una producción eficiente de energía y proteger tanto a los trabajadores como al medio ambiente en los sistemas de biogás. [126]

2.2. Tecnología y datos de emisión proporcionados por los proyectos internacionales tipo mecanismos de desarrollo limpio

Para abordar la comparación de tecnologías en proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), es fundamental comprender cómo estas iniciativas han sido implementadas en diferentes contextos geográficos, económicos y tecnológicos. Bionersis, al ser una empresa líder en la gestión de biogás y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en vertederos, ha desarrollado varios proyectos significativos en Malasia, Tailandia, República Dominicana y Chile como se mostrará más adelante son proyectos que destacan por su enfoque en la captura y aprovechamiento del biogás, un gas compuesto principalmente de metano, para la generación de energía eléctrica, contribuyendo tanto a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero como a la generación de energía renovable.

Comparar estos proyectos internacionales con iniciativas similares en Colombia, como los rellenos sanitarios en Pasto, Bucaramanga y Villavicencio, donde también se implementan tecnologías de recuperación de biogás, permite identificar prácticas exitosas y áreas de mejora con esta innovación y la cooperación internacional son esenciales para avanzar en la gestión de residuos y la sostenibilidad ambiental a nivel global y local. La estimación anual de reducción de emisiones de CO₂ en Colombia muestra un crecimiento constante en la cantidad de emisiones reducidas, reflejando la efectividad de las políticas y tecnologías implementadas.[127]

Estas comparaciones permiten comprender mejor las diferencias y similitudes en las estrategias de reducción de emisiones y generación de energía renovable, proporcionando una base para mejorar las prácticas y políticas en Colombia y otros países, promoviendo un desarrollo sostenible y una gestión ambiental efectiva.

Bionersis es una empresa especializada en la gestión de biogás y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en vertederos a través de proyectos de captura y aprovechamiento de biogás. A continuación, se describen algunos de los proyectos significativos de Bionersis en varios países:

2.2.1. *Bionersis LFG Project Malaysia (Penang)*

Este proyecto se lleva a cabo en el vertedero de Pulau Burung en Penang, Malasia. El objetivo principal del proyecto es la captura y utilización del gas de vertedero (LFG) para generar electricidad. El biogás, compuesto principalmente por metano, se extrae del vertedero mediante un sistema de pozos y tuberías, y luego se quema en generadores para producir energía eléctrica. [128]

Impacto Ambiental: Este proyecto reduce significativamente las emisiones de metano, un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global 25 veces mayor que el dióxido de carbono.[129]

Generación de Energía: La electricidad generada se suministra a la red local, proporcionando una fuente de energía renovable.

Beneficios Locales: Además de la reducción de emisiones, el proyecto mejora la gestión de residuos y reduce los riesgos asociados con los lixiviados y olores.

2.2.2. *Bionersis Project Thailand 1*

El primer proyecto de Bionersis en Tailandia se centra en la captura y utilización de biogás en el vertedero de Chiang Mai. Este proyecto también incluye la instalación de un sistema de recolección de LFG y la generación de electricidad a partir de este gas. [130]

Reducción de Emisiones: Al capturar y utilizar el metano del vertedero, se evita que este gas altamente nocivo se libere a la atmósfera.

Energía Renovable: La electricidad producida a partir del biogás se inyecta en la red eléctrica nacional, apoyando la transición de Tailandia hacia fuentes de energía más sostenibles.[131], [132]

Desarrollo Sostenible: El proyecto contribuye a mejorar la calidad de vida local mediante la reducción de olores y la mejora de la gestión de residuos.

2.2.3. *Bionersis project on La Duquesa landfill, Dominican Republic*

El proyecto en el vertedero de La Duquesa, en la República Dominicana, se centra en la captura de biogás para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la generación de energía. [133]

Contexto del Vertedero: La Duquesa es uno de los vertederos más grandes del Caribe y presenta desafíos significativos en términos de gestión de residuos y emisiones de gases de efecto invernadero.

Tecnología Utilizada: El proyecto implementa un sistema de extracción de biogás y lo utiliza para generar electricidad mediante motores de combustión interna.

Impacto Positivo: La iniciativa no solo reduce las emisiones de metano, sino que también mejora las condiciones ambientales locales, disminuyendo la contaminación del aire y los riesgos para la salud pública.

2.2.4. *Bionersis LFG Project Chile 4 (Los Angeles)*

Este proyecto se lleva a cabo en el vertedero de Los Ángeles en Chile y está diseñado para capturar y utilizar el biogás para la generación de energía eléctrica. [133]

Captura de Metano: Mediante un sistema de pozos y tuberías, el biogás se extrae del vertedero, evitando la liberación de metano a la atmósfera.

Generación de Electricidad: El biogás capturado se utiliza para alimentar generadores eléctricos, proporcionando energía limpia y renovable a la red local.

Beneficios Ambientales y Sociales: El proyecto reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, mejora la calidad del aire y contribuye al desarrollo sostenible de la comunidad local.

2.3. Comparación de emisiones entre proyectos colombianos y proyectos internacionales

Una vez descritos los proyectos con mayor similitud a los procesos realizados en Colombia se debe tener en cuenta la búsqueda de soluciones sostenibles para gestionar los residuos sólidos y mitigar el cambio climático, los proyectos de captura y aprovechamiento de biogás han demostrado ser una alternativa innovadora y efectiva. Bionersis, empresa líder en este campo, ha implementado con éxito una serie de proyectos en muchas partes del mundo, entre ellos: Malasia, Tailandia, República Dominicana y Chile.

Estos proyectos no sólo ayudan a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también promueven la producción de energía renovable y mejoran el medio ambiente y la salud pública de las comunidades locales. Además, para lograr comparar estos proyectos internacionales con iniciativas similares en Colombia se obtiene un compromiso compartido con la gestión sostenible de residuos y la reducción de emisiones.

En Colombia, proyectos de vertederos como los rellenos ubicados en Pasto, Bucaramanga y Villavicencio donde en cada uno también han implementado tecnologías de recuperación de biogás, lo que demuestra que la innovación y la cooperación internacional pueden acelerar el progreso ambiental en muchos contextos diferentes. Esta comparación permitirá comprender mejor las tecnologías, captura y contaminación para avanzar en la gestión de residuos y la sostenibilidad ambiental a nivel global y local. [133]

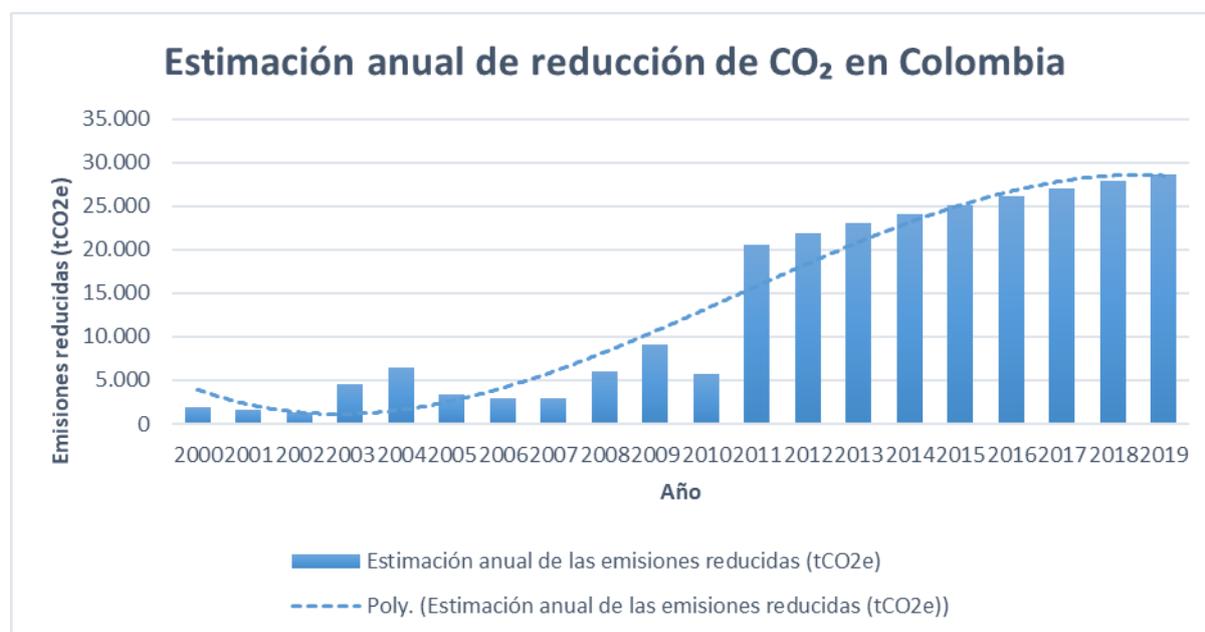
Para tener una base de donde realizar la comparación se toma las emisiones se tiene en cuenta la estimación de reducción de emisiones de CO₂ en toneladas de la ciudad de Pasto en Colombia ya que no posee fluctuaciones en los datos presentados y permite observar y verificar de una manera más evidente la diferencia entre los proyectos de MDL. Cabe destacar que otro aspecto relevante es la tecnología que se presenta en todos los proyectos ya que resulta ser la misma y se basa en los mismos sistemas de aprovechamiento y captura de emisiones como ya se explicó anteriormente, todos estos proyectos tienen en común que son financiados y

realizados por la empresa Bionersis con subyugados en cada país y ciudad en donde realice algún proceso.

A continuación se presenta la Figura 22 en la cual se puede observar la estimación anual de reducción de CO₂ en toneladas en Colombia durante los últimos veinte años, se puede observar cómo a lo largo de los años ha ido creciendo la cantidad de emisiones reducidas debido a los aumentos de población que conlleva a una mayor generación de residuos en la ciudad; desde el año 2010 ha tenido un crecimiento exponencial el cual ha ido creciendo paulatinamente con un pico máximo de 28 mil toneladas en el año 2019.

Figura 22.

Gráfica de la estimación anual de reducción de emisiones en Colombia



Nota. Estimación anual de reducción de CO₂ en Colombia. Tomado de: «World Bank Open Data», World Bank Open Data. [https://data.worldbank.org/indicador/EN.ATM.CO₂E.KT?end=2020&locations=CO&start=2000](https://data.worldbank.org/indicador/EN.ATM.CO2E.KT?end=2020&locations=CO&start=2000)

2.3.1. Comparación de datos de emisiones entre Colombia y Malasia

La figura 23 presenta estimaciones anuales de reducción de emisiones de CO₂ para Colombia y Malasia desde 2011 hasta 2018. Al observar la tendencia general, se nota un aumento gradual en ambas naciones a lo largo de los años, indicando posibles medidas adoptadas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Colombia muestra una tendencia de crecimiento constante, sin grandes fluctuaciones, señalando una progresión estable en sus esfuerzos de reducción de emisiones. Por otro lado, Malasia experimenta variaciones más notables: entre 2012 y 2016, registra un aumento significativo en las estimaciones de reducción, alcanzando su punto más alto en 2016. Sin embargo, en 2017 y 2018, se observa una disminución en estas estimaciones.

Destaca el año 2016 como un punto destacado para Malasia, donde logró una reducción notable de emisiones, posiblemente debido a políticas o proyectos específicos implementados durante ese período. Aunque en términos generales, las estimaciones de reducción de emisiones para Malasia son considerablemente más altas que las de Colombia en la mayoría de los años, reflejando diferencias en la escala de actividades económicas y enfoques de mitigación ambiental de ambos países.

La disminución en las estimaciones de Malasia en 2017 plantea interrogantes sobre posibles cambios en políticas ambientales o factores económicos que influyeron en esa disminución. A través del trabajo investigativo se logró observar que uno de los factores clave para la reducción de emisiones en 2017 es el fuerte crecimiento económico de Malasia este año, especialmente en sectores como la manufactura y la construcción. Según Estadísticas de Malasia, el producto interno bruto (PIB) creció un 5,9% en 2017, impulsado por el desarrollo industrial y la inversión en infraestructura este crecimiento económico conduce a una mayor actividad industrial y una mayor demanda de energía.

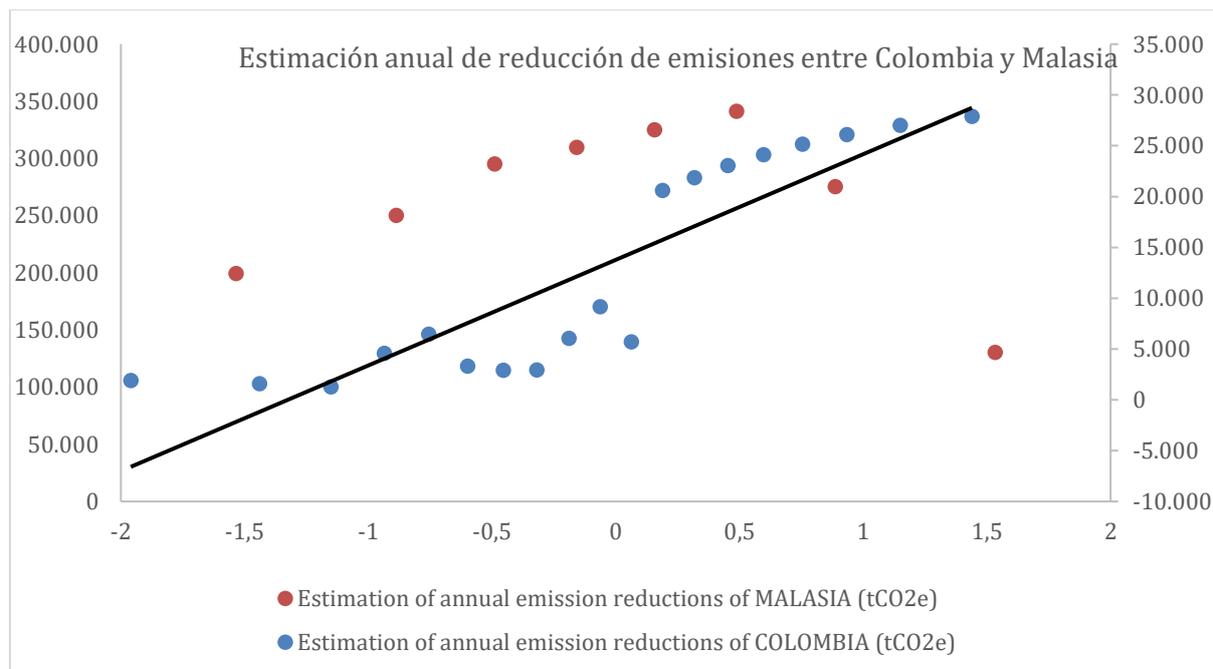
La Agencia Internacional de Energía (AIE) señaló que el consumo de energía en Malasia aumentó aproximadamente un 3% en 2017, lo que podría conducir a un

aumento de las emisiones de CO₂ procedentes de la generación de electricidad. Además, los factores climáticos pueden influir ya que, en 2017, muchas partes de Malasia experimentaron una estación seca prolongada, que afectó la disponibilidad de agua para la generación de energía hidroeléctrica, una de las fuentes de energía más limpias del país por lo que esto podría conducir a un mayor uso de fuentes de energía con mayor uso intensivo de carbono, lo que contribuiría al aumento de las emisiones de CO₂. [133]

Si bien no hay evidencia directa de cambios significativos en la política ambiental nacional de Malasia en 2017, es importante considerar factores externos. Por ejemplo, los cambios en las reglas del comercio internacional o en los precios de las materias primas pueden afectar la actividad económica y, por lo tanto, las emisiones de CO₂ de un país.

Figura 23.

Gráfica qqplot de comparación de la estimación anual de reducción de emisiones entre Colombia y Malasia.



Nota. Comparación de bases de datos de Colombia y Malasia. Tomado de: Elaboración propia y datos de «World Bank Open Data», World Bank Open Data. [https://data.worldbank.org/indicador/EN.ATM.CO₂E.KT?end=2020&locations=CO&start=2000](https://data.worldbank.org/indicador/EN.ATM.CO2E.KT?end=2020&locations=CO&start=2000)

2.3.2. Comparación de datos de emisiones entre Colombia y Tailandia

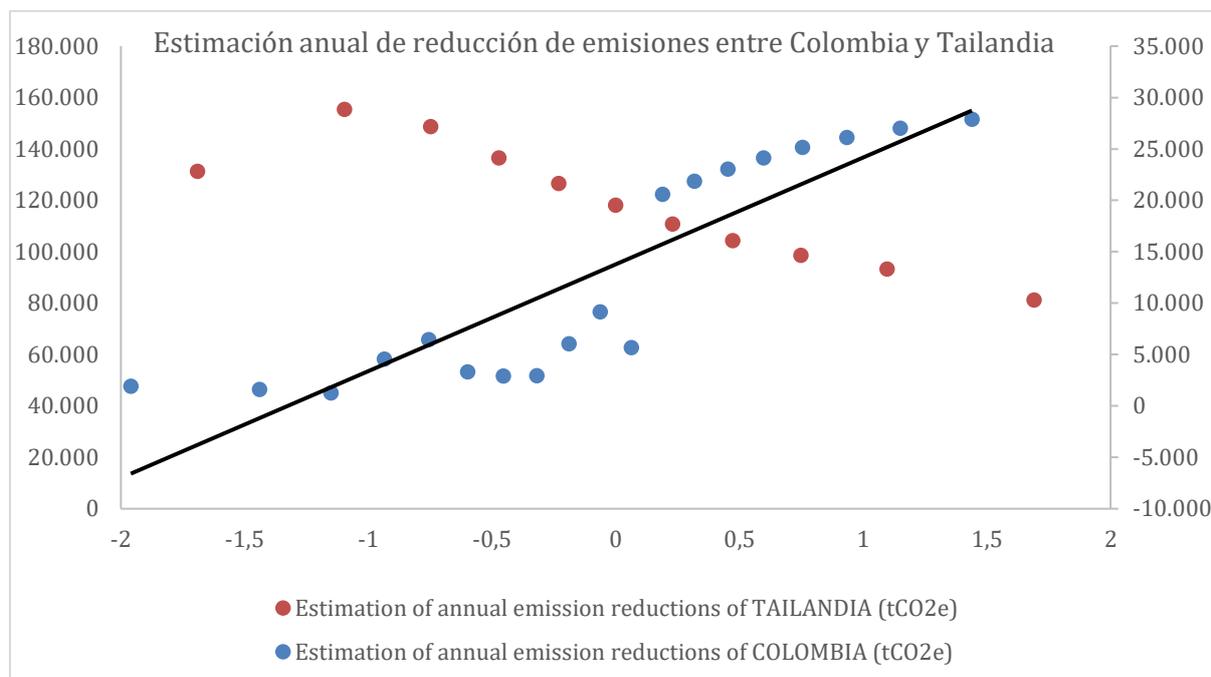
Como se puede observar en la figura 24 a lo largo del periodo de 2009 a 2019, Colombia muestra una tendencia ascendente y constante en la reducción de emisiones de CO₂. En 2009, Colombia logró reducir 9,155 toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂e). Este valor aumentó de manera continua cada año, alcanzando una reducción de 28,686 tCO₂e en 2019. Este crecimiento constante sugiere la implementación de políticas ambientales efectivas y una creciente adopción de tecnologías limpias.

Por otro lado, Tailandia muestra una tendencia diferente. En 2009, las reducciones de emisiones fueron de 13,126 tCO₂e. En 2010, Tailandia experimentó un pico significativo, con una reducción de 155,393 tCO₂e, lo que probablemente refleja la implementación de proyectos específicos de gran impacto, como los proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL). Sin embargo, después de 2010, las reducciones de emisiones comenzaron a disminuir gradualmente cada año, llegando a 81,163 tCO₂e en 2019. Esta tendencia descendente puede indicar desafíos en la sostenibilidad de las políticas ambientales o fluctuaciones económicas que afectaron la capacidad de mantener los niveles iniciales de reducción. [133]

En 2010 Tailandia adoptó políticas de eficiencia energética y diversificación de su matriz energética, incluyendo la promoción de fuentes de energía renovable como la energía solar y eólica, dichas políticas se vieron respaldadas por el compromiso del gobierno tailandés de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la sostenibilidad ambiental del país. La integración de estas políticas en el sistema de comercio de emisiones también jugó un papel significativo en la reducción de emisiones. [133]

Figura 24.

Gráfica qqplot de comparación de la estimación anual de reducción de emisiones entre Colombia y Tailandia.



Nota. Comparación de bases de datos de Colombia y Tailandia. Tomado de: Elaboración propia y datos de «World Bank Open Data», World Bank Open Data. [https://data.worldbank.org/indicador/EN.ATM.CO₂E.KT?end=2020&locations=CO&start=2000](https://data.worldbank.org/indicador/EN.ATM.CO2.E.KT?end=2020&locations=CO&start=2000)

2.3.3. Comparación de datos de emisiones entre Colombia y República Dominicana

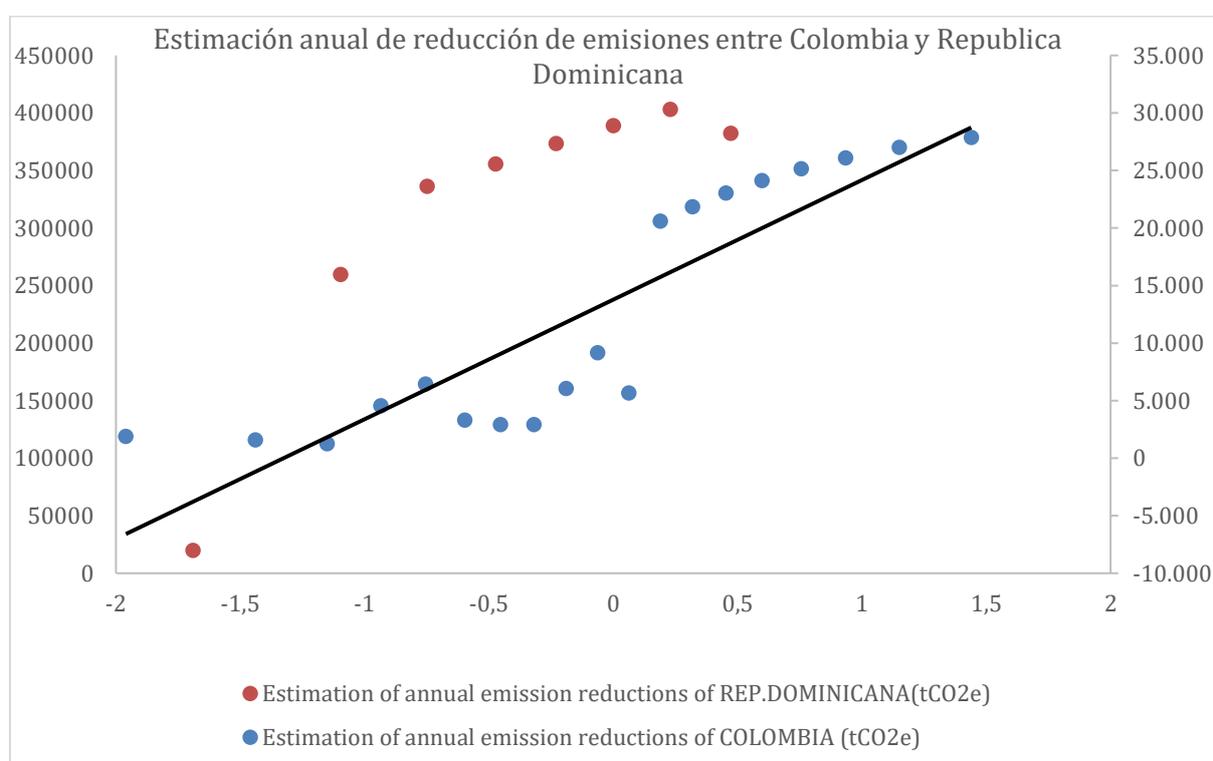
La Figura 25 que presenta las estimaciones de reducciones anuales de emisiones de CO₂ para Colombia y la República Dominicana desde 2009 hasta 2016 revela tendencias interesantes en los esfuerzos de ambos países por mitigar sus emisiones de gases de efecto invernadero. La República Dominicana mostró una tendencia de reducción de emisiones significativamente mayor que Colombia durante el mismo periodo, en el año 2009, la reducción de emisiones fue de 19,657 tCO₂e, mientras que en 2010, hubo un aumento dramático a 259,600 tCO₂e, reflejando la implementación de proyectos de gran escala o políticas efectivas; en ese año la posible causa de aumento en reducción de las emisiones puede atribuirse a la implementación de proyectos importantes bajo mecanismos como el Mecanismo de

Desarrollo Limpio (MDL), que captaron financiamiento internacional y ayudaron a mejorar la infraestructura de mitigación de emisiones.[134]

Las reducciones continuaron aumentando hasta alcanzar un máximo de 403,018 tCO₂e en 2015, por lo que en 2016, hubo una ligera disminución a 382,294 tCO₂e, aunque la tendencia general sigue siendo de alto rendimiento en la reducción de emisiones, un posible factor de afectación a la reducción de emisiones del país se puede deber al financiamiento internacional y colaboración con organizaciones globales para desarrollar infraestructura sostenible y proyectos de energía renovable; logrando así incrementos significativos en un corto periodo, destacando la efectividad de proyectos específicos y políticas ambientales implementadas. [134]

Figura 25.

Gráfica de comparación de la estimación anual de reducción de emisiones entre Colombia y República Dominicana.



Nota. Comparación de bases de datos de Colombia y República Dominicana. Tomado de: Elaboración propia y datos de «World Bank Open Data», World Bank Open Data. <https://data.worldbank.org/indicador/EN.ATM.CO₂E.KT?end=2020&locations=CO&start=2000>

2.3.4. Comparación de datos de emisiones entre Colombia y Chile

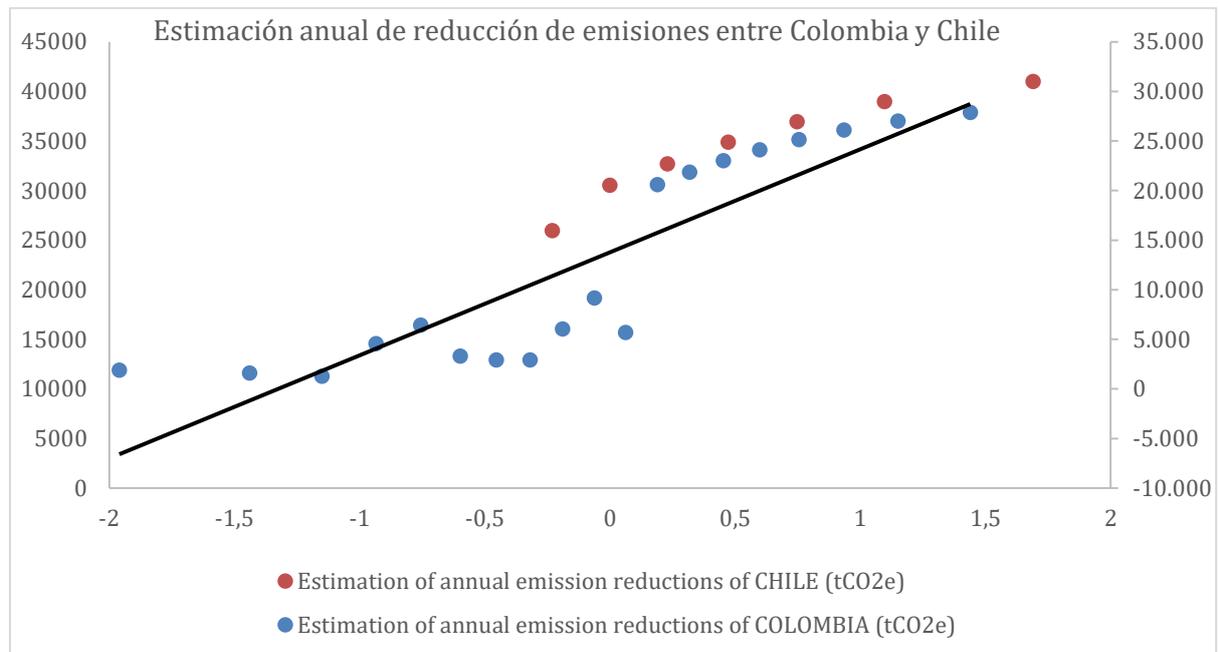
Como última comparación se tiene la figura 26 que presenta las estimaciones de reducciones anuales de emisiones de CO₂ de dos proyectos para Colombia y Chile desde 2013 hasta 2019 donde se revelan algunas tendencias bastante interesantes en los esfuerzos de ambos países por mitigar sus emisiones de gases de efecto invernadero. Por lo que se puede observar Chile muestra una tendencia similar, pero con una tasa de crecimiento de reducción de emisiones más alta.

En 2013, Chile logró reducir 25,960 tCO₂e, y esta cifra aumentó de manera constante cada año hasta llegar a 40,988 tCO₂e en 2019, para el año 2013, Chile adoptó su agenda de energía, que incluía metas ambiciosas para la generación de energía renovable y ya en 2015, el país introdujo la Ley 20.780, que estableció un impuesto al carbono, siendo uno de los primeros países en Latinoamérica en implementar tal medida, este impuesto gravaba las emisiones de fuentes estacionarias, incentivando a las empresas a reducir sus emisiones mediante la adopción de tecnologías más limpias; además, el sector privado en Chile ha invertido significativamente en proyectos de energía renovable, como la solar y la eólica, debido a las condiciones favorables del mercado y las políticas de apoyo del gobierno.

Estas inversiones han resultado en un incremento sustancial en la capacidad instalada de energías renovables, lo cual ha contribuido a la reducción de las emisiones de CO₂. Este incremento significativo también puede atribuirse a la implementación de políticas nacionales de cambio climático y energías renovables, así como a iniciativas específicas bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) que han facilitado financiamiento internacional y mejorado la infraestructura de mitigación de emisiones. [134]

Figura 26.

Gráfica de comparación de la estimación anual de reducción de emisiones entre Colombia y Chile.



Nota. Comparación de bases de datos de Colombia y Chile. Tomado de: Elaboración propia y datos de «World Bank Open Data», World Bank Open Data. <https://data.worldbank.org/indicador/EN.ATM.CO2E.KT?end=2020&locations=CO&start=2000>

3. HERRAMIENTAS, DATOS Y DIAGNOSTICO DE ANALITICA DE DATOS PARA PROYECTOS DE MECANISMO DE DESARROLLO LIMPIO TIPO PARQUE ECOLOGICO

En la era de la información, el análisis de datos se ha convertido en una herramienta importante para convertir datos en conocimiento útil, especialmente en campos complejos e interdisciplinarios como la ingeniería química. La disciplina se beneficia enormemente de la capacidad de analizar grandes cantidades de datos para optimizar procesos, mejorar la eficiencia y garantizar operaciones seguras y sostenibles. A continuación, se muestra una descripción de cómo se utiliza el análisis de datos en la industria, sus métodos y técnicas, casos de uso específicos y más. [135]

El análisis de datos en ingeniería química implica el uso de métodos estadísticos, matemáticos y computacionales para extraer información valiosa de grandes conjuntos de datos producidos por procesos químicos, simulación, experimentos y sensores. Esta información se utiliza para tomar decisiones informadas para mejorar el diseño, el rendimiento y la optimización; Para ello, considere diferentes métodos como los que se describen a continuación:

- a. **Análisis descriptivo:** este método utiliza estadísticas básicas para describir las características de los datos del proceso químico, como temperatura, presión, reactivos y concentraciones de productos.
- b. **Análisis diagnóstico:** Se enfoca en comprender las causas de los cambios en los procesos químicos a través de análisis de correlación y regresión, identificando así los principales factores que afectan el desempeño y la calidad del proceso presentado.
- c. **Análisis predictivo:** utiliza modelos estadísticos y aprendizaje automático para predecir el comportamiento futuro de los procesos químicos. Se utilizan métodos como la regresión lineal, árboles de decisión y redes neuronales artificiales para predecir los resultados de reacciones químicas y optimizar las condiciones operativas.

- d. Análisis prescriptivo: va más allá de la previsión y proporciona recomendaciones específicas para la optimización de procesos. Esto puede incluir algoritmos de optimización y simulación para encontrar las mejores condiciones operativas.
- e. Análisis exploratorio de datos (EDA): utiliza herramientas estadísticas y de visualización para descubrir patrones y relaciones en datos procesados y experimentales sin hipótesis predeterminadas.

El análisis de datos juega un papel importante en la optimización de procesos, el control de calidad, el desarrollo de nuevos productos, la seguridad de los procesos y la sostenibilidad ambiental. Estas aplicaciones se crean analizando datos históricos y en tiempo real para tomar decisiones informadas y mejorar la eficiencia de los procesos químicos.

Por ejemplo, en optimización de procesos, que tiene como objetivo mejorar la eficiencia y productividad de los procesos químicos a través del análisis de datos históricos y en tiempo real; Ajuste las condiciones de reacción para maximizar el rendimiento y la pureza del producto.

El control de calidad suele estar regulado para monitorear y analizar los datos de producción para garantizar que los productos químicos cumplan con las especificaciones de calidad, así como para identificar desviaciones tempranamente y tomar medidas. Se introduce uno de los métodos más nuevos en el mundo de la ingeniería química para el desarrollo de nuevos productos, mediante el cual se pueden analizar datos experimentales y de simulación para diseñar y optimizar nuevas moléculas y procesos, especialmente utilizando modelos predictivos para acelerar el desarrollo. y reducir costos.

A nivel de mejora de la seguridad de procesos, la atención se centra en evaluar datos utilizando sensores y sistemas de monitoreo para predecir y prevenir incidentes de seguridad en plantas químicas, mientras se implementan sistemas de control y alertas basadas en datos para minimizar el riesgo.

Finalmente, uno de los temas más frecuentes en los últimos años ha sido la promoción de la sostenibilidad y el medio ambiente, fomentando y permitiendo la optimización del uso de recursos y la reducción de residuos y emisiones a través del análisis de datos de procesos y así desarrollar estrategias de reciclaje y reutilización de residuos por producto.

3.1. Analítica de datos aplicada a problemáticas actuales

La implementación de analítica de datos en la industria química enfocada a los rellenos sanitarios donde se enfrentan a diversos desafíos:

- **Gestión de Grandes Volúmenes de Datos:** Almacenar, procesar y analizar grandes cantidades de datos generados por sensores y equipos de proceso en tiempo real.
- **Calidad de los Datos:** Asegurar que los datos utilizados sean precisos, completos y libres de errores, lo cual es crucial para obtener resultados confiables.
- **Integración de Datos:** Combinar datos de diferentes fuentes y formatos para obtener una visión predictiva de datos.
- **Seguridad y Privacidad de los Datos:** Proteger los datos sensibles relacionados con procesos químicos y cumplir con las regulaciones de seguridad.

El análisis de información en este contexto incluye etapas como la recolección de datos de sensores, sistemas de control, bases de datos experimentales y simulaciones. Luego, se realiza el preprocesamiento de datos para limpiar y preparar los datos, seguido de la exploración de datos utilizando técnicas de EDA para comprender las características y relaciones dentro de los datos. Posteriormente, se construyen y evalúan modelos analíticos utilizando técnicas estadísticas y de machine learning, y se valida el rendimiento de estos modelos mediante métricas como precisión y recall.

Finalmente, la visualización de la información es crucial para comunicar los hallazgos analíticos de manera comprensible. Se utilizan herramientas como gráficos de barras

y líneas, histogramas, mapas de calor, gráficos de dispersión y dashboards interactivos para representar y explorar visualmente los datos y patrones. Esto permite a los usuarios entender y tomar decisiones basadas en la información analítica obtenida.[135]

3.2. Herramientas computacionales

Para realizar un estudio de analítica de datos se debe tener en cuenta una serie de herramientas de computación que proporcionan facilidades para el análisis de los datos, a continuación, se presentan algunas de las herramientas de programación más comunes y útiles usadas en ingeniería:

3.2.1. Python

Python es ampliamente reconocido como uno de los lenguajes de programación más populares en el campo de la analítica de datos. Su éxito se debe a su simplicidad y la amplia gama de bibliotecas especializadas que facilitan el manejo y análisis de datos. Posee una serie de bibliotecas para manipulación de datos conocida como *Pandas* la cual es una de las bibliotecas más esenciales para la analítica de datos en Python con la cual se permite la manipulación y análisis de datos estructurados a través de DataFrames, estructuras de datos que facilitan operaciones como el filtrado, la agrupación y la agregación de datos. Con Pandas, los analistas pueden leer datos de múltiples formatos, como CSV, Excel y SQL, y realizar transformaciones complejas de manera eficiente.

Otra de las bibliotecas es NumPy ya que es fundamental para centrar el cálculo numérico y la manipulación de matrices y arreglos. Proporciona herramientas para realizar operaciones matemáticas y lógicas, además de funciones estadísticas y algebraicas que son cruciales para el análisis de datos científicos y de ingeniería.

Además, existen algunos apartados que permiten la visualización de datos como Matplotlib la cual es una de las bibliotecas más utilizadas la cual permite la creación de gráficos estáticos, animados e interactivos, y es conocida por su flexibilidad para personalizar cada aspecto de los gráficos. Seaborn, construida sobre Matplotlib,

ofrece una interfaz de alto nivel para crear gráficos estadísticos atractivos y complejos con mayor facilidad, facilitando la visualización de patrones y relaciones en los datos. Plotly destaca por su capacidad para generar gráficos interactivos y sofisticados que pueden integrarse fácilmente en aplicaciones web. Sus herramientas permiten a los usuarios explorar los datos de manera dinámica, ajustando visualizaciones en tiempo real para obtener una comprensión más profunda.

En el ámbito del machine learning, Scikit-learn es la biblioteca de referencia en Python ya que proporciona herramientas eficientes y sencillas para realizar tareas de clasificación, regresión y clustering, así como para el preprocesamiento de datos y la evaluación de modelos. Por otro lado, TensorFlow y Keras son esenciales para el desarrollo de modelos de aprendizaje profundo, permitiendo construir, entrenar y desplegar redes neuronales complejas.

3.2.2. R

R es otro lenguaje de programación muy popular para la analítica de datos, especialmente en la academia y la investigación. Este lenguaje es conocido por sus capacidades estadísticas y su extensa colección de paquetes dedicados al análisis de datos. Posee una serie de bibliotecas y paquetes más utilizados para la manipulación de datos con los cuales se facilita el filtrado, selección, mutación y agrupación de datos, permitiendo a los analistas transformar y resumir conjuntos de datos de manera eficiente. Utiliza una gramática de gráficos para crear visualizaciones elegantes y personalizables que pueden adaptarse a una amplia variedad de necesidades analíticas, también destaca la biblioteca *tidyverse* ya que es una colección de paquetes en R que comparten una filosofía de diseño común y se integran perfectamente entre sí donde se incluye herramientas esenciales como *dplyr*, *ggplot2*, *tidyr* para el manejo de datos, *readr* para la importación de datos y *purrr* para la programación funcional, entre otros.

RStudio es el entorno de desarrollo integrado (IDE) más popular para trabajar con R con este se facilita el análisis de datos proporcionando un editor de código avanzado, una consola interactiva, y paneles para la visualización de datos y gráficos. Además, RStudio soporta la creación de documentos reproducibles con R Markdown,

permitiendo a los analistas combinar código, resultados y narrativa en un solo documento, gracias a estas herramientas y bibliotecas proporcionan un conjunto completo de capacidades para la manipulación, análisis y visualización de datos se logra que los analistas y científicos pueden extraer datos de conocimientos valiosos y comunicar sus hallazgos de manera efectiva, transformando datos crudos en información significativa.

3.2.3. SQL (*Structured Query Language*)

SQL es una herramienta esencial para la gestión y consulta de bases de datos relacionales con esta se logra que los usuarios puedan extraer, manipular y gestionar datos almacenados en bases de datos como MySQL, PostgreSQL y Microsoft SQL Server. Las consultas SQL pueden ser tan simples como seleccionar registros específicos de una tabla o tan complejas como combinar datos de múltiples tablas y realizar agregaciones avanzadas; debido a su eficiencia y capacidad para manejar grandes volúmenes de datos, SQL es una habilidad fundamental para los analistas de datos. [135]

3.2.4. Power BI

Microsoft Power BI es una herramienta de análisis empresarial que permite crear informes y dashboards interactivos. Integrado con otros productos de Microsoft, Power BI facilita la conexión a diversas fuentes de datos y la creación de visualizaciones en tiempo real. Es especialmente útil para las empresas que buscan aprovechar sus datos para obtener insights y tomar decisiones informadas. [136]

3.3. Aplicación de la analítica de datos para la toma de decisiones

La analítica de datos se ha convertido en una herramienta crucial para optimizar la gestión y operación de los rellenos sanitarios, especialmente en lo que respecta a las emisiones de gases. Utilizando técnicas avanzadas de análisis, los gestores de residuos pueden tomar decisiones más informadas y efectivas.

Para lograr un buen monitoreo y análisis de emisiones los rellenos sanitarios generan una variedad de gases, como metano y dióxido de carbono, que tienen impactos significativos en el medio ambiente. El uso de sensores y sistemas de monitoreo continuo permite la recopilación de grandes volúmenes de datos en tiempo real, con dichos datos pueden ser analizados para identificar patrones de emisión, evaluar la eficiencia de los sistemas de captura de gases y prever posibles problemas antes de que ocurran. [137]

3.3.1. Optimización de Procesos

Mediante el análisis de datos históricos y actuales, es posible optimizar diversos procesos operativos. Por ejemplo, se pueden ajustar los métodos de compactación de residuos, mejorar las técnicas de cobertura diaria y optimizar el uso de biocapas que reducen las emisiones de metano. La modelización predictiva también puede ayudar a estimar la vida útil del relleno y planificar su cierre y post-cierre de manera más efectiva. [137]

En cuanto a las estrategias para la toma de decisiones basadas en los datos obtenidos se deben tener en cuenta la salida de datos ya que estos pueden depender de factores externos e internos que logren afectar la decisión a tomar para una empresa específica, para tomar decisiones informadas se debe hacer un estudio paulatino a lo largo del tiempo así se logra determinar cuál es la mejor decisión estratégica.

3.3.2. Implementación de sistemas de monitoreo avanzados

La instalación de sensores con conexión a Internet en rellenos sanitarios permite la recopilación continua de datos sobre emisiones de gases, temperatura, humedad y otros factores relevantes. Estos datos pueden ser enviados a plataformas centralizadas para su análisis. El análisis predictivo se destaca por hacer uso de algoritmos de machine learning y técnicas de análisis predictivo permite anticipar problemas y optimizar la gestión del relleno sanitario. Por ejemplo, mediante la predicción de picos de emisión de gases, se pueden implementar medidas preventivas para reducir el impacto ambiental.

3.3.3. Integración de Datos

La integración de datos de diversas fuentes, como sensores, informes meteorológicos y datos operativos, proporciona una visión holística del funcionamiento del relleno sanitario. Herramientas como Apache Hadoop y Apache Spark son útiles para manejar y analizar grandes volúmenes de datos de forma eficiente.

Los sistemas de soporte a las decisiones (DSS) son herramientas computacionales que ayudan a los gestores a tomar decisiones informadas mediante el análisis de datos y la simulación de escenarios. Esto permite que los modelos de simulación puedan incorporar diferentes datos para evaluar diversas estrategias de gestión de residuos y sus impactos potenciales. Por ejemplo, se puede simular cómo diferentes métodos de cobertura diaria afectan las emisiones de gases y la eficiencia de captura de metano. Finalmente es apropiado hacer una integración de sistemas de Machine Learning donde se destaca la integración de algoritmos ya que mejora la precisión de las predicciones y recomendaciones. Por ejemplo, algoritmos de clasificación pueden identificar patrones de fallos en sistemas de captura de gases, mientras que los modelos de regresión pueden prever niveles futuros de emisión basados en datos históricos y condiciones actuales. [138]

3.3.4. Ejemplos y Casos de Estudio en Ingeniería e Industria

- **Caso de Estudio: Relleno Sanitario en California**

Un relleno sanitario en California implementó un sistema avanzado de monitoreo de emisiones que utiliza sensores distribuidos por todo el sitio. Los datos recolectados se analizan utilizando Apache Spark para identificar patrones de emisión y predecir picos de metano, por medio de este enfoque se ha permitido reducir las emisiones no controladas en un 20% mediante la optimización de las operaciones de captura de gases y el ajuste de las prácticas de gestión diaria. [139]

- **Implementación de Tableau para la Visualización de Datos**

En otro caso, una empresa de gestión de residuos utilizó Tableau para crear un dashboard que integra datos de múltiples fuentes, incluyendo sensores de emisión,

datos meteorológicos y registros operativos. Este dashboard permite a los gestores visualizar en tiempo real las tendencias de emisión y tomar decisiones inmediatas para mitigar impactos ambientales, contando con una gran capacidad de ver datos integrados ha mejorado la eficiencia operativa y ha reducido los costos asociados con la gestión de emisiones.

- **Caso de estudio para uso de Machine Learning en Alemania**

Un relleno sanitario en Alemania ha implementado algoritmos de machine learning para predecir las emisiones de gases en diferentes condiciones operativas. Utilizando datos históricos y en tiempo real, los modelos predictivos ayudan a los gestores a anticipar problemas y a implementar estrategias proactivas para reducir las emisiones. Este enfoque ha resultado en una mejora significativa en la gestión del relleno y en la reducción de las emisiones totales de gases de efecto invernadero.

3.4. Descripción de las estrategias para la toma de decisiones en proyectos de mecanismos de desarrollo limpio

La toma de decisiones basada en datos (DDDM) es una estrategia fundamental que permite a las organizaciones tomar decisiones informadas basadas en datos y análisis estadísticos. Esta estrategia se divide en varios pasos principales:

El primer paso es recopilar datos relevantes a nivel contextual de la gestión de proyectos del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), incluida la recopilación de datos sobre emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a partir de sensores, informes operativos y datos meteorológicos. Por ejemplo, los proyectos de captura de gases de vertedero (LFG) recopilan datos sobre las concentraciones de metano y otros gases de efecto invernadero en los vertederos.[140]

Una vez que se recopilan los datos, se realizan análisis para identificar patrones y tendencias utilizando herramientas y datos que permiten observar el comportamiento de las variables utilizando sistemas predictivos, ya sea aprendizaje automático u otros sistemas de aprendizaje automatizados, que se utilizan para analizar grandes cantidades de datos. Los datos y pronósticos sobre los picos de emisiones de gases de efecto invernadero gracias a este análisis permiten optimizar y adaptar las operaciones de recuperación de gas a las prácticas de gestión diaria.

Los resultados del análisis de datos se interpretan para obtener información útil a través de paneles creados para proporcionar la mejor información sobre los factores relevantes y los gerentes pueden ver las tendencias, rastrear las emisiones en tiempo real y tomar decisiones inmediatas para minimizar el impacto ambiental.

Finalmente, comenzamos a implementar soluciones basadas en los resultados de nuestro análisis, que pueden incluir modificar los métodos de espesamiento de desechos, mejorar los métodos de cobertura diaria y optimizar el uso de los métodos de filtrado y captura de desechos, por lo tanto, este enfoque proactivo permite anticipar los problemas y tomar medidas preventivas eficaces.[140]

Cuando hablamos de modelos predictivos, demuestran ser una herramienta importante para planificar y gestionar proyectos MDL, ya que la mayoría de ellos utilizan datos históricos y en tiempo real. Estos modelos ayudan a predecir emisiones futuras y optimizar las estrategias de mitigación; con el desarrollo de modelos predictivos implica la creación de algoritmos que puedan predecir las emisiones en diversas condiciones operativas, lo que permitirá a los vertederos implementar algoritmos de aprendizaje automático para predecir las emisiones, lo que conducirá a mejoras significativas en el control y la reducción de las emisiones.

Con estos modelos, puede planificar medidas de mitigación específicas para predecir picos de emisiones y tomar decisiones informadas sobre la implementación de estrategias proactivas, incluidas las oportunidades regulatorias, ajustar las operaciones de captura de gas y optimizar las medidas de gestión diarias para reducir las emisiones fugitivas.

3.4.1. Metodología para la planificación de medidas de mitigación

La planificación de medidas de mitigación en proyectos ambientales, especialmente aquellos relacionados con la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, requiere un enfoque sistemático y basado en datos para asegurar la efectividad y sostenibilidad de las acciones para ello es necesario describir algunas estrategias importantes para la toma de decisiones con respecto a las medidas de mitigación:

Es fundamental recopilar datos precisos y detallados de múltiples fuentes, incluyendo sensores de emisiones, datos meteorológicos, y registros operativos históricos, para lograr utilizar las herramientas de análisis predictivo para identificar patrones y tendencias en las emisiones. La ayuda de los algoritmos de aprendizaje automático y modelos estadísticos pueden proporcionar previsiones precisas sobre posibles picos de emisiones así se consigue hacer un análisis de riesgos donde se enfoque en un análisis exhaustivo de los riesgos ambientales asociados con las emisiones, incluyendo impactos potenciales en la salud pública y el medio ambiente.

Basar la priorización de las medidas de mitigación en el análisis de riesgos, enfocándose primero en las acciones que pueden generar los mayores beneficios en términos de reducción de emisiones y mitigación de riesgos, para evaluar el impacto potencial de diferentes medidas de mitigación antes de su implementación permitiendo ajustar y optimizar las estrategias con base en los resultados simulados.

La implementación escalonada consiste en aplicar las medidas de mitigación de manera escalonada, comenzando con proyectos piloto y expandiendo las acciones basadas en los aprendizajes y resultados obtenidos. para que con esas medidas se logre posteriormente hacer un monitoreo en tiempo real que permitan la recolección de datos en tiempo real sobre las emisiones y la efectividad de las medidas de mitigación. [140]

En cuanto se tengan los datos se debe realizar un ajustes basados en estos mismos para así establecer un proceso de retroalimentación continua donde los datos recogidos se utilizan para ajustar y mejorar las estrategias de mitigación de manera dinámica; esto puede conllevar a una colaboración multisectorial con la que se fomenta la colaboración entre diferentes sectores, incluyendo gobiernos, empresas, y organizaciones no gubernamentales, para compartir conocimientos y recursos que faciliten la implementación efectiva de las medidas de mitigación.

Las evaluaciones y reporte de resultados se hacen teniendo en cuenta una cantidad de indicadores de rendimiento con los cuales se logra establecer esquemas claros para evaluar la efectividad de las medidas de mitigación, tales como la reducción de toneladas de CO₂ equivalente manteniendo así la transparencia en los resultados

obtenidos y reportar regularmente a los sobre el progreso y los desafíos encontrados en la implementación de las medidas de mitigación.

3.5. Ejemplo de proyectos internacionales de mecanismos de desarrollo limpio que promueven la analítica de datos

En el esfuerzo global para combatir el cambio climático y promover el desarrollo sostenible, el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) se ha convertido en una herramienta importante. Estos proyectos no sólo tienen como objetivo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también utilizan tecnologías avanzadas y métodos innovadores para optimizar el uso de recursos y minimizar el impacto ambiental. El análisis de datos juega un papel clave en la gestión y evaluación de estos proyectos, proporcionando herramientas para monitorear el desempeño, mejorar la eficiencia y garantizar la transparencia. A continuación, se muestran algunos ejemplos notables de proyectos internacionales del MDL que han incorporado el análisis de datos en sus estrategias de sostenibilidad y reducción de gases de efecto invernadero. Estos proyectos ilustran cómo la aplicación de datos y tecnología puede transformar industrias tan diversas como la gestión de residuos, la producción de energía renovable y la eficiencia industrial, generando importantes beneficios ambientales para la escuela, la economía y la sociedad.

3.5.1. Proyecto de Captura de Metano en Vertedero Doña Juana, Colombia

Implementación de un sistema de captura y aprovechamiento del gas de vertedero para generar electricidad. Este proyecto tiene como objetivo implementar un sistema para capturar y utilizar el metano producido en el vertedero de Doña Juana en Bogotá, Colombia. El metano, un potente gas de efecto invernadero, se captura y se utiliza para generar electricidad. Este sistema no sólo reduce las emisiones de metano, sino que también proporciona a la sociedad local energía renovable.[141] Han logrado reducir significativamente las emisiones contribuyendo a la mitigación de la ciudad de Bogotá además de generar electricidad a partir del gas de vertedero proporciona una fuente de energía renovable, beneficiando a la comunidad local y reduciendo la dependencia de fuentes de energía no renovables.

3.5.2. *Parque Eólico Los Cocos, República Dominicana*

El Parque Eólico Los Cocos es un proyecto de energía renovable que implica la construcción de turbinas eólicas para aprovechar la energía eólica y generar electricidad en República Dominicana. Este proyecto tiene como objetivo reducir la dependencia de los combustibles fósiles y reducir las emisiones de CO₂, [142] logro proporcionar una fuente sostenible y limpia de energía, disminuyendo la dependencia de fuentes de energía no renovables además del desarrollo económico local mediante la creación de empleos.

3.5.3. *Proyecto de Reforestación en el Amazonas, Brasil*

Plantación de árboles en áreas deforestadas y protección de bosques existentes para mejorar la absorción de CO₂. Este proyecto involucra la plantación de árboles en áreas deforestadas y la protección de bosques existentes en el Amazonas, Brasil. La reforestación y conservación de estos bosques mejora la absorción de CO₂ de la atmósfera, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y a la conservación de la biodiversidad, con esto se ha logrado reforestar y conservar bosques que aumentan la absorción de CO₂, ayudando a combatir el cambio climático junto al impulso de desarrollo sostenible de las comunidades locales. [143]

3.5.4. *Mejora de Eficiencia Energética en Planta Cementera, India*

Implementación de tecnologías avanzadas para mejorar la eficiencia energética en una planta de producción de cemento. El proyecto en una planta cementera en India se enfoca en la implementación de tecnologías avanzadas para mejorar la eficiencia energética. Esto incluye la modernización de equipos y procesos para reducir el consumo de energía y las emisiones de CO₂ asociadas con la producción de cemento; logro tener una eficiencia energética muy grande aumentando la competitividad de la planta cementera mediante la reducción de costos operativos y de sostenibilidad. [144]

3.5.5. Proyecto de Captura de Metano en Vertedero Bantar Gebang, Indonesia

El proyecto en el vertedero de Bantar Gebang, uno de los más grandes de Indonesia, implica implementar un sistema para capturar y utilizar metano para producir electricidad. El metano se extrae y se convierte en energía, reduciendo así las emisiones de gases de efecto invernadero, logro generar ingresos a través de la venta de electricidad y mejora la gestión de residuos, ya que la ciudad de Bantar Gebang alberga grandes cantidades de residuos que permiten un gran aprovechamiento de estos. [145]

3.5.6. Proyecto de Energía Solar en Gujarat, India

Este proyecto tiene como objetivo instalar paneles solares fotovoltaicos en Gujarat, India, para generar electricidad a partir de energía solar. La energía generada reduce la dependencia de fuentes de energía fósiles y reduce las emisiones de CO₂; a su vez lograron producir alrededor de 20000 KW diarios para la alimentación constante de la ciudad y provincias aledañas. [145]

3.5.7. Proyecto de Biogás en Granja Lechera, Nueva Zelanda

Un proyecto en una granja lechera de Nueva Zelanda implicó convertir estiércol de vaca en biogás mediante digestores anaeróbicos. El biogás resultante se utiliza para producir electricidad y calor, reduciendo así las emisiones de metano y CO₂. [146]

3.5.8. Proyecto de Eficiencia Energética en Planta de Acero, China

Este proyecto implementó mejoras tecnológicas en una acería en China para mejorar la eficiencia energética. Se están implementando sistemas avanzados de optimización de procesos y recuperación de calor para reducir el consumo de energía y las emisiones de CO₂, con esto se logró mejorar la eficiencia de los procesos industriales de la ciudad disminuyendo las emisiones asociadas con la producción de acero. [147]

3.5.9. Proyecto de Energía Hidroeléctrica en el Río Juruena, Brasil

Una planta hidroeléctrica en el río Juruena en Brasil utiliza el flujo del río para generar electricidad sin construir grandes represas, minimizando así el impacto ambiental. La hidroelectricidad producida es una fuente renovable que reduce la dependencia de los combustibles fósiles. [148]

3.5.10. Proyecto de Cogeneración en Planta de Azúcar, México

Como parte de un proyecto llevado a cabo en un ingenio azucarero en México, se utilizó bagazo como combustible en un sistema de cogeneración para producir electricidad y calor. Esto reduce la dependencia de los combustibles fósiles, aunque también logra reducir las emisiones de CO₂ por lo que es un proyecto bastante eficaz para diferentes aspectos, contando también que está ubicado en pueblos sin avances tecnológicos muy altos.

3.6. Estrategia de analítica de datos de los proyectos

La estrategia de análisis de datos para proyectos MDL PE en Colombia tiene como objetivo analizar la tecnología y las emisiones de gases de efecto invernadero en los ecoparques con base en la base de datos presentada. Los proyectos MDL bajo el Protocolo de Kyoto se han convertido en una herramienta importante para ayudar a los países a cumplir sus compromisos de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En este contexto, los ecoparques juegan un papel importante en la mitigación del cambio climático, ya que protegen la biodiversidad y contribuyen a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a través de tecnologías y medidas sostenibles diferentes fuentes de conocimiento Información para este análisis.[149]

El principal objetivo de esta estrategia es analizar las tecnologías utilizadas y las emisiones de gases de efecto invernadero en los ecoparques para identificar tendencias y evaluar la efectividad de las tecnologías implementadas. A partir de este análisis, nuestro objetivo es proponer mejoras para optimizar futuras iniciativas de

reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en Colombia, logrando así un impacto ambiental más positivo.

Para lograr este objetivo se ha propuesto un método basado en técnicas avanzadas de análisis de datos. Primero se realizará la recopilación y limpieza de datos para garantizar que se eliminen los datos incompletos o inconsistentes luego se realiza un análisis de datos exploratorios (EDA), incluidas estadísticas descriptivas y visualización de datos, para identificar patrones y tendencias. Posteriormente se utilizarán modelos estadísticos y algoritmos de aprendizaje automático para analizar la relación entre las tecnologías utilizadas y las emisiones de gases de efecto invernadero, así como para predecir y clasificar la efectividad de cada tecnología.

Finalmente, se evaluarán los resultados obtenidos en base a las metas marcadas en los proyectos MDL y se harán recomendaciones para mejorar la efectividad de los ecoparques en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, a partir de eso se identifica por qué estas tecnologías son tan efectivas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. [149]

Esto ayudará a optimizar la asignación de recursos para maximizar el impacto ambiental positivo, y los datos y análisis pueden ayudar a desarrollar políticas públicas más efectivas para combatir el cambio climático. Por lo tanto, implementar esta estrategia de análisis de datos ayudará a comprender mejor el impacto de la tecnología en los ecoparques y apoyará la toma de decisiones y la mejora continua de las iniciativas de reducción para minimizar el cambio climático.

El análisis de datos (también conocido como data analytics) es el proceso de recopilar, transformar y organizar datos para sacar conclusiones, hacer predicciones y tomar decisiones informadas, lo que implica examinar conjuntos de datos para descubrir patrones, tendencias y relaciones que pueden ser útiles para comprender un fenómeno o resolver un problema. Resulta ser un proceso que se lleva a cabo en muchos campos, como el análisis de datos, las estadísticas, la investigación de mercado y el análisis empresarial.

Existen varios modelos diferentes de análisis de datos, como análisis descriptivo, análisis de diagnóstico, análisis predictivo y análisis prescriptivo, cada uno es fundamental para campos específicos pero poseen un significado único para cada uno, como al análisis descriptivo el cual se enfoca en resumir y describir datos, mientras que el análisis de diagnóstico implica identificar las causas de los patrones y tendencias en datos, mientras que por último está el análisis predictivo implica el uso de datos y algoritmos de aprendizaje automático para predecir eventos futuros, mientras que el análisis prescriptivo implica el uso de datos y algoritmos para recomendar acciones que se deben realizar.

El ciclo de vida del análisis de datos normalmente incluye varias etapas: recopilación de datos, limpieza de datos, extracción y visualización de datos, modelado de datos e interpretación y comunicación de resultados. Las mejores prácticas de análisis de datos incluyen elegir la fuente de datos adecuada, limpiar y preprocesar los datos, utilizar técnicas de visualización de datos adecuadas y garantizar la confiabilidad y precisión de los resultados. [150]

El análisis de datos tiende a ser predictivo y abre muchas posibilidades nuevas, incluidas mejoras iterativas en los algoritmos de aprendizaje automático (ML) que sustentan gran parte de la inteligencia artificial (IA); además mejora significativamente la eficiencia del análisis y la toma de decisiones en las organizaciones, donde el objetivo es aprovechar la creciente cantidad de datos, para la recopilación de datos eficaz de los mismos.

Los datos a menudo se recopilan en forma cruda (tablas, gráficos, archivos de registro) y no tienen valor a menos que se procesen con esto es donde entra en juego el análisis de datos, ya que los datos sin procesar recopilados de diversas fuentes se analizan para extraer información útil, esto suele estar a cargo de analistas y, a veces, ingenieros donde observan todo el rompecabezas de los datos, lo comprenden (limpiando, transformándolo, modelando) y finalmente identifican el modelo e ideas relevantes para su uso a través de la creación de paneles e informes que resultan eficaces para el futuro de organizaciones especializadas.[151]

3.6.1. Importancia en Proyectos MDL y Parques Ecológicos

En el contexto de los proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y parques ecológicos, la analítica de datos juega un papel crucial para la evaluación [152]:

- **Evaluar la Efectividad:** Medir el impacto de tecnologías implementadas en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Esto incluye el seguimiento y la verificación de las reducciones de emisiones logradas por proyectos específicos.
- **Optimizar Esfuerzos de Mitigación:** Identificar estrategias más efectivas y eficientes para mitigar el cambio climático. Esto puede implicar el uso de modelos predictivos para anticipar los resultados de diferentes intervenciones y seleccionar las más prometedoras.
- **Tomar Decisiones Informadas:** Basar decisiones en datos sólidos y análisis rigurosos para maximizar los beneficios ambientales y económicos. La analítica prescriptiva puede proporcionar recomendaciones concretas para mejorar la gestión de proyectos y políticas ambientales.
- **Monitorear el Progreso:** Realizar un seguimiento continuo del desempeño de los proyectos para asegurar que se cumplan los objetivos establecidos y realizar ajustes necesarios en tiempo real.

Donde además existen algunos beneficios esenciales para que se pueden obtener por este método, como la mejora en la toma de decisiones con la cual se proporciona información basada en datos que apoya decisiones estratégicas y tácticas, la eficiencia operativa con la cual se logra identifica áreas de mejora y optimización en procesos y operaciones y por último la innovación y competitividad la cual facilita la identificación de nuevas oportunidades de negocio y tendencias emergentes.

3.6.2. Condiciones meteorológicas y terrenos

Una de las principales preocupaciones de los vertederos es la generación de contaminantes del aire, como gases de efecto invernadero y compuestos orgánicos volátiles, que pueden afectar significativamente la calidad del aire y la salud de la

comunidad circundante. Por tanto, se debe prestar especial atención a las condiciones meteorológicas que influyen en la dispersión y concentración de contaminantes en la atmósfera.

Comprender cómo factores como la temperatura, la velocidad y dirección del viento, la humedad y la estabilidad atmosférica afectan la distribución de los contaminantes es importante para desarrollar modelos precisos para predecir y reducir la contaminación en estos lugares. [152]

Las condiciones meteorológicas juegan un papel decisivo en la dinámica de la contaminación del aire en los vertederos. Por ejemplo, la velocidad y dirección del viento pueden influir en la dispersión de gases y partículas, y la temperatura y la humedad pueden influir en la formación de compuestos secundarios en la atmósfera. Además, la estabilidad atmosférica puede determinar la altitud a la que se propagan los contaminantes y su persistencia en el entorno.

Las precipitaciones y las condiciones climáticas también juegan un papel decisivo en la dinámica de la contaminación del aire en los vertederos. La precipitación puede tener efectos tanto positivos como negativos sobre la dispersión y concentración de contaminantes.

a. Efectos de la lluvia

Para la eliminación de contaminantes se tiene en cuenta la lluvia ya que puede ayudar a eliminar contaminantes de la atmósfera al depositar gases y partículas en el suelo. Este fenómeno, llamado "asociación del aire", reduce temporalmente la concentración de contaminantes en el aire, mejorando la calidad del aire en la zona.

En cuanto al aumento de las emisiones se deben tener en consideración que las lluvias también pueden aumentar las emisiones de gases de efecto invernadero como el metano, debido a que cuando el agua de lluvia ingresa a los vertederos, puede acelerar la descomposición anaeróbica de la materia orgánica, aumentando la producción de metano y dióxido de carbono.

Además, el agua puede movilizar compuestos orgánicos volátiles (COV) de los vertederos a la atmósfera. A su vez generando y formando lixiviados donde la intrusión de aguas pluviales puede provocar problemas en la tierra del relleno, un líquido altamente contaminante que se forma cuando el agua se filtra a través de desechos sólidos. Este lixiviado puede contener altos niveles de contaminantes químicos y orgánicos que, si no se manejan adecuadamente, pueden filtrarse al suelo y al agua subterránea, afectando la calidad del agua y la salud ambiental.

También es adecuado ver como Fenómenos climáticos extremos donde el cambio climático está aumentando la frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos, como tormentas y huracanes, que pueden tener impactos significativos en los vertederos. Las tormentas severas pueden causar daños estructurales a las instalaciones de manejo de desechos, liberar repentinamente grandes cantidades de contaminantes y aumentar el riesgo de incendios en los vertederos.

Se pueden llegar a generar patrones de viento y temperatura por lo tanto dichos cambios en los patrones de viento y temperatura debidos al cambio climático pueden alterar la trayectoria de los contaminantes. Dando, por ejemplo, un aumento exponencial de las temperaturas puede aumentar la formación de ozono a nivel del suelo, un contaminante secundario que se forma a partir de una reacción química entre los COV y los óxidos de nitrógeno (NOx) cuando se exponen a la luz solar.

Los cambios en la estabilidad atmosférica pueden llegar a verse alterados por el cambio climático, afectando la capacidad de la atmósfera para mezclar y diluir contaminantes. Una atmósfera más estable podría atrapar contaminantes cerca del suelo, aumentando sus concentraciones y potencialmente impactando negativamente la salud pública y el medio ambiente. [154]

Para minimizar el impacto de la contaminación del aire en los vertederos, es importante implementar estrategias de gestión y control basadas en la comprensión de las condiciones meteorológicas y climáticas.

- Monitoreo del clima. Implementar sistemas de monitoreo climático continuo para predecir y gestionar eventos extremos y condiciones climáticas que puedan exacerbar las emisiones contaminantes.
- Mejorar la infraestructura: Fortalecer la infraestructura de los vertederos para resistir eventos climáticos extremos y minimizar las fugas de contaminantes. Recuperación y tratamiento de gases: Instalar sistemas de recuperación y tratamiento de gases para reducir los gases de efecto invernadero y los compuestos orgánicos volátiles.
- Gestión de lixiviados donde se deben Implementar sistemas eficaces de gestión de lixiviados para prevenir la contaminación del suelo y las aguas subterráneas.[154]

Una vez explicado la importancia meteorológica se hará énfasis en un elemento de análisis de vientos denominado como rosa de vientos como se muestra a continuación:

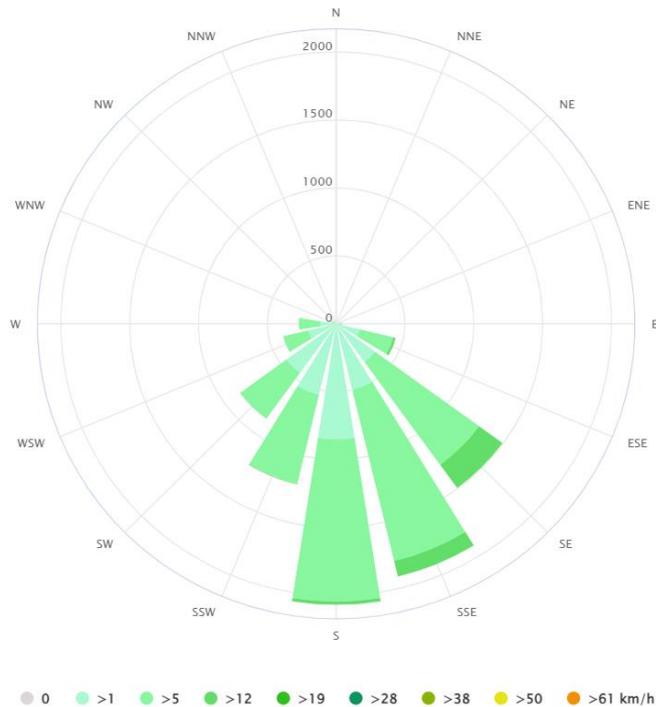
b. Rosa de vientos

Las rosas de vientos son herramientas utilizadas en la cartografía y la navegación para indicar la dirección del viento en un lugar y momento determinados. Estas imágenes se encuentran a menudo en cartas y cartas náuticas y se representan como una rosa estilizada con muchos "pétalos" que representan las direcciones mayor y menor, así como la fuerza o intensidad del viento. La rosa de vientos clásica o más usada se divide en 16 puntos cardinales, incluidos los puntos cardinales (norte, sur, este, oeste) y puntos intermedios (noreste, sureste, suroeste, noroeste), cada dirección se representa como un pétalo de flor. Además, algunas rosas de los vientos tienen divisiones más pequeñas que indican la dirección con mayor precisión. [155]

Cada pétalo de rosa de los vientos está marcado con una abreviatura para indicar la dirección como se muestra en la figura 27 donde se observa N para el norte, NE para el noreste, etc; donde además se utilizan códigos de colores o símbolos para indicar la fuerza del viento en cada dirección.

Figura 27.

Rosa de vientos establecida en la ciudad de Bogotá.



Nota. Se presenta un ejemplo de las rosas de viento, viendo cómo se establece en la capital de Colombia. Tomado de: https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/bogot%C3%A1_1_colombia_3688689

A nivel colombiano, las rosas de vientos son una herramienta esencial para comprender y visualizar las condiciones climáticas relacionadas con el viento en diferentes regiones del país. Debido a que Colombia es geográficamente diversa, desde las costas del Caribe y el Pacífico hasta los Andes y la selva amazónica, las condiciones climáticas varían ampliamente de una región a otra.

Las rosas de los vientos colombianas se utilizan en una variedad de contextos, que incluyen [155]:

- **Navegación marítima y fluvial:** En las costas y ríos navegables de Colombia, las rosas de los vientos eran fundamentales para que navegantes y navegantes entendieran la dirección y fuerza de los vientos que afectan la navegación y la seguridad en el agua.

- **Aeronave:** En los aeropuertos y helipuertos de Colombia, las rosas de los vientos son herramientas importantes para pilotos y controladores de tránsito aéreo. Les proporcionan información importante sobre las condiciones del viento durante el despegue y el aterrizaje, así como durante todo el vuelo.
- **Agricultura:** En la agricultura, especialmente en áreas como la región cafetera de Colombia, las rosas de los vientos ayudan a los agricultores a comprender los patrones del viento que pueden afectar el crecimiento de los cultivos y la propagación de plagas.
- **Meteorología:** En meteorología, las rosas de los vientos se utilizan para recopilar datos del viento en diferentes regiones del país, lo que ayuda a los meteorólogos a pronosticar el tiempo y comprender los patrones climáticos en todo el país.
- **Diseño de infraestructura:** Al diseñar y planificar infraestructuras como edificios, puentes e instalaciones energéticas, se tienen en cuenta las comisiones eólicas para determinar la resistencia al viento y garantizar la seguridad de las estructuras.

Para obtener información más detallada y específica sobre las rosas de vientos para estas ciudades, se revisaron las bases de datos históricas del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia) y se hizo uso de herramientas meteorológicas avanzadas disponibles en línea. Estos recursos lograron proporcionar una visión precisa y detallada de los patrones de viento, ayudando a planificar y tomar decisiones informadas en diversos aspectos. [156]

Para cada uno de los escenarios se debe tener en cuenta que las condiciones del viento en Colombia pueden variar mucho según la zona geográfica y la época del año dado que, por ejemplo, las zonas del Caribe pueden experimentar vientos alisios constantes, mientras que las zonas montañosas pueden experimentar vientos variables debido a la topografía.

3.6.3. Condiciones meteorológicas y terrenales de la ciudad de Pasto

Pasto, ubicado en las montañas de Colombia, se ve influenciado por los vientos dependiendo de la altitud y la ubicación geográfica. Los vientos en Pasto varían dependiendo de la temporada, prevaleciendo los vientos alisios del sureste la mayor

parte del año. Estos vientos de Alisios son permanentes y suelen provenir del Océano Pacífico, proporcionando una atmósfera fresca y húmeda para la ciudad. En algunos puntos, el viento es el más fuerte de los fenómenos atmosféricos locales. Las rosas de los vientos de Pasto son una herramienta importante para comprender la dirección y la fuerza del viento, especialmente en áreas montañosas donde el terreno puede afectar la velocidad y dirección del viento. Esto es especialmente importante en áreas como el transporte aéreo y fluvial, la agricultura y la planificación urbana.[157]

- A. Ubicación:** Pasto es la capital de la provincia de Nariño, ubicada en el suroeste de Colombia, cerca de la frontera con Ecuador.
- B. Clima:** Pasto tiene un clima alpino subtropical (clasificación climática de Köppen [158] con temperaturas bajas durante todo el año debido a la altitud.
- C. Actividad económica:** La economía de Pasto se basa en la agricultura (papa, maíz, café), ganadería, comercio y servicios.

Ubicada en un valle rodeado de majestuosas montañas y dominado por el impresionante volcán Galeras, Pasto es una ciudad donde el viento se convierte en el narrador del paisaje andino. Aquí, aunque el viento es suave, lleva consigo el frescor del altiplano, acariciando los tejados de las casas y los campos como susurrando secretos ancestrales. La dirección del viento predominante en Pasto suele soplar del Norte y Noroeste, a través de los valles y cañones que rodean la ciudad.

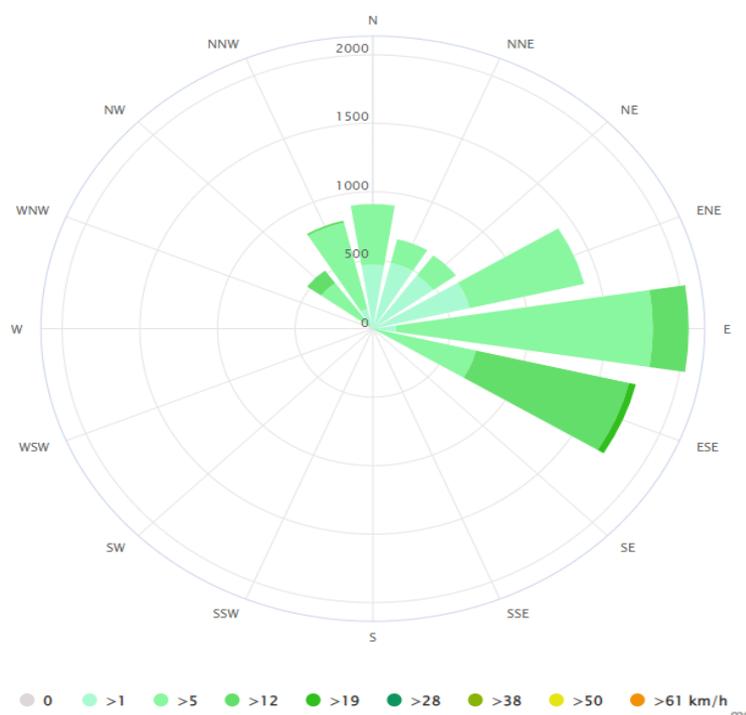
Este flujo constante de aire es como una suave caricia, rara vez interrumpida por fuertes vientos, excepto al mediodía, cuando el calentamiento del día crea corrientes de viento que amplifican su presencia. En la estación seca, el viento se vuelve más juguetón, circulando más libremente por las calles, y en la estación lluviosa su comportamiento es más comedido, como respetando la severidad de las fuertes lluvias que nutren la fertilidad de la región. [159]

A continuación, se puede observar la Figura 28 la cual representa la rosa de vientos habitual presente en la ciudad de Pasto mostrando las siguientes especificaciones:

- ❖ **Dirección predominante:** Los vientos predominantes suelen venir del norte y noroeste. Esto se debe a la configuración del valle en el que se encuentra la ciudad, que canaliza el flujo de aire en estas direcciones.
- ❖ **Velocidad:** Los vientos suelen ser moderados, con velocidades típicas que oscilan entre 10 y 20 km/h. Sin embargo, puede haber incrementos en las tardes debido a los efectos de calentamiento diurno y enfriamiento nocturno.
- ❖ **Estacionalidad:** Durante la temporada seca (de junio a septiembre), los vientos pueden ser más constantes y predecibles, mientras que en la temporada de lluvias (de octubre a mayo), los patrones de viento pueden volverse más variables.

Figura 28.

Rosa de vientos Pasto, Colombia.



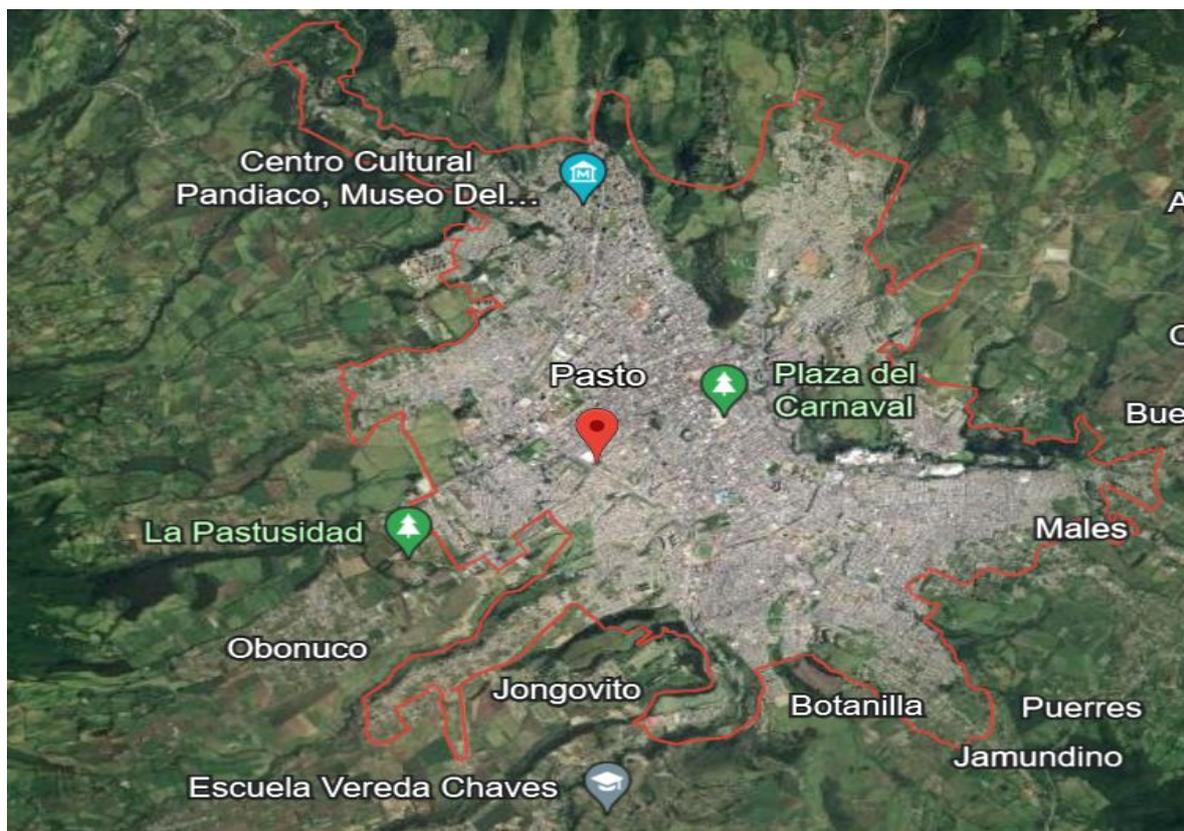
Nota. Rosa de vientos de la ciudad de Pasto del año 2022. Tomado de: [\[https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/pasto_colombia_3672778\]](https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/pasto_colombia_3672778)

Pasto, con una población de alrededor 450.000 personas, está situada en una zona montañosa favorable a la dirección y dirección del viento por lo que la ciudad es un

importante centro urbano y agrícola en el suroeste de Colombia, generando una variedad de contaminantes. Los sectores más contaminantes de la ciudad incluyen la producción, transporte e incineración de desechos agrícolas, que contribuyen significativamente a la contaminación del aire. Además, la topografía del valle puede atrapar contaminantes, exacerbando los problemas de calidad del aire, especialmente durante períodos de mala ventilación atmosférica. En la figura 29 se observa la superficie completa de la ciudad con un total de 1181 km² y una altura de 2527 metros sobre el nivel del mar.

Figura 29.

Terreno y limitaciones de la ciudad de Pasto.



Nota. Terrenos de la ciudad de Pasto. Tomado de: google earth.

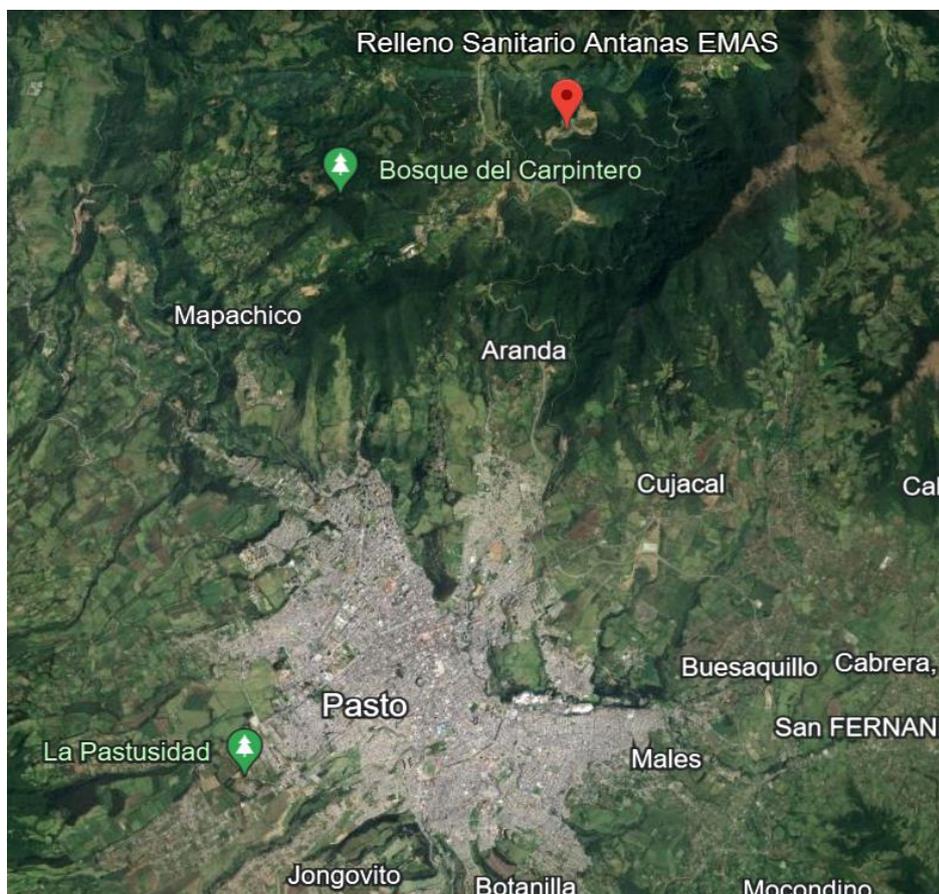
El relleno sanitario Atanas EMAS (Empresa Metropolitana de Aseo de Pasto) es también conocido como el Parque Tecnológico Ambiental Antanas o en sus siglas PTAA, creado por Emas Pasto con el objetivo de gestionar adecuadamente los residuos sólidos y minimizar su impacto ambiental. En cuanto a su ubicación y dimensiones el PTAA se encuentra a unos 13 kilómetros al sureste de Pasto como se

puede observar en la Figura 30 además ocupa una extensión de aproximadamente 100 hectáreas.

Sus funciones y características son más desarrolladas a diferencia de los rellenos tradicionales, ya que posee un diseño para integrarse con el entorno natural contando con amplias zonas verdes, senderos y espacios educativos. El parque alberga un aula ambiental donde se imparten clases sobre ecología, manejo de residuos y conservación. También cuenta con un centro agroecológico, donde se promueve la agricultura sostenible y la producción de alimentos orgánicos. Siendo más específicos posee un impacto positivo ya que ha logrado reducir significativamente la cantidad de residuos que llegan al relleno sanitario convencional.

Figura 30.

Distancia entre la ciudad de Pasto y el relleno sanitario Antanas EMAS.



Nota. Distancia entre la ciudad de Pasto y el relleno sanitario Antanas EMAS. Tomado de: google earth.

El relleno está estratégicamente ubicado cerca de la ciudad de Pasto, lo que facilita el transporte y manejo de residuos desde la ciudad hasta la instalación. La ubicación también se seleccionó considerando factores ambientales para minimizar los impactos negativos en las áreas circundantes, la ubicación en concreto se muestra en la figura 31. Además, está diseñado con capacidad para manejar grandes volúmenes de residuos sólido con un estimado diario alrededor de 300 toneladas de residuos sólidos municipales, lo que representa una cantidad significativa considerando la población y el tamaño de la ciudad donde se hace uso de tecnologías avanzadas para la compactación de residuos y la cobertura diaria, lo que ayuda a controlar los olores y a reducir la presencia de vectores como insectos y roedores. Además, cuenta con sistemas de monitoreo para garantizar el cumplimiento de las normativas ambientales.

Figura 31.

Ubicación del relleno sanitario Antanas EMAS.



Nota. Ubicación del relleno sanitario Antanas EMAS. Tomado de: google earth.

3.6.4. Condiciones meteorológicas y terrenales de la ciudad de Bucaramanga

Bucaramanga, ubicada en la región andina de Colombia, está influenciada por los vientos, influenciados por su ubicación geográfica y clima cálido montañoso. Los vientos en Bucaramanga suelen ser suaves y constantes, con brisas agradables que soplan desde diferentes direcciones según la temporada. Durante la temporada de lluvias, es posible que haya vientos más fuertes debido a los patrones atmosféricos regionales.

La comisión eólica de Bucaramanga es importante para comprender el impacto de los vientos locales en los edificios y la infraestructura urbana, así como para la navegación aérea en el aeropuerto de la ciudad. [160]

- **Ubicación:** Bucaramanga es la capital de la provincia de Santander, ubicada al noreste de Colombia, en la región Andina.
- **Clima:** Bucaramanga se caracteriza por un clima cálido montañoso (clasificación climática de Köppen) con temperaturas agradables todo el año y una temporada de lluvias de abril a noviembre.
- **Actividad económica:** La economía de Bucaramanga se basa en el comercio, la industria (textiles, alimentos, metalurgia), los servicios y la educación.

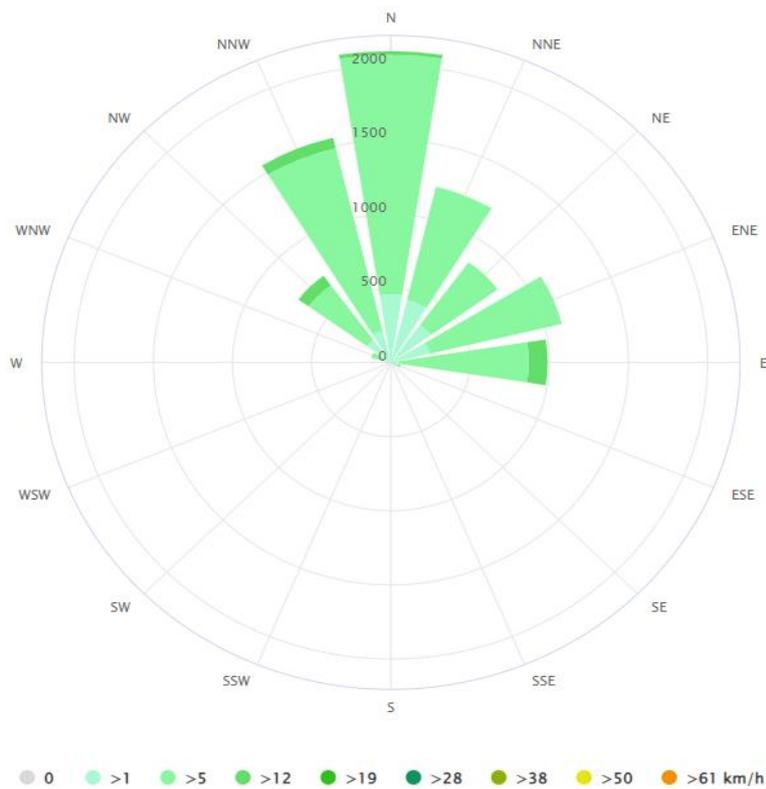
El viento en Bucaramanga suele soplar del Noreste y Este, trayendo consigo el frescor de las montañas y el aroma de la exuberante vegetación. La velocidad del viento aquí suele ser moderada o ligera, la suave brisa acaricia los rostros de los residentes, creando una atmósfera tranquila y confortable. La brisa del valle y la brisa de la montaña se notan especialmente por la tarde, cuando el sol comienza a ponerse y el aire fresco fluye por la ladera de la montaña, refrescando la atmósfera de la ciudad. Durante todo el año, el viento en Bucaramanga es constante, reflejando la estabilidad y tranquilidad de esta ciudad, aunque existen pequeños cambios estacionales que agregan dinamismo al clima templado. [161]

A continuación, se puede observar la Figura 32 la cual representa la rosa de vientos habitual presente en la ciudad de Bucaramanga mostrando las siguientes especificaciones:

- ❖ **Dirección predominante:** Los vientos en Bucaramanga suelen venir del noreste y este. Esto es influenciado por las corrientes de aire que se mueven a través de la cordillera.
- ❖ **Velocidad:** La velocidad del viento es generalmente baja a moderada, con vientos típicos que varían entre 5 y 15 km/h. Las brisas suelen ser más notables en las tardes y noches debido a los cambios de temperatura diurnos.
- ❖ **Estacionalidad:** Hay variaciones estacionales, pero los vientos suelen mantenerse relativamente constantes a lo largo del año, con algunas variaciones durante la temporada de lluvias.

Figura 32.

Rosa de vientos Bucaramanga, Colombia.

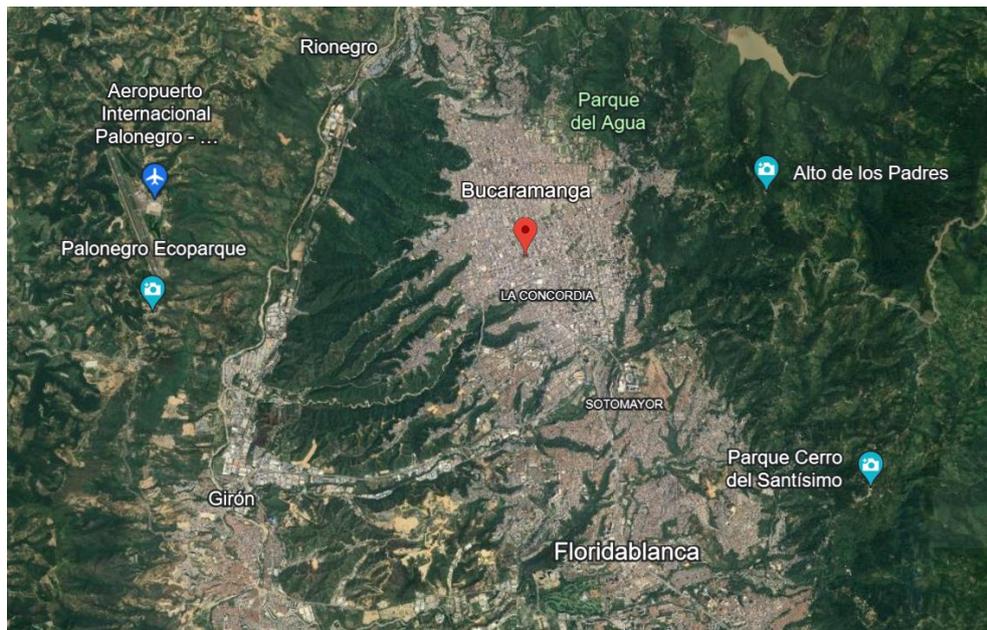


Nota. Rosa de vientos Bucaramanga. Tomado de: https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/bucaramanga_colombia_3688465

Bucaramanga, la capital del departamento de Santander en Colombia, es una ciudad con una población de aproximadamente 581,130 habitantes en 2024. La ciudad se extiende sobre una superficie de 165 kilómetros cuadrados, siendo un importante centro urbano y comercial de la región como se puede observar en la Figura 33, con una densidad de población de 3.548 personas/km². [162]

Figura 33.

Terreno y limitaciones de la ciudad de Bucaramanga.



Nota. Terreno y limitaciones de la ciudad de Bucaramanga. Tomado de: google earth.

La calidad del aire en Bucaramanga varía de buena a aceptable donde su principal contaminante identificado es el polvo fino (PM_{2,5}) además actualmente, la concentración de PM_{2,5} en Bucaramanga es 2,4 veces mayor que el valor anual recomendado por la OMS para la calidad del aire. Según el Índice de Calidad del Aire (ICA), los niveles de partículas en Bucaramanga han alcanzado valores que clasifican al aire como “moderado”, con un ICA de 55 y una concentración de PM_{2.5} de 2.2. Es varias veces superior a las directrices anuales de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS). [163]

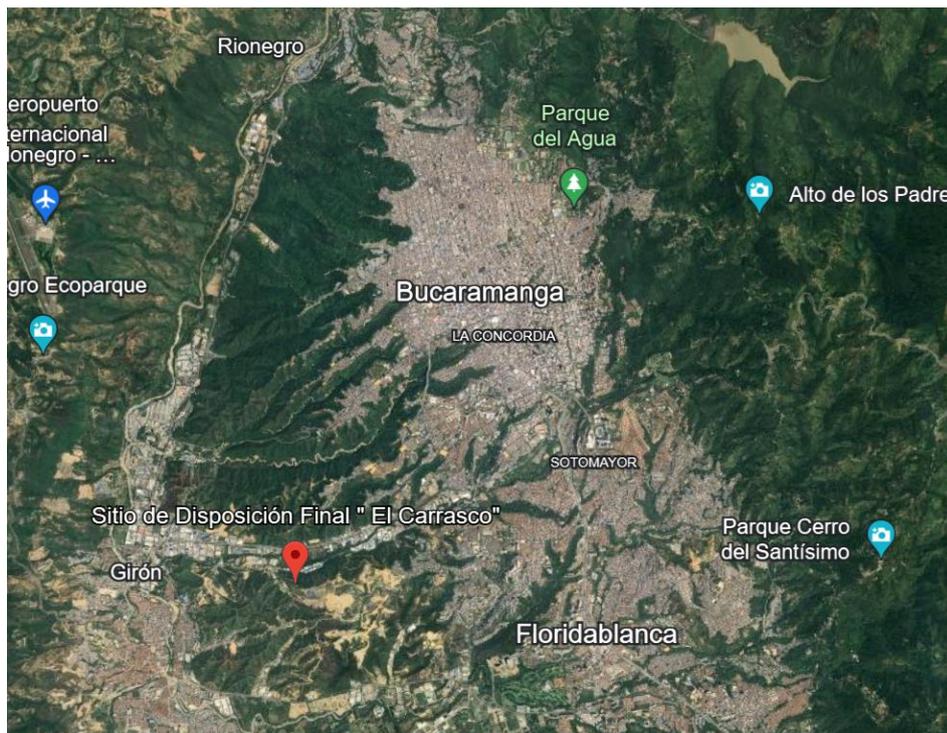
Las principales fuentes de contaminación en la ciudad son el transporte donde la combustión de vehículos es una de las mayores fuentes de emisiones contaminantes

en Bucaramanga debido a la alta densidad del tráfico y una gran cantidad de vehículos viejos que no cumplen con los estándares de emisiones actuales están teniendo un impacto significativo en el empeoramiento de la calidad del aire. En la figura 34 se logra observar la distancia entre el vertedero y la ciudad viendo que este se encuentra dentro de los límites de esta.

Las actividades de la industria y de construcción donde los trabajos en el sector y la construcción producen una gran cantidad de polvo y otros contaminantes que agravan la situación va con relación con condiciones meteorológicas, siendo un ejemplo claro el clima por la falta de lluvia y viento de contaminantes para recolectar la ciudad en el aire. Por último, se tiene los dilemas de incineración de desechos y materiales debido a las incineraciones de desechos y materiales como carbón y madera, tanto en áreas urbanas como suburbanas, contribuye significativamente a la contaminación del aire. [164]

Figura 34.

Distancia entre la ciudad de Bucaramanga y el relleno sanitario El Carrasco.



Nota. Distancia entre la ciudad de Bucaramanga y el relleno sanitario El Carrasco. Tomado de: google earth.

El relleno sanitario El Carrasco, ubicado en las afueras de la ciudad, es fundamental para el manejo de residuos sólidos en Bucaramanga y su área metropolitana, este relleno sanitario, que recibe aproximadamente 1,000 toneladas de basura diarias de 16 municipios circundantes, ha sido una fuente constante de conflictos y preocupaciones por su impacto en la salud pública y el medio ambiente. Sin embargo, la instalación ha sido una gran fuente de liberación y saneamiento debido a su impacto ambiental y capacidad, lo que genera algunas soluciones sobre la contaminación del aire, el agua y el suelo. Para minimizar estos impactos se han aplicado medidas como la captura y combustión de biogás, el tratamiento de lixiviados y el seguimiento ambiental continuo. Pese a estas acciones, el futuro de El Carrasco representado en la figura 35 sigue siendo incierto, con polémica por su cierre y la búsqueda de alternativas sostenibles como nuevos vertederos, plantas de reciclaje y proyectos de conversión de residuos en energía.

El tratamiento de lixiviados es un componente clave y utiliza tecnologías como biorreactores de contacto giratorio para reducir la carga orgánica y eliminar los contaminantes químicos de los lixiviados. Además, se utilizan técnicas de floculación y electrólisis para mejorar la calidad de las aguas residuales antes de ser vertidas al medio ambiente.

Figura 35.

Ubicación del relleno sanitario El Carrasco.



Nota. Ubicación del relleno sanitario El Carrasco. Tomado de: google earth.

3.6.5. **Condiciones meteorológicas y terrenales de la ciudad de Villavicencio**

Villavicencio, ubicada en la región de la Orinoquia de Colombia, está expuesta a los vientos debido a su clima de sabana tropical y su ubicación en la Llanura colombiana. El viento en Villavicencio es cálido y constante, soplando principalmente del este y noreste. Durante la temporada de lluvias pueden aparecer vientos más fuertes debido a los sistemas de convección locales. La rosa de los vientos de Villavicencio es fundamental para comprender cómo el viento afecta la agricultura, la ganadería y el turismo en la región de la Orinoquia, así como la seguridad de actividades como la aviación y el tráfico fluvial en el río Meta.[165]

- **Ubicación:** Villavicencio es la capital de la provincia del Meta, ubicada en la región de la Orinoquia en el centro-este de Colombia.
- **Clima:** Villavicencio tiene un clima de estepa tropical (clasificación climática de Köppen), con altas temperaturas durante todo el año y una marcada temporada de lluvias de abril a noviembre.
- **Actividad económica:** La economía de Villavicencio se basa en la agricultura (ganadería, arroz, palma aceitera), el comercio, la industria petrolera y el turismo.

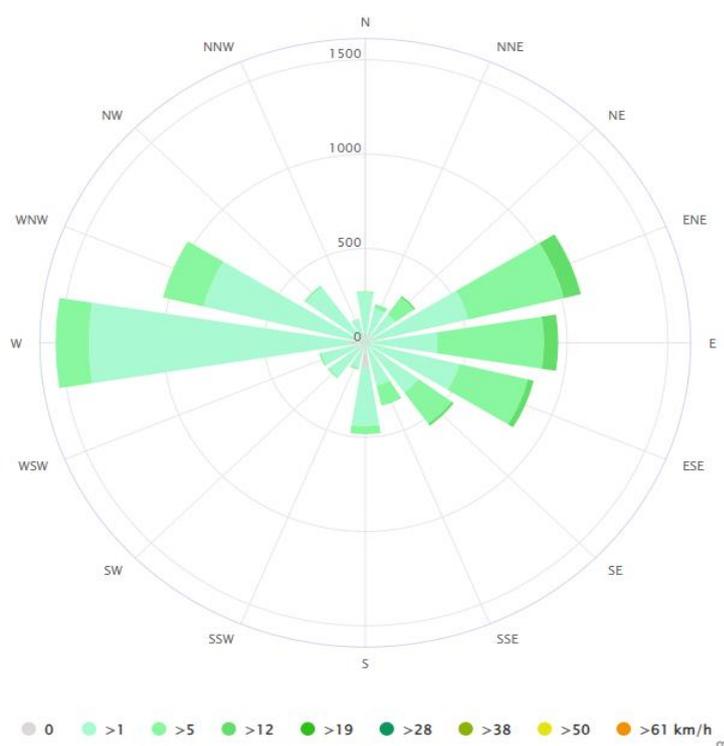
Los vientos en Villavicencio generalmente soplan del sureste y este, influenciados por las corrientes de aire que atraviesan la llanura y pasan por la ciudad. La velocidad del viento puede variar, pero los vientos de moderados a fuertes son comunes, especialmente durante la temporada de lluvias. Las tormentas convectivas no sólo traen fuertes lluvias sino también repentinas y fuertes ráfagas de viento que barren la ciudad, recordando a la gente el poder de la naturaleza. Durante la estación seca, los vientos se vuelven más continuos y débiles, transportando calor durante el día y enfriando las cálidas noches de la región. [166] A continuación, se puede observar la Figura 36 la cual representa la rosa de vientos habitual presente en la ciudad de Villavicencio mostrando las siguientes especificaciones:

- ❖ **Dirección predominante:** Los vientos predominantes vienen del sureste y este, influenciados por las corrientes de aire que cruzan las vastas llanuras.

- ❖ **Velocidad:** Los vientos en Villavicencio pueden ser moderados a fuertes, especialmente durante la temporada de lluvias. Las velocidades suelen oscilar entre 10 y 25 km/h, con ráfagas más fuertes durante las tormentas.
- ❖ **Estacionalidad:** Durante la temporada de lluvias (de abril a noviembre), los vientos pueden ser más intensos y variables debido a las tormentas convectivas. En la temporada seca (de diciembre a marzo), los vientos tienden a ser más constantes y menos intensos.

Figura 36.

Rosa de vientos Villavicencio, Colombia.



Nota. Rosa de vientos Villavicencio Tomado de: google earth.

https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/villavicencio_colombia_3665900

Conocida como la "Puerta del Llano", Villavicencio es una ciudad que actualmente experimenta un importante crecimiento y desarrollo. Es la ciudad más grande y dinámica de Meta con una población de más de 500.000 personas. Este crecimiento demográfico ha venido acompañado de un rápido desarrollo urbano e industrial, lo que ha traído consigo tanto beneficios económicos como desafíos ambientales. [167]

En términos de territorio, Villavicencio abarca una extensión aproximada de 1,328 kilómetros cuadrados como se observa en la Figura 37. Esta vasta región incluye áreas tanto urbanas como rurales y ofrece un paisaje diverso, desde áreas residenciales y comerciales hasta tierras de cultivo y reservas naturales. Esta expansión territorial también permitió la expansión de infraestructura y servicios, pero a veces el rápido crecimiento condujo a una expansión desordenada. Uno de los principales desafíos que enfrenta Villavicencio hoy es la calidad del aire. La contaminación del aire en las ciudades ha aumentado principalmente debido al aumento del tráfico, las actividades industriales y la quema de residuos. En determinadas épocas del año, los niveles de partículas (PM10 y PM2,5) y otros contaminantes como el dióxido de nitrógeno (NO₂) aumentan, lo que obliga a las autoridades locales a tomar medidas para controlar y mejorar la calidad del aire. Sin embargo, la conciencia ambiental y las políticas sostenibles intentan reducir el impacto negativo de este problema.

Una de las principales causas de la contaminación es el transporte. El número de vehículos ha aumentado significativamente en los últimos años. La ciudad ha ampliado su población de vehículos, incluidas muchas motocicletas y automóviles. La mayoría de estos vehículos son modelos antiguos que emiten altos niveles de contaminantes como dióxido de nitrógeno (NO₂) y polvo fino (PM10 y PM2,5), que tienen un efecto perjudicial sobre la salud respiratoria de los residentes. Las actividades industriales también inciden en la contaminación del aire en Villavicencio. [168]

La ciudad cuenta con varias industrias que utilizan combustibles fósiles en su producción. La quema de estos combustibles libera una variedad de contaminantes al aire, incluido el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO₂) y otros compuestos orgánicos volátiles. Estas emisiones no sólo afectan la calidad del aire, sino que también pueden tener un impacto negativo en el medio ambiente. Otra causa importante de la contaminación del aire es la quema de residuos y las prácticas agrícolas. La incineración de residuos agrícolas y desechos domésticos es común en las zonas rurales y suburbanas de Villavicencio. Estas prácticas liberan grandes cantidades de humo y partículas al aire, agravando los problemas de calidad del aire en la zona.

En respuesta a estos problemas, las autoridades locales han implementado medidas para monitorear y mejorar la calidad del aire. La estación de monitoreo se mide para medir los contaminantes y establecer políticas estrictas y se propone en términos de transporte y regulaciones de vehículos. Además, estamos esperando campañas de sensibilización para informar la importancia de las prácticas estables y responsables. [169]

Figura 37.

Terreno y limitaciones de la ciudad de Villavicencio.



Nota. Terreno y limitaciones de la ciudad de Villavicencio. Tomado de: google earth.

El Parque Ecológico Reciclante es un proyecto clave en Villavicencio, ubicado en el kilómetro 18 de la vía a Caños Negros, en la vereda San Juan Bosco. El vertedero tiene una superficie de 43,26 hectáreas y está dividido en varias celdas para la eliminación de residuos sólidos. La capacidad de instalación es de 7,198,230 toneladas para residuos y trabaja durante 33 años, la distancia entre la ciudad y el relleno sanitario se puede ver más a profundidad en la figura 38 con se logra evidencia la superficie del relleno sanitario.

Figura 38.

Distancia entre la ciudad de Villavicencio y el relleno sanitario parque ecológico Reciclante.



Nota. Distancia entre la ciudad de Villavicencio y el relleno sanitario parque ecológico Reciclante. Tomado de: google earth.

Los parques de procesamiento y ambiental no ofrecen servicios de Villavicencio, así como a otras administraciones locales en el departamento de Meta Departamento. Esta instalación juega un papel clave en la gestión de residuos sólidos y ayuda a reducir los problemas de contaminación que pueden surgir por la eliminación inadecuada de residuos. Bioagropecuaria del Llano, empresa responsable de la operación del vertedero, es responsable de minimizar los efectos negativos de las prácticas de gestión de residuos en el medio ambiente y la salud humana, asegurando el cumplimiento de la normativa ambiental vigente. [170]

Además, el procesamiento y los vehículos económicos son diferentes debido a la estabilidad y la recuperación de materiales reciclables. Bio agrícola Del Llano ha implementado una variedad de estrategias educativas y de concientización para gestionar adecuadamente los desechos fijos entre los ciudadanos, incluidos el alcalde y el tratamiento. Estas iniciativas tienen como objetivo mejorar la eficiencia de los rellenos sanitarios, así como promover una cultura ambientalmente responsable en Villavicencio. [171]

Figura 39.

Ubicación del relleno sanitario parque ecológico Reciclante.



Nota. Ubicación del relleno sanitario parque ecológico Reciclante. Tomado de: google earth.

La gestión y uso está a cargo de Bioagricola del Llano ya que es la empresa encargada de gestionar el ecoparque de reciclaje. La empresa es responsable de garantizar que todas las actividades de eliminación de residuos se realicen de acuerdo con la normativa medioambiental. Las responsabilidades incluyen el control de aguas residuales, la recolección y tratamiento de gases provenientes de la descomposición de desechos y el monitoreo continuo de los impactos ambientales. [172] El parque ecológico de reciclaje (Figura 39) promueve la sostenibilidad y el reciclaje, así como la eliminación de residuos. Bioagricola del Llano ha implementado programas de educación y concientización pública que promueven prácticas como la separación en origen y el reciclaje. Estas iniciativas son importantes para reducir la cantidad de residuos que terminan en los vertederos y aumentar la cultura de responsabilidad ambiental entre los vecinos de Villavicencio. Por lo tanto, tiene una importancia local no solo en Villavicencio, ya que el Parque de Reciclaje Ambiental recolecta residuos de otros gobiernos locales del Departamento del Meta y se ha consolidado como una instalación importante para el manejo de residuos locales. Sus

operaciones contribuyen al mejoramiento de las condiciones sanitarias y ambientales y a la mitigación de problemas asociados a la adecuada disposición de residuos.

3.7. Metodología para la gestión de los datos obtenidos de las bases de datos de los proyectos

Los procedimientos para la limpieza y preparación de los datos que sirven como fuente para la reducción de emisiones son datos recopilados y preprocesados para el desarrollo de los proyectos MDL por ello necesitan una serie de instrucciones específicas que luego permitirán realizar la publicación en los reportes de información del portal de MDL. Para ser más específico con las descripciones y procedimientos relacionados con los archivos de MDL, se tiene una guía detallada basada en las informaciones presentadas por la empresa Bionersis en cada uno de sus proyectos desarrollados a nivel latinoamericano y asiático. [173]

- **Determinación del Flujo de Gas Residual:** Determinación del flujo másico del gas residual que se quema donde se tiene una medición continua de la fracción volumétrica de metano en el gas residual (CH_4 , H) también se mide el flujo volumétrico del gas residual en base seca y condiciones normales.
- **Determinación de la Fracción de Componentes en el Gas Residual:** Se debe determinar la fracción másica de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno en el gas residual, se utiliza un analizador de gases para medir la fracción volumétrica de oxígeno y metano en el gas de escape.
- **Flujo Volumétrico del Gas de Escape:** Posteriormente se procede a la determinación del flujo volumétrico del gas de escape en base seca con el uso de termocuplas para medir la temperatura del gas de escape en la antorcha.
- **Flujo Másico de Metano:** Cálculo del flujo másico de metano del gas de escape en base seca, y este se calcula en base a la concentración de metano medida en el gas de escape.

- Flujo Másico de Metano en el Gas Residual: Como uno de los últimos pasos de procesamiento de datos se debe estimar el flujo másico de metano del gas residual en base seca, por ello, se tiene una conversión de unidades (de ppmv a mg/m³) utilizando el factor de conversión (0.7168 tCH₄/m³CH₄ a temperatura y presión estándar).
- Cálculo de Emisiones Anuales del Proyecto: Por último, se realiza la estimación de las emisiones anuales del proyecto a partir de los valores horarios medidos o valores predeterminados de eficiencia de la antorcha. El uso de la metodología logra simplificar las mediciones de la fracción volumétrica de metano en el gas residual y considerando el resto como nitrógeno.

Finalmente se plantea un plan de monitoreo y procedimientos de mantenimiento en donde se realizan diferentes transmisiones de datos recopilados en un sistema de adquisición de datos y se transmiten por módem a un servidor central para su posterior calibración ya que cada uno de los instrumentos de medición se calibran periódicamente según los procedimientos y métodos evaluados por el proyecto y así lograr la validación y verificación de actividades, por parte del Director de CDM & Carbon Finance mientras que el Gerente de Monitoreo es responsable de la recopilación y almacenamiento de datos de monitoreo. [174]

3.8. Variables y parámetros que afectan a los datos en los proyectos de mecanismo de desarrollo limpio en Colombia

A nivel colombiano y específicamente en departamentos como Meta, Santander y Nariño donde se ha experimentado un importante crecimiento en la actividad de emisiones generadas en las últimas décadas. La quema de residuos puede contribuir a las emisiones de GEI, especialmente si se trata de materiales orgánicos como la madera, el papel o los restos de alimentos. Durante la combustión, se liberan gases como el dióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄), que son dos de los principales gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global. Según el “Instituto de hidrología meteorología y estudios ambientales” (IDEAM) junto al “Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo” desde el año 2008 a la

actualidad la reducción de residuos por medio de quema dado en Gg CO₂ equivalente lo cual genera alrededor de 6% de la contaminación anual en Cundinamarca y 10% a nivel nacional [175].

En este contexto, es importante resaltar que la evaluación de los factores de emisiones contaminantes al aire solo se enfocará de manera cuantitativa para la zona de estudio establecida por los periodos dictaminados en proyectos CDM de los últimos 15 años, con el fin de entender mejor el impacto de esta actividad en la calidad del aire y en la salud de la población. Además, esta evaluación puede servir como base para el desarrollo de políticas y prácticas más sostenibles para el manejo y eliminación de residuos.

Una vez explicado el contexto y los avances vanguardistas de tecnología que se usa en los diferentes modelos y como estos tienen su importancia en los proyectos de MDL, se hará un énfasis en los proyectos de MDL realizados en Colombia con sus respectivas bases de datos. Para ello se van a tener en cuenta algunos aspectos que podrían llegar a afectar de manera significativa a la reducción y estimación de gases de efecto invernadero en los rellenos sanitarios de estudio. Los parámetros a tener en consideración reflejan las incógnitas que se podrían presentar cuando en los estudios de las bases de datos se reflejan problemas o inconvenientes externos o internos que logren afectar de manera significativa los resultados esperados; los aspectos que se tendrán en cuenta son el aumento de población de la ciudad de estudio (cantidad de habitantes), la economía de los departamentos en relación al aumento de PIB de los mismos y el crecimiento del área del relleno sanitario estudiado (m²), para cada aspecto se hará la revisión a lo largo de 20 años para tener una observación más específica y concreta de las posibles consecuencias y afectaciones que se hayan sufrido.

3.8.1. Aumento poblacional en ciudades que albergan los casos de estudio

a. Ciudad y alrededores de Pasto

La población de Pasto, Colombia, ha experimentado un crecimiento moderado en los últimos 20 años. Se presenta en la tabla 9 una lista de la población desde el año 2000

hasta el 2020, según datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística. [176] [177]:

Tabla 9.

Evolución de la población de Pasto.

Año	Cantidad aproximada de habitantes
2000	360,000
2001	364,000
2002	368,000
2003	372,000
2004	376,000
2005	385,527
2006	387,000
2007	389,000
2008	391,000
2009	393,000
2010	395,579
2011	396,000
2012	397,000
2013	398,000
2014	399,000
2015	396,389
2016	398,000
2017	399,000
2018	400,000
2019	401,000
2020	402,073

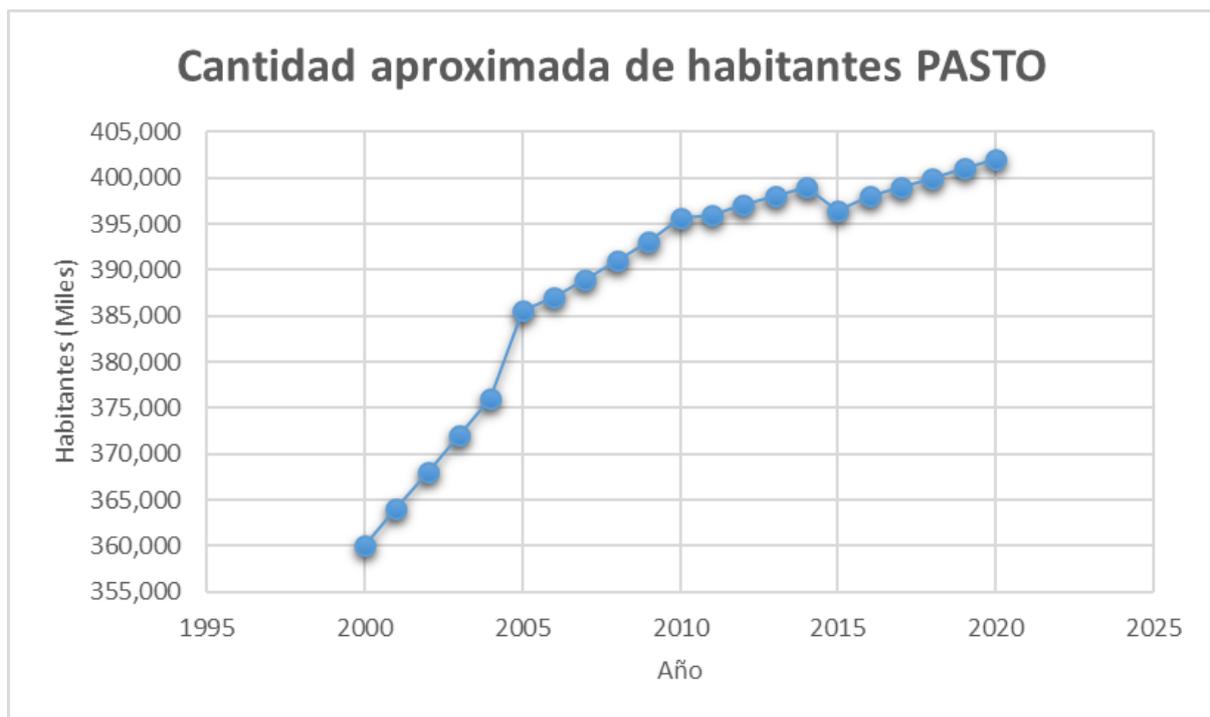
Nota. Se presenta una tabla para observar la evolución poblacional de la ciudad de Pasto, Colombia. Tomado de: «ATLAS DE AGLOMERACIÓN DE PASTO», Departamento Nacional de Planeación, 2019. https://osc.dnp.gov.co/administrator/components/com_publicaciones/uploads/Atlas_de_la_aglomeracin_de_Pasto.pdf

Con los datos anteriores se propone la siguiente gráfica (Figura 40) donde se puede observar de mejor manera el crecimiento poblacional de la ciudad, viendo como el

único año que no tuvo un crecimiento exponencial fue en 2015 debido a una serie de problemas socioeconómicos y ambientales en donde se destacó un conflicto armado interno que llevó a desplazarse a una parte de la población afectando de manera directa a la pobreza y el desempleo; no obstante se observa un crecimiento bastante grande desde hace años por lo que su economía ha crecido de gran manera como se verá más adelante. [178] [179].

Figura 40.

Gráfica de la evolución de habitantes de pasto.



Nota. Se presenta una gráfica para observar la evolución poblacional de la ciudad de Pasto, Colombia. Tomado de: «ATLAS DE AGLOMERACIÓN DE PASTO», Departamento Nacional de Planeación, 2019. https://osc.dnp.gov.co/administrator/components/com_publicaciones/uploads/Atlas_de_la_aglomeracin_de_Pasto.pdf

b. Ciudades y alrededores de Bucaramanga

La población de la ciudad de Bucaramanga, Colombia, ha experimentado un crecimiento exponencial en los últimos 20 años, este es el tiempo en el cual se puede hacer una evaluación clara del impacto ambiental que puede llegar a tener el

crecimiento poblacional en un punto específico, a continuación, se presenta la tabla 10 en donde se puede observar la línea evolutiva de la población desde el año 2000 hasta el 2020 [180][181]:

Tabla 10.

Evolución de la población de Bucaramanga.

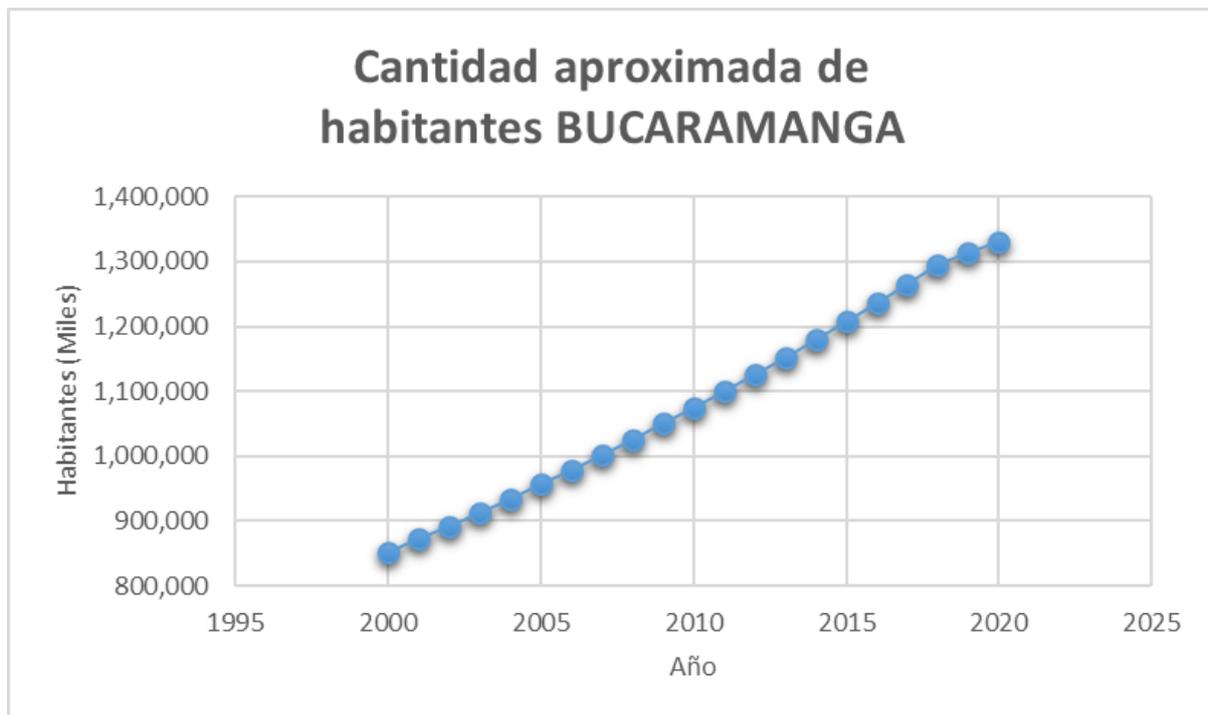
Año	Cantidad aproximada de habitantes
2000	851,700
2001	871,731
2002	892,261
2003	913,275
2004	934,814
2005	956,800
2006	979,334
2007	1,002,399
2008	1,026,039
2009	1,050,171
2010	1,074,904
2011	1,100,219
2012	1,126,167
2013	1,152,653
2014	1,179,800
2015	1,207,586
2016	1,236,066
2017	1,265,136
2018	1,294,890
2019	1,313,376
2020	1,331,453

Nota. Se presenta una tabla para observar la evolución poblacional de la ciudad de Bucaramanga, Colombia. Tomado de: «ATLAS DE AGLOMERACIÓN DE BUCARAMANGA», *Departamento Nacional de Planeación*, 2019. https://osc.dnp.gov.co/administrator/components/com_publicaciones/uploads/Atlas_Aglomeracin_de_Bucaramanga.pdf

En la gráfica de Bucaramanga (Figura 41) se logra observar un crecimiento bastante normal no posee afectaciones socioeconómicas y culturales que hayan podido afectar a la ciudad, siendo que cada año suelen aumentar alrededor de 30 mil personas por lo que su economía y generación de residuos es directamente proporcional.[182]

Figura 41.

Gráfica de la evolución de los habitantes de Bucaramanga.



Nota. Se presenta una gráfica para observar la evolución poblacional de la ciudad de Bucaramanga, Colombia. Tomado de: «ATLAS DE AGLOMERACIÓN DE BUCARAMANGA», *Departamento Nacional de Planeación*, 2019. https://osc.dnp.gov.co/administrator/components/com_publicaciones/uploads/Atlas_Aglomeracin_de_Bucaramanga.pdf

c. Ciudades y alrededores de Villavicencio

La población de la ciudad de Villavicencio, Colombia, se ha visto cómo ha crecido exponencialmente en los últimos 20 años, en este tiempo se puede hacer una evaluación clara del impacto ambiental que puede llegar a tener el crecimiento poblacional en un punto específico, a continuación, se presenta la tabla 11 en donde se puede observar la línea evolutiva de la población [183] [184][185]:

Tabla 11.

Evolución de la población de Villavicencio.

Año	Cantidad aproximada de habitantes
2000	292,876
2001	305,667
2002	319,036
2003	332,990
2004	347,575
2005	362,185
2006	372,633
2007	383,382
2008	394,457
2009	405,820
2010	417,526
2011	429,570
2012	441,979
2013	454,711
2014	467,828
2015	481,323
2016	495,227
2017	509,493
2018	524,169
2019	534,290
2020	544,115

Nota. Se presenta una tabla para observar la evolución poblacional de la ciudad de Villavicencio, Colombia. Tomado de: «ATLAS DE AGLOMERACIÓN DE VILLAVICENCIO», *Departamento Nacional de Planeación*, 2019. https://osc.dnp.gov.co/administrador/components/com_publicaciones/uploads/Atlas_de_la_aglomeracin_de_Villavicencio.pdf

Como se puede observar en la gráfica (Figura 42) de la ciudad de Villavicencio se puede evidenciar el crecimiento más exponencial de todas las ciudades estudiadas, esto debido a que en los últimos años la ciudad ha incrementado su nivel turístico,

económico y cultural que les ha permitido tener más control de la población debido a las constantes mejoras poblacionales.

Figura 42.

Gráfica de la evolución de los habitantes de Villavicencio.



Nota. Se presenta una gráfica para observar la evolución poblacional de la ciudad de Villavicencio, Colombia. Tomado de: «ATLAS DE AGLOMERACIÓN DE VILLAVICENCIO», *Departamento Nacional de Planeación*, 2019. https://osc.dnp.gov.co/administrator/components/com_publicaciones/uploads/Atlas_de_la_aglomeracin_de_Villavicencio.pdf

3.8.2. Estándares económicos y de producto interno bruto

a. Ciudad y alrededores de Pasto

En las últimas dos décadas, la economía de Pasto, capital del departamento de Nariño en Colombia, ha mostrado un crecimiento constante y significativo; este crecimiento se ha visto impulsado por diversos sectores, incluyendo la agricultura, el comercio, y más recientemente, el turismo. Sin embargo, este desarrollo económico también ha traído consigo desafíos ambientales, particularmente en términos de gestión de residuos sólidos y emisiones generadas por los rellenos sanitarios.

Para mitigar estos efectos, es crucial implementar estrategias de gestión de residuos que reduzcan la cantidad de desechos enviados a los rellenos sanitarios, incluyendo iniciativas de reciclaje, compostaje y la promoción de una economía circular que maximice el uso de los recursos y minimice los desechos, asimismo, la captación y utilización del biogás producido en los rellenos sanitarios puede convertir un problema ambiental en una oportunidad para generar energía limpia. [186]

En la tabla 12 se presentan los datos de crecimiento económico del departamento de Nariño desde 2005 hasta 2020 para observar cómo esta puede llegar a afectar al relleno sanitario ubicado en las afueras de la ciudad de Pasto, este dato es proporcionado en producto interno bruto a pesos corrientes.

Tabla 12.*Evolución de la economía de Nariño.*

Año de estudio	Producto Interno Bruto del departamento de Nariño (Miles de millones de pesos)
2005	5.169
2006	5.989
2007	6.517
2008	6.915
2009	7.418
2010	7.704
2011	8.553
2012	9.343
2013	10.149
2014	10.991
2015	12.230
2016	13.893
2017	14.062
2018	14.835
2019	15.907
2020	15.702

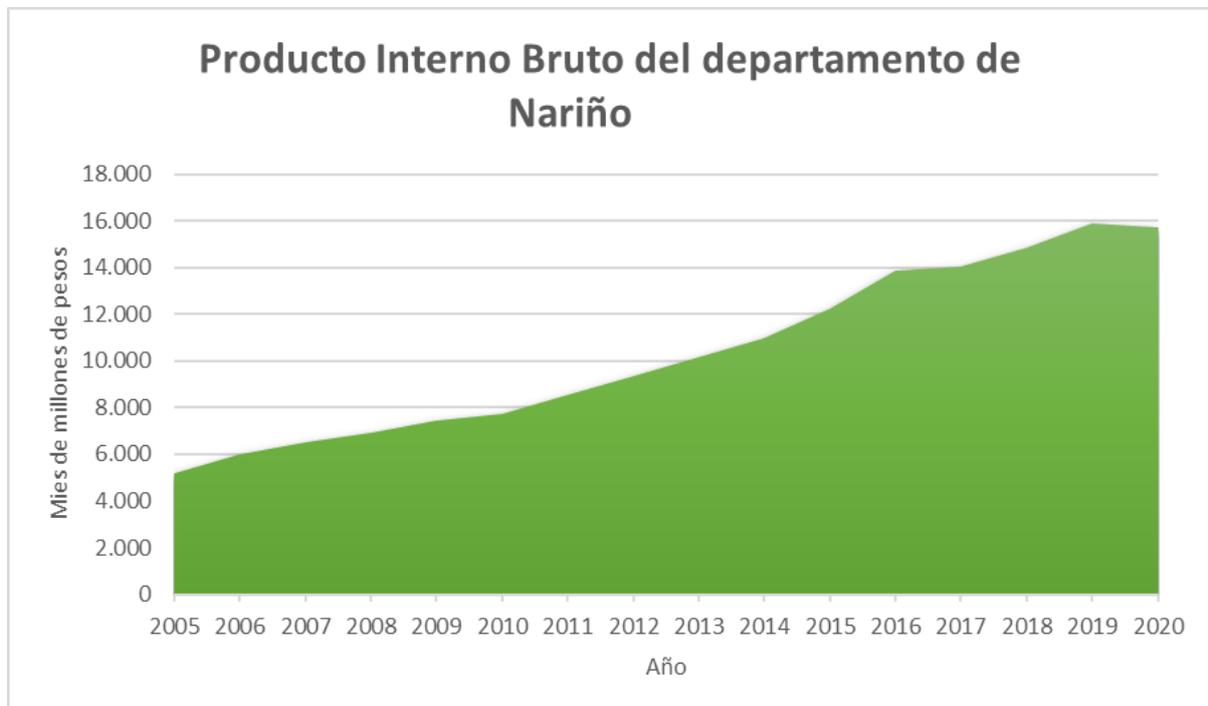
Nota. Se presenta una tabla para observar la evolución económica del departamento de Nariño, Colombia. Tomado de: D. A. N. De Estadística, «DANE - Cuentas nacionales departamentales: PIB por departamento».

<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales>

La evolución del Producto Interno Bruto (PIB) del departamento de Nariño entre 2005 y 2020 se logra observar de manera más clara en la siguiente gráfica (Figura 43) muestra una tendencia general de crecimiento constante, con algunos años de incremento más pronunciado y una ligera disminución al final del período. En 2005, el PIB de Nariño era de 5.169 miles de millones de pesos colombianos, y alcanzó su punto más alto en 2019 con 15.907 miles de millones de pesos. Este crecimiento sostenido se interrumpió ligeramente en 2020, cuando el PIB descendió a 15.702 miles de millones de pesos, probablemente debido a los efectos económicos de la pandemia de COVID-19. [187]

Figura 43.

Gráfica de evolución de PIB del departamento de Nariño.



Nota. Se presenta una gráfica para observar la evolución económica del departamento de Nariño, Colombia. Tomado de: D. A. N. De Estadística, «DANE - Cuentas nacionales departamentales: PIB por departamento». <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales>

b. Ciudad y alrededores de Bucaramanga

En la ciudad de Bucaramanga, el principal relleno sanitario, conocido como El Carrasco, ha sido un foco de atención debido a su impacto tanto en términos medioambientales como económicos.

Desde una perspectiva económica, la gestión y operación de los rellenos sanitarios involucra una serie de costos y beneficios que afectan directamente a la economía local, esto incluye los costos de construcción, operación y mantenimiento, así como los costos asociados con las medidas de mitigación ambiental y de salud pública. Además, es importante considerar los ingresos generados a partir de la valorización de residuos, como la captura y venta de biogás, y los posibles beneficios económicos derivados de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. En Bucaramanga, la relación con el relleno sanitario El Carrasco ha sido compleja, marcada por desafíos financieros, normativos y comunitarios por lo que a medida que la ciudad crece, la necesidad de una gestión eficiente y sostenible de los residuos se vuelve más urgente.[188] En la tabla 13 se presenta los datos de crecimiento económico del departamento de Santander desde 2005 hasta 2020 para observar cómo esta puede llegar a afectar al relleno sanitario ubicado en la ciudad de Bucaramanga, este dato es proporcionado en producto interno bruto a pesos corrientes.

Tabla 13.

Evolución de la economía de Santander.

Año de estudio	Producto Interno Bruto del departamento de Santander (Miles de millones de pesos)
2005	18.733
2006	21.572
2007	24.620
2008	28.389

Tabla 13.*Continuación*

Año de estudio	Producto Interno Bruto del departamento de Santander (Miles de millones de pesos)
2009	28.494
2010	32.726
2011	37.784
2012	40.283
2013	43.409
2014	50.858
2015	51.999
2016	55.182
2017	59.463
2018	63.776
2019	69.124
2020	61.639

Nota. Se presenta una tabla para observar la evolución económica del departamento de Santander, Colombia. Tomado de: D. A. N. De Estadística, «DANE - Cuentas nacionales departamentales: PIB por departamento».

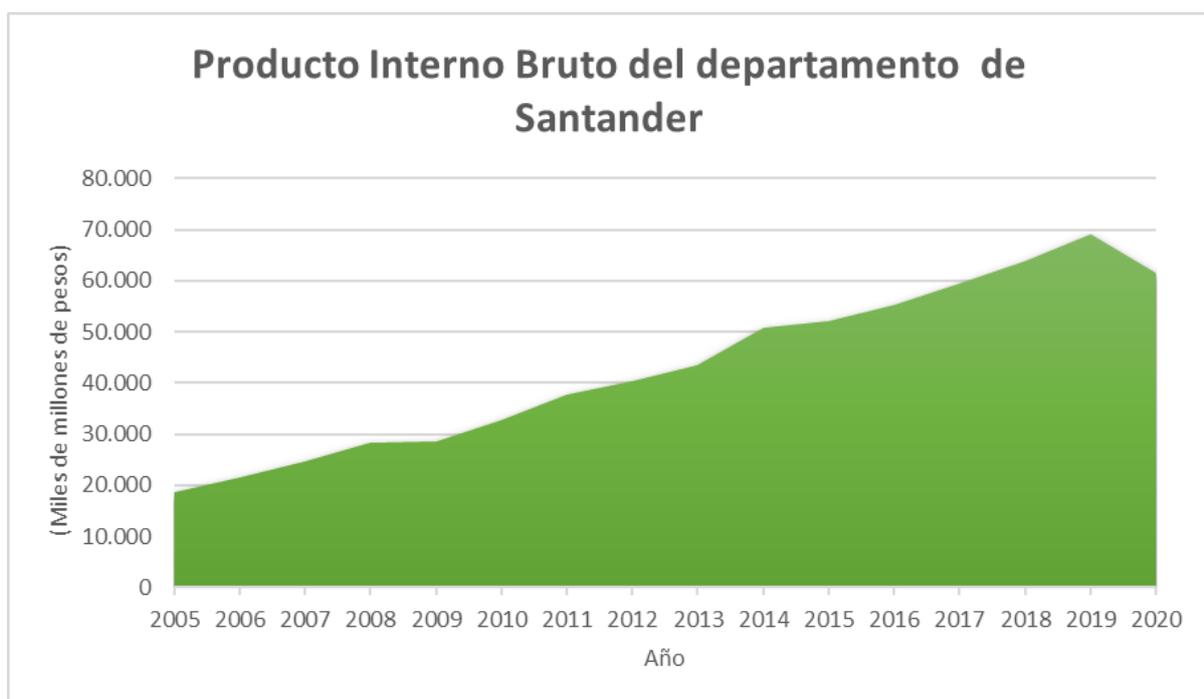
<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales>

El análisis del Producto Interno Bruto (PIB) del departamento de Santander entre 2005 y 2020 revela una tendencia general de crecimiento, aunque con algunas fluctuaciones notables. En 2005, el PIB de Santander era de 18.733 miles de millones de pesos colombianos, y este valor ascendió de manera significativa a lo largo de los años, alcanzando su punto más alto en 2019 con 69.124 miles de millones de pesos.

Algunos años se destacaron por un crecimiento particularmente fuerte. Por ejemplo, entre 2009 y 2010, el PIB aumentó de 28.494 a 32.726 miles de millones de pesos, y entre 2013 y 2014, el crecimiento fue de 43.409 a 50.858 miles de millones de pesos, estos incrementos reflejan períodos de desarrollo económico robusto en la región; como se puede evidenciar en la gráfica (Figura 44) sin embargo, en 2020, el PIB cayó a 61.639 miles de millones de pesos, una disminución significativa desde el año anterior, probablemente debido a los efectos económicos de la pandemia de COVID-19.

Figura 44.

Gráfica de evolución de PIB del departamento de Santander.



Nota. Se presenta una gráfica para observar la evolución económica del departamento de Santander, Colombia. Tomado de: D. A. N. De Estadística, «DANE - Cuentas nacionales departamentales: PIB por departamento». <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales>

c. Ciudad y alrededores de Villavicencio

El relleno sanitario principal de la ciudad es una infraestructura vital que permite el manejo adecuado de estos residuos, pero también plantea importantes consideraciones económicas. Desde el punto de vista económico, los rellenos sanitarios implican una serie de costos directos e indirectos donde para Villavicencio los costos directos incluyen la construcción, operación y mantenimiento del relleno, así como los gastos en tecnologías para la mitigación de impactos ambientales y sanitarios mientras que los costos indirectos pueden abarcar aspectos como la depreciación del valor de la tierra circundante, la gestión de olores y la atención a problemas de salud pública que puedan surgir. Por ejemplo, la construcción del relleno sanitario La Esmeralda tuvo un costo inicial de aproximadamente 10 mil millones de pesos colombianos con unos costos anuales de operación y mantenimiento se estiman en alrededor de 1.5 mil millones de pesos. Además, la ciudad invierte cerca de 500 millones de pesos al año en tecnologías de mitigación de impactos ambientales y sanitarios, como sistemas de control de lixiviados y captura de biogás. [189] En la siguiente tabla 14 se presentan los datos de crecimiento económico del departamento de Meta desde 2005 hasta 2020 para observar cómo esta puede llegar a afectar al relleno sanitario ubicado en la ciudad de Villavicencio, este dato es proporcionado en producto interno bruto a pesos corrientes.

Tabla 14.

Evolución de la economía de Meta.

Año de estudio	Producto Interno Bruto del departamento de Meta (Miles de millones de pesos)
2005	7.953
2006	9.656
2007	10.623
2008	15.253
2009	16.836

Tabla 154.*Continuación.*

Año de estudio	Producto Interno Bruto del departamento de Meta (Miles de millones de pesos)
2010	23.608
2011	35.741
2012	39.466
2013	42.214
2014	37.364
2015	30.712
2016	26.35
2017	30.239
2018	35.331
2019	38.496
2020	30.525

Nota. Se presenta una tabla para observar la evolución económica del departamento de Meta, Colombia. Tomado de: D. A. N. De Estadística, «DANE - Cuentas nacionales departamentales: PIB por departamento».

<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales>

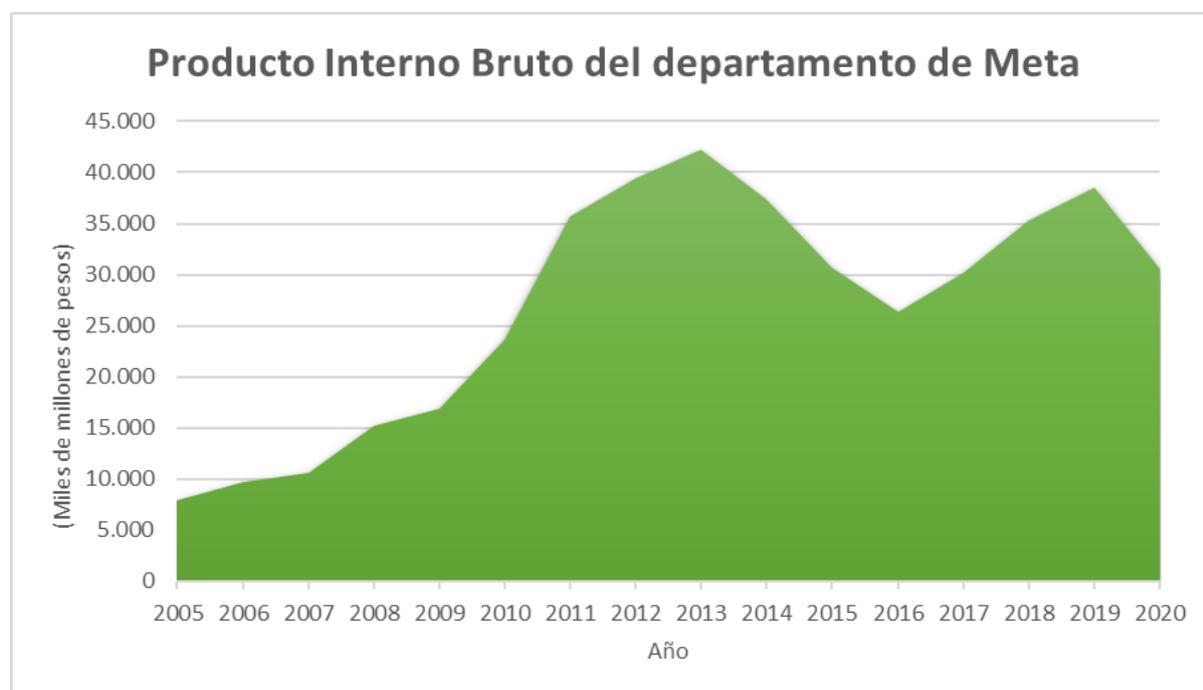
El análisis del Producto Interno Bruto (PIB) del departamento del Meta entre 2005 y 2020 revela una tendencia general de crecimiento con algunas fluctuaciones significativas. En 2005, el PIB del Meta era de 7.953 miles de millones de pesos colombianos y tuvo un aumento sustancialmente en los años siguientes, alcanzando un punto máximo en 2013 con 42.214 miles de millones de pesos. Por otro lado, durante algunos períodos también muestra algunas caídas notables ya que, a partir de 2014, cuando el PIB alcanzó 37.364 miles de millones de pesos, se observa una disminución en los años siguientes, cayendo a 30.712 miles de millones de pesos en

2015 y a un mínimo de 26.35 miles de millones de pesos en 2016, dicha disminución puede estar relacionada con factores económicos específicos del departamento o eventos externos que afectaron la economía regional.

El PIB se recuperó nuevamente a partir de 2017, alcanzando 30.239 miles de millones de pesos, y continuó creciendo hasta 2019, cuando llegó a 38.496 miles de millones de pesos como se puede evidenciar en la gráfica (Figura 45) sin embargo, en 2020, el PIB volvió a disminuir a 30.525 miles de millones de pesos, probablemente debido a los impactos económicos de la pandemia de COVID-19.

Figura 45.

Gráfica de evolución de PIB del departamento de Meta.



Nota. Se presenta una gráfica para observar la evolución económica del departamento de Meta, Colombia. Tomado de: D. A. N. De Estadística, «DANE - Cuentas nacionales departamentales: PIB por departamento». <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales>

3.8.3. Crecimiento del área de los rellenos sanitarios

En los últimos 20 años, el crecimiento de área de los rellenos sanitarios Antanas EMAS, El Carrasco y el Parque Ecológico Reciclante ha reflejado un esfuerzo continuo para manejar de manera eficiente los residuos sólidos en sus respectivas regiones.

a. Relleno Sanitario Antanas EMAS

Este relleno, ubicado en el municipio de Pasto, ha sido una pieza clave en la gestión de residuos de la región para el año 2020, se amplió para gestionar el incremento en la generación de residuos sólidos de la región. En 2016, el área del relleno era de aproximadamente 45 hectáreas, y ha habido planes de expansión adicionales para aumentar la capacidad y mejorar la infraestructura de tratamiento de residuos, se sabe que este relleno ha implementado varias etapas de expansión para satisfacer las demandas crecientes de disposición de residuos en la ciudad de Pasto y sus alrededores, dichos esfuerzos se han centrado en mejorar las celdas de disposición y la infraestructura para aumentar su capacidad operativa. [190] [191]

b. Relleno Sanitario El Carrasco

Situado en Bucaramanga, El Carrasco ha experimentado varios desafíos relacionados con su capacidad y gestión ambiental. Desde 2010, ha habido una serie de ampliaciones y mejoras para aumentar su capacidad de recepción de residuos. Sin embargo, las controversias legales y ambientales han sido un obstáculo constante, llevando a la búsqueda de alternativas para su reemplazo o expansión controlada, aunque se ordenó su cierre definitivo en 2011, el relleno ha continuado operando bajo diversas prórrogas y medidas de contingencia. En términos de área, se ha reportado que el relleno ha expandido sus celdas operativas para gestionar mejor los residuos y minimizar riesgos ambientales con la extensión y mejora de estas celdas han sido fundamentales para mantener su operatividad mientras se buscan alternativas de disposición final. [192] [193]

c. Parque Ecológico Reciclante

Este relleno sanitario, localizado en Villavicencio y operado por Bioagrícola del Llano S.A. E.S.P., ha visto un crecimiento significativo en el año 2020, se reportó que el parque abarcaba 43.26 hectáreas, con 38 celdas de almacenamiento, de las cuales 34 tiene un área de residuos de 10,000 m². Este relleno tiene una capacidad de disposición de aproximadamente 7,198,230 toneladas de residuos sólidos, proyectada para una vida útil de 33 años. Además, se han implementado expansiones para acomodar el aumento en la generación de residuos de la región, reflejando un incremento global en la capacidad operativa del parque, aproximadamente 3 toneladas de residuos se generan de podas y estiércol, los cuales se trituran y mezclan para generar compostaje, produciendo 30 toneladas de compost al mes. [194] [195]

3.9. Diversos escenarios para proyección de los proyectos

En el contexto de evaluar y minimizar el impacto ambiental de actividades industriales como los vertederos municipales de residuos sólidos y los proyectos de generación de energía, es importante comprender y calcular con precisión el factor de emisión de emisiones, así como la cantidad de emisiones generadas. Este proceso incluye una serie de fórmulas y métodos específicos que nos permiten estimar tanto las emisiones como las reducciones de emisiones bajo diferentes escenarios.

La fórmula para calcular las emisiones de los rellenos sanitarios se basa en el factor de emisión (EF) multiplicado por el área de la fuente de emisión (A). Esto nos da una estimación de las emisiones en unidades de masa por unidad de tiempo, por ejemplo, kilogramos por hora (kg/h), y es importante para evaluar el impacto ambiental de dichas instalaciones.

Por otro lado, la fórmula de estimación de emisiones del consumo eléctrico permite calcular las emisiones del proyecto en función del consumo eléctrico y el factor de emisión de CO₂ asociado. Este método nos ayuda a comprender y cuantificar las emisiones debidas al uso de energía de un proyecto. Además, se presentaron

fórmulas detalladas para calcular las reducciones de emisiones antes y después del inicio del proyecto.

Estos cálculos incluyen una variedad de variables como las emisiones de referencia, las emisiones del proyecto, el metano capturado y destruido y otros factores importantes para evaluar el éxito y el impacto ambiental real del proyecto.

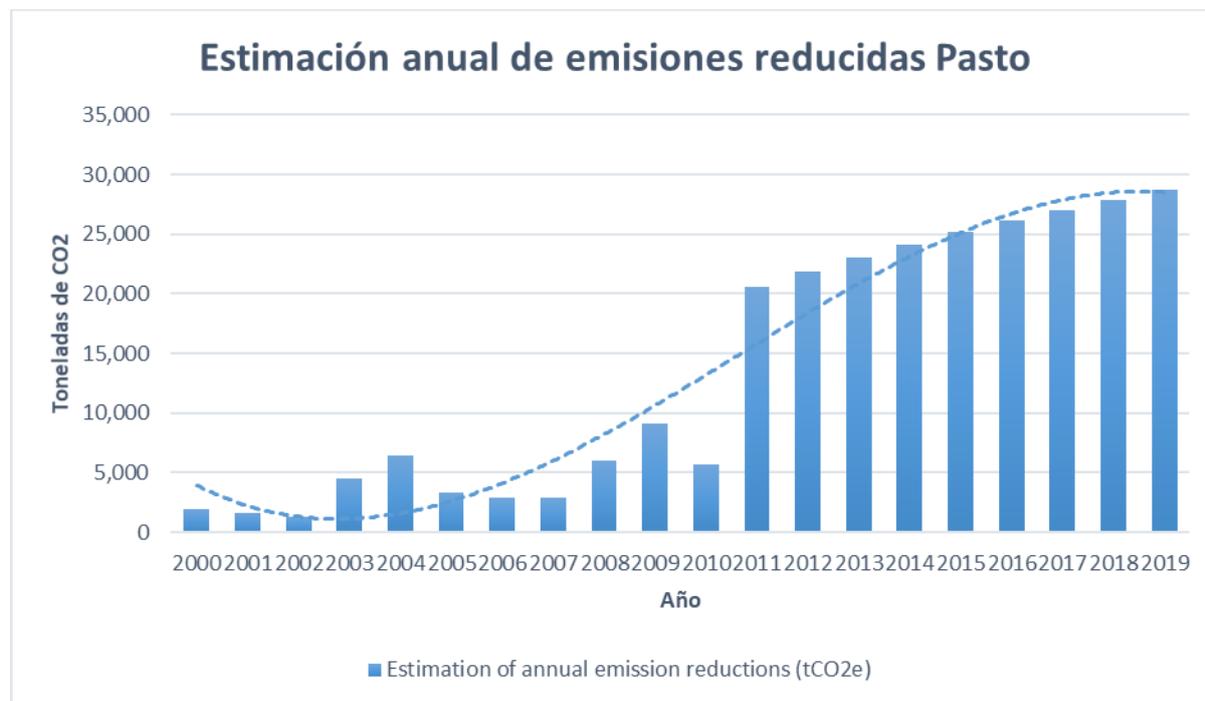
3.9.1. *Estimación anual de reducción de emisiones reportadas por proyecto*

Para la estimación de las emisiones se analiza diferentes puntos gracias a la toma de datos de cada uno de los puntos de quema de biogás de los rellenos, en estos puntos se deben tener en cuenta varios factores que pueden influir positiva o negativamente en la reducción de las emisiones, entre ellos se tiene la dirección del viento, la cantidad de residuos que se pueden quemar, los lixiviados generados, el mantenimiento de los equipos, entre otros. [197]

Teniendo en cuenta los anteriores factores se presenta una serie de datos y gráficas en las cuales se representa las series de datos estimados en cada uno de los rellenos sanitarios estudiados, observando su comportamiento a lo largo de los últimos 20 años explicando así cómo se ha aumentado la cantidad de residuos en estos a medida que pasa el tiempo. Primero se hará énfasis en las emisiones anuales reducidas para Pasto, Bucaramanga y Villavicencio en cada uno de los respectivos rellenos sanitarios, en la figura 46 se muestra la estimación anual de reducción de emisiones de CO₂ (tCO₂e) a lo largo de un período determinado en el relleno sanitario Antanas EMAS donde se observan variaciones anuales, con picos altos y bajos en los primeros años de la toma de datos ya que en ciertos años que podrían coincidir con la implementación de nuevas tecnologías o políticas ambientales como es el caso de 2007 en donde el relleno sufrió problemas de tecnología y necesitaron realizar actualizaciones de estas; con estas implementaciones subió de gran manera la reducción anual teniendo un pico en 2019 con casi 30000 toneladas de CO₂ reducidas. [197]

Figura 46.

Estimación anual de emisiones reducidas en la ciudad de Pasto.



Nota. Gráfica de emisiones reducidas en Pasto. Tomado de: United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: Bionersis landfill project in Pasto, Colombia». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/TUEV-SUED1248705611.94/view>

La Figura 47 muestra las reducciones anuales estimadas de emisiones de CO₂ en toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂e) durante el período 2000-2022. Hubo fluctuaciones significativas en la caída anual durante estos 23 años, como se puede observar durante los primeros años, de 2000 a 2010, la capacidad de reducción de emisiones aumentó continuamente, partiendo de 31.243 tCO₂e en 2000 y finalizando en 65.033 tCO₂e en 2010, con esto la ciudad de Bucaramanga tuvo mejores índices de calidad del aire en dicho periodo de tiempo además que refleja el esfuerzo por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que siguió aumentando durante esa década.

De 2011 a 2015, la reducción aumentó notablemente, alcanzando un máximo en 2013 de 99.706 tCO₂e, sin embargo, una vez alcanzado este pico, la reducción anual comenzó a disminuir, alcanzando las 63.025 tCO₂e en 2015; con esto las reducciones

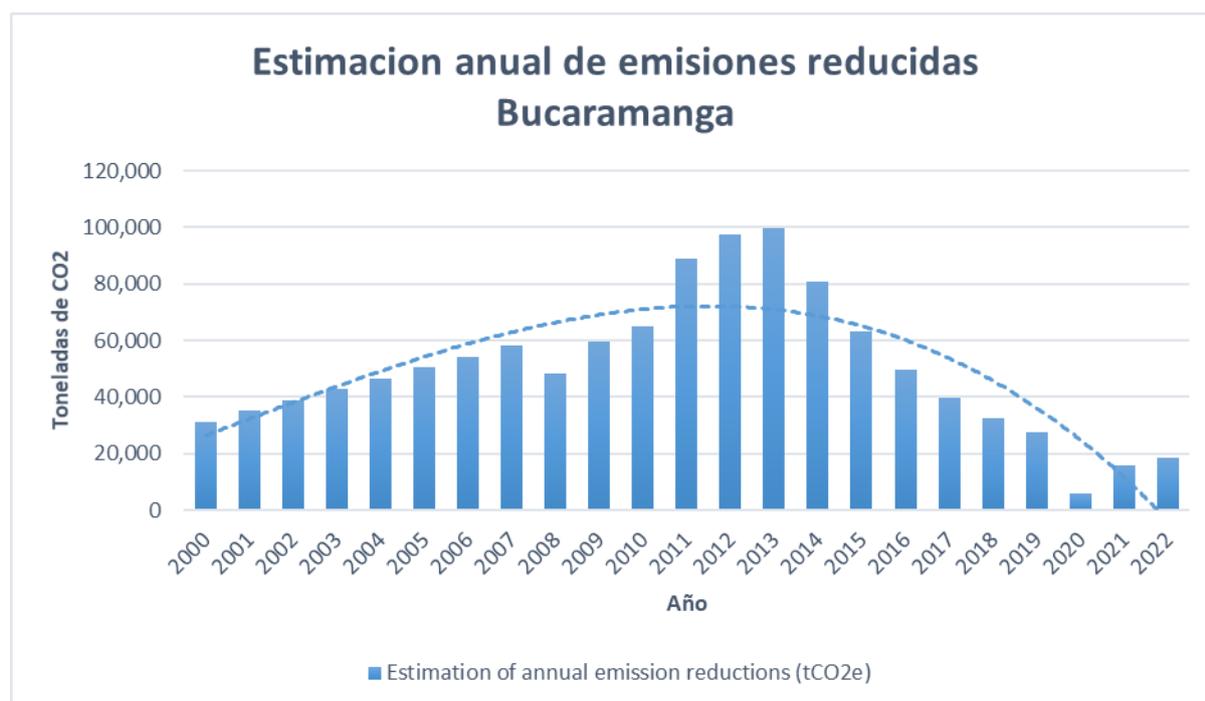
anuales de emisiones tienden a disminuir continuamente de 2016 a 2022, oscilando entre 49.472 tCO₂e en 2016 y un mínimo de 5.776 tCO₂e en 2020.

Aunque ha habido una ligera recuperación desde 2020 (18.450 tCO₂e para 2022), los niveles no han vuelto a ser observados como anteriormente, teniendo en conjunto, que la reducción anual media estimada en estos 23 años es de 49.960 tCO₂e, este promedio refleja una variación significativa de un año a otro, destacada tanto por años con caídas muy grandes, como 2013, como por años con caídas mucho menores, como 2020.

Sin embargo, a partir de este año, los recortes anuales comenzaron a disminuir, con algunas fluctuaciones en los últimos años por ello la disminución anual promedio proporciona una instantánea del desempeño durante estos 23 años, aunque la variación de un año a otro sugiere que el desempeño es desigual.

Figura 47.

Estimación anual de emisiones reducidas en la ciudad de Bucaramanga.



Nota. Gráfica de emisiones reducidas en Bucaramanga. Tomado de: United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: Bionersis LFG project Colombia 2». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SGS-UKL1264777801.97/view>

Durante los primeros años, de 2000 a 2010, las reducciones anuales comenzaron en niveles modestos, con 4,421 tCO₂e en el año 2000, aumentando gradualmente hasta 7,864 tCO₂e en el 2010 en este periodo muestra un crecimiento constante, con un incremento significativo en el 2005 cuando las reducciones alcanzaron 7,795 tCO₂e.

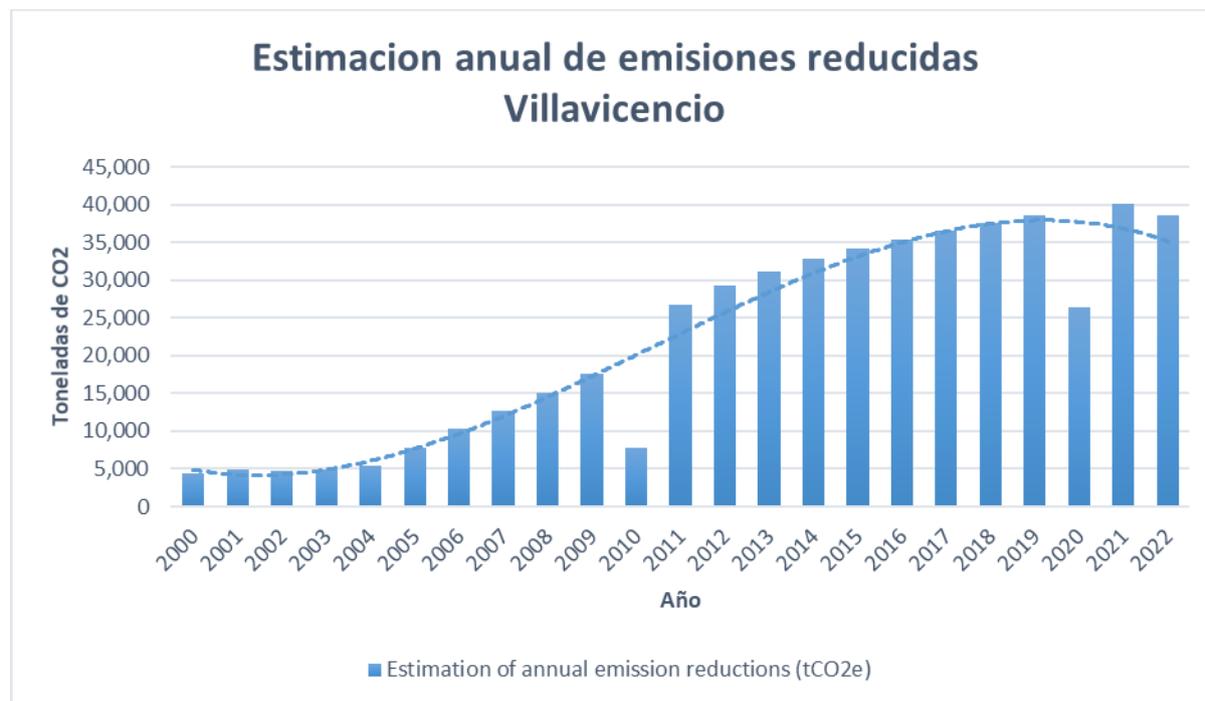
A partir del 2011, las reducciones anuales experimentaron un aumento notable por ello en el 2011, se registraron 26,799 tCO₂e, casi triplicando el valor del año anterior como se puede observar en la figura 48. Este crecimiento se mantuvo constante hasta el 2015, llegando a 34,158 tCO₂e, mientras que en los años 2016 y el 2022, las reducciones continuaron en aumento, alcanzando un máximo de 40,173 tCO₂e en el 2021 pero sufrieron una pequeña, aunque significativa disminución en el 2022 con 38,590 tCO₂e, el nivel sigue siendo significativamente alto en comparación con los primeros años del período

A pesar de la tendencia general de crecimiento, existen algunas fluctuaciones notables, como la disminución en el 2010 y en el 2020, estas variaciones pueden estar influenciadas por factores diversos, incluyendo cambios en políticas ambientales, avances tecnológicos, o circunstancias económicas específicas. Por ello se puede concluir que la gráfica evidencia un esfuerzo sostenido y creciente en la reducción de emisiones de CO₂ en Villavicencio a lo largo de los 23 años analizados.

Desde valores iniciales relativamente bajos a principios de la década de 2000, las reducciones han aumentado considerablemente, especialmente desde el 2011, alcanzando su punto más alto en el 2021 con un promedio anual de 21,870 tCO₂e proporciona una perspectiva general del desempeño durante este periodo, indicando un compromiso continuo con la mitigación de emisiones de CO₂ en la ciudad.

Figura 48.

Estimación anual de emisiones reducidas en la ciudad de Villavicencio.



Nota. Gráfica de emisiones reducidas en Villavicencio. Tomado de: United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: Bionersis LFG project Colombia 3 (Villavicencio)». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SQS1274188918.1/view>

3.9.2. Toneladas métricas producidas y eliminadas reportadas por proyecto

Las emisiones de CO₂, para este caso son los resultantes de actividades industriales, agrícolas y urbanas, contribuyen significativamente al efecto invernadero y al calentamiento global por ello se busca mitigar estos impactos, es esencial no solo reducir las emisiones producidas, sino también implementar estrategias eficaces para eliminarlas o neutralizarlas.

En este contexto, los rellenos sanitarios evaluados han realizado esfuerzos significativos para monitorear y reducir sus emisiones de CO₂ a lo largo de los años este análisis abarca desde el año 2000 hasta el 2022, periodo durante el cual se ha registrado una estimación anual de las reducciones de emisiones en toneladas métricas de CO₂ equivalente (tCO₂e). La evaluación de estas reducciones no solo nos

proporciona una visión clara del progreso realizado, sino que también resalta las áreas que requieren atención continua.

A través de la recopilación y análisis de datos sobre las toneladas métricas de CO₂ producidas y eliminadas, podemos entender mejor la efectividad de las políticas implementadas y planificar acciones futuras más sostenibles. Por ello se busca presentar una explicación detallada y comprensiva de las tendencias en la reducción de emisiones, destacando los logros alcanzados y las oportunidades de mejora.

Por lo anterior comentado se presenta en la figura 49 los datos del relleno sanitario EMAS en Pasto a lo largo de estos 17 años, se observa un aumento constante en la cantidad de residuos dispuestos cada año, así como en el acumulado total, lo que refleja un crecimiento continuo en la generación de residuos y la capacidad de disposición de la ciudad.

En el año 2001, Pasto y los alrededores dispusieron de 72,215 toneladas métricas de residuos, este número aumentó ligeramente en 2002 a 74,615 toneladas, y aunque hubo una leve disminución en 2003 a 70,481 toneladas, la tendencia general en estos primeros años fue de crecimiento. En conjunto, para estos cinco primeros años, el total acumulado de residuos dispuestos alcanzó 361,062 toneladas. Entre 2006 y 2010, la cantidad de residuos dispuestos continuó aumentando cada año. En 2006, se dispusieron 73,587 toneladas métricas de residuos y en 2010, la cifra llegó a 83,242 toneladas durante este período de cinco años, el total acumulado aumentó significativamente, alcanzando 762,705 toneladas para finales de 2010.

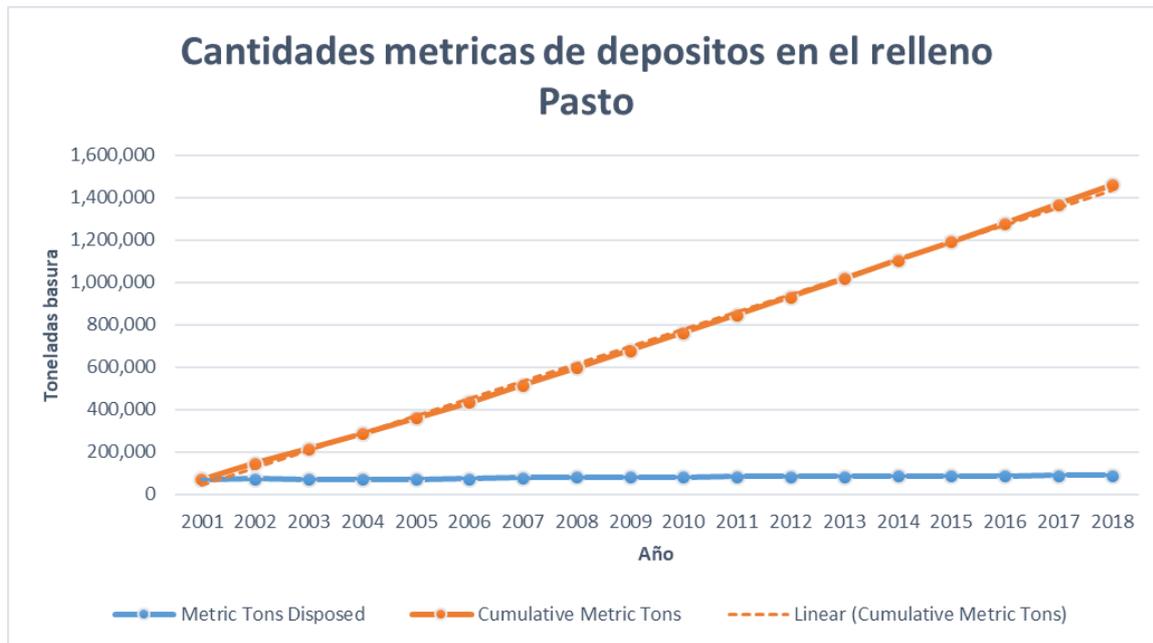
Finalmente, entre 2016 y 2018, la disposición anual de residuos siguió aumentando ya que, en 2016, se dispusieron 88,363 toneladas métricas, en 2017 la cifra fue de 89,247 toneladas, y en 2018 alcanzó 90,139 toneladas para finalmente que, en este período, el total acumulado de residuos dispuestos había llegado a 1,459,319 toneladas.

El acumulado total de residuos dispuestos alcanzó 10,446,505 toneladas, lo que muestra la magnitud de la gestión de residuos en la ciudad a lo largo del tiempo. Este aumento constante en la disposición de residuos refleja no solo el crecimiento

poblacional y el desarrollo económico, sino también la necesidad continua de mejorar y expandir las infraestructuras y políticas para la gestión de residuos en la ciudad.

Figura 49.

Cantidades métricas de depósitos en el relleno sanitario de Pasto.



Nota. Gráfica de cantidades métricas de depósitos en Pasto. Tomado de: United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: Bionersis landfill project in Pasto, Colombia». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/TUEV-SUED1248705611.94/view>

La figura 50 proporciona un conjunto de datos del relleno sanitario El Carrasco ubicado en la ciudad de Bucaramanga presentando los datos sobre la eliminación de toneladas métricas de residuos desde el año 1997 hasta el 2014, los datos incluyen tanto las toneladas métricas eliminadas anualmente como el total acumulado de toneladas métricas a lo largo del período para ellos se detalla las tendencias observadas, las variaciones anuales y los totales generales.

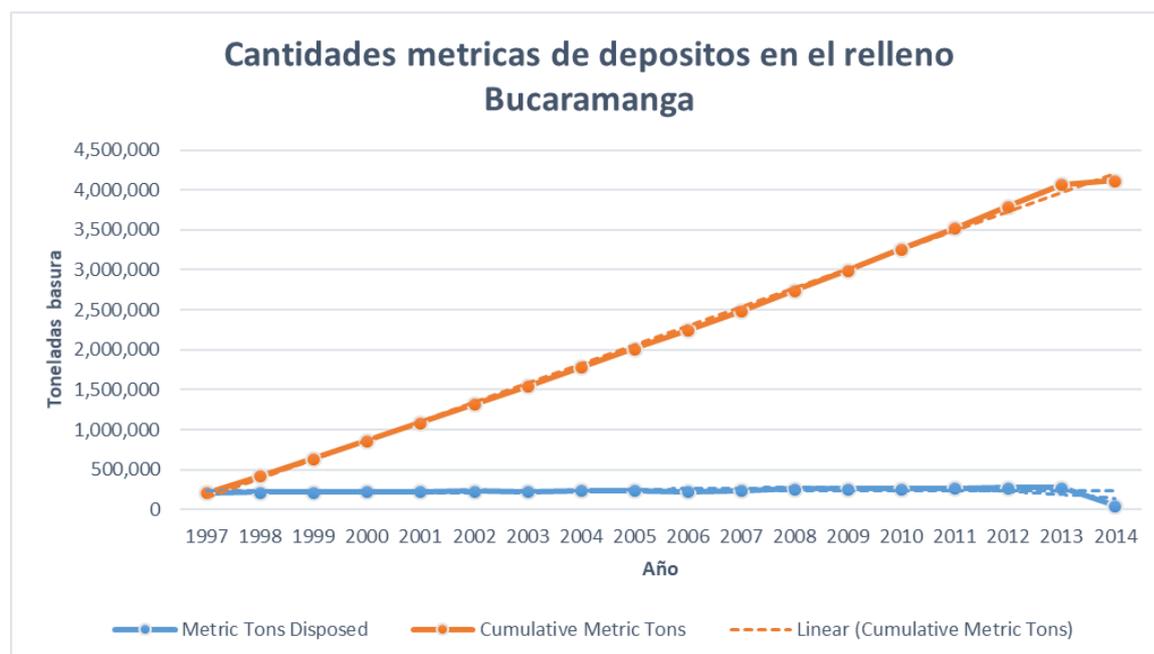
A lo largo del período analizado, se observa una tendencia creciente en la cantidad de residuos eliminados anualmente con dicha tendencia se sugiere una mejora constante en la gestión de residuos, reflejando posiblemente la implementación de nuevas políticas, tecnologías y procesos destinados a la eliminación eficiente de

residuos. Entre ellos destaca los años con mayor eliminación siendo el 2013 destacado como el año con la mayor cantidad de residuos eliminados, alcanzando un total de 274.599 toneladas métricas dicho incremento significativo está relacionado con mejoras en las infraestructuras de gestión de residuos y la implementación de proyectos específicos de alto impacto, mientras que en 2014, se muestra una disminución drástica con solo 46.564 toneladas métricas eliminadas dicha reducción se vio muy afectada por la inclusión de la finalización de grandes proyectos de eliminación, cambios en la política de residuos, o mejoras en la reducción y reciclaje de residuos antes de la eliminación final.

Desde 1997, el total acumulado ha mostrado un aumento constante, alcanzando 4.116.515 toneladas métricas en 2014, este incremento refleja un esfuerzo sostenido en la gestión de residuos a lo largo de los años por ello a lo largo de los 17 años analizados, se eliminaron un total de 3.889.494 toneladas métricas de residuos.

Figura 50.

Cantidades métricas de depósitos en el relleno sanitario de Bucaramanga.



Nota. Gráfica de cantidades métricas de depósitos en Bucaramanga. Tomado de: United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: Bionersis LFG project Colombia 2». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SGS-UKL1264777801.97/view>

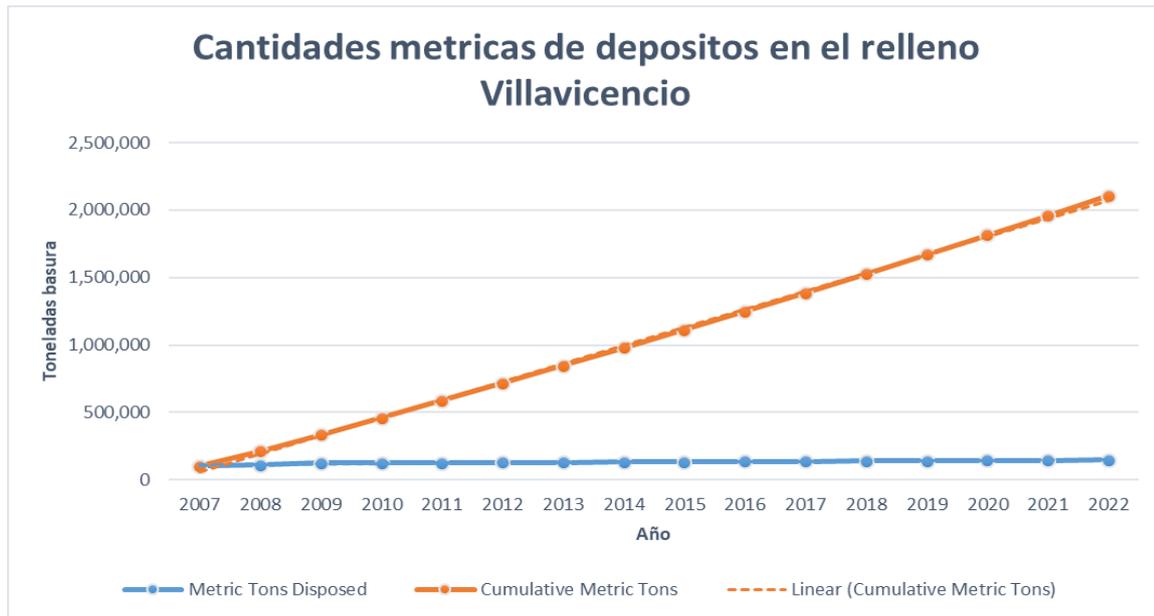
Finalmente, en la figura 51 se presentan los últimos datos del relleno sanitario parque ecológico reciclarte ubicado a pocos kilómetros de Villavicencio, entre 2007 y 2022 ha mostrado una mejora constante y sostenida, como se refleja en el aumento anual de las toneladas métricas eliminadas y el total acumulado de residuos gestionados.

A lo largo del período, se observa una tendencia ascendente, destacando el año 2022 con la mayor cantidad de residuos eliminados, 148.450 toneladas métricas, esto debido al crecimiento poblacional, mayor actividad económica y mejoras en los sistemas de recolección y eliminación; en contraste, 2007 tuvo la menor cantidad eliminada con 102.385 toneladas métricas, reflejando una capacidad inicial más limitada.

El total acumulado de residuos eliminados ha aumentado consistentemente, alcanzando 2.108.157 toneladas métricas en 2022, con incrementos significativos en periodos específicos, como entre 2007 y 2010 (358.308 toneladas métricas) y entre 2018 y 2022 (580.697 toneladas métricas). En total, se eliminaron 2.202.298 toneladas métricas en 17 años, lo que demuestra la capacidad de las infraestructuras locales para gestionar grandes volúmenes de residuos con dichos datos se subrayan la efectividad de las políticas y tecnologías implementadas, resaltando la importancia de la optimización en los procesos de recolección y eliminación de residuos, además de desarrollar estrategias de reducción y reciclaje para manejar eficientemente el aumento continuo de residuos y minimizar el impacto ambiental.

Figura 51.

Cantidades métricas de depósitos en el relleno sanitario de Villavicencio.



Nota. Gráfica de cantidades métricas de depósitos en Villavicencio. Tomado de: United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: Bionersis LFG project Colombia 3 (Villavicencio)».

<https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SQS1274188918.1/view>

4. ESTRATEGIA ANALÍTICA DE SOFTWARE Y RELACIÓN PARA TOMA DE DECISIONES EN PROYECTOS FUTUROS

En un entorno global cada vez más basado en datos, la capacidad de analizar y utilizar información precisa en tiempo real se ha convertido en un factor clave para el éxito de los proyectos sostenibles. Las estrategias de análisis de software desempeñan un papel esencial en este contexto, proporcionando herramientas y técnicas que permiten a las organizaciones transformar grandes cantidades de datos en información procesable. La incorporación de análisis avanzados en el proceso de toma de decisiones no solo mejora la eficiencia y eficacia de los proyectos actuales, sino que también crea una base sólida para el diseño y la implementación de proyectos futuros. Utilizando potentes soluciones de software y métodos analíticos, las organizaciones pueden identificar tendencias, evaluar riesgos, optimizar recursos y medir el impacto ambiental con una precisión sin precedentes. [199]

Esta sección explora cómo el análisis de software puede respaldar una toma de decisiones más informada y estratégica en proyectos de desarrollo ecológico para los proyectos de mecanismo de desarrollo limpio en Colombia y para su posterior uso en futuros proyectos. Se discutirá la importancia de elegir las herramientas adecuadas, los beneficios del análisis avanzado y cómo estos métodos pueden transformar la planificación y ejecución de proyectos futuros, garantizando que sean más sostenibles, más eficientes y alineados con los objetivos globales de sostenibilidad y reducción de emisiones.

4.1. Modelos matemáticos orientados al proyecto mecanismo de desarrollo limpio

Los modelos matemáticos son herramientas importantes en el diseño, implementación y evaluación de proyectos del Mecanismo de Desarrollo Limpio, estos modelos permiten a los científicos y profesionales simular una variedad de escenarios, optimizar procesos y predecir resultados con alta precisión. En el contexto de los proyectos, los modelos matemáticos ayudan a cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero, evaluar los impactos ambientales y determinar la viabilidad económica y técnica de diversas medidas. Utilizando técnicas de modelado

avanzadas, puede integrar datos históricos y en tiempo real, lo que le ayudará a tomar decisiones más informadas y estratégicas. Los modelos matemáticos también son clave para la certificación y el monitoreo continuo de proyectos MDL, asegurando que cumplan con los estándares internacionales y los objetivos de desarrollo sostenible. [200]

Se presenta todos aquellos cálculos que son usados en los proyectos de mecanismo de desarrollo limpio teniendo en consideración los diferentes tipos de modelos matemáticos utilizados en proyectos MDL, incluidos aquellos centrados en la captura de metano, la producción de energía renovable, los bosques y el uso eficiente de la energía. Se discutirá cómo estos modelos contribuyen a optimizar los recursos, reducir las emisiones y mejorar la sostenibilidad a largo plazo.

4.1.1. Estimación de emisiones fugitivas (fuentes de área)

En el contexto de la gestión ambiental y la evaluación de impacto, estimar las emisiones fugitivas es importante para comprender y controlar las fuentes de contaminación, especialmente en entornos como los vertederos. Estas emisiones, que pueden provenir de áreas específicas del vertedero, se calculan utilizando factores de emisión, que son la cantidad de contaminantes emitidos por unidad de área y en el tiempo.

En este caso, nos centramos en el factor de emisión del vertedero, que, combinado con la superficie de emisión, nos permite estimar las emisiones en unidades de masa por unidad de tiempo, por ejemplo: kilogramos por hora (kg/h).

Este método de cálculo se basa en la fórmula $E = FE * A$, brindándonos una herramienta esencial para evaluar y tomar acciones efectivas para gestionar las emisiones de los vertederos, destacando la importancia de determinar los factores de emisión correctos para cada tipo específico de emisiones y acciones para este tipo de emisiones en las zonas ecológicas. [201]

Para ello se debe entender la condición de cada uno de los aspectos mencionados:

Factor de Emisión (FE): Este factor varía según el tipo de residuos depositados en el relleno sanitario y las condiciones de gestión de este. Puede calcularse utilizando datos específicos de emisión para cada tipo de residuo o basarse en valores estándar proporcionados por regulaciones ambientales o estudios previos.

Actividad (A): La actividad en este contexto se refiere al área de la superficie del relleno sanitario de donde se emiten los gases. Es importante considerar no solo el área total del relleno, sino también las áreas específicas donde se espera una mayor emisión de gases, como las áreas donde se depositan residuos orgánicos.

Interpretación de las Emisiones: Las emisiones calculadas mediante esta fórmula representan la cantidad de contaminantes liberados por la superficie del relleno sanitario en un periodo de tiempo determinado. Estas emisiones pueden ser importantes para evaluar el impacto ambiental del relleno y diseñar estrategias de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero, como el metano.

Monitoreo y Control: Es fundamental monitorear regularmente las emisiones fugitivas en un relleno sanitario para identificar posibles áreas de mejora y asegurar el cumplimiento de las regulaciones ambientales. Se pueden implementar medidas de control, como la captura y quema de gases, para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. [202]

La fórmula propuesta se desglosa de la siguiente manera:

- Emisión = factor de emisión * actividad

4.1.2. **Factor emisión de un relleno sanitario**

$$E = F_E * A$$

$$E = F_E * m^2$$

$$E \left(\frac{kg}{h} \right) = \left(\frac{kg}{h * m^2} \right) * m^2$$

Donde:

E: es la emisión en unidades de masa por unidad de tiempo (por ejemplo, kg/h para kilogramos por hora).

FE: es el factor de emisión en unidades de masa por unidad de área y tiempo (por ejemplo, kg/h*m² para kilogramos por hora por metro cuadrado).

A: es el área de la fuente de emisión en unidades de área (por ejemplo, m² para metros cuadrados).

Esta fórmula indica que la emisión E es igual al producto del factor de emisión FE y el área A.

Para calcular la emisión en kilogramos por hora (kg/h) utilizando esta fórmula, simplemente multiplicas el factor de emisión en kg/h*m² por el área en metros cuadrados (m²) de la fuente de emisión. Cabe resaltar que el factor de emisión (FE) debe estar correctamente determinado para el tipo específico de emisión y actividad que estás evaluando en el relleno sanitario.

las bases de datos que son presentadas por los proyectos de MDL son bastante grandes y poseen un gran número de aspectos informativos y numéricos a tener en cuenta, entre ellos están las formas de cálculo de emisiones, la generación de electricidad con el gas recolectado, la cantidad de gas emitido por electricidad consumida, entre otros; por ello se tendrán en cuenta las fórmulas de cálculo más relevantes que conllevan a la formación de las bases de datos a usar en el modelo de predicción.[203]

4.1.3. Fórmula de estimación de emisiones a partir del consumo de electricidad

La fórmula que proporcionaste se utiliza para calcular las emisiones de un proyecto a partir del consumo de electricidad. Aquí está la desglosada:

$PE_{EC,y}$ Emisiones del proyecto por la electricidad consumida por la actividad del proyecto durante el año y (en toneladas de CO₂ por año, tCO₂/yr).

$EC_{PJ,y}$ Cantidad de electricidad consumida por la actividad del proyecto a pequeña escala durante el año y (en megavatios-hora, MWh).

EF_{CO_2} Factor de emisión de CO₂ asociado a la generación de electricidad utilizada por el proyecto (en toneladas de CO₂ por megavatio-hora, tCO₂/MWh).

La fórmula completa es:

$$PE_{EC,y} = EC_{PJ,y} * EF_{CO_2}$$

Para calcular las emisiones del proyecto a partir del consumo de electricidad, necesitarías conocer la cantidad de electricidad consumida por la actividad del proyecto durante el año en cuestión ($EC_{PJ,y}$) y el factor de emisión de CO₂ asociado a la generación de esa electricidad (EF_{CO_2}). Multiplicando estos dos valores, obtendrás las emisiones de CO₂ generadas por el consumo de electricidad del proyecto durante ese período de tiempo.

Si el proyecto utiliza energía de la red, el factor de emisión aplicable será el último factor oficial. El documento oficial aprobado por el Ministerio de Minas y Energía (MME), disponible en el momento de la verificación.

En Colombia, el factor de emisión de la red lo fija el MME en resolución. Donde el MME calcula los factores de emisión según los MDL que requieran la facultad de avance e información contrastada para financiar y promover el desarrollo de proyectos MDL.

Los datos más recientes disponibles en el momento del comienzo de los proyectos MDL para su revisión, es la Resolución N° 180740 de 2007, anunciada el 23 de mayo de 2007.

Según el art. 1 de esta resolución, el coeficiente de emisión se determina según el método MDL, para calcular las emisiones de referencia de las actividades de generación de energía de un proyecto debe tener las especificaciones de las fuentes de energía renovables con capacidad instalada inferior a 15 MW son 0,4308 tCO₂/MWh. [204]

Según el artículo anualmente se deben publicar 4 factores de emisión y los coeficientes publicados en la norma N° 180740 de 2007 se mantienen vigentes hasta que se emita nueva normatividad.

- Si el proyecto utiliza electricidad procedente de un generador diésel, el coeficiente de emisión previsto en el apartado es específico e inamovible.
- Si el proyecto utiliza electricidad de la propia planta de energía renovable del proyecto, el factor de emisión se aplicará 0.

4.1.4. Fórmula utilizada para el cálculo de emisiones antes del inicio de operaciones

De acuerdo con la metodología, las reducciones de emisiones logradas por la actividad de proyecto se logran estimar mediante:

$$ER_{estimated,y} = BE_y - PE_y - Fuga$$

Para el cálculo exacto de emisiones consiste en determinar la quema de materia para mitigar la contaminación por GEI se puede llegar a considerar que los proyectos no posean ningún efecto de fuga, con lo cual la ecuación anterior puede simplificarse de la siguiente forma [194]:

$$ER_{estimated,y} = BE_y - PE_y$$

Donde:

$ER_{estimated,y}$ Reducción estimada de emisiones en un tiempo determinado generalmente en periodos de un año representado por la letra y, en toneladas equivalentes de CO₂ (tCO₂/yr)

BE_y Emisiones de referencia en un año determinado y, en toneladas equivalentes de CO₂ (tCO₂/yr)

PE_y Emisiones del proyecto en un año determinado y, en toneladas equivalentes de CO_2 (tCO_2/yr)

Para la estimación de las emisiones anuales PE_y se deben tener en cuenta el consumo de electricidad que tiene el vertedero durante un periodo de tiempo anual a través de la siguiente relación:

$$PE_y = EC_{PJ,y} * EF_{CO2}$$

$EC_{PJ,y}$ La cantidad de electricidad consumida por el proyecto, la cantidad de electricidad importada de la red, calculada en MWh, se estima en aproximadamente 96 MWh/año (consumo en minas e incineradores: capacidad de combustión primaria 11 kW * 24 horas * 365 días /1000)

EF_{CO2} Factor de emisión a la red 0,4308 tCO_2/MWh

4.1.5. Fórmula utilizada para el cálculo de emisiones con el vertedero en operación

Según el método, la reducción de las emisiones reales que el proyecto logró en el período de reconocimiento se calculará utilizando la cantidad de metano, restaurada y destruida por el proyecto, a través de la ecuación estándar, mediante la siguiente ecuación estandarizada para este tipo de casos:

$$ER_{Calculada,y} = MD_y - MD_{reg,y} - PE_y - Fuga$$

Como en la ecuación presentada para las emisiones antes del inicio de operaciones de los proyectos no se debe considerar ningún efecto de fuga, por lo tanto, la ecuación anterior se simplifica de la siguiente manera:

$$ER_{Calculada,y} = MD_y - MD_{reg,y} - PE_y - Fuga$$

Donde:

MD_y Hace referencia al Metano capturado y destruido/utilizado provechosamente por la actividad de proyecto en el año y (tCO₂/yr)

$MD_{reg,y}$ Son emisiones de metano que se capturarían y destruirían para cumplir con los requisitos de seguridad o las normativas legales nacionales o locales en el año y (tCO₂/yr).

Considerando la actividad de quema en antorcha del proyecto, se medirá utilizando las condiciones de la quema de la antorcha utilizada en los proyectos MDL:

$$MD_y = LFG_{quemado,y} * w_{CH_4,y} * D_{CH_4,y} * FE * GWP_{CH_4}$$

Donde:

$LFG_{quemado,y}$ Son las emisiones de gas de vertedero quemado o utilizado como combustible en un año y (m³)

$w_{CH_4,y}$ Representa el contenido de metano en el gas del vertedero con periodo anual y (Fracción másica)

$D_{CH_4,y}$ Representa la densidad del metano a la temperatura y presión del gas de vertedero en un año (toneladas/m³)

FE Representa la eficacia de la quema realizada por la antorcha FE en el año y (fracción); también denominada $\eta_{flama,h}$ en la herramienta para determinar las emisiones procedentes de la quema en antorcha de gases que contienen metano.

GWP_{CH_4} Se estima que el GWP del metano (CH₄) estará entre 27 y 30 en 100 años. Las emisiones de CH₄ duran en promedio unos 10 años, mucho menos que las emisiones de CO₂, pero el CH₄ también absorbe más energía que el CO₂.

El efecto neto de una vida útil más corta y una mayor absorción de energía se refleja en el GWP también explica algunos efectos indirectos, como el hecho de que el CH₄ es un precursor del ozono y que el ozono en sí es un gas de efecto invernadero. [205]

Otra forma de realizar el cálculo del Metano capturado y destruido/utilizado provechosamente ya que, en realidad, no todas las emisiones de las fuentes pueden capturarse y destruirse durante el proceso de diseño por lo que ningún diseño posee un 100% de eficacia a la hora de predecir la contaminación de un proyecto MDL.

Se deben considerar los sistemas aislados y anexos que se instalan como parte de las actividades del proyecto con los cuales se logra la estimación preliminar de costos, se utiliza un factor de recuperación (R_r) para la estimación inicial para reflejar la eficiencia del sistema de recolección de gas.

Además, suelen tener en cuenta la eficiencia del sistema de combustión (factor de eficiencia de combustión FE) para la antorcha que se tiene en los proyectos, esta se puede tener en cuenta como un factor menor si el terreno no tiene capacidad para albergar más de 20 antorchas. Para dichos cálculos se estima que la quema por antorcha tendría alrededor de un 90% de eficacia para así calcular la cantidad de metano que se destruirá durante la implementación. Por lo tanto, se calculadora de la siguiente forma:

$$MD_y = BE_y * R_r * FE$$

Donde:

BE_y Emisiones de referencia en un año determinado y, en toneladas equivalentes de CO₂ (tCO₂/yr)

R_r La tasa de recuperación se determina en un 50%, para los vertederos está organizado en celdas de forma piramidal en donde los residuos depositados se cubren de arcilla cada 6 metros.

Dicha cubierta final tiene un rango de entre 30 a 40 cm de arcilla. Debido a la forma de las celdas y al hecho de que los rellenos/vertederos son establecidos en zonas abiertas, la eficiencia de captura se fija en un valor conservador del 50% para los cálculos antes del inicio de operaciones.

FE La eficiencia de la quema en antorcha se controlará de acuerdo con la herramienta de cálculo presentada para determinar las emisiones del proyecto procedentes de gases de combustión que contienen metano.

4.1.6. Cálculo de reducción de emisiones antes del inicio de operaciones

Para la estimación del potencial de emisión de metano de un vertedero de residuos sólidos ($BE_{CH_4,SEDS,y}$ en tCO₂) utilizando la última conversión para determinar las emisiones de metano evitadas por la eliminación de residuos en un vertedero de residuos sólidos. [206]

$$BE_{CH_4,SEDS,y} = \phi (1 - f) * GWP_{CH_4} * (1 - OX) * 16/12 * F * DOC_f * MCF * \sum \sum W_{j,x} * DOC_j * e^{-kj(y-x)} * (1 - e^{-kj})$$

ϕ Factor de corrección para tener en cuenta las incertidumbres del modelo (0,9)

f Fracción de metano capturado en el SWDS y quemado en antorcha, quemado o utilizado de otra manera (0)

GWP_{CH_4} Potencial de calentamiento global (GWP) del metano

OX Factor de oxidación (refleja la cantidad de metano de los SWDS que se oxida en el suelo u otro material que cubra los residuos)

F Fracción de metano en el gas de los SWDS (fracción volumétrica) (0,5)

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

MCF Factor de corrección del metano

$W_{j,x}$ Cantidad de residuos orgánicos de tipo *j* que se evita eliminar en el SWDS en el año *x* (toneladas)

DOC_j Fracción de carbono orgánico degradable (en peso) en el tipo de residuo *j*

k_j Tasa de descomposición del tipo de residuo *j*

j Tipo de residuo

x Año durante la vida útil del vertedero: *x* va desde el primer año de apertura del vertedero (*x* = 1) hasta el año *y* para el que se calculan las emisiones evitadas (*x* = *y*)

y Año para el que se calculan las emisiones de metano

4.1.7. Cálculo de cantidad neta de electricidad producida

Al estimar las emisiones de gases de efecto invernadero de un proyecto, es importante calcular con precisión las emisiones derivadas del consumo de electricidad. Estos cálculos se realizan mediante fórmulas especiales que tienen en cuenta las fuentes de energía utilizadas, ya sean redes, generadores de respaldo o tecnologías de energía renovable, los cálculos a presentar son solo parte del proyecto realizado en Bucaramanga ya que es el único que cuenta con la disponibilidad de tecnología y recursos para poder tomar los datos necesarios.

A continuación, se detalla el proceso para calcular las emisiones del proyecto en función del consumo de electricidad, así como varios escenarios posibles. La primera fórmula para el cálculo es representada por las emisiones que genera el proyecto:

$$PE_y = PEEC_y * PEFC_y$$

Donde:

PE_y Representa las emisiones de la actividad del proyecto durante el año y (tCO₂/año).

$PEEC_y$ son las emisiones por consumo de electricidad de la actividad del proyecto durante el año y (tCO₂/año)

$PEFC_y$ son las emisiones por consumo de calor de la actividad del proyecto durante el año y (tCO₂/año)

Dado que en este proyecto no hay consumo de calor, se tiene:

$$PEFC_y = 0$$

Las emisiones por consumo de electricidad se calculan a través de las emisiones por consumo de electricidad haciendo uso de la siguiente fórmula.

$$PEEC_y = ECPJ_y * EF_{grid,y} * (1 + TDL)$$

Donde:

$ECPJ_y$ Representa la cantidad de electricidad consumida por la actividad del proyecto durante el año y (MWh)

$EF_{grid,y}$ Es el factor de emisión de la red (tCO₂/MWh), que está establecido en 0.4308 tCO₂/MWh.

TDL representa las pérdidas técnicas promedio de transmisión y distribución en la red, con un valor por defecto del 20%.

Con estos datos se logra hacer una sustitución sencilla que permite calcular más rápido los valores solicitados como se muestra a continuación:

$$PEEC_y = ECPJ_y * 0.4308 * 1.20$$

$$PEEC_y = ECPJ_y * 0.51696$$

Además de la estimación de emisiones por consumo de electricidad también se tiene la posibilidad y el escenario del cálculo para un generador de combustible fósil de respaldo, en dado que sé que cortara la energía del relleno por casos de fuerza mayor. Por ello, en el caso de que el proyecto utilice un generador de combustible fósil como respaldo, las emisiones se calcularán con un valor conservador por defecto de 1.3 tCO₂/MWh se tendría:

$$PEEC_y = ECPJ_y * 1.3$$

También se identificaron dos fuentes principales de consumo de electricidad en el proyecto.

$ECPJ_{flare,y}$ es la cantidad de electricidad consumida por el equipo de venteo en el año y

$ECPJ_{elec,y}$ es la cantidad de electricidad consumida por la planta de energía en el año y

Considerando ambas fuentes de consumo de electricidad, la ecuación final de emisiones del relleno en Bucaramanga es:

$$PEEC_y = (ECPJ_{elec,y} + ECPJ_{flare,y}) * 0.51696$$

Sin embargo, en el caso de utilizar un generador de combustible fósil de respaldo, la ecuación se modifica a:

$$PEEC_y = (ECPJ_{elec,y} + ECPJ_{flare,y}) * 1.3$$

4.2. Modelos predictivos con potencial aplicación a los proyectos de mecanismo de desarrollo limpio para la analítica de datos

Para el estudio, se recopiló información sobre el vertedero, incluido el nivel del agua subterránea, las precipitaciones anuales, el método de eliminación, la generación de desechos sólidos per cápita y el peso de los desechos sólidos. [207]

Los métodos para evaluar la producción de biogás se dividen en dos grupos:

- Modelos teóricos
- Mediciones directas

El propósito de los modelos teóricos es presentar los fenómenos químicos, físicos y biológicos que ocurren durante la descomposición de los residuos orgánicos. Estos modelos son ampliamente utilizados debido a la precisión de los resultados. Actualmente existen modelos de estimación de primer orden y de segundo orden, de los cuales el modelo de primer orden es el más utilizado debido a su facilidad de uso. La medición directa se basa en la recopilación de datos, pero solo se aplica a empresas que cuentan con un sistema de recolección de biogás, independientemente de su propósito.

4.2.1. *Machine learning*

El aprendizaje automático, o aprendizaje automático en español, es una rama de la inteligencia artificial que se enfoca en desarrollar algoritmos y modelos que permitan a las computadoras aprender y tomar decisiones sin programación directa. En lugar de seguir instrucciones específicas, los algoritmos de aprendizaje automático pueden aprender y mejorar a través de la experiencia y los datos que se les proporcionan.[208]

El concepto básico detrás del aprendizaje automático es que las máquinas pueden analizar datos, reconocer patrones y aprender de ellos para realizar tareas específicas. Estas tareas pueden incluir clasificación de datos, predicción de resultados, reconocimiento de imágenes, procesamiento de lenguaje natural y más.

El aprendizaje automático tiene una variedad de enfoques y técnicas que se pueden dividir en tres categorías principales.

- A. Aprendizaje supervisado: este enfoque implica entrenar un algoritmo de aprendizaje automático utilizando un conjunto de datos etiquetados, es decir, un conjunto de datos en el que cada instancia está asociada con una etiqueta o resultado conocido. Usando estos ejemplos, el algoritmo aprende a hacer conexiones entre las características de entrada y las etiquetas correspondientes. Después del entrenamiento, el modelo puede usar estas relaciones aprendidas para predecir etiquetas para nuevos datos.

- B. Aprendizaje no supervisado: en este caso, se aplica un algoritmo de aprendizaje automático a un conjunto de datos sin etiquetar, es decir, un conjunto de datos cuyo resultado o características se desconocen. El objetivo principal del aprendizaje no supervisado es descubrir patrones, estructuras o agrupaciones ocultas en los datos. Puede proporcionar información útil sobre los datos, identificar características relacionadas o agrupar datos en grupos similares.

- C. Aprendizaje por refuerzo: este enfoque se basa en el aprendizaje a través de la interacción y la retroalimentación. Un agente de aprendizaje interactúa con el entorno y realiza acciones. Según la calidad de las acciones realizadas, el agente es recompensado o castigado. A través de este proceso de prueba y error, el agente aprende a tomar decisiones que maximicen las recompensas esperadas.

El aprendizaje automático ha demostrado ser una herramienta poderosa para una amplia gama de aplicaciones, como reconocimiento de voz, detección de fraudes, recomendaciones de productos, diagnósticos médicos, conducción autónoma, análisis de datos y más. Los avances en el poder de procesamiento y el acceso a cantidades masivas de datos han impulsado el desarrollo y la aplicación del aprendizaje automático en diversas industrias y campos. [209]

4.2.2. Metodología Random Forest

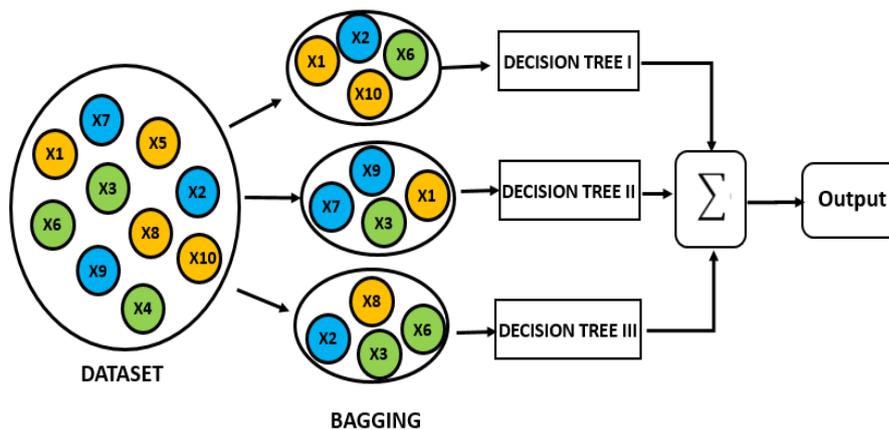
La metodología Random Forest es un algoritmo de Machine Learning que se utiliza para abordar problemas de clasificación y regresión. Se basa en la creación de múltiples árboles de decisión y combina sus resultados para obtener una predicción final. Se deben tener en cuenta la preparación de datos donde se realiza el procesamiento y la limpieza de los datos de entrenamiento esto puede incluir la eliminación de valores atípicos, la normalización de variables, el manejo de datos faltantes y la codificación de variables categóricas. [210] Además de proponer una creación de árboles de decisión permite combinar un conjunto de decisiones individuales utilizando una técnica llamada "bagging" o Bootstrap aggregating donde se implica tomar muestras aleatorias con reemplazo del conjunto de datos original y construir un árbol de decisión para cada muestra. Cada árbol se entrena utilizando una parte del conjunto de datos original durante la construcción de cada árbol, se seleccionan de forma aleatoria un subconjunto de características (variables) para dividir los datos en los nodos.

La combinación de resultados es representada una vez que se han creado todos los árboles, las predicciones individuales de cada árbol se combinan para obtener una predicción final, donde además se realiza una evaluación del modelo para evaluar el rendimiento del modelo utilizando métricas adecuadas para el problema específico, como precisión, exactitud, sensibilidad, F1-score o error cuadrático medio, dependiendo del tipo de tarea (clasificación o regresión).

Se pueden ajustar los hiperparámetros del modelo para mejorar su rendimiento donde algunos de los hiperparámetros comunes en Random Forest incluyen el número de árboles en el conjunto, la profundidad máxima de los árboles y el número mínimo de muestras requeridas para dividir un nodo. [211] Se debe hacer una validación del modelo que se ha sido ajustado, se valida su rendimiento utilizando conjuntos de datos de prueba independientes. Esto ayuda a evaluar cómo se generaliza el modelo a nuevos datos no vistos, la explicación general del modelo se representa en la figura 52.

Figura 52.

Metodología y técnica de random forest.



Nota. Es una combinación de árboles predictores tal que cada árbol depende de los valores de un vector aleatorio probado independientemente y con la misma distribución para cada uno de estos. Es una modificación sustancial de bagging que construye una larga colección de árboles no correlacionados y luego los promedia.

Tomado de: https://rpubs.com/SantanaAlec/Random_Forest,
<https://www.iartificial.net/random-forest-bosque-aleatorio/>

4.2.3. Metodología Redes Neuronales

Las redes neuronales son un conjunto de algoritmos de aprendizaje automático inspirados en el funcionamiento del cerebro humano. Están diseñados para reconocer patrones y relaciones complejos en grandes conjuntos de datos no lineales. Las redes neuronales constan de varias capas de nodos (o "neuronas"), cada capa conectada a neuronas de la siguiente capa. [212] Estas conexiones tienen "pesos" que se ajustan durante el entrenamiento para minimizar errores en las predicciones o clasificación de la red. Se trata de modelos computacionales inspirados en la estructura y función del cerebro humano, diseñados para reconocer patrones complejos y resolver problemas de aprendizaje automático. Estas redes constan de unidades básicas llamadas neuronas, organizadas en capas, que trabajan juntas para procesar datos y producir predicciones o clasificaciones. Posee una serie de componentes principales que resultan ser esenciales para su funcionamiento.

Neuronas (nodos): elementos de procesamiento básicos que reciben información, la procesan y producen resultados. Cada neurona aplica una función de activación a la suma ponderada de sus señales de entrada. [213]

La red neuronal consta de varias capas:

- Capa de entrada: recibe datos de entrada.
- Capa oculta: Una o más capas entre entrada y salida que procesan datos.
- Capa de salida: Genera la predicción o clasificación final.

Pesos y sesgos: parámetros configurables que determinan la importancia de las conexiones entre neuronas. Los pesos son los multiplicadores de los datos de entrada y los sesgos son constantes agregadas para ajustar los datos de salida.

Función de activación: funciones no lineales aplicadas a la salida de cada neurona para aumentar la complejidad del modelo, como ReLU (unidad lineal rectificadora), sigmoide y tanh.

Algoritmo de aprendizaje: proceso en el que se ajustan ponderaciones y sesgos para minimizar el error de predicción. El algoritmo de retropropagación es el más utilizado y se optimiza mediante técnicas como el descenso de gradiente. [213]

a. Tipos de redes neuronales:

- Red neuronal artificial (ANN): una forma básica de red neuronal adecuada para muchas tareas de predicción y clasificación.
- Red neuronal convolucional (CNN): se especializa en procesar datos estructurados en cuadrícula, como imágenes, y es conocida por su eficacia en el reconocimiento de patrones visuales.
- Redes neuronales recurrentes (RNN): adecuadas para datos secuenciales, como series de tiempo y texto, porque pueden almacenar información de entradas anteriores en la memoria interna.

Las redes neuronales se utilizan en muchos campos, entre ellos: reconocimiento de imágenes, procesamiento del lenguaje natural, diagnóstico médico, previsión financiera, vehículos autónomos y más. Su capacidad para aprender y sintetizar datos complejos los convierte en una herramienta valiosa para resolver problemas diversos y complejos.

b. Casos de estudio basados en la predicción de datos con redes neuronales

Existen varios casos de estudio en los que se han aplicado redes neuronales para la predicción de la contaminación del aire. A continuación, se presentan algunos ejemplos destacados:

- **Predicción de la Calidad del Aire en Beijing, China**

"Deep Air Quality Forecasting Using Hybrid Deep Learning Framework". En este estudio, los investigadores utilizaron una combinación de redes neuronales convolucionales (CNN) y redes neuronales recurrentes (RNN) para predecir la calidad del aire en Beijing. La CNN se empleó para extraer características espaciales de los datos, mientras que la RNN (específicamente LSTM, Long Short-Term Memory) se utilizó para capturar dependencias temporales, dicho modelo híbrido demostró ser más preciso que los métodos tradicionales y otras arquitecturas de redes neuronales en la predicción de niveles de PM2.5. [213]

- **Sistema de Predicción de Contaminación del Aire en Madrid, España.**

"A Comparative Study of Neural Network Architectures for Next-hour Air Quality Prediction in Urban Environments". Este estudio comparó diferentes arquitecturas de redes neuronales, incluyendo redes neuronales artificiales (ANN), redes neuronales convolucionales (CNN) y redes neuronales recurrentes (RNN), para predecir la contaminación del aire en Madrid. Los datos utilizados incluyeron mediciones históricas de contaminantes como NO₂ y PM₁₀, así como datos meteorológicos, como resultados las redes neuronales recurrentes (LSTM) mostraron un rendimiento superior en la predicción a corto plazo debido a su capacidad para manejar secuencias temporales. [214]

- **Predicción de Contaminación del Aire en Seúl, Corea del Sur**

"Hybrid Deep Learning Model for Forecasting Air Pollution". Este estudio utilizó un modelo híbrido que combina redes neuronales convolucionales (CNN) para el análisis espacial y redes neuronales recurrentes (LSTM) para el análisis temporal. Los datos incluyeron concentraciones de PM_{2.5}, datos meteorológicos y otras variables ambientales, con ello el modelo híbrido proporcionó predicciones más precisas en

comparación con modelos individuales de CNN y LSTM, demostrando la efectividad de combinar ambas técnicas.

- **Predicción de Niveles de Ozono en Houston, Texas, EE. UU.**

"Deep Neural Networks for Forecasting Ozone Pollution". En este estudio, se utilizó una red neuronal profunda (DNN) para predecir los niveles de ozono en Houston. Los datos incluyeron mediciones históricas de ozono, condiciones meteorológicas y otros factores ambientales, por lo tanto, la red neuronal profunda mostró una alta precisión en la predicción de niveles de ozono, superando a los modelos tradicionales de regresión lineal y otros enfoques de aprendizaje automático. [215]

4.3. Casos de estudio de modelos de métodos estadísticos

Los métodos estadísticos han desempeñado un papel esencial en el análisis de datos durante décadas, proporcionando poderosas herramientas para interpretar y modelar datos. En el contexto de los proyectos del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), los métodos estadísticos desempeñan un papel clave en la estimación de emisiones, la predicción de impactos ambientales y la optimización de recursos. Estos métodos permiten a investigadores y profesionales analizar con precisión grandes cantidades de datos, identificar tendencias importantes y tomar decisiones informadas basadas en datos cuantitativos. Los estudios de casos son una forma eficaz de ilustrar cómo aplicar métodos estadísticos a situaciones de la vida real para resolver problemas complejos. Esta sección presentará varios ejemplos de proyectos MDL que utilizan modelos estadísticos para resolver problemas específicos. Estos estudios de caso destacarán el uso de técnicas como la regresión, el análisis de series de tiempo, el modelado de mezclas y otros métodos estadísticos avanzados. [216]

Estos ejemplos mostrarán cómo los métodos estadísticos no sólo le ayudarán a comprender mejor sus datos, sino que también le proporcionarán una base sólida para tomar decisiones estratégicas. Explorará hallazgos, lecciones aprendidas y mejores prácticas para implementar estos modelos en futuros proyectos de desarrollo limpio, esto proporcionará una imagen integral de cómo las herramientas estadísticas pueden contribuir significativamente a la sostenibilidad y eficacia de los proyectos del MDL. Predecir la contaminación por la combustión de biogás requiere considerar

varias variables, incluida la composición del biogás, las condiciones de combustión, la eficiencia del equipo de combustión y la dispersión de contaminantes en el medio ambiente. A continuación, se proporciona la tabla 16 con la descripción general de algunos de los modelos que podrían ser considerados acertados para ello.

Tabla 16.

Modelos de métodos estadísticos.

Modelos	Explicación	Casos de modelos
Redes neuronales	<p>ANN es un modelo de aprendizaje automático que se puede utilizar para predecir las emisiones de contaminantes del aire en función de datos como la composición del biogás, la temperatura de combustión y la velocidad del viento. Estos modelos se pueden entrenar utilizando datos históricos de emisiones para mejorar la precisión de las predicciones.</p> <p>Recopila datos históricos de emisiones de la planta de quema de biogás y variables de entrada relevantes, como la composición del biogás y la temperatura de combustión. Luego se dividen los datos en conjuntos de entrenamiento y prueba y normalizar las variables de entrada.</p>	<p>Air Quality Prediction Using LSTM RNN and CNN-LSTM Hybrid Models. [216]</p> <p>A Novel Deep Learning Model for Air Pollution Prediction Based on CNN and Bi-LSTM. [217]</p> <p>Predicting Air Quality Index Using Machine Learning Techniques and Evaluating Their Performance.</p>
Random Forest	<p>El modelo genera múltiples árboles de decisión durante el entrenamiento. Cada árbol se construye utilizando un método llamado agrupación o anidamiento de arranque, lo que implica tomar muestras de reemplazo aleatorias del conjunto de datos original para entrenar cada árbol. Además, en cada paso de construcción del árbol, se selecciona un conjunto aleatorio de características (predictores) que se tendrán en cuenta al dividir los nodos. Esto se denomina "encapsulación de funciones" o "muestreo de funciones". Cultivo de árboles:</p> <p>Cada árbol se entrena utilizando una parte del conjunto de datos de entrenamiento y características seleccionadas aleatoriamente en ese momento. Después de entrenar se realizan predicciones combinando los resultados de todos los árboles. Para los cálculos de regresión, la estimación final suele ser el promedio de las estimaciones de todos los árboles del bosque. Los valores comunes utilizados en los cálculos de regresión incluyen el error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de determinación (R^2) y otras medidas de precisión.</p>	<p>Comparison of Random Forest and XGBoost Classifiers Using Integrated Optical and SAR Features for Mapping Urban Impervious Surface. [218]</p> <p>Siting and ranking municipal landfill sites in regional scale using nighttime satellite imagery. [219]</p> <p>Prediction of fugitive landfill gas hotspots using a random forest algorithm and Sentinel-2 data.</p> <p>HGSORF: Henry Gas Solubility Optimization-based Random Forest for C-Section prediction and XAI-based cause analysis. [220]</p>

Tabla 16.

Continuación

<p>Análisis de Regresión múltiple</p>	<p>Suele ser utilizado para predecir la producción de gases en función de variables como la temperatura, la humedad, la composición de los residuos, el tiempo desde el cierre del vertedero, entre otros. Esto permite entender mejor los factores que influyen en la generación de gas y tomar decisiones informadas para su gestión.</p>	<p>Multivariate Linear Regression Model for Predicting Air Pollution Levels in Urban Areas. [221] Using Multiple Linear Regression and Artificial Neural Networks to Predict Air Quality in Urban Environments.</p>
<p>Análisis de series de tiempo</p>	<p>El análisis de series de tiempo puede ser utilizado para modelar y predecir la producción de gases a lo largo del tiempo, teniendo en cuenta patrones estacionales, tendencias a largo plazo y posibles ciclos relacionados con cambios en la gestión del vertedero o condiciones ambientales. Esto proporciona información valiosa para la planificación y optimización de la captura y aprovechamiento de landfill gas</p>	<p>Time Series Analysis for Air Quality Forecasting: ARIMA and Prophet Models. [221] Forecasting Air Quality Using Time Series Analysis and Machine Learning Models.</p>
<p>Dispersión atmosférica</p>	<p>Este modelo se utiliza para predecir la dispersión de contaminantes en la atmósfera provenientes de fuentes como la combustión de biogás. El modelo calcula las concentraciones de contaminantes en diferentes lugares, teniendo en cuenta factores como la velocidad y dirección del viento, la estabilidad atmosférica y las características del terreno. Recopilar datos meteorológicos locales, como la velocidad y dirección del viento, la temperatura y la estabilidad atmosférica. Determinar la ubicación de la fuente de emisión (por ejemplo, la planta de quema de biogás) y las características de emisión del biogás. Utilizar software especializado en modelado de dispersión atmosférica, como AERMOD y CALPUFF, para simular la dispersión de contaminantes en la atmósfera. Calibrar el modelo utilizando datos de emisiones y mediciones de calidad del aire para mejorar la precisión de las predicciones.</p>	<p>Modeling Atmospheric Dispersion of Pollutants Using Gaussian Plume Model. Application of CALPUFF Model for Air Pollution Dispersion Simulation in Urban Areas. [221]</p>

Tabla 16.*Continuación*

LandGEM	Representa un modelo de predicción desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estado Unidos (EPA) para estimar la generación de gas en vertederos, la cual tiene como objetivo principal evaluar el potencial de generación de biogás como fuente de energía renovable. Utilizando datos específicos de los vertederos como la cantidad de residuos depositados, la composición de los residuos y las condiciones climáticas para calcular propiamente la producción de metano	Estimation of landfill gas and its renewable energy potential in Lagos, Nigeria [222] Estimation of gas emission and derived electrical power generation from landfills. Trinidad and Tobago as study case. [222]
LandSim	El software integra datos relacionados con los vertederos, como la composición de los residuos, la cantidad de residuos eliminados, la topografía del vertedero, la cobertura del suelo y las condiciones climáticas locales. Estos datos se utilizan para modelar la digestión anaeróbica de residuos, la producción de biogás y metano a lo largo del tiempo. Se pueden evaluar diferentes escenarios operativos para comprender cómo los cambios específicos en la gestión de residuos o las condiciones ambientales afectarán la producción de gas de vertedero. LandSim es útil para realizar evaluaciones de impacto porque puede evaluar cómo las diferentes estrategias de gestión de residuos y los cambios en las condiciones operativas afectarán la producción total de biogás, la eficiencia de la captura de gas, el metano y otras emisiones de gases de efecto invernadero. El software también puede proporcionar influencia y orientación sobre la viabilidad económica y ambiental de implementar prácticas o tecnologías específicas de gestión de gases de vertedero.	Household Hazardous Waste Disposal to Landfill: Using Landsim to Model Leachate Migration. Optimization of a landfill gas collection shutdown based on an adapted first-order decay model. [223]
GasSim	GasSim se centra en la modelización de la generación de gas en vertederos y permite simular diferentes estrategias de gestión de residuos para evaluar su impacto en la producción de biogás. Es utilizado para estudiar la viabilidad de proyectos de captura y utilización de biogás.	Assessment of electricity generation potential and economic analysis through different municipal solid waste management scenarios: a case study [223]

4.3.1. Casos de estudio menos conocidos

Otros modelos o evaluaciones que son útiles a la hora de predecir la contaminación en un punto específico pueden ser los mencionados a continuación, pero se debe de tener en cuenta que son modelos nuevos y no tan estandarizados como los explicados con anterioridad:

- **Modelo de combustión:** Este modelo tiene como objetivo predecir las emisiones producidas durante el proceso de combustión del biogás. Estiman las emisiones de contaminantes del aire como CO₂, CO, NO_x y partículas teniendo en cuenta factores como la composición del biogás, la temperatura de combustión, la relación aire-combustible y la eficiencia de la combustión. Análisis de la composición e identificación de los componentes clave como metano, dióxido de carbono y otros contaminantes potenciales. [224]

Uso de modelos de combustión como equilibrio químico o modelos de mezcla completa para simular la combustión de biogás y predecir emisiones contaminantes. Al realizar simulaciones, se deben considerar factores como la relación aire-combustible, la temperatura de combustión y la eficiencia del equipo de combustión. Por último, se validan los resultados del modelo midiendo las emisiones en condiciones controladas de laboratorio o del mundo real.

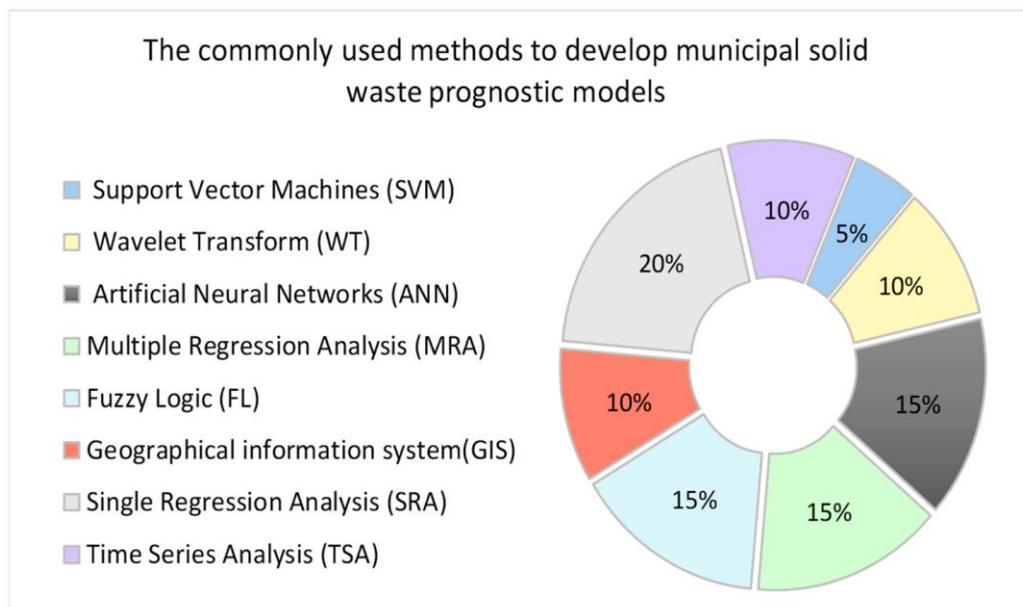
- **Modelo de Evaluación de Impacto Ambiental:** Este modelo evalúa los impactos ambientales de la combustión de biogás en términos de calidad del aire, calidad del agua, calidad del suelo y salud humana. Utilizan datos sobre emisiones, concentraciones de contaminantes y factores de exposición para predecir efectos adversos para el medio ambiente y la salud. Utilizar los resultados de las concentraciones de contaminantes en el aire, evalúa los impactos ambientales de estas concentraciones utilizando modelos de exposición humana y efectos sobre la salud, como el modelo USEPA BenMAP, por último, se considera otros impactos ambientales, como la deposición de contaminantes en el suelo y el agua, utilizando modelos de transporte y transformación de contaminantes.[224]
- **Modelo de ciclo de vida (LCA):** Un modelo LCA evalúa el impacto ambiental de un producto o proceso a lo largo de su ciclo de vida, desde la extracción de la materia prima hasta la disposición final. Estos modelos se pueden utilizar para comparar diferentes opciones de eliminación de residuos, como quemar biogás y eliminarlo o convertirlo en energía. Identificar y recopilar datos sobre el ciclo de vida completo del proceso de tratamiento de residuos, desde la recolección hasta la disposición final. Utilizar software de LCA, como SimaPro o OpenLCA,

para modelar el flujo de materiales y energía a lo largo de todo el ciclo de vida y calcular los impactos ambientales asociados luego se compara diferentes opciones de tratamiento de residuos, como la quema de biogás frente al vertido o la conversión en energía, en términos de su impacto ambiental total.[224]

Por último, se tiene la Figura 53 donde se observa la lista de métodos que se utilizan comúnmente para desarrollar modelos de previsión de residuos, observando como el modelo de redes neuronales posee un 15% de utilidad debido a su gran versatilidad y manejo de aspectos específicos.

Figura 53.

Lista de métodos que se utilizan comúnmente para desarrollar modelos de previsión de residuos.



Nota. Modelos más comunes de software que permiten la modelación de contaminación de residuos. **Tomado de:**

http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2309-04132022000100044

4.3.2. Librerías para los Modelos analíticos

Para lograr que los modelos anteriormente nombrados funcionen se debe tener en cuenta los sistemas en los que se ejecutan por lo tanto en el entorno se abordan dos sistemas de software como lo son R y Python de los cuales existen una amplia gama de librerías con alta capacidad e información que permiten con datos precisos desarrollar modelos eficientes para prever la producción y comportamiento de los gases en vertederos. Explorando las principales librerías disponibles en dos lenguajes de programación. [225] Desde las librerías clásicas hasta las más modernas y especializadas, cada una ofrece sus propias fortalezas y funcionalidades que facilitan la construcción y evaluación de modelos de predicción para landfill gas. Como se puede observar en la siguiente tabla (Tabla 17) se presentan las librerías más adecuadas para las modelos proporcionadas por los lenguajes de programación:

Tabla 17.

Principales librerías de lenguajes de programación.

Modelos Software	Librerías
	<p>Pandas: Es una librería fundamental para el análisis y manipulación de datos en Python, suele ayudar a preparar datos antes de construir modelos de predicción.</p> <p>NumPy: Uso principalmente para operaciones matemáticas y manipulación de matrices, que son comunes en el análisis de datos y la modelización.</p> <p>Scikit-learn: Proporciona una amplia gama de algoritmos de modelización, como regresión lineal, bosques aleatorios, máquinas de vectores de soporte (SVM), etc.</p> <p>TensorFlow y Keras: TensorFlow es un marco de aprendizaje automático de extremo a extremo, mientras que Keras proporciona una API de alto nivel para construir y entrenar modelos de aprendizaje profundo.</p> <p>XGBoost: Al igual que en R, XGBoost es una librería útil para la construcción de modelos de árboles de decisión potenciados por gradientes.</p> <p>Prophet: Esta librería es útil para el pronóstico de series temporales con estacionalidad y tendencias</p>

Nota. Librerías de Python más comunes de software que permiten la modelación de contaminación de residuos.

4.4. Descripción de los códigos y herramientas utilizadas por medio de GitHub

En el campo del pronóstico de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el uso de códigos y herramientas computacionales es necesario para desarrollar, probar y optimizar modelos de pronóstico. GitHub, la plataforma de colaboración para desarrolladores, se ha convertido en una herramienta esencial para gestionar y compartir estos recursos. Este artículo describe el código y las herramientas utilizadas para desarrollar modelos de pronóstico de emisiones de gases de efecto invernadero y destaca cómo GitHub admite la colaboración, el control de versiones y la implementación de soluciones de vanguardia. Se describen detalladamente las bibliotecas y marcos utilizados, el entorno de desarrollo configurado y las mejores prácticas utilizadas para garantizar procesos de análisis y modelado repetibles y eficientes. [226]

En este apartado se esquematiza el modelo a utilizar con inspiración de diversos modelos de redes neuronales para predecir la contaminación del aire en diferentes ciudades. Utilizando datos simulados para demostrar el proceso de entrenamiento del modelo, la generación de gráficas y el cálculo del factor de emisión.

a. Cargar las librerías necesarias

Primero, se cargan todas las librerías que serán utilizadas en el análisis demostrado en la figura 54, para cada una de las librerías se tiene una función específica que se describe en detalle.

Figura 54.

Carga de librerías.

```
import numpy as np
import pandas as pd
from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler
from tensorflow.keras.models import Sequential
from tensorflow.keras.layers import LSTM, Dense
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.interpolate import make_interp_spline>
```

Nota. Lista de librerías para modelo de software.

- *numpy*: Biblioteca fundamental para realizar operaciones numéricas en Python, como la creación y manipulación de arreglos multidimensionales.
- *pandas*: Utilizada para la manipulación y el análisis de datos, proporciona estructuras de datos y operaciones para manipular tablas numéricas y series temporales.
- *MinMaxScaler* de *sklearn.preprocessing*: Herramienta para escalar o normalizar los datos, ajustando todos los valores en un rango específico, generalmente [0, 1].
- *Sequential*, *LSTM* y *Dense* de *tensorflow.keras*: Herramientas para construir redes neuronales. *Sequential* facilita la creación de modelos lineales, *LSTM* es una capa de red neuronal recurrente adecuada para series temporales, y *Dense* es una capa completamente conectada.
- *matplotlib.pyplot*: Biblioteca para crear visualizaciones de datos, como gráficos de líneas, barras, dispersión, etc.
- *make_interp_spline* de *scipy.interpolate*: Utilizada para suavizar curvas en gráficos, creando una interpolación spline suave a partir de un conjunto de puntos de datos.

b. Función para cargar los datos de Excel

Con el propósito de cargar datos desde un archivo de Excel, se implementa la función `pd.read_excel(file)` la cual usa *pandas* para leer el archivo Excel especificado en `file` y cargarlo en un `DataFrame`. Se llama a esta función proporcionando la ruta del archivo Excel, y devuelve un `DataFrame` con los datos (Figura 55).

Figura 55.

Carga de datos de Excel.

```
def load_data(file):  
    data = pd.read_excel(file)  
    return data
```

Nota. Código para carga de datos.

c. Función para preparar datos

Para preparar los datos para entrenar el modelo LSTM, se implementa una entrada data (DataFrame), time_steps (número de pasos de tiempo), donde se crea secuencias de longitud time_steps demostrado en la figura 56:

- X contiene las secuencias de entrada (subconjuntos de time_steps filas de las primeras 3 columnas).
- y contiene las etiquetas correspondientes (la fila siguiente a cada secuencia en las primeras 3 columnas).

X y y son convertidos a arreglos numpy con esta función es útil para convertir los datos en un formato adecuado para entrenar redes neuronales LSTM, que requieren secuencias de datos.

Figura 56.

Preparación de datos.

```
file = 'Nombre del archivo'  
time_steps = 10  
num_years = 20  
num_simulations = 10
```

Nota. Preparación de datos para análisis de software.

d. Cargar los datos

En este apartado se encuentra una función que permite verificar si un archivo existe en la ruta especificada antes de intentar leerlo demostrado en la figura 57. Si el archivo no existe, lanza un error; así se verifica que las bases de datos tengan la información requerida para el modelo de predicción.

Figura 57.

Carga de datos.

```
data = load_data(file)
```

Nota. Carga de datos mediante load_data.

e. Leer datos de bases de datos comprimidas

Esta sección lee los datos de diferentes archivos especificados, se propone las bases de datos provenientes de los estudios realizados en las ciudades de Pasto, Bucaramanga y Villavicencio de los proyectos de mecanismo de desarrollo limpio diagnosticados en archivos de Excel como se observa en la figura 58.

Figura 58.

Lectura de datos comprimidos.

```
scaler = MinMaxScaler(feature_range=(0, 1))  
data_normalized = scaler.fit_transform(data)
```

Nota. Lectura de los datos cargados.

f. Creación de dataset

Figura 59.

Creación data base.

```
X, y = prepare_data(pd.DataFrame(data_normalized), time_steps)
```

Nota. Algoritmo para creación de base de datos.

g. División de los datos en conjuntos de entrenamiento y pruebas

Se definen las variables objetivo que se desean predecir, con la función donde se enlista la cantidad de variables dependientes que el modelo tratará de predecir, como en la Figura 60.

Figura 60.

División de datos.

```
train_size = int(len(X) * 0.7)
X_train, X_test = X[:train_size], X[train_size:]
y_train, y_test = y[:train_size], y[train_size:]
```

Nota. Modelo de para división de datos.

h. Definir modelo LSTM

Se crea y configurar el modelo de red neuronal LSTM como se demuestra en la figura 61.

model = Sequential() para iniciar un modelo secuencial.

model.add(LSTM(...)) Añade una capa LSTM con 50 unidades (neuronas) y la forma de entrada especificada.

model.add(Dense(...)) Añade una capa densa (totalmente conectada) con 3 unidades de salida.

Figura 61.

Definición del modelo LSTM.

```
model = Sequential()
model.add(LSTM(units=50, return_sequences=False, input_shape=(time_steps, 3)))
model.add(Dense(units=3))
```

Nota. Modelo que permite realizar el modelo LSTM.

i. Compilar el modelo

Configurar el modelo con el optimizador y la función de pérdida.

`optimizer='adam'` Utiliza el optimizador Adam, que es eficiente y adecuado para muchos problemas.

`loss='mean_squared_error'` Usa la pérdida del error cuadrático medio, adecuada para regresión.

Figura 62.

Compilación de datos.

```
model.compile(optimizer='adam', loss='mean_squared_error')
```

Nota. Modelo de para compilación de datos presentados

j. Entrenar modelo de predicción

Ajustar los pesos del modelo utilizando los datos de entrenamiento, demostrado en la figura 63.

`epochs=50`: Número de veces que el algoritmo verá el conjunto de entrenamiento completo.

`batch_size=32`: Número de muestras por actualización de gradiente.

`validation_split=0.2`: Usa el 20% del conjunto de entrenamiento para validación durante el entrenamiento.

Figura 63.

Entrenamiento de predicción.

```
model.fit(X_train, y_train, epochs=50, batch_size=32, validation_split=0.2)
```

Nota. Principio de algoritmo para predicción.

k. Función para hacer predicciones futuras

Realizar predicciones futuras utilizando el modelo entrenado, con las siguientes funciones como se muestra 64.

Entrada: `model` (el modelo entrenado), `current_data` (los datos actuales), `num_years` (número de años para predecir), `noise_level` (nivel de ruido aleatorio para añadir variabilidad).

Para cada año en `num_years`:

Actualiza `current_data` con la nueva predicción.

Salida: `future_predictions` contiene las predicciones para los próximos `num_years` años. La serie de predicciones futuras se basa en el modelo y los datos actuales.

Figura 64.

Función para predicción.

```
def make_future_predictions(model, current_data, num_years, noise_level):
    future_predictions = []
    for _ in range(num_years):
        next_year_prediction = model.predict(current_data)
        next_year_prediction += np.random.normal(0, noise_level, next_year_prediction.shape)
        future_predictions.append(next_year_prediction)
        current_data = np.concatenate([current_data[:, 1:, :], next_year_prediction.reshape(1, 1, 3)], axis=1)
    return np.array(future_predictions).reshape(-1, 3)
```

Nota. Modelo principal para predicción de datos.

l. Hacer múltiples simulaciones de predicciones futuras

Se generan varias simulaciones para evaluar la variabilidad en las predicciones se realizó el modelo proporcionado en la figura 65.

Implementación:

La función `num_simulations` realiza varias simulaciones.

`current_data`: Inicializa los datos actuales con las últimas `time_steps` muestras de los datos normalizados.

`noise_level`: Genera un nivel de ruido aleatorio para cada simulación.

`make_future_predictions`: Realiza predicciones futuras utilizando el modelo y los datos actuales. Almacena las predicciones en `all_predictions`.

Figura 65.

Función para múltiples simulaciones.

```
all_predictions = []
for i in range(num_simulations):
    current_data = data_normalized[-time_steps:].reshape(1, time_steps, 3)
    noise_level = np.random.uniform(0.01, 0.1)
    future_predictions = make_future_predictions(model, current_data, num_years, noise_level)
    all_predictions.append(future_predictions)
```

Nota. Funciones establecidas para función de simulación.

m. Desnormalizar las predicciones

Convertir las predicciones normalizadas de vuelta a su escala original por ello se adaptó al sistema demostrado en la figura 66 donde se utiliza `scaler.inverse_transform` para desnormalizar cada predicción en `all_predictions` y como resultado se tiene `all_predictions_descaled` el cual contiene las predicciones en su escala original, listas para ser interpretadas.

Figura 66.

Desnormalización de simulaciones.

```
all_predictions_descaled = [scaler.inverse_transform(pred) for pred in all_predictions]
```

Nota. Modelo de para compilación de datos presentados

n. Crear una lista de años

Se genera una lista de años (Figura 67) para el período de predicción. Utiliza una comprensión de listas para crear un arreglo de años desde 2022 hasta 2022 + `num_years` y el apartado `years` contiene los años correspondientes a las predicciones.

Figura 67.

Lista de años.

```
years = np.array([2022 + i for i in range(num_years)])
```

Nota. Lista de tiempo para modelo.

o. Graficar todas las simulaciones de predicciones

Configurar el gráfico para visualizar las predicciones y definir una función para suavizar las líneas con funciones tipo `plt.Figura(figsize=(12, 8))`: que permite configurar el tamaño del gráfico y `smooth_line` que logra define una función que toma `x` e `y`, y devuelve una versión suavizada de estos valores usando interpolación spline como se muestra en la figura 68.

Figura 68.

Plot de figuras.

```
plt.figure(figsize=(12, 8))
```

Nota. Algoritmo para presentación y grafica de resultados.

p. Definir funciones para obtener colores en base a valores

Asignar colores a las líneas del gráfico en función de los valores predichos, demostrado en la figura 69.

`get_green_color(value)`: Calcula el color verde, más claro a medida que el valor se aleja del rango inicial.

`get_yellow_color(value)`: Calcula el color amarillo, ajustándose entre dos valores continuos.

`get_red_color(value)`: Calcula el color rojo, más intenso a medida que el valor se aproxima a un valor extremo.

Figura 69.

Definición de funciones para colores.

```
def smooth_line(x, y, factor=300):  
    xnew = np.linspace(x.min(), x.max(), factor)  
    spl = make_interp_spline(x, y, k=3)  
    ynew = spl(xnew)  
    return xnew, ynew
```

Nota. Modelo de para compilación de datos presentados

q. Graficar las predicciones de cada simulación con colores dependiendo de los valores

En la figura 70 se logra visualizar las predicciones, asignando colores basados en los valores, lo cual itera sobre cada simulación (`all_predictions_descaled`) y cada serie dentro de cada predicción haciendo uso de `smooth_line` para suavizar los valores predichos.

Asigna colores a las líneas basándose en los valores usando `get_green_color`, `get_yellow_color`, y `get_red_color`; finalmente `plt.plot(...)` grafica las líneas segmentadas para aplicar los colores apropiados.

Figura 70.

Grafica de predicción por simulación.

```
for i, prediction in enumerate(all_predictions_descaled):
    for j in range(3):
        x_smooth, y_smooth = smooth_line(years, prediction[:, j])
        for k in range(len(x_smooth) - 1):
            value = y_smooth[k]
            if value > 475:
                color = get_red_color(value)
            elif 430 <= value <= 475:
                color = get_yellow_color(value)
            else:
                color = get_green_color(value)
            plt.plot(x_smooth[k:k+2], y_smooth[k:k+2], linestyle='-', color=color, alpha=1)
```

Nota. Delimitación de colores para grafica de resultados.

r. Nombre de ejes

`plt.xlabel('Año')`: Etiqueta del eje x.

`plt.ylabel('Cantidad de kilotoneladas mitigadas de CO2')`: Etiqueta del eje y.

`plt.title(...)`: Título del gráfico.

`plt.grid(True)`: Añade una cuadrícula para facilitar la lectura de valores.

Figura 71.

Nombre de ejes para grafica.

```
plt.xlabel('Año')
plt.ylabel('Cantidad de kilotoneladas mitigadas de CO2')
plt.title('Predicciones para los próximos años en Bucaramanga con 0.9')
plt.grid(True)
```

Nota. Denominación de nombres de ejes.

s. Ajustar la leyenda para evitar sobreposición

Como se logra visualizar en la figura 72 se debe ajustar la leyenda para evitar sobreposición y asegurar una presentación clara haciendo uso de `plt.gca().get_legend_handles_labels()` la cual obtiene los manejadores y etiquetas de la leyenda.

`dict(zip(labels, handles))`: Crea un diccionario para eliminar duplicados.

`plt.legend(...)`: Configura la leyenda en una ubicación adecuada.

Figura 72.

Ajuste de leyenda para grafica.

```
handles, labels = plt.gca().get_legend_handles_labels()
by_label = dict(zip(labels, handles))
plt.legend(by_label.values(), by_label.keys(), loc='upper left', bbox_to_anchor=(1, 1), ncol=1, fontsize='small')
```

Nota. Ajuste de datos para leyenda de graficas.

t. Ajustar el rango del eje y

`plt.ylim()`: Ajusta el rango del eje y para una mejor visualización.

`plt.xticks(years)`: Asegura que el eje x muestre números enteros correspondientes a los años.

`plt.tight_layout()`: Ajusta automáticamente el diseño del gráfico para evitar superposición.

`plt.show()`: Muestra el gráfico

Figura 73.

Ajuste de límites de grafica.

```
plt.ylim(400, 520)
```

Nota. Limitación de datos.

Figura 74.

Plot de variables.

```
plt.xticks(years)
plt.tight_layout()
plt.show()
```

Nota. Modelo de grafica final.

u. Finalización y muestra de grafico

Como se muestra en la figura 75 las predicciones futuras para cada simulación año por año donde implementa e itera sobre cada simulación y año, imprimiendo los valores predichos dando como resultados en consola de las predicciones futuras, proporcionando una visión detallada de los resultados.

Figura 75.

Muestra de grafico final.

```
print("Predicciones para los próximos 20 años (año por año):")
for i, prediction in enumerate(all_predictions_descaled):
    print(f"Simulación {i+1}:")
    for j, year_prediction in enumerate(prediction):
        print(f"Año {2022+j}: {year_prediction}")
```

Nota. Demostración final para denominación de grafica de predicción.

4.5. Toma de decisiones basada en datos y resultados de predicción de datos

El análisis de la tecnología y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en los ecoparques es una herramienta esencial para la toma de decisiones y el seguimiento de los proyectos del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) en el país. Diseñados para promover la protección ambiental y el desarrollo sostenible, estos parques son lugares ideales para implementar tecnologías avanzadas para monitorear y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. [227]

El uso de modelos predictivos y análisis de datos en este contexto no solo facilita la evaluación del impacto ambiental de las tecnologías implementadas, sino que también proporciona información valiosa para optimizar, optimizar y mejorar continuamente estos proyectos. Al analizar los datos recopilados de los parques ecológicos, es posible identificar patrones, tendencias y oportunidades para medidas de reducción de emisiones más efectivas.

Este enfoque permite a los tomadores de decisiones tener herramientas basadas en datos específicas y precisas, aumentando la transparencia y la eficiencia en la gestión de proyectos. Además, también proporciona una base sólida para el seguimiento y la evaluación continuos, asegurando la implementación efectiva y sostenible de los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Para esta sección veremos cómo el análisis de la tecnología y las emisiones en los ecoparques puede mejorar la gestión de los proyectos del Mecanismo Nacional de Desarrollo Limpio, contribuyendo significativamente a la lucha contra el Cambio Climático.[227]

4.5.1. *Recolección de datos y explicación de modelo estadístico*

El código realiza predicciones sobre la mitigación de CO₂ en Bucaramanga utilizando una red neuronal de tipo LSTM (Long Short-Term Memory). Primero, se importan las bibliotecas necesarias, incluyendo numpy y pandas para la manipulación de datos, MinMaxScaler para la normalización, Sequential y LSTM de Keras para construir y entrenar el modelo de predicción, y matplotlib y scipy.interpolate para la visualización de resultados.

La función `load_data` se encarga de cargar los datos desde un archivo de Excel, y la función `prepare_data` estructura estos datos en secuencias adecuadas para el modelo LSTM, con un número específico de pasos de tiempo. Los datos son normalizados para mejorar el rendimiento del modelo.

El modelo LSTM se define con una capa LSTM y una capa densa. Se compila utilizando el optimizador 'adam' y se entrena con los datos preparados, dividiendo estos en conjuntos de entrenamiento y prueba para validar su rendimiento. [228]

Para hacer predicciones futuras, se define la función `make_future_predictions`, la cual genera predicciones iterativas para un número especificado de años, incorporando una cantidad aleatoria de ruido para simular la incertidumbre en las predicciones. Se realizan múltiples simulaciones para obtener un rango de posibles futuros escenarios.

Al hacer uso de la función `train_size` se establece un porcentaje máximo de datos reales con el cual el algoritmo va a trabajar así entre más alto sea el porcentaje más datos de la base proporcionada tomará, esto resulta ser eficiente si se desea hacer una predicción de pocos años o con una base de datos muy corta, pero para estos casos se realizará 3 diferentes modelos y graficas viendo cual modelo es más apropiado para el caso de estudio realizado. Los tres casos que se tendrán en cuenta son con 70% de afinidad, 80% de afinidad y 90% de afinidad; así se lograra observar con qué porcentaje los datos tiendan comportarse de manera más asertiva.[229]

Las predicciones generadas son desnormalizadas para volver a su escala original y se grafican. Las predicciones para los diferentes años se suavizan utilizando interpolación cúbica, y se colorean dependiendo de los valores predichos para visualizar mejor las tendencias y la variabilidad. Los colores verde, amarillo y rojo se usan para indicar diferentes rangos de valores, facilitando la interpretación de los resultados.

Finalmente, se muestra una gráfica que presenta las predicciones de mitigación de CO₂ para los próximos 20 años, destacando los valores con colores y suavizando las líneas para una mejor visualización. También se imprimen las predicciones de cada

simulación año por año, proporcionando una visión detallada de los posibles escenarios futuros.

4.5.2. Análisis de sensibilidad e interpretación de resultados

En las siguientes graficas se muestra las predicciones de mitigación de CO₂ en Pasto para los próximos 20 años (de 2022 a 2041) basadas en múltiples simulaciones. Estas predicciones están expresadas en kilotoneladas de CO₂ mitigadas y son el resultado de un modelo de red neuronal LSTM, que ha sido entrenado con datos históricos y genera proyecciones futuras; las líneas en la gráfica representan diferentes simulaciones, cada una de las cuales incorpora un nivel de ruido aleatorio para reflejar la incertidumbre en las predicciones estas líneas están suavizadas usando interpolación cúbica para mejorar la visualización de las tendencias. Además, se presentan 3 diferentes gamas de colores que permiten establecer que tan posible sean los datos de predicción en donde el color verde representa que serán los datos más posibles, el amarillo los datos que podían ocurrir con ciertas medias e implementaciones y, por último, Rojo que representa el resultado más lejano y poco posible.[230][231]

a. Gráficas y análisis relacionado con Pasto.

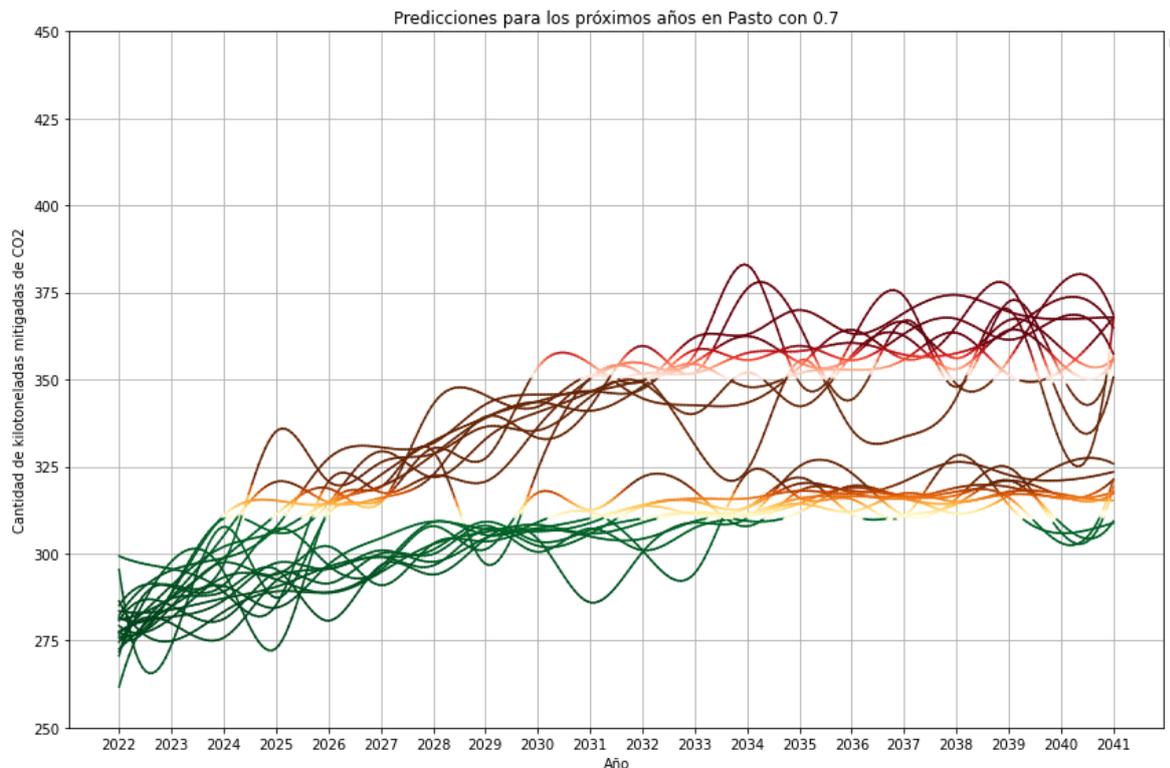
Para la figura 76 se logra observar como la mayoría de las simulaciones muestran una tendencia ascendente en la cantidad de CO₂ mitigado desde el año 2022 hasta alrededor del año 2030-2035, después de lo cual las predicciones se estabilizan o muestran fluctuaciones más significativas. Además, que existe una notable variabilidad en las predicciones, especialmente en los años posteriores a 2030, lo que refleja la incertidumbre inherente en las proyecciones a largo plazo.

Las predicciones comienzan alrededor de 275 kilotoneladas en 2022 y tienden a aumentar, con muchas simulaciones alcanzando entre 300 y 350 kilotoneladas en años futuros. Algunas simulaciones alcanzan valores por encima de 400 kilotoneladas, representadas en tonos más rojos por lo tanto resultarían ser los escenarios menos posibles a diferencia del color más bajo que predominan en los

primeros años de las predicciones (verdes y amarillos), mientras que los valores más altos (naranjas y rojos) son más frecuentes en los años más lejanos, argumentando que para esos años se pueda tener mayores capacidades tecnológicas y económicas que faciliten la llegada a los valores de mitigación estipulados.

Figura 76.

Predicción para los próximos años en Pasto con 70% de afinidad.

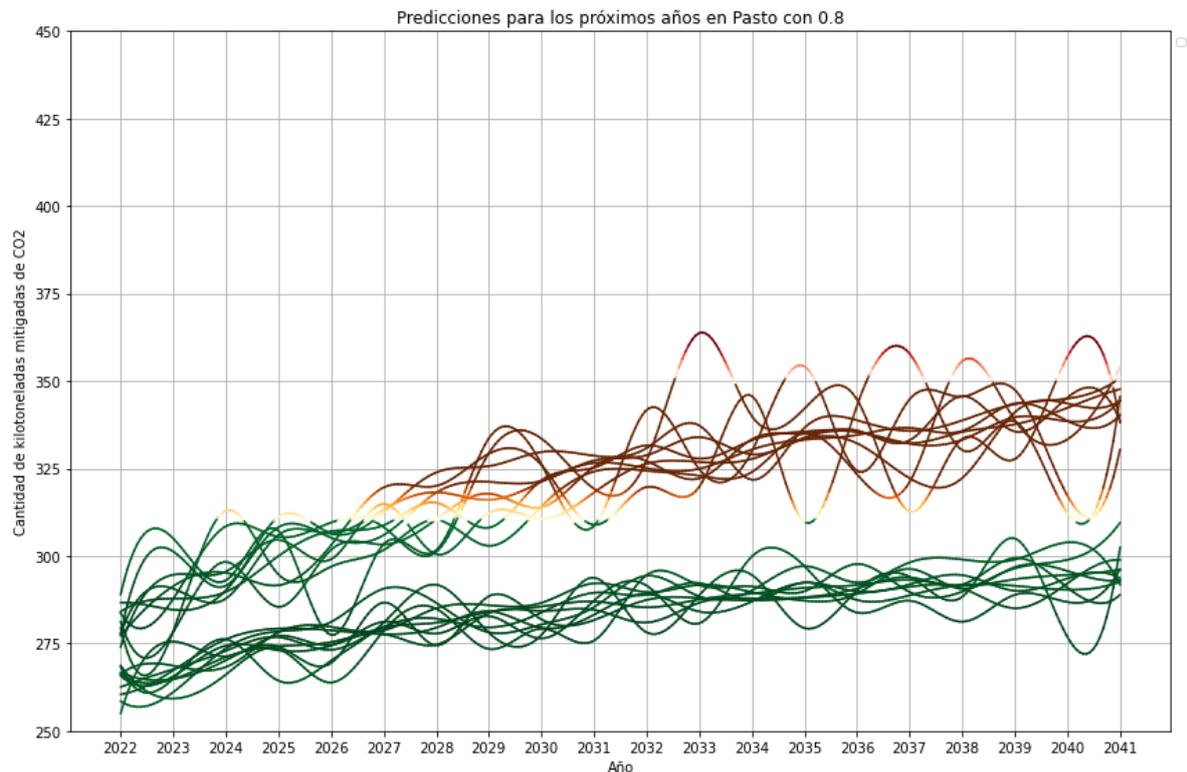


Nota. Modelo generado mediante el software explicado.

Para el segundo caso de estudio representado en la Figura 77 se tiene una afinidad de datos relacionada con un 80% de los datos proporcionados donde se puede observar un claro cambio de dinámica en cuanto a la cantidad de CO₂ que se puede mitigar a lo largo del periodo establecido viendo como hasta el año 2041 se podría tener una línea consecutiva de datos mitigados entre un rango de 250 kilotoneladas y 300 kilotoneladas esto graficas a la toma de decisiones que ha tenido el relleno en los últimos años, ya que ha albergado mayor cantidad de residuos y por lo tanto ha necesitado mayor cantidad de antorchas de quema de gas para lograr cantidades propuestas.

Figura 77.

Predicción para los próximos años en Pasto con 80% de afinidad.

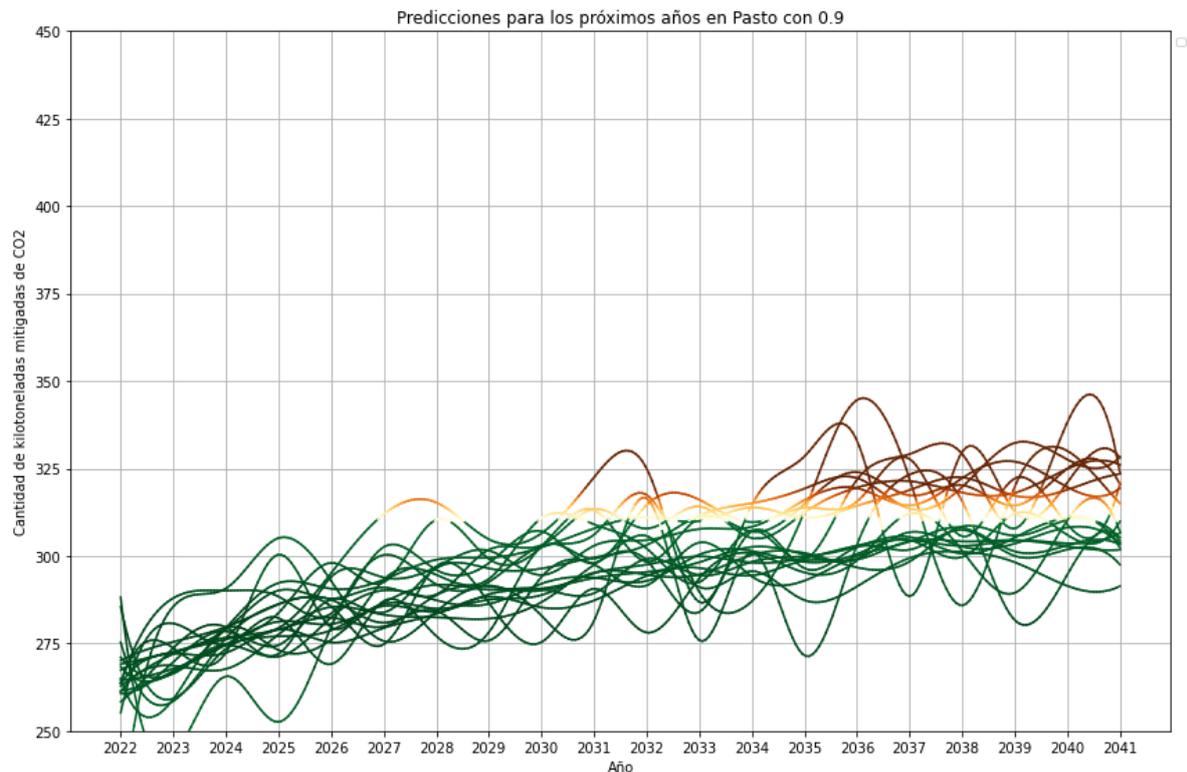


Nota. Modelo generado mediante el software explicado.

Por ultimo y para finalizar con el relleno sanitario EMAS ubicado en zonas aledañas a Pasto se observa el caso final de afinidad del 90% para así entender cuál es el mejor modelo para la predicción de datos de esta ciudad como se observa en la figura 78, viendo como al igual que con la afinidad del 80% todos los años tienen una misma probabilidad de mitigación bastante alta entre los 250 y 300 kilotoneladas anuales, siendo el modelo de predicción más acertado de los tres por la similitud de datos a futuro además que presenta mayor cantidad de varianza por los dilemas económicos y poblacionales, estos datos ya habían sido presentados con anterioridad y recopilados para las predicciones. Por esto último el modelo de 90% de afinidad es el modelo más acertado y considerado para la posible toma de decisiones en el relleno EMAS.

Figura 78.

Predicción para los próximos años en Pasto con 90% de afinidad.



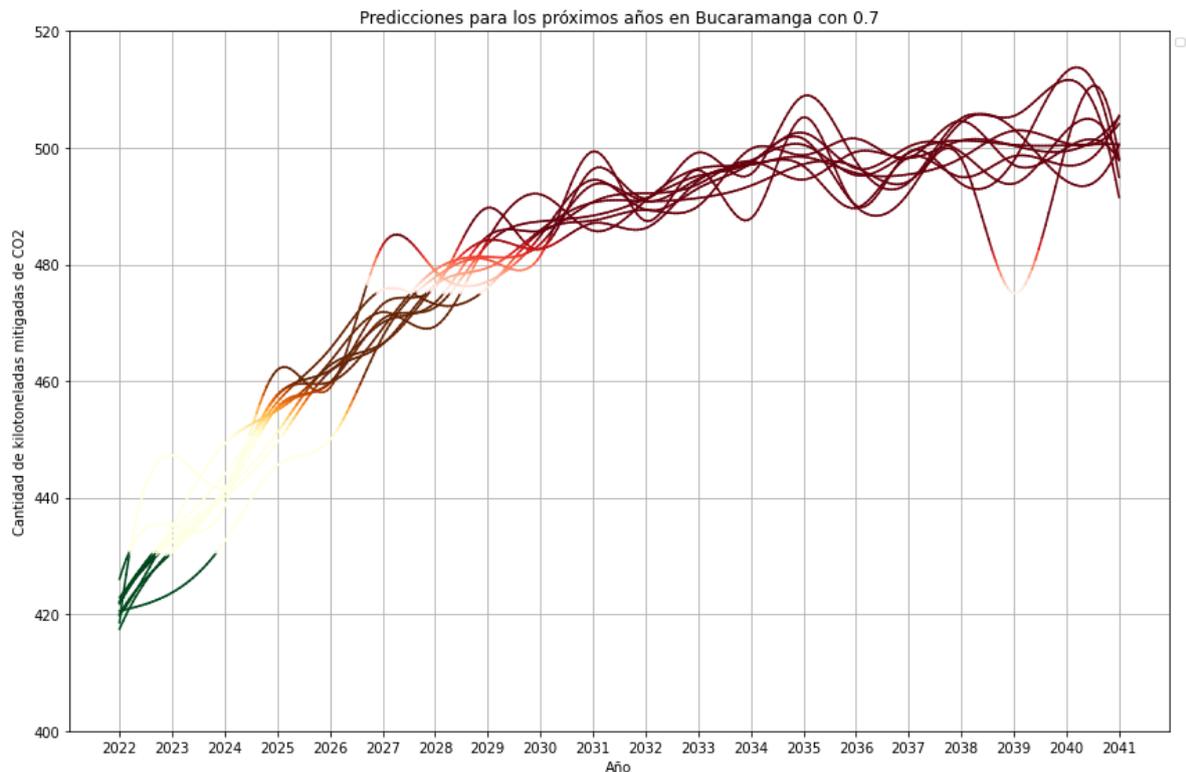
Nota. Modelo generado mediante el software explicado.

b. Gráficas y análisis relacionado con Bucaramanga.

La grafica 79 muestra las predicciones de mitigación de CO₂ en Bucaramanga desde 2022 hasta 2041, destacando una tendencia ascendente en la cantidad de kilotoneladas mitigadas, que comienza en aproximadamente 420 en 2022 y alcanza entre 480 y 500 para 2041. Las múltiples líneas de predicción, que cambian de colores más claros a oscuros, indican un incremento general pero también reflejan una creciente variabilidad e incertidumbre en las proyecciones a largo plazo, esta variabilidad es especialmente notoria después de 2024 y con esta afinidad de 70% se logra identificar como por los dilemas económicos y legales que ha experimentado el relleno el carrasco después de 2024 las predicciones son de color rojo ya que son menos probables que ocurran, además se subraya la importancia de considerar diferentes escenarios y la necesidad de estrategias flexibles para la mitigación efectiva del CO₂.

Figura 79.

Predicción para los próximos años en Bucaramanga con 70% de afinidad.

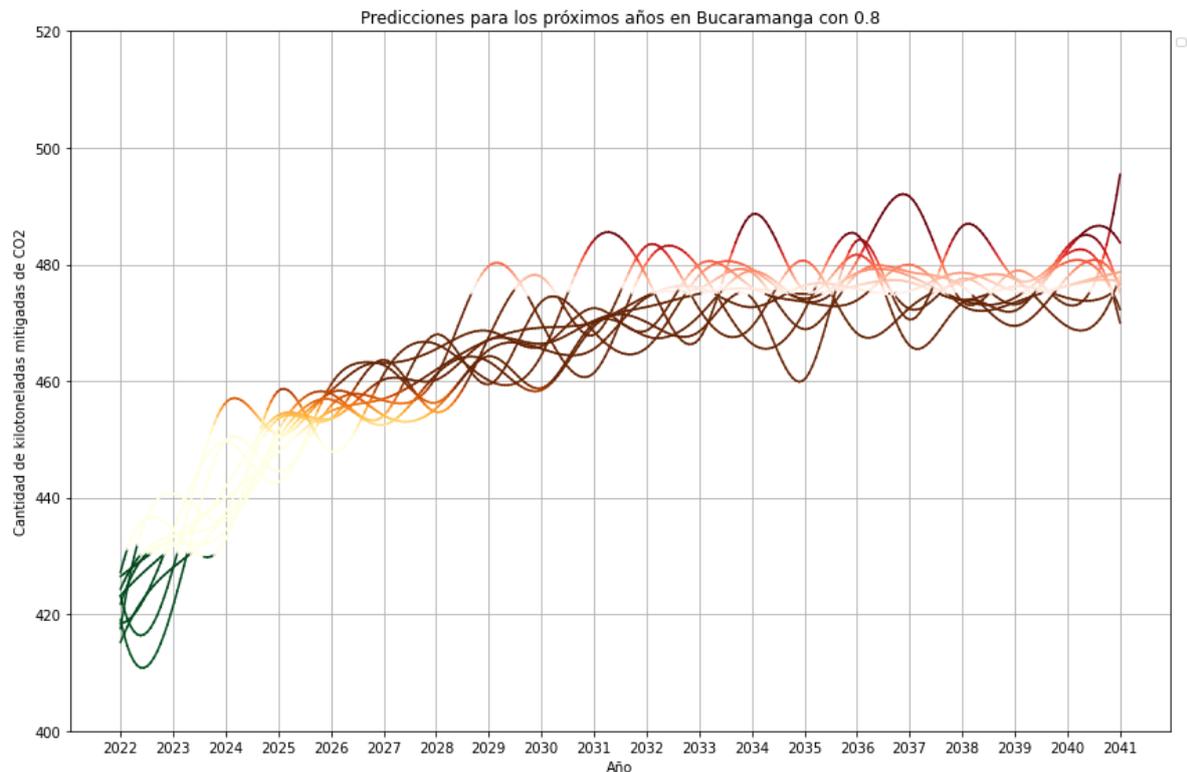


Nota. Modelo generado mediante el software explicado.

Como en el caso anterior en la figura 80 se logra observar la variación de los datos a lo largo del tiempo y como las afectaciones externas han afectado de manera significativa al estudio del relleno sanitario El Carrasco, como máximo pico se tiene la mitigación probable hasta 2028 con casi 450 kilotoneladas de emisiones mitigadas. Esta afinidad del 80% permite que el modelo se ajuste un poco más a los datos predictivos de los últimos años ya que este había subido de manera significativa dicho esto, la afinidad no logra ser lo suficientemente exacta como para predecir la exactitud de los años posteriores ya que posee demasiada varianza entre los cálculos predictivos.

Figura 80.

Predicción para los próximos años en Bucaramanga con 80% de afinidad.



Nota. Modelo generado mediante el software explicado.

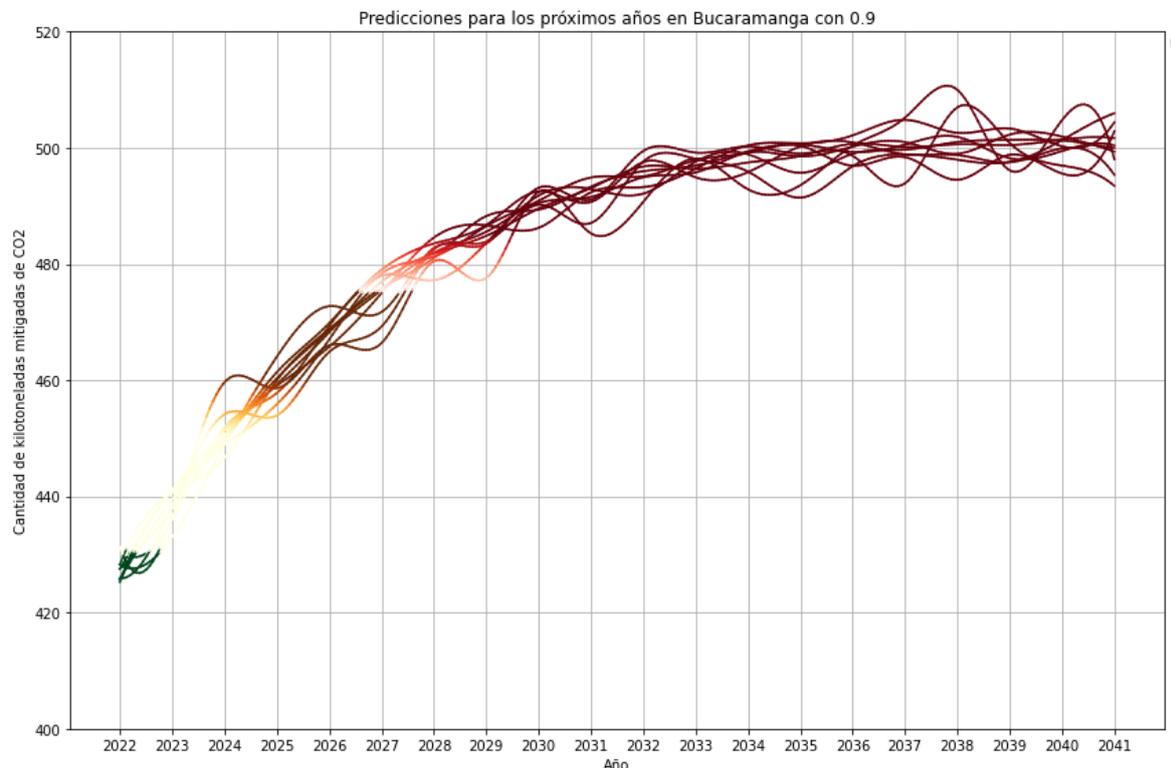
Para finalizar la figura 81 muestra la gama de colores de las líneas donde se comienzan a evidenciar las tonalidades con color verde oscuro en 2022 y se aclaran gradualmente a tonos de amarillo hasta aproximadamente 2026. A partir de 2026, los colores cambian de amarillo a marrón y luego a tonos de rojo oscuro, estos tonos de rojo oscuro se estabilizan antes y alrededor de 2031, sugiriendo una convergencia y menor variabilidad en las predicciones hacia los últimos años del periodo estudiado.

Existe una mayor estabilidad en las predicciones a partir de 2031, con menos fluctuaciones a comparación con la figura con valor de 70%, por lo que permite tener en consideración una mejor predicción a pesar de la fluctuación de los últimos años. La figura con un valor de 70% sugiere un incremento constante en la cantidad de CO₂ mitigado en Bucaramanga, con las predicciones mostrando menos variabilidad e incertidumbre a largo plazo, especialmente hasta de 2031. Los colores oscuros que se estabilizan antes indican una mayor convergencia en las proyecciones, reflejando mayor confiabilidad en los resultados proyectados para los primeros años del periodo

analizado por lo tanto el modelo de 90% de afinidad es el más estable y con menos varianza en los datos de todos para el análisis estadístico

Figura 81.

Predicción para los próximos años en Bucaramanga con 90% de afinidad.



Nota. Modelo generado mediante el software explicado.

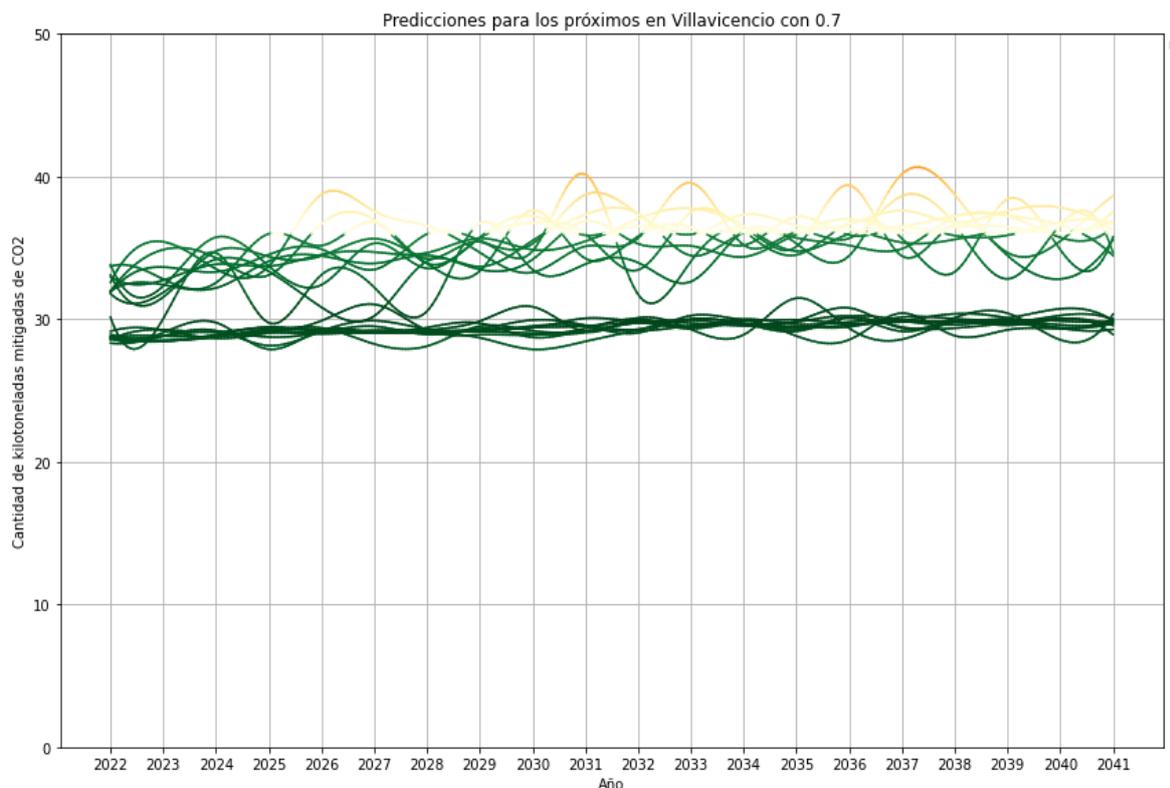
c. Gráficas y análisis relacionado con Villavicencio.

Para el último relleno sanitario de este caso de estudio, se tomaron en cuenta las mismas condiciones que las demás ciudades, el relleno sanitario de Villavicencio es el que menos residuos promedia por año debido a su población y nivel económico no posee la capacidad de afrontar una mayor cantidad de residuos en su establecimiento. Hay múltiples líneas representando diferentes simulaciones o escenarios de predicción, en donde las líneas empiezan alrededor de 30 kilotoneladas en 2022 y muestran ligeras fluctuaciones a lo largo del tiempo, hacia 2027, algunas líneas cambian a tonos más claros de verde y amarillo, indicando variabilidad en las predicciones y a partir de ese año las líneas más altas muestran más fluctuaciones en tonos amarillos, mientras que las líneas más bajas permanecen en tonos verdes

oscuros como se muestra en la figura 82. La tendencia general muestra que la cantidad de CO₂ mitigado se mantiene bastante constante alrededor de 30 kilotoneladas a lo largo del tiempo, con algunas líneas mostrando aumentos que llegan hasta 40 kilotoneladas dichas fluctuaciones son más evidentes en los tonos más claros, que oscilan más alrededor de los 30-40 kilotoneladas.

Figura 82.

Predicción para los próximos años en Villavicencio con 70% de afinidad.

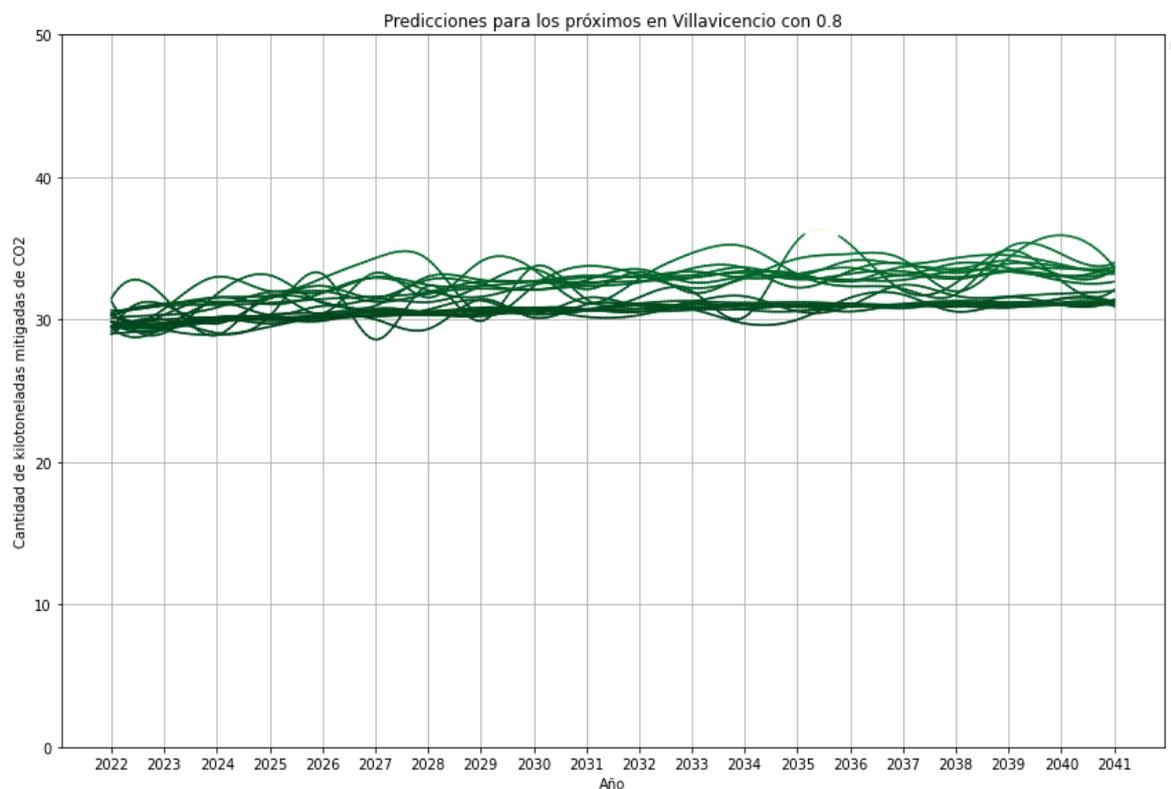


Nota. Modelo generado mediante el software explicado.

En la figura 83 se tiene muy poca variación de valores de predicción en los niveles de los años desde el año 2024 hasta 2041 no se posee valores alteros o dispersos que provoque tener una varianza que afecten de mala manera a los estudios futuros, aun así no presenta tener una gran cantidad de casos alternos por la cantidad de datos presentados en las bases, también se logra observar que con esta afinidad de 80% las variaciones son bajas y por ello podrían llegar a necesitar consideraciones económicas y legales para mantener este nivel.

Figura 83.

Predicción para los próximos años en Villavicencio con 80% de afinidad.



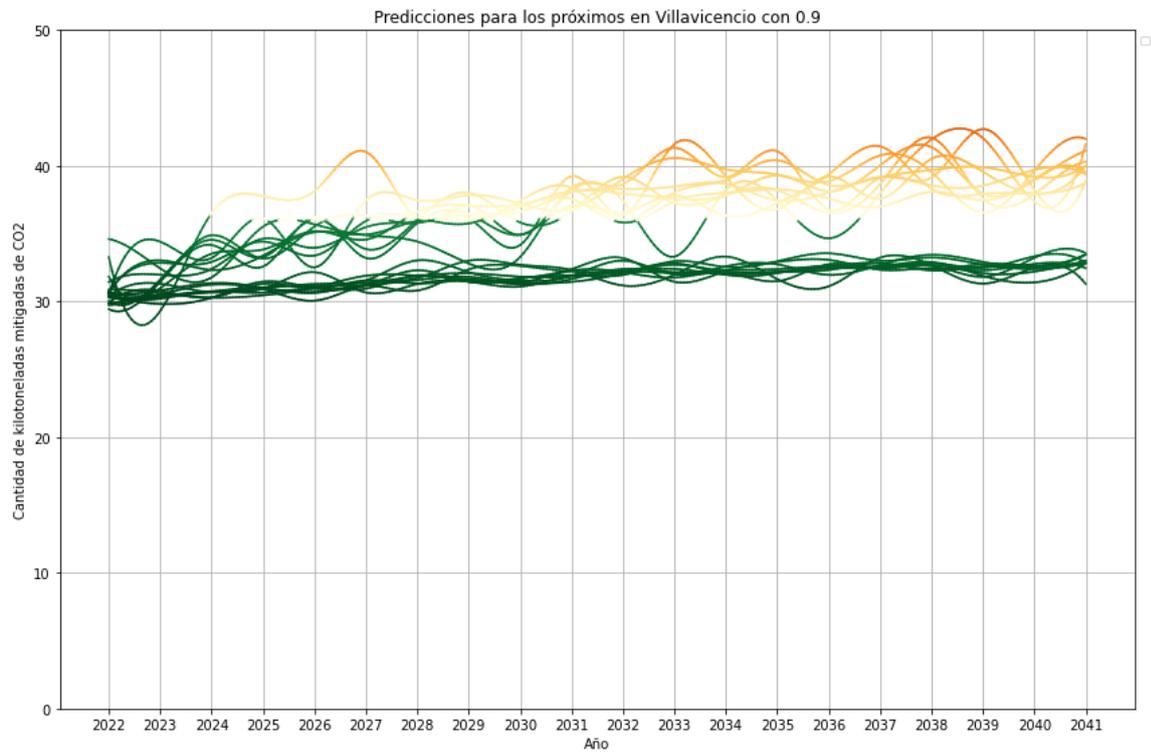
Nota. Modelo generado mediante el software explicado.

El gráfico 84 muestra la reducción esperada de emisiones de CO₂ en kilotoneladas en Villavicencio de 2022 a 2041, mostrando predicciones basadas en varias simulaciones. Las líneas del gráfico están coloreadas según el grado de reducción de CO₂ donde verde oscuro para valores bajos cercanos a 30 kilotoneladas, amarillo para valores intermedios de 35 a 40 kilotoneladas y naranja/rojo para valores altos de 40 a 45 kilotoneladas. Observando que la mayoría de los pronósticos caen dentro del rango de 30 a 35 kilotoneladas, mostrando una tendencia constante dentro de este rango, la variación de las previsiones, marcada por diferentes líneas, muestra las diferencias en la reducción de emisiones de CO₂ a lo largo de los años.

Esto muestra que, si bien la tendencia dominante es hacia una mitigación estable y moderada, hay escenarios en los que la mitigación podría aumentar significativamente, lo que podría requerir medidas adicionales o mejoradas en política y tecnología ambientales para mantener valores consistentemente más altos.

Figura 84.

Predicción para los próximos años en Villavicencio con 90% de afinidad.



Nota. Modelo generado mediante el software explicado.

5. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los casos de estudio analizados de los diferentes rellenos sanitarios presentados a lo largo de la industria concentrándose en aquellos que lograron proporcionar los datos y documentos necesarios para lograr diagnosticar la información adecuada para la toma de decisiones en cada uno de los casos expuestos, el análisis mostró que los proyectos MDL en Colombia han alcanzado una eficiencia comparable a nivel global. Las tecnologías implementadas, como las antorchas de quema y los pozos de extracción, han permitido reducir hasta un 80% las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). La generación de electricidad a partir de biogás ha sido una estrategia clave, maximizando los beneficios ambientales y económicos del proyecto.

Los proyectos PE-LFG en Colombia utilizan tecnologías avanzadas comparables a las mejores prácticas internacionales. El relleno sanitario EMAS en Pasto, por ejemplo, utiliza múltiples antorchas de quema que han reducido las emisiones de GEI en un 75% y cuentan con una capacidad de generación eléctrica de 2 MW., destacando las antorchas de quema ya que esta posee varios tubos de salida que permite tener un mayor control de la cantidad de emisiones como se logró evidenciar en el proyecto del relleno sanitario cuenta con la capacidad de albergar al menos 17 antorchas de quema de biogás en el área que cubre el relleno.

La estrategia de analítica de datos ha permitido un seguimiento y revisión detallada de los proyectos MDL, resultando en una identificación clara de áreas de mejora. Se han propuesto alternativas como la implementación de bonos de carbono y la producción de energía renovable, que podrían reducir las emisiones en un 30% adicional. Además, la mejora en la separación de residuos ha mostrado potencial para reducir las emisiones en un 20%.

El desarrollo de una herramienta digital basada en análisis de datos y modelos predictivos, como las Redes Neuronales, ha permitido la proyección de una reducción de 50,000 toneladas de CO₂ para los próximos 20 años en varios rellenos sanitarios. Esta herramienta ofrece predicciones precisas y recomendaciones, garantizando la sostenibilidad y eficiencia de futuros proyectos PE-LFG. Las acciones propuestas

para la reducción y/o compensación de emisiones de CO₂ son altamente fortalecidas por la herramienta analítica realizada a partir de la metodología con capacidades de afinidad a los datos base de 90%.

REFERENCIAS

- [1] World Health Organization: WHO, «la calidad del aire tienen como objetivo evitar millones de muertes debidas a la contaminación del aire», Organización Mundial de la Salud 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution>
- [2] C. Novillo, «Contaminación química: qué es, causas y consecuencias», ecologiaverde.com, 16 de septiembre de 2021. <https://www.ecologiaverde.com/contaminacion-quimica-que-es-causas-y-consecuencias-2169.html>
- [3] «AP 42, Fifth Edition, Volume I Chapter 2: Solid Waste Disposal | US EPA», US EPA, 22 de Abril de 2024. <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-fifth-edition-volume-i-chapter-2-solid-waste-0>
- [4] World Health Organization: WHO, «Las nuevas directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire tienen como objetivo evitar millones de muertes debidas a la contaminación del aire», Organización Mundial de la Salud, 22 de septiembre de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution>
- [5] «Proyectos Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL-POA) -», 18 de enero de 2022. <https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico-y-gestion-del-riesgo/proyectos-mecanismo-de-desarrollo-limpio/>
- [6] C. Novillo, «Contaminación química: qué es, causas y consecuencias», ecologiaverde.com, 16 de septiembre de 2021. <https://www.ecologiaverde.com/contaminacion-quimica-que-es-causas-y-consecuencias-2169.html>

- [7] «Emisiones atmosféricas contaminantes -», 26 de marzo de 2022.
<https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/emisiones-atmosfericas-contaminantes/>
- [8] «El acuerdo de París», *Naciones Unidas Contra el Cambio Climatico*, 2021.
<https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris#:~:text=El%20Acuerdo%20de%20Par%C3%ADs%20habla,orientaci%C3%B3n%20general%20al%20Mecanismo%20Tecnol%C3%B3gico>
- [9] C. Fund, «Colombia», *Green Climate Fund*.
<https://www.greenclimate.fund/countries/colombia>
- [10] «World Bank Open Data», *World Bank Open Data*.
<https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.KT?end=2020&locations=CO&start=2000>
- [11] «World Bank Open Data», *World Bank Open Data*.
<https://data.worldbank.org/topic/climate-change?contextual=similar&end=2023&locations=CO&start=2000>
- [12] Afadmin, «Project Information - Adaptation Fund», *Adaptation Fund*, 22 de diciembre de 2015. <https://www.adaptation-fund.org/projects-programmes/project-information/>
- [13] CONTAMINACIÓN AMBIENTAL - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible», *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*.
<https://www.minambiente.gov.co/?s=CONTAMINACION+AMBIENTAL>
- [14] United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: Dona Juana landfill gas-to-energy project».
<https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/TUEV-SUED1241446939.84/view?cp=1>
- [15] «World Bank Open Data», *World Bank Open Data*.
<https://data.worldbank.org/>

- [16] «Inventario De Emisiones De Gases De Efecto Invernadero De La Universidad Libre – Sede Principal», *Universidad Libre*, 2018.
<https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/15876>
- [17] «Impactos potenciales de los cambios climáticos.», *Scielo*, vol. 16, n.º 62, pp. 12-22, 2012, [En línea]. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212012000100002&lng=es&nrm=iso>. ISSN 1316-4821.
- [18] «7 METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO», *Ihobe S.A. - Sociedad Pública de Gestión Ambiental Departamento de Medio Ambiente y Política Territorial Gobierno Vasco*, 2013.
https://www.euskadi.eus/contenidos/documentacion/7metodologias_gei/es_d/adjuntos/7METODOLOGIAS.pdf
- [19] «Emisiones de gases de efecto invernadero por país y sector (infografía) | Temas | Parlamento Europeo», *Temas | Parlamento Europeo*, 3 de julio de 2018.
<https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20180301STO98928/emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pais-y-sector-infografia>
- [20] «Los sectores que más contaminan», *El Orden Mundial*, 3 de abril de 2022. <https://elordenmundial.com/mapas-y-graficos/sectores-que-mas-contaminan/>
- [21] «INFORMACIÓN TÉCNICA SOBRE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO», *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM*, 2007.
<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf>

- [22] S. Boehm, «10 grandes hallazgos del informe del IPCC de 2023 sobre el cambio climático», *Instituto de Recursos Mundiales (WRI)*. <https://es.wri.org/insights/10-grandes-hallazgos-del-informe-del-ipcc-de-2023-sobre-el-cambio-climatico#:~:text=Como%20deja%20en%20claro%20el,una%20transici%C3%B3n%20justa%20y%20equitativa>.
- [23] «Global Warming of 1.5 °C —», *Global Warming Of 1.5 °C*. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- [24] «AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014 — IPCC», *IPCC*. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- [25] «Fifth Assessment report — IPCC», *IPCC*. <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/>
- [26] «Sixth assessment report — IPCC», *IPCC*. <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>
- [27] «AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023 — IPCC», *IPCC*. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>
- [28] «IPCC Sixth Assessment report». <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/publications/sixth-assessment-report>
- [29] M. J. Gamez, «Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible», *Desarrollo Sostenible*, 24 de mayo de 2022. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [30] United Nations, «Biodiversidad: nuestra defensa natural más fuerte contra el cambio climático | Naciones Unidas», *United Nations*. <https://www.un.org/es/climatechange/science/climate-issues/biodiversity>

- [31] «Proyectos Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL-POA) - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible», *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*, 18 de enero de 2022. <https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico-y-gestion-del-riesgo/proyectos-mecanismo-de-desarrollo-limpio/>
- [32] «PROYECTOS CDM – PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL - Biotecnogas», *Biotecnogas*, 11 de noviembre de 2021. <http://www.biotecnogas.com/es/case-history/progetti-cdm/>
- [33] R. Neshovski, «Home - United Nations Sustainable Development», *United Nations Sustainable Development*, 1 de mayo de 2024. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/>
- [34] United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: CDM insights - intelligence about the CDM at the end of each month». <https://cdm.unfccc.int/Statistics/Public/CDMinsights/index.html>
- [35] «Topics», *World Bank*. <https://www.worldbank.org/en/topic>
- [36] United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: Methodologies». <https://cdm.unfccc.int/methodologies>
- [37] «CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO», *Organizacion de las Naciones Unidas*, 1992. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
- [38] «La Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)», *Ministerio Para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*. <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contr-el-cambio-climatico/naciones-unidas.html>
- [39] «Proyectos de energías renovables en Colombia | Enel». <https://www.enel.com.co/es/historias/a202308-serie-web-proyectos-de-energias-renovables-en-colombia.html>

- [40] K. S. Bohórquez, «¿Quiénes están detrás de los grandes proyectos de energías limpias en Colombia?», *Forbes*, vol. 4, abr. 2023, [En línea]. Disponible en: <https://forbes.co/2023/04/19/energias-renovables-en-colombia/quienes-estas-detras-de-los-proyectos-de-energias-renovables-en-colombia/>
- [41] «SER COLOMBIA – Asociación Energías Renovables». <https://ser-colombia.org/>
- [42] «Climate change», *World Bank*. <https://www.worldbank.org/en/topic/climatechange>
- [43] «International Finance Corporation (IFC)», *IFC*. <https://www.ifc.org/en/home>
- [44] United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: LEBOSHWQB9KG3N5XCBZ9DHSTWT8AWU». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SQS1271226956.44/view>
- [45] «POLÍTICA NACIONAL DE CAMBIO CLIMÁTICO», *IDEAM*. <http://www.cambioclimatico.gov.co/directorio-del-cambio-climatico>
- [46] «PROTOCOLO PARA EL MONITOREO Y SEGUIMIENTO DE LA CALIDAD DEL AIRE», *Ministerio de Ambiente*, octubre de 2010. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Protocolo_Calidad_del_Aire_-_Manual_Disenio.pdf
- [47] «Proyecto de resolución Re clasificación área fuente de emisión», *MINISTERIO DE AMBIENTE y DESARROLLO SOSTENIBLE*, 2015. <https://www.andi.com.co/Uploads/Proyecto%20de%20Resoluci%C3%B3n%20re%20clasificaci%C3%B3n%20%C3%A1rea%20fuente%20%2016122020.pdf>

- [48] «Contaminantes del aire», *Metropol*, 2019. https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/PublishingImages/Paginas/Generalidades/Principales-contaminantes/02-IMG_contaminantes.png
- [49] Waga Energy, «Todo sobre el gas de vertedero - Waga Energy», *Waga Energy - Biometano Para Todos.*, 3 de noviembre de 2023. <https://waga-energy.com/es/saber-sobre-el-gas-de-vertedero/#:~:text=Composici%C3%B3n%20qu%C3%ADmica%20del%20gas%20de,adem%C3%A1s%20de%20trazas%20diversos%20compuestos>
- [50] «Composición y características del gas de vertedero». <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/9952/Capitulo5.pdf>
- [51] González., «Alternativas de captacion y tratamiento del biogas en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba, Argentina.», *UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA. FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FISICAS y NATURALES.*, 2014. <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/1635/Alternativas%20de%20captaci%C3%B3n%20y%20tratamiento%20del%20biogas%20en%20el%20vertedero%20de%20Piedras%20Blancas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [52] S. Tuset, «Tratamiento de lixiviados de vertedero | Condorchem Enviro Solutions», *Condorchem Enviro Solutions*, 6 de noviembre de 2023. <https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-de-lixiviados-de-vertedero/>
- [53] Patricia, «La problemática de los rellenos sanitarios», *Aseca*, 12 de julio de 2022. <https://aseca.com/la-problematica-de-los-rellenos-sanitarios/>
- [54] Día Mundial del Reciclaje: Arroja los residuos peligrosos en puntos autorizados, «Día Mundial del Reciclaje: Arroja los residuos peligrosos en puntos autorizados», *Bogota.gov.co*, 17 de mayo de 2022. <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/ambiente/como-y-en-donde-depositar-los-residuos-peligrosos-correctamente>

- [55] S. Tuset, «Tratamiento de lixiviados de vertedero | Condorchem Enviro Solutions», *Condorchem Enviro Solutions*, 6 de noviembre de 2023. <https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-de-lixiviados-de-vertedero/>
- [56] «Tratamiento de lixiviados», *Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos EMGIRS - EP*, 2023. <https://www.emgirs.gob.ec/index.php/zentools/zentools-slideshow/zentools-carousel>
- [57] S. Tuset, «Tratamiento de lixiviados de vertedero | Condorchem Enviro Solutions», *Condorchem Enviro Solutions*, 6 de noviembre de 2023. <https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-de-lixiviados-de-vertedero/>
- [58] «Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review | Health & Environmental Research Online (HERO) | US EPA». https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference_id/8142363
- [59] P. Kjeldsen, M. A. Barlaz, A. P. Rooker, A. Baun, A. Ledin, y T. H. Christensen, «Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review», *Critical Reviews In Environmental Science And Technology*, vol. 32, n.º 4, pp. 297-336, oct. 2002, doi: 10.1080/10643380290813462
- [60] «Tipos de plásticos: clasificación y reciclaje», *DKV Seguros*, 29 de abril de 2024. <https://dkv.es/corporativo/blog-360/medioambiente/reciclaje/tipos-de-plasticos-clasificacion-reciclaje>
- [61] «Descripción general de los gases de efecto invernadero | US EPA», *US EPA*, 7 de junio de 2023. <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/descripcion-general-de-los-gases-de-efecto-invernadero>
- [62] «Landfill Gas Basics», *Tchobanoglous, Theisen, And Vigil*. https://www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/PDFs/Landfill_2001_ch2mod.pdf

- [63] «ATSDR - Landfill Gas Primer - Chapter 2: Landfill Gas Basics». <https://www.atsdr.cdc.gov/hac/landfill/html/ch2.html>
- [64] R. Cossu y T. Lai, «Physical waste pretreatment», en *Elsevier eBooks*, 2018, pp. 179-190. doi: 10.1016/b978-0-12-407721-8.00010-3.
- [65] «Sistemas de tratamiento», *Ministerio Para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/tratamientos-biologicos-compostaje.html>
- [66] «Análisis de ciclo de vida comparativo entre la deposición en vertedero y el tratamiento biológico mediante digestión anaerobia de residuos de frutas y verduras generados en mercados abiertos», *Dpto. Ingeniería Química y Ambiental Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla*, 2021. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/72152/fichero/TFM-2152+JIM%C3%89NEZ+P%C3%81EZ%2C+ELENA.pdf>
- [67] Patricia, «La problemática de los rellenos sanitarios», *Aseca*, 12 de julio de 2022. <https://aseca.com/la-problematica-de-los-rellenos-sanitarios/>
- [68] M. Bianco, «¿Qué son los bonos de carbono y qué tipos existen?», *CARBON NEUTRAL +*, 4 de marzo de 2024. <https://www.carbonneutralplus.com/proyectos-de-bonos-de-carbono-cuales-son-que-tipos-hay/>
- [69] «Gold Standard», *Gold Standard*, 22 de mayo de 2024. <https://www.goldstandard.org/>
- [70] «Energy, Climate change, Environment», *European Commission*. https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment_en

- [71] «Pricing carbon», *World Bank*. <https://www.worldbank.org/en/programs/pricing-carbon>
- [72] «Colombia. National Communication (NC). NC 3. | UNFCCC», UNFCCC, 2022. <https://unfccc.int/gcse?q=colombia>
- [73] Verra, «Home | Verra», Verra, 28 de mayo de 2024. <https://verra.org/>
- [74] K. V. M. Aguilar, «Con bonos de \$20.500 es posible combatir las emisiones de carbono de las empresas», *Diario la República*, 5 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.larepublica.co/especiales/bonos-sostenibles/con-bonos-de-20-500-es-posible-combatir-las-emisiones-de-carbono-de-las-empresas-3722112#:~:text=%E2%80%9CEn%20Colombia%2C%20el%20precio%20del,que%20son%20aproximadamente%20US%245%E2%80%9D>
- [75] Del Medio Ambiente, «La contribución del mercado de bonos de carbono en Colombia en la lucha contra el cambio climático. Dos...», *Derecho del Medio Ambiente*, 29 de enero de 2024. <https://medioambiente.uexternado.edu.co/la-contribucion-del-mercado-de-bonos-de-carbono-en-colombia-en-la-lucha-contra-el-cambio-climatico-dos-perspectivas-implementacion-de-alta-tecnologia-y-o-soluciones-basadas-en-la-naturaleza/>
- [76] «Frequent Questions about Landfill Gas | US EPA», *US EPA*, 25 de abril de 2024. <https://www.epa.gov/lmop/frequent-questions-about-landfill-gas>
- [77] «ATSDR - Landfill Gas Primer - Chapter 2 continued: Landfill Gas Basics». <https://www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/html/ch2a.html>
- [78] Blanco, E. Santalla, V. Córdoba, y A. Levy, «Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: Un análisis teórico-práctico», 18 de marzo de 2017.

<https://publications.iadb.org/es/publicacion/13967/generacion-de-electricidad-partir-de-biogas-capturado-de-residuos-solidos-urbanos>

- [79] «Benefits of Landfill Gas Energy Projects | US EPA», *US EPA*, 25 de abril de 2024. <https://www.epa.gov/lmop/benefits-landfill-gas-energy-projects>
- [80] K. Pukylo, «Landfill Gas to Energy: Turning Trash into Power», 6 de febrero de 2024. <https://www.linkedin.com/pulse/landfill-gas-energy-turning-trash-power-kyle-pukylo-kflwc/?trackingId=Nfx21LSZTMCJ%2B1uN6lly8Q%3D%3D>
- [81] «Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos por fuentes puntuales en la zona Cali-Yumbo.», *CDM*. <https://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/download/2373/1539/7497>
- [82] «Informe Final Inventario de Emisiones de Fuentes Industriales», *Jurisdicción de CORANTIOQUIA*. <https://www.corantioquia.gov.co/wp-content/uploads/2022/01/Inventario-de-Emisiones-de-Fuentes-Industriales-Ano-Base-2018.pdf>
- [83] United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: INTERASEO LANDFILL GAS MITIGATION PROJECT». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1356525322.33/view>
- [84] «La Glorita Landfill Gas Project», *CDM*. <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SQS1320667987.88/view>
- [85] United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: Bionersis landfill project in Pasto, Colombia». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/TUEV-SUED1248705611.94/view>
- [86] United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: Bionersis LFG project Colombia 2». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SGS-UKL1264777801.97/view>

- [87] United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: Bionersis LFG project Colombia 3 (Villavicencio)». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SQS1274188918.1/view>
- [88] United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: Bionersis LFG projects Colombia 4 (Cucuta & Manizales)». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SQS1271226956.44/view?cp=1>
- [89] United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: Cartagena Landfill Gas Capture and Usage Project». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SQS1340872690.31/view?cp=1>
- [90] United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: Proactiva Presidente landfill gas to energy project». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/AENOR1343109778.05/view?cp=1>
- [91] United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: MONTERIA LANDFILL GAS RECOVERY AND FLARING». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/ICONTEC1296306920.79/view>
- [92] United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: Centro Industrial del Sur Organic Waste Project». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1188545610.71/view>
- [93] United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: Curva de Rodas and La Pradera landfill gas management project». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/TUEV-RHEIN1218645656.52/view?cp=1>
- [94] United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: Dona Juana landfill gas-to-energy project». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/TUEV-SUED1241446939.84/view?cp=1>
- [95] United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: El Guacal Landfill Gas Flaring Project». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SQS1285154018.41/view>

- [96] United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: MONTENEGRO LANDFILL GAS RECOVERY AND FLARING». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/ICONTEC1293742150.86/view>
- [97] United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: The Colomba-Guabal Landfill Gas Project». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SQS1314108239.34/view>
- [98] United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: Los Pocitos Landfill Gas Utilization Project». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/TUEV-RHEIN1355301795.75/view?cp=1>
- [99] «Articulos web», *EPA*. https://search.epa.gov/epasearch/?querytext=residuos+solidos+&areaname=&areacontacts=&areasearchurl=&typeofsearch=epa&result_template=#/
- [100] «Search | World Bank», *World Bank*. <https://www.worldbank.org/en/search?q=residuos+solidos+>
- [101] «INFORME NACIONAL DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS 2020», *Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios Colombia*, 2021. https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/informe_df_2020%20%281%29.pdf
- [102] «Análisis de mercados internacionales | Legiscomex». <https://www.legiscomex.com/analisis-de-mercados-internacionales>
- [103] «Gases de vertedero», *Departamento Nacional de Planeacion*, 2023. <https://www.dnp.gov.co/Paginas/Buscador.aspx#k=residuos&gsc.tab=0>
- [104] «Has buscado RESIDUOS SOLIDOS - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible», *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. <https://www.minambiente.gov.co/?s=RESIDUOS+SOLIDOS>

- [105] United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: Bionersis landfill project in Pasto, Colombia». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/TUEV-SUED1248705611.94/view>
- [106] United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: Bionersis LFG project Colombia 2». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SGS-UKL1264777801.97/view>
- [107] United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: Bionersis LFG project Colombia 2». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SGS-UKL1264777801.97/view>
- [108] United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: Bionersis LFG projects Colombia 4 (Cucuta & Manizales)». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SQS1271226956.44/view?cp=1>
- [109] United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: Bionersis LFG projects Colombia 4 (Cucuta & Manizales)». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SQS1271226956.44/view?cp=1>
- [110] S. AGUDELO CASTAÑEDA y A. F. CARMONA CARMONA, «METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS PROVENIENTE DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS», *UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA*, 2020. <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/26d73448-1ad5-412f-909c-de98b3ed6a44/content>
- [111] «Basic Information about Landfill Gas | US EPA», *US EPA*, 25 de abril de 2024. <https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas#:~:text=LFG%20is%20extracted%20from%20landfills,ultimate%20use%20for%20the%20gas>.
- [112] Works, «La función de la antorcha quemadora de biogás en la estación depuradora de aguas residuales».

<https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/la-funcion-de-la-antorcha-quemadora-de-biogas-en-la-estacion-depuradora-de-aguas-residuales>

- [113] Works, «Aguasresiduales.info | Líderes en Información para el Sector del Tratamiento del Agua». <https://www.aguasresiduales.info/>
- [114] «Best Practices for Landfill Gas Collection System Design and Installation», EPA. https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-03/documents/pdh_chapter7.pdf
- [115] Cruz, «Monitorización de antorchas con cámaras termográficas», *Apliter Termografia*, 27 de julio de 2023. <https://www.apliter.com/blog/monitorizacion-de-antorchas/>
- [116] «Perforacion en pozo verticales con revestimiento», *Issuu*, 17 de diciembre de 2009. <https://issuu.com/biliovirtual/docs/perforacion-en-pozo-verticales-con-revestimiento/13>
- [117] «Bentonita sódica: Qué es y para qué sirve». <https://www.vadequimica.com/blog/todos-los-articulos/bentonita-sodica.html>
- [118] «Sello sanitario», UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA – UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA – UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN – UNIVERSIDAD NACIONAL. <https://www.metropol.gov.co/ambiental/recurso-hidrico/Publicaciones/anexo-2-sello-sanitario.pdf>
- [119] Equilibar, «Landfill gas extraction - equilibar vacuum regulators», *Equilibar*, 9 de junio de 2022. <https://www.equilibar.com/application/landfill-gas-extraction/>
- [120] Equilibar, «Landfill gas extraction - equilibar vacuum regulators», *Equilibar*, 9 de junio de 2022. <https://www.equilibar.com/application/landfill-gas-extraction/>

- [121] Colombia, «Sistema de caudalímetro portátil FH950 (velocidad y profundidad) con cable de 6,5 pies (12 metros) | Hach Colombia - Aspectos Generales | Hach». <https://co.hach.com/sistema-de-caudalimetro-portatil-fh950-velocidad-y-profundidad-con-cable-de-6-5-pies-12-metros/product?id=53559969896>
- [122] «Medidor de flujo de gas metano - SILVER AUTOMATION INSTRUMENTS LTD.», *SILVER AUTOMATION INSTRUMENTS LTD.* <https://es.silverinstruments.com/Methane-gas-flowmeter.html>
- [123] «Medición de Líquidos y Gases: 4 Tipos de Medidores de Flujo para Petróleo y Gas», *Kimray*. <https://kimray.com/training/medicion-de-liquidos-y-gases-4-tipos-de-medidores-de-flujo-para-petroleo-y-gas>
- [124] Sysadvance, «METHAGEN LF - Sysadvance», *Sysadvance*, 28 de septiembre de 2023. https://sysadvance.com/energy/methagen-lf/?ppc_keyword=biogas&qad_source=1&qclid=Cj0KCQjwjLGyBhCYARIsAPqTz1_Ovu4rKedZcdwuYyigpZ5M23GyrkwLELpnTyLIRA5DOxG23JTroeAaAqsEALw_wcB
- [125] «MODELO PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS PRODUCIDO EN RELLENOS SANITARIOS», *UNIVERSIDAD DE CHILE FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS y MATEMÁTICAS DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA.* <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/138545/Modelo-para-el-diseno-de-sistemas-de-captacion-y-aprovechamiento-de-biogas-producido.pdf>
- [126] «Generación de biogás en rellenos sanitarios, para producción energética | Genia Bioenergy», *Genia Bioenergy*. <https://geniobioenergy.com/el-biogas-industrial-como-alternativa-a-los-rellenos-sanitarios-de-vertederos/#:~:text=Los%20pozos%20de%20recolecci%C3%B3n%20de,mis%20elementos%20en%20su%20interior>

- [127] «World Bank Open Data», *World Bank Open Data*. <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.KT?end=2020&locations=CO&start=2000>
- [128] «MALAYSIA ECONOMIC MONITOR», *Expanding Malaysia's Digital Frontier*, 2023. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099063502042320186/pdf/P179681008aa910db0bca9057d2dfa76bed.pdf>
- [129] «PIB de Malasia 2022», *Datosmacro.com*. <https://datosmacro.expansion.com/pib/malasia>
- [130] «Outlook on Thailand's Activities on GHG Emission Reduction | Envilience ASIA», *Envilience ASIA*. <https://envilience.com/regions/southeast-asia/th/th-ghg>
- [131] «Putting a price on carbon – an efficient way for Thailand to meet its bold emission target – Analysis - IEA», *IEA*. <https://www.iea.org/articles/putting-a-price-on-carbon-an-efficient-way-for-thailand-to-meet-its-bold-emission-target>
- [132] «Evaluación integrada de Tailandia», *Coalición Por el Clima y el Aire Limpio*. <https://www.ccacoalition.org/es/content/thailand-integrated-assessment>
- [133] «Proyectos Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL-POA) - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible», *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*, 18 de enero de 2022. <https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico-y-gestion-del-riesgo/proyectos-mecanismo-de-desarrollo-limpio/>
- [134] «Perspectivas de crecimiento y estabilidad en la República Dominicana». <https://www.bancentral.gov.do/a/d/5867-perspectivas-de-crecimiento-y-estabilidad-en-la-republica-dominicana#:~:text=El%20producto%20interno%20bruto%20>
- [135] «MySQL». <https://www.mysql.com/>

- [136] «Power BI - Data Visualization | Microsoft Power Platform». <https://powerbi.microsoft.com/>
- [137] «Apache Hadoop». <https://hadoop.apache.org/>
- [138] «What is data-driven decision-making?», *Tableau*, 2024. <https://www.Tableau.com/learn/articles/data-driven-decision-making#:~:text=What%20is%20data%2Ddriven%20decision,goals%2C%20objectives%2C%20and%20initiatives.>
- [139] «Landfill Methane Outreach Program (LMOP) | US EPA», *US EPA*, 8 de abril de 2024. <https://www.epa.gov/lmop>
- [140] Staff, «What is Data-Driven Decision-Making (DDDM)?», *Coursera*, 15 de mayo de 2024. <https://www.coursera.org/articles/data-driven-decision-making>
- [141] United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: Dona Juana landfill gas-to-energy project». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/TUEV-SUED1241446939.84/view?cp=1>
- [142] «EGE Haina». <https://www.egehaina.com/Centrales?name=LOSCOCOS>
- [143] Mundial, «Un informe del Banco Mundial recomienda un nuevo modelo de desarrollo para los estados amazónicos de Brasil», *World Bank*, 8 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2023/05/09/brazil-world-bank-report-calls-for-a-new-development-model-amazonian-states>
- [144] Aristizábal-Alzate y J. González-Manosalva, «Revision de las medidas en pro de la eficiencia energética y la sostenibilidad de la industria del cemento a nivel mundial», 2021. <https://www.redalyc.org/journal/5537/553770600006/>

- [145] «Population and Demography». <https://www.dane.gov.co/index.php/en/statistics-by-topic-1/population-and-demography/population-projections>
- [146] «ATLAS DE AGLOMERACION DE PASTO», *Departamento Nacional de Planeación*, 2019. https://osc.dnp.gov.co/administrator/components/com_publicaciones/uploads/Atlas_de_la_aglomeracin_de_Pasto.pdf
- [147] «Pasto (Municipality, Colombia) - Population Statistics, Charts, Map and Location». https://www.citypopulation.de/en/colombia/admin/nari%C3%B1o/52001_pasto/
- [148] T.-E. Telefónicas, «Cuántos habitantes tenía Pasto, Nariño en 2020», *Telencuestas*, 13 de abril de 2024. <https://telencuestas.com/censos-de-poblacion/colombia/2020/narino/pasto>
- [149] «Bucaramanga population 2024». <https://worldpopulationreview.com/world-cities/bucaramanga-population>
- [150] T.-E. Telefónicas, «Cuántos habitantes tenía Bucaramanga, Santander en 2021», *Telencuestas*, 13 de abril de 2024. <https://telencuestas.com/censos-de-poblacion/colombia/2021/santander/bucaramanga>
- [151] «City population - site search». <https://www.citypopulation.de/en/search/?q=Bucaramanga%20Colombia&cntry=Colombia>
- [152] «Villavicencio population 2024». <https://worldpopulationreview.com/world-cities/villavicencio-population>
- [153] «DANE - Estimaciones del cambio demográfico». <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/estimaciones-del-cambio-demografico>

- [154] T.-E. Telefónicas, «Cuántos habitantes tenía Villavicencio, Meta en 2020», *Telencuestas*, 13 de abril de 2024. <https://telencuestas.com/censos-de-poblacion/colombia/2020/meta/villavicencio>
- [155] N. De Estadística, «DANE - Cuentas nacionales departamentales: PIB por departamento». <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales>
- [156] N. De Estadística, «DANE - Cuentas nacionales departamentales: PIB por departamento». <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales>
- [157] A. N. De Estadística, «DANE - Cuentas nacionales departamentales: PIB por departamento». <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales>
- [158] «Parques Tecnológicos Ambientales, PTA», *Parque Tecnológico Ambiental ANTANAS*. https://www.emaspastoputumayo.com.co/soluciones/disposicion-final/parque_antanas
- [159] «Relleno sanitario El carrasco», *RCN NOTICIAS*. <https://www.rvcnoticias.com/relleno-sanitario-el-carrasco-que-pasa>
- [160] De Bucaramanga, «Así opera El Carrasco actualmente», *Alcaldía de Bucaramanga*, 7 de mayo de 2022. <https://www.bucaramanga.gov.co/noticias/asi-opera-el-carrasco-actualmente/>
- [161] L. Pineda, «Multimillonaria inversión para modernizar el relleno sanitario El Carrasco permitiría su operación por una década», *www.vanguardia.com*, 24 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/2023/07/01/multimillonaria-inversion-para-modernizar-el-relleno-sanitario-el-carrasco-permitiria-su-operacion-por-una-decada/>

- [162] «Parque ecológico Reciclante (PER) PAÍS: Colombia CIUDAD: Villavicencio POBLACIÓN: 516.831», (DANE, 2005). [https://iuc.eu/fileadmin/user_upload/Regions/iuc_lac/user_upload/ESP_Villavicencio - Parque ecol%C3%B3gico Reciclante PER .pdf](https://iuc.eu/fileadmin/user_upload/Regions/iuc_lac/user_upload/ESP_Villavicencio_-_Parque_ecol%C3%B3gico_Reciclante_PER_.pdf)
- [163] «Relleno de Villavo, ejemplo medioambiental», *Portafolio.co*. <https://www.portafolio.co/economia/finanzas/relleno-villavo-ejemplo-medioambiental-411162>
- [164] J. Danielson y P. Chandran, «Spanish version - Leave No Trace: Vital lessons from the frontline of waste and ocean plastics», *Gibs*, ene. 2020, [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/43132165/Spanish_version_Leave_No_Trace_Vital_lessons_from_the_frontline_of_waste_and_ocean_plastics
- [165] United Nations Framework Convention on Climate Change, «CDM: GHG abatement project through wind based energy generation, in Kutch, Gujarat». <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/RINA1312534239.23/view>
- [166] «El Grupo de Trabajo Especial sobre el Acuerdo de París elige a sus copresidentas», *Naciones Unidas Contra el Cambio Climático*, 2013. <https://unfccc.int/fr/node/13417>
- [167] «Poryectos realizados en china», *Naciones Unidas Contra el Cambio Climático*, 2016. <https://unfccc.int/node/180417>
- [168] «Efectos del cambio global del clima en los Ecosistemas Marinos y Terrestres en Brasil», *Ministerio de Ciencia y Tecnologia, Brasil*, 2006. [https://unfccc.int/files/adaptation/adverse_effects_and_response_measures_art_48/application/pdf/modelo_regional_de_cambio_global_del_clima_modelo_eta_cptec - haroldo machado filho brasil.pdf](https://unfccc.int/files/adaptation/adverse_effects_and_response_measures_art_48/application/pdf/modelo_regional_de_cambio_global_del_clima_modelo_eta_cptec_-_haroldo_machado_filho_brasil.pdf)
- [169] «Mexico's Climate Change Mid-Century Strategy», *National Institute Of Ecology And Climate Change*, 2016. https://unfccc.int/sites/default/files/mexico_mcs_final_cop22nov16_red.pdf
- [170] A. McAfee, «Big Data: the Management Revolution», *Harvard Business Review*, 29 de febrero de 2012. <https://hbr.org/2012/10/big-data-the-management-revolution>
- [171] «¿Qué es la analítica de datos? Definición, modelos, ciclo de vida y mejores prácticas de aplicación», *INNOVA*. <https://innova-scape.info/que-es-la-analitica-de-datos/>

- [172] Pgngr, «Analítica de datos, ¿para qué sirve y qué es?», *Politécnico Grancolombiano*. <https://www.poli.edu.co/blog/poliverso/analitica-de-datos>
- [173] «Análisis predictivo: qué es y cómo aprovecharlo al máximo». <https://thepower.education/blog/analisis-predictivo-que-es>
- [174] J. Rodríguez, « Qué es el análisis de datos: definición, etapas y ejemplos», *Mundo Posgrado*, 3 de abril de 2024. <https://www.mundoposgrado.com/que-es-el-analisis-de-datos/>
- [175] Colombia. M. De Industrias, «Atlas de viento y energía eólica de Colombia», 27 de mayo de 2019. <https://repositoriobi.minenergia.gov.co/handle/123456789/2249>
- [176] I. A. Pérez, M. Á. García, M. L. Sánchez, N. Pardo, y B. Fernández-Duque, «Key Points in Air Pollution Meteorology», *International Journal Of Environmental Research And Public Health/International Journal Of Environmental Research And Public Health*, vol. 17, n.º 22, p. 8349, nov. 2020, doi: 10.3390/ijerph17228349.
- [177] «Atmosphere». https://www.mdpi.com/journal/atmosphere/special_issues/J3CF79JBQ2
- [178] «Rosas de los vientos construidas a partir del promedio mensual para...», *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/Figura/Rosas-de-los-vientos-construidas-a-partir-del-promedio-mensual-para-cada-hora-de-los_fig4_332766838
- [179] «Distribución horaria de la velocidad del viento en zonas con mayor aprovechamiento de potencial eólico», *Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia • Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia • Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia • Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia • Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia*. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21125/Capitulo4.pdf/3648f6d2-2350-40b4-bf35-a54611253612>
- [180] «Organización de Pasto», *Visita Cultural Pasto*. <https://colombia.travel/es/pasto>
- [181] «Tipos de climas». <http://www.ccpy.gob.mx/agenda-regional/escenarios-cambio-climatico/atlas/tipos-climas.php#:~:text=Los%20grupos%20clim%C3%A1ticos%20originales%20de,muy%20fr%C3%ADos%20con%20nieves%20permanentes>

- [182] «Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados para Pasto»,
Meteoblue.
https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/pasto_colombia_3672778
- [183] «Bucaramanga», *Turismo Nacioanl.*
<https://colombia.travel/es/bucaramanga>
- [184] «Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados para Bucaramanga»,
Meteoblue.
https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/bucaramanga_colombia_3688465
- [185] «PLanes bucaramanga», *Dane*.
<https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/planes-departamentos-ciudades/210204-InfoDane-Bucaramanga-Santander.pdf>
- [186] «Índice de la calidad del aire (ICA) de Bucaramanga y contaminación del aire en Colombia | IQAir».
<https://www.iqair.com/es/colombia/santander/bucaramanga>
- [187] Semana, «Bucaramanga está en alerta por la fuerte contaminación en el aire», *Semana.com Últimas Noticias de Colombia y el Mundo*, 24 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en:
<https://www.semana.com/nacion/bucaramanga/articulo/bucaramanga-esta-en-alerta-por-la-fuerte-contaminacion-en-el-aire/202351/>
- [188] «USTA», *Universidad Santo Tomás | Villavicencio*, 20 de mayo de 2024.
<https://www.ustavillavicencio.edu.co/>
- [189] «Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados para Villavicencio»,
Meteoblue.
https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/villavicencio_colombia_3665900
- [190] «Datos climaticos villavicencio», *Dane*.
<https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/planes-departamentos-ciudades/210310-InfoDane-Villavicencio-Meta.pdf>
- [191] Comunicaciones, «Minambiente financiará Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire en 11 biodiverciudades -», 15 de septiembre de 2021.
<https://www.minambiente.gov.co/minambiente-financiara-sistema-de-vigilancia-de-calidad-del-aire-en-11-biodiverciudades/>

- [192] «Buscador general». <https://www.cormacarena.gov.co/buscar?q=villavicencio>
- [193] Redacción, «Rellenos Sanitarios y su impacto en el ambiente del Meta», *REGIÓN 365*. <https://www.region365.com/2021/04/rellenos-sanitarios-y-su-impacto-en-el.html>
- [194] «Disposición final residuos ordinarios | Bioagrícola del Llano». https://www.bioagricoladelllano.com.co/es/disposicion_final_residuos_ordinarios
- [195] «Home | Bioagrícola Del Llano». <https://www.bioagricoladelllano.com.co/>
- [196] «INVENTARIO DE EMISIONES DE GASES EFECTO INVERNADERO PARA LA REGIÓN BOGOTÁ – CUNDINAMARCA», *IDEAM*. http://www.ideam.gov.co/documents/40860/609198/INFORME+TECNICO_Gases+Efecto+Invernadero.pdf/e9f9a51e-4350-4914-944c-d767fefb0c61?version=1.2
- [197] D. A. C. A. Santiago y C. C. A. Felipe, «Metodología para el diseño de un sistema de captación y aprovechamiento de biogás proveniente de residuos sólidos urbanos», 2020. <https://repositorio.utp.edu.co/items/a43a21ed-798e-4738-8d31-dc1809bc444d>
- [198] «Understanding global warming potentials | US EPA», *US EPA*, 27 de marzo de 2024. <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>
- [199] E. GraphEverywhere, «Machine Learning | Qué es, tipos, ejemplos y cómo implementarlo», *GraphEverywhere*, 21 de septiembre de 2022. <https://www.grapheverywhere.com/machine-learning-que-es-tipos-ejemplos-y-como-implementarlo/>
- [200] P. R. De los Santos, «Tipos de aprendizaje en Machine Learning: supervisado y no supervisado», *Telefónica Tech*, 29 de junio de 2023. <https://empresas.blogthinkbig.com/que-algoritmo-elegir-en-ml-aprendizaje/>
- [201] Jmartinezheras, «2018-MachineLearning-Lectures-ESA/iartificial_net at master · jmartinezheras/2018-MachineLearning-Lectures-ESA», *GitHub*. <https://www.iartificial.net/random-forest-bosque-aleatorio/>

- [202] «RPUBs - Random Forest». https://rpubs.com/SantanaAlec/Random_Forest
- [203] M. A. Nielsen, «Neural Networks and Deep Learning», 2015. <http://neuralnetworksanddeeplearning.com/>
- [204] «Deep learning». <https://www.deeplearningbook.org/>
- [205] «Elements of Statistical Learning: data mining, inference, and prediction. 2nd Edition.» <https://hastie.su.domains/ElemStatLearn/>
- [206] «Deep air quality forecasting using hybrid Deep Learning Framework», *IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8907358>
- [207] «B. Sistema de Predicción de Contaminación del Aire en Madrid, España.» https://www.researchgate.net/publication/225620689_Neural_Network_Models_for_Air_Quality_Prediction_A_Comparative_Study
- [208] M. J. Jiménez-Navarro, M. Martínez-Ballesteros, F. Martínez-Álvarez, y G. Asencio-Cortés, «Explaining deep learning models for ozone pollution prediction via embedded feature selection», *Applied Soft Computing*, vol. 157, p. 111504, may 2024, doi: 10.1016/j.asoc.2024.111504.
- [209] J. Duan, Y. Gong, J. Luo, y Z. Zhao, «Air-Quality Prediction Based on the ARIMA-CNN- LSTM Combination Model optimized by Dung Beetle Optimizer», *Research Square (Research Square)*, mar. 2023, doi: 10.21203/rs.3.rs-2726968/v1.
- [210] «A Novel Hybrid Model Based on Deep Learning and Autoregressive for Air Quality Prediction», *IEEE Conference Publication | IEEE Xplore*, 18 de junio de 2023. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10191748>
- [211] N. S. Gupta, Y. Mohta, K. Heda, R. Armaan, B. Valarmathi, y G. Arulkumaran, «Prediction of Air Quality Index Using Machine Learning Techniques: A Comparative Analysis», *Journal Of Environmental And Public Health*, vol. 2023, pp. 1-26, ene. 2023, doi: 10.1155/2023/4916267.
- [212] Z. Shao, M. N. Ahmad, y A. Javed, «Comparison of Random Forest and XGBoost Classifiers Using Integrated Optical and SAR Features for Mapping Urban Impervious Surface», *Remote Sensing*, vol. 16, n.º 4, p. 665, feb. 2024, doi: 10.3390/rs16040665.

- [213] N. Karimi, A. Richter, y K. T. W. Ng, «Siting and ranking municipal landfill sites in regional scale using nighttime satellite imagery», *Journal Of Environmental Management*, vol. 256, p. 109942, feb. 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109942.
- [214] N. Karimi, K. T. W. Ng, y A. Richter, «Prediction of fugitive landfill gas hotspots using a random forest algorithm and Sentinel-2 data», *Sustainable Cities And Society*, vol. 73, p. 103097, oct. 2021, doi: 10.1016/j.scs.2021.103097.
- [215] M. S. Islam *et al.*, «HGSORF: Henry Gas Solubility Optimization-based Random Forest for C-Section prediction and XAI-based cause analysis», *Computers In Biology And Medicine*, vol. 147, p. 105671, ago. 2022, doi: 10.1016/j.combiomed.2022.105671.
- [216] S.-M. Choi, H. Choi, y W. Paik, «Multivariate Regression Modeling for Coastal Urban Air Quality Estimates», *Applied Sciences*, vol. 13, n.º 19, p. 10556, sep. 2023, doi: 10.3390/app131910556.
- [217] S. Sousa, F. Martins, M. Alvimferraz, y M. Pereira, «Multiple linear regression and artificial neural networks based on principal components to predict ozone concentrations», *Environmental Modelling & Software*, vol. 22, n.º 1, pp. 97-103, ene. 2007, doi: 10.1016/j.envsoft.2005.12.002.
- [218] «Time Series Analysis for Air Quality Forecasting: ARIMA and Prophet Models.»
https://www.researchgate.net/publication/351770527_Time_Series_Analysis_Using_ARIMA_Model_for_Air_Pollution_Prediction_in_Hyderabad_City_of_India
- [219] B. S. Freeman, G. Taylor, B. Gharabaghi, y J. Thé, «Forecasting air quality time series using deep learning», *Journal Of The Air & Waste Management Association*, vol. 68, n.º 8, pp. 866-886, may 2018, doi: 10.1080/10962247.2018.1459956.
- [220] A. A. Abdel-Rahman, «ON THE ATMOSPHERIC DISPERSION AND GAUSSIAN PLUME MODEL», *ResearchGate*, oct. 2008, [En línea]. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/265989872_ON_THE_ATMOSPHERIC_DISPERSION_AND_GAUSSIAN_PLUME_MODEL
- [221] S. Rahman, «CALPUFF- Air Quality modelling», *SlideShare*, 24 de febrero de 2014. <https://www.slideshare.net/slideshow/calpuff-air-quality-modelling/31568132#:~:text=%EF%82%97%20The%20CALPUFF%20model%20is,path%20of%20the%20pollution%20plumes>

- [222] «Estimation of landfill gas and its renewable energy potential in Lagos, Nigeria».
https://www.researchgate.net/publication/278715975_Estimation_of_landfill_gas_and_its_renewable_energy_potential_in_Lagos_Nigeria
- [223] J. Pillai y C. Riverol, «Estimation of gas emission and derived electrical power generation from landfills. Trinidad and Tobago as study case», *Sustainable Energy Technologies And Assessments*, vol. 29, pp. 139-146, oct. 2018, doi: 10.1016/j.seta.2018.08.004.
- [224] «Household Hazardous Waste Disposal to Landfill: Using Landsim to Model Leachate Migration».
https://www.researchgate.net/publication/6749763_Household_Hazardous_Waste_Disposal_to_Landfill_Using_Landsim_to_Model_Leachate_Migration
- [225] D. A. Lagos, M. Héroux, R. Gosselin, y A. R. Cabral, «Optimization of a landfill gas collection shutdown based on an adapted first-order decay model», *Waste Management*, vol. 63, pp. 238-245, may 2017, doi: 10.1016/j.wasman.2016.08.012.
- [226] Z. Sabeti, S. Nosratnejad, M. Mousavi, y M. Mosaferi, «Assessment of electricity generation potential and economic analysis through different municipal solid waste management scenarios: a case study», *Biomass Conversion And Biorefinery*, nov. 2022, doi: 10.1007/s13399-022-03525-7.
- [227] «APLICACIÓN DE UN MODELO DE DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA», *PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA*, 2012.
http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-3000/UCF3110_01.pdf
- [228] «10 Librerías Python para Data Science y Machine Learning», *Verne Academy*, 17 de marzo de 2023. <https://verneacademy.com/blog/articulos-ia/10-librerias-python-data-science-machine-learning/>
- [229] S. Nowak, «GitHub: La Herramienta que Revoluciona la Programación», *Nuclio Digital School*, 23 de enero de 2024. <https://nuclio.school/blog/github/>
- [230] «Toma de decisiones basadas en los datos: cómo tener éxito en la era digital», *Tableau*. <https://www.tableau.com/es-es/learn/articles/data-driven-decision-making>
- [231] «¿Qué son las Redes LSTM? | Codificando Bits», *Codificando Bits*.
<https://www.codificandobits.com/blog/redes-lstm/>

GLOSARIO

Machine Learning: subcampo de la inteligencia artificial que permite a los sistemas aprender y mejorar automáticamente a partir de la experiencia sin ser programados explícitamente.

Redes Neuronales: modelos computacionales inspirados en el cerebro humano, utilizados en el aprendizaje automático para reconocer patrones complejos en datos.

Modelos predictivos: herramientas analíticas que utilizan datos históricos y algoritmos de aprendizaje automático para predecir futuros eventos o comportamientos.

Calidad del aire: medida de la concentración de contaminantes en el aire, como partículas, ozono y dióxido de nitrógeno, que afectan la salud humana y el medio ambiente.

Emisiones de GEI: gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera, como el dióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄), que contribuyen al cambio climático.

Parques ecológicos: áreas designadas para la conservación de la biodiversidad y el medio ambiente, a menudo utilizadas para la investigación y la recreación sostenible.

Tecnología sostenible: tecnologías diseñadas para minimizar el impacto ambiental y promover el uso eficiente de recursos naturales.

Monitoreo ambiental: proceso de recopilación y análisis de datos sobre variables ambientales, como la calidad del aire y del agua, para evaluar el estado del medio ambiente.

ANEXOS

En el siguiente anexo se presenta el código de producción completo explicado en la sección 4.4, en este se podrá observar todo el compilado del código final utilizado en este trabajo.

```
import numpy as np
import pandas as pd
from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler
from tensorflow.keras.models import Sequential
from tensorflow.keras.layers import LSTM, Dense
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.interpolate import make_interp_spline

# Función para cargar datos de Excel
def load_data(file):
    data = pd.read_excel(file)
    return data

# Función para preparar los datos
def prepare_data(data, time_steps):
    X, y = [], []
    for i in range(len(data) - time_steps):
        X.append(data.iloc[i:i + time_steps, 0:3])
        y.append(data.iloc[i + time_steps, 0:3])
    return np.array(X), np.array(y)

# Parámetros
file = 'C:/Users/tiago/OneDrive/Base de datos Bucaramanga - Estimacion anual de
reduccion .xlsx'
time_steps = 10
num_years = 20
num_simulations = 10
```

```

# Cargar los datos
data = load_data(file)

# Normalizar los datos
scaler = MinMaxScaler(feature_range=(0, 1))
data_normalized = scaler.fit_transform(data)

# Crear el dataset
X, y = prepare_data(pd.DataFrame(data_normalized), time_steps)

# Dividir los datos en conjuntos de entrenamiento y prueba
train_size = int(len(X) * 0.9)
X_train, X_test = X[:train_size], X[train_size:]
y_train, y_test = y[:train_size], y[train_size:]

# Definir el modelo LSTM
model = Sequential()
model.add(LSTM(units=50, return_sequences=False, input_shape=(time_steps, 3)))
model.add(Dense(units=3))

# Compilar el modelo
model.compile(optimizer='adam', loss='mean_squared_error')

# Entrenar el modelo
model.fit(X_train, y_train, epochs=50, batch_size=32, validation_split=0.2)

# Función para hacer predicciones futuras
def make_future_predictions(model, current_data, num_years, noise_level):
    future_predictions = []
    for _ in range(num_years):
        next_year_prediction = model.predict(current_data)
        next_year_prediction += np.random.normal(0, noise_level,
next_year_prediction.shape)
        future_predictions.append(next_year_prediction)

```

```

    current_data = np.concatenate([current_data[:, 1:, :],
next_year_prediction.reshape(1, 1, 3)], axis=1)
    return np.array(future_predictions).reshape(-1, 3)

# Hacer múltiples simulaciones de predicciones futuras
all_predictions = []
for i in range(num_simulations):
    current_data = data_normalized[-time_steps:].reshape(1, time_steps, 3)
    noise_level = np.random.uniform(0.01, 0.1)
    future_predictions = make_future_predictions(model, current_data, num_years,
noise_level)
    all_predictions.append(future_predictions)

# Desnormalizar las predicciones
all_predictions_descaled = [scaler.inverse_transform(pred) for pred in
all_predictions]

# Crear una lista de años
years = np.array([2022 + i for i in range(num_years)])

# Graficar todas las simulaciones de predicciones
plt.Figura(figsize=(12, 8))

# Función para suavizar las líneas
def smooth_line(x, y, factor=300):
    xnew = np.linspace(x.min(), x.max(), factor)
    spl = make_interp_spline(x, y, k=3)
    ynew = spl(xnew)
    return xnew, ynew

# Definir funciones para obtener colores en base a valores
def get_green_color(value):
    return plt.cm.Greens((430 - abs(value - 430)) / 430)

```

```

def get_yellow_color(value):
    return plt.cm.YlOrBr((value - 450) / 10)

def get_red_color(value):
    return plt.cm.Reds((value - 475) / 10)

# Graficar las predicciones de cada simulación con colores dependiendo de los
valores
for i, prediction in enumerate(all_predictions_descaled):
    for j in range(3):
        x_smooth, y_smooth = smooth_line(years, prediction[:, j])
        for k in range(len(x_smooth) - 1):
            value = y_smooth[k]
            if value > 475:
                color = get_red_color(value)
            elif 430 <= value <= 475:
                color = get_yellow_color(value)
            else:
                color = get_green_color(value)
            plt.plot(x_smooth[k:k+2], y_smooth[k:k+2], linestyle='-', color=color, alpha=1)

plt.xlabel('Año')
plt.ylabel('Cantidad de kilotoneladas mitigadas de CO2')
plt.title('Predicciones para los próximos años en Bucaramanga con 0.9')
plt.grid(True)

# Ajustar la leyenda para evitar sobreposición
handles, labels = plt.gca().get_legend_handles_labels()
by_label = dict(zip(labels, handles))
plt.legend(by_label.values(), by_label.keys(), loc='upper left', bbox_to_anchor=(1, 1),
ncol=1, fontsize='small')

# Ajustar el rango del eje y
plt.ylim(400, 520)

```

```
# Asegurarse de que el eje x muestre números enteros
plt.xticks(years)

plt.tight_layout()
plt.show()

print("Predicciones para los próximos 20 años (año por año):")
for i, prediction in enumerate(all_predictions_descaled):
    print(f"Simulación {i+1}:")
    for j, year_prediction in enumerate(prediction):
        print(f"Año {2022+j}: {year_prediction}")
```