



*Recibido:* 24/febrero/2025 *Aceptado:* 12 de junio de 2025

## **Modelo de economía circular: Oportunidades de desarrollo mediante el manejo de Residuos Sólidos Urbanos (Revisión)**

**Circular Economy Model: Development Opportunities Through MSW Management (Review)**

Luis Stefano Romero Feijoo. *Estudiante de la carrera de Economía en la Facultad de Ciencias Empresariales de la Universidad Técnica de Machala. Ecuador.* [ [lromero17@utmachala.edu.ec](mailto:lromero17@utmachala.edu.ec) ] [ <https://orcid.org/0009-0007-6103-2603> ]

Leonardo Andrés Delgado Martínez. *Estudiante de la carrera de Economía en la Facultad de Ciencias Empresariales de la Universidad Técnica de Machala. Ecuador.* [ [ldelgado4@utmachala.edu.ec](mailto:ldelgado4@utmachala.edu.ec) ] [ <https://orcid.org/0009-0002-8853-5415> ]

Virgilio Eduardo Salcedo Muñoz. *PhD. Profesor Universidad Técnica de Machala. Ecuador.* [ [vsalcedo@utmachala.edu.ec](mailto:vsalcedo@utmachala.edu.ec) ] [ <https://orcid.org/0000-0001-9821-3722> ]

Graciela Maribel Fajardo Aguilar. *Ingeniera. Profesora Universidad Técnica de Machala. Ecuador.* [ [gfajardo@utmachala.edu.ec](mailto:gfajardo@utmachala.edu.ec) ] [ <https://orcid.org/0000-0003-1152-6414> ]

### **Resumen**

El presente trabajo recoge la creciente preocupación sobre uno de los fallos del actual modelo de producción global. Debido al creciente ritmo de consumo, los residuos urbanos están alcanzando niveles peligrosos que amenazan con poner en riesgo las condiciones de vida de la población. Esta es la razón de ser de este trabajo que analiza los volúmenes de biogás generado dentro del relleno sanitario de la ciudad de Machala, mediante la recopilación de información clave que permite determinar el potencial energético disponible dentro del complejo, presentando así, a la sociedad machaleña las oportunidades de desarrollo que un modelo circular podría presentar para la ciudad aportando nuevos enfoques a la manera en que se gestionan los residuos.

**Palabras clave:** Economía circular; Relleno sanitario; Residuos sólidos urbano; Biogás; Potencial energético.

### **Abstract**

This work addresses the growing concern about one of the failures of the current global production model. Due to the increasing pace of consumption, urban waste is reaching dangerous levels that threaten to jeopardize the living conditions of the population. This is the purpose of this study, which analyzes the volumes of biogas generated within the sanitary landfill of the city of Machala. By collecting key information, it seeks to determine the energy potential available



within the complex, thus presenting the Machala society with the development opportunities that a circular model could offer to the city, providing new approaches to waste management.

**Keywords:** Circular economy; Landfill; Urban; Solid waste; Biogas; Energy potential

## **Introducción**

Frente al ritmo de la economía mundial y los desafíos presentados por la crisis ambiental que amenaza la calidad de vida de la población, es crucial realizar la transición hacia modelos más sostenibles. Para ello se deben establecer procesos productivos más sustentables, que mejoren las condiciones de vida de la población restaurando el ambiente y generando nuevas plazas de trabajo. El modelo actual de la economía somete a las fuentes de recursos naturales a un estrés preocupante debido al ritmo con el que consume recursos, que no permite a estas fuentes tener un ciclo estable de renovación, por otro lado, está la velocidad con la que se generan desechos.

La contaminación por desechos está avanzando a niveles preocupantes, según el informe Perspectiva Mundial de la Gestión de Residuos de la Organización de Naciones Unidas (ONU) elaborado por Lenkiewicz (2024) la generación de residuos sólidos urbanos en América Latina y el Caribe en el año 2014 había alcanzado las 541 mil toneladas/día. Sumado a esto, están las proyecciones del Banco Mundial que indican que para el año 2050 esta cifra alcanzaría los 369 millones de toneladas/año.

Como respuesta a las falencias del modelo lineal nace la economía circular. Tal como mencionan Marcet et al. (2018) la motivación de la economía circular se sustenta por un lado en maximizar el aprovechamiento de los recursos y por otro minimizar la generación de residuos. Es debido a este principio que el modelo de economía circular debe ser el camino a seguir si se busca un futuro próspero y duradero para la población y dentro de este camino la gestión de los residuos es un punto clave donde la economía circular debe prestar mucha atención. Con esta premisa nace este trabajo, que analiza el potencial de producción de energía a partir del biogás generado en el relleno sanitario de la ciudad de Machala, mediante el estudio de las tecnologías aplicadas e iniciativas realizadas con características similares al entorno, con el fin de desarrollar un modelo de crecimiento más sostenible para la ciudad.

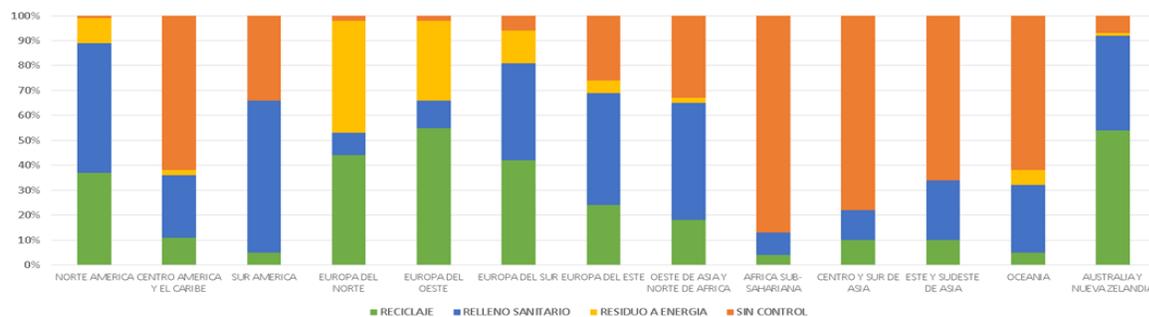
## **Desarrollo**

*Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y su tratamiento alrededor del mundo*



El constante crecimiento poblacional, la movilización de la ruralidad a las grandes ciudades y la expansión de la urbanización son factores que aceleran el ritmo con el que se generan los residuos sólidos, estos se presentan comúnmente en países en vías de desarrollo. Es por ello que regiones como América latina deben prestar particular importancia a esta problemática. Cuando se observa esta región se ve que su situación está agravándose, como lo explica Junqueira et al. (2022) al referir que la gestión de residuos se reduce al uso de vertederos a cielo abierto, los cuales no terminan cumpliendo con las normas de uso, por otro lado, la recolección se realiza sin la correcta clasificación desde su origen. Como se ve en el gráfico 1 centrándonos en el sur de América se observa que la presencia de procesos de transformación de residuo a energía es prácticamente nula.

**Gráfico 1. Distribución regional del destino de los residuos sólidos urbanos (2020)**



**Fuente: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2024)**

### *Contexto de Ecuador y sus particularidades*

La República del Ecuador es un país de características únicas, mega diverso, debido a la exorbitante presencia de flora y fauna endémica. Esta cercanía con la naturaleza es identidad de los ecuatorianos, la misma que se ha traducido en su constitución al ser la única del mundo en otorgarle derecho a la naturaleza en la Constitución de la República del Ecuador (2008) dentro de su capítulo séptimo, en los artículos del 71 al 74. Aunque aún enfrenta varios desafíos para materializarse, de los cuales la gestión de los residuos ha ido incrementando su nivel de urgencia. Organismos como la Plataforma Acción Plásticos del Foro Económico Mundial (World Economic Forum, 2024) dan fe de ello, según sus proyecciones la generación de residuos tendrá un incremento del 82% para el año 2040 en comparación con el 2022.

En la actualidad como lo indica el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC, 2023) bajo la metodología de la Organización Panamericana de Salud, en el año 2022 los

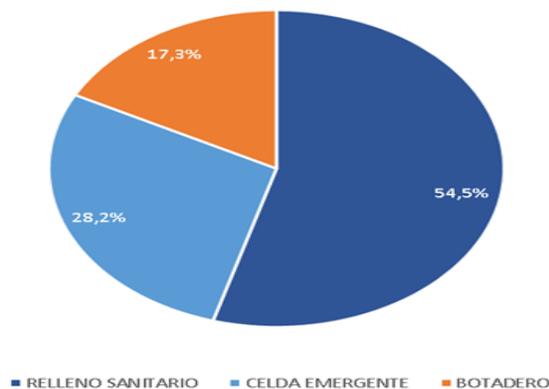


ecuatorianos producían un total de 0,9 kg de residuos sólidos al día. Segmentando por provincia, Guayas presenta el valor más alto con 1,3 kg/hab/día le siguen las provincias de El Oro, Pichincha, Santa Elena con 0,9 kg/hab/día, en contraste están Napo y Azuay con el valor más bajo de 0,5 kg/hab/día.

Dentro del país el Código Orgánico de Organización Territorial Autonomía Descentralización (2019) en sus artículos 55 y 137, determinan que la gestión de los residuos sólidos urbanos es competencia exclusiva de los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales (GADM). Además, en el Código Orgánico del Ambiente (2017) en su artículo 27 refiere que el marco de competencias de los GADMs se extiende a todo lo correspondiente a la planificación, programación y proyección de mecanismos y sistemas que permitan una gestión integral de los residuos urbanos.

Los municipios en Ecuador establecen como mecanismos para el tratamiento de sus residuos sólidos urbanos a los botaderos, celdas emergentes y relleno sanitario, siendo el último el que mayor presencia tiene en el territorio nacional. Esto se corrobora con el Registro de Gestión de Residuos Sólidos provisto por el INEC (2023) como se observa en el gráfico 2. El 54,5% de estos residuos terminan en rellenos sanitarios, un 28,2% en celdas emergentes y un 17,3 en botaderos.

**Gráfico 2. Destino de los residuos sólidos en Ecuador (2022)**



**Fuente: INEC (2023).**

### *Mecanismos para el tratamiento de RSU: Relleno Sanitario*

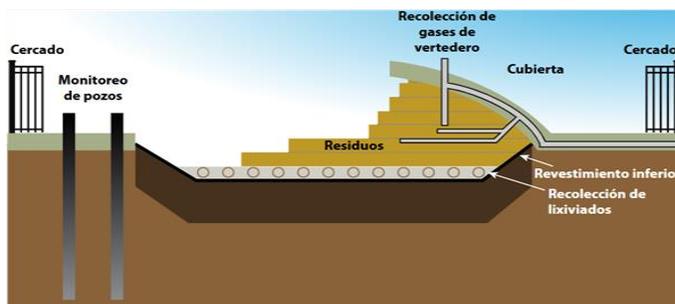
En la actualidad se han desarrollado diversas tecnologías dedicadas al tratamiento de los residuos sólidos urbanos. Como indica Caballero et al. (2011) existe el pretratamiento por alta compactación, el tratamiento mecánico-biológico y los tratamientos en relleno sanitario. De



todos, el relleno sanitario se ubica como el más utilizado en la gestión de los residuos. Tal como explica la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE, 2025). Este mecanismo utiliza principios ingenieriles para confinar los desechos en la menor área posible, comprimiendo su volumen al mínimo práctico, para luego confinarla con una capa de tierra al finalizar cada jornada.

La Organización Panamericana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (2002) explica que esta técnica de gestión de residuos sólidos reduce las molestias y los peligros para la salud, la seguridad pública, y el ambiente, siempre y cuando se mantengan normas técnicas, como las que se observan en la figura 1, en el diseño sugerido por la Environmental Protection Agency (2020) debido a que dentro de los rellenos sanitarios existen grandes cantidades de biogás.

**Figura 1. Diseño estándar de un relleno sanitario**



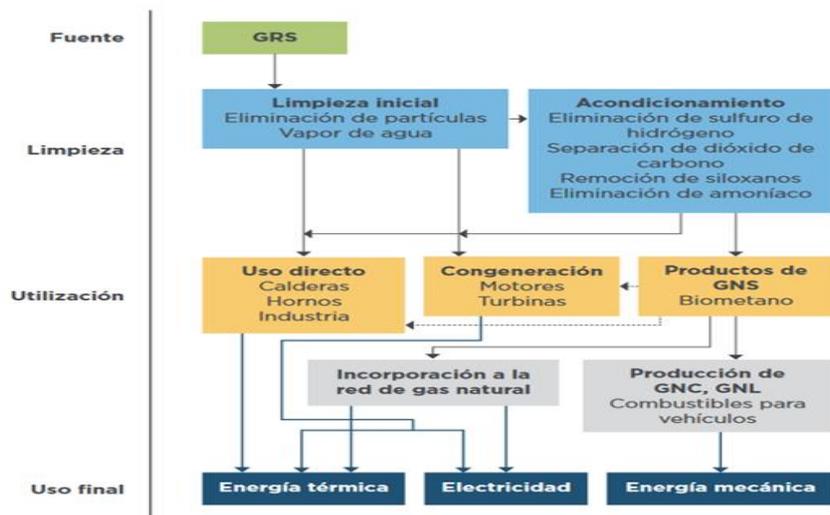
**Fuente: Environmental Protection Agency (2020)**

### *Biogás producido en rellenos sanitarios*

En los rellenos sanitarios ocurren distintos procesos físicos y químicos que poseen un alto potencial en materia energética (Blanco et al., 2017). Se produce una descomposición de la materia orgánica depositada en él, que produce como resultado un biogás también llamado Gas de Relleno Sanitario (GRS). Si este GRS no es gestionado de manera correcta se convierte en un peligro debido a que es altamente nocivo e inflamable, así lo indica Escamilla (2019), al referir que, con un manejo adecuado se puede evitar que el biogás se disperse sin control y afecte a los territorios adyacentes. Una vez capturado puede ser destruido o recolectado a través de las tuberías para su uso directo, o utilizado para la producción de energía como lo explica el Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2017) en el esquema que se observa en la figura 2.



Figura 2. Esquema para el aprovechamiento del GRS



Fuente: Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2017)

Además de lo ya mencionado la generación de energía mediante el biogás emanado en los sitios de disposición final de RSU presenta desde el enfoque ambiental un mecanismo de doble mitigación en cuanto al control de la emisión de gases de efecto invernadero. Como explica Blanco et al. (2017) esto debido, por un lado, a la captura de metano y por otro la sustitución de combustibles fósiles dentro de los procesos de generación de energía.

#### *Mecanismos para captura y aprovechamiento de biogás*

Dentro de los estándares de los rellenos sanitarios por diseño existen sistemas para la recolección y destrucción del biogás generado. Tal como lo indica la Environmental Protection Agency (2020) destruir este biogás ayuda a disminuir el riesgo de incendios dentro del complejo, además de reducir las emisiones de metano al ambiente. Para esto existen diferentes mecanismos, los cuales se encierran en dos grupos. como indica Barrios (2008), el primero la ventilación pasiva, que se compone de trincheras alrededor del complejo rellenas con un material granulado. Esto crea un área de alta permeabilidad alrededor de la celda por donde fluye el gas para ser recolectado. Y el segundo y más completo el de ventilación activa, el cual se compone de corredores de alta permeabilidad a través una red de tuberías en los cuales se recolectará el biogás, usualmente se añade una pequeña presión de succión para una mejor recolección.

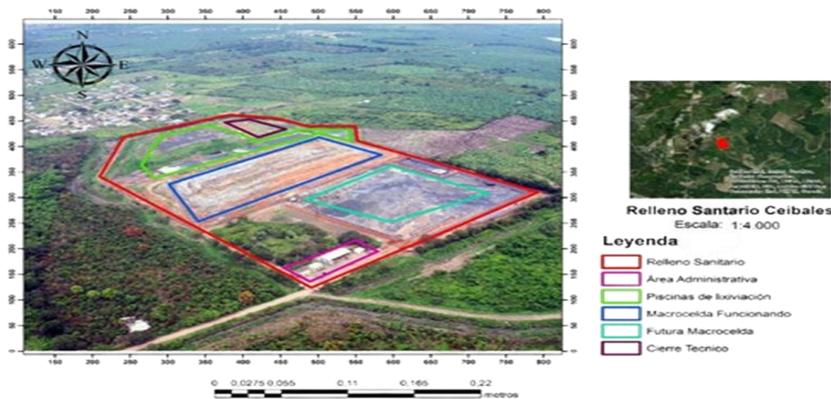


Una vez el GRS es capturado puede ser aprovechado para la generación de energía, para ello el motor reciprocante de combustión interna se presenta como la mejor opción. Tal como lo explican Quevedo y Rodríguez (2022) exhiben una mayor eficiencia, de entre el 25 al 35 % y presentan un menor costo por Kw en comparación con micro turbinas y turbinas de gas, además está el añadido de que existen diversos modelos capaces de ajustarse mejor al flujo de GSR del complejo.

#### *Análisis del entorno: Relleno Sanitario Institucional Ceibales de Machala*

El análisis se realiza en el Relleno Sanitario Institucional Ceibales de Machala, este cuenta con un área de 20,27 Ha. Como se observa en la figura 3 está distribuido en tres macro celdas y siete piscinas para almacenamiento de lixiviados; este complejo tiene designada como fecha de cierre técnico el año 2030.

**Figura 3. Mapa técnico del relleno sanitario Ceibales**



**Fuente: Chávez (2022)**

#### *Metodología de la investigación*

Establecido el contexto se llegó a la conclusión de que el enfoque cuantitativo sería el más adecuado para el trabajo. En cuanto al diseño de la investigación, se ha optado por el descriptivo no experimental debido a la manera en que se trata la información. Como lo describe Escamilla (2019) se fundamenta en la observación y el análisis del fenómeno tal como ocurre en su contexto natural. Así mismo se hace uso del método deductivo, ya que como explica Espinoza (2023) implica el análisis de los principios generales del fenómeno, el cual una vez comprobado, verificado y determinado, procede a aplicarse a contextos particulares. En cuanto a las técnicas de investigación, estas incluyen la revisión bibliográfica y la aplicación de modelos matemáticos a la información recopilada.



### Método de estimación de biogás generado

Para poder estimar los volúmenes de biogás generados se hará uso del programa LandGEM con base en Excel desarrollado por la Environmental Protection Agency (2020); esta herramienta usa la ecuación de primer orden Decay como se observa en la fórmula 1, con la cual se calcula la tasa con la que los residuos se descomponen con base en una cantidad de metano estimada, esto para un periodo de tiempo específico.

Formula 1. Ecuación del modelo LandGEM

$$Q_{LFG} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k L_0 \left[ \frac{M_i}{10} \right] (e^{-kt_{ij}})$$

$Q_{LFG}$ : Volumen de biogás generado ( $m^3$ ).

$M_i$ : Masa de residuos depositados (toneladas).

$L_0$ : Potencial de generación de biogás ( $m^3$ /tonelada).

$k$ : Constante de generación (1/año).

$t_1, t_2$ : Tiempo transcurrido desde la deposición inicial (años)

Antes de poder aplicar de manera acertada el modelo LandGEM se debe considerar las condiciones tanto climáticas como técnicas del complejo, esto con el fin de establecer los valores de  $k$  y  $L_0$  correspondientes al entorno estudiado. Para el caso del relleno sanitario Ceibales haremos uso del modelo ecuatoriano, el cual es una extensión del modelo mexicano desarrollado por la Environmental Protection Agency (2020) en el 2003. Tal como explica Barragán et al. (2020) esta extensión se creó recalibrando el modelo original con base en estudios realizados a dos complejos, en Guayaquil y Cuenca en el año 2007, complementado con la evaluación realizada a los rellenos sanitarios de Loja en el 2008, dando como resultado los valores que se observan en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros del modelo ecuatoriano para estimación de biogás

<b>k</b>	<b>F</b>	<b>L<sub>0</sub></b>	<b>%CH<sub>4</sub></b>
0,045	50%	86,52	50%

Fuente: Elaboración propia.

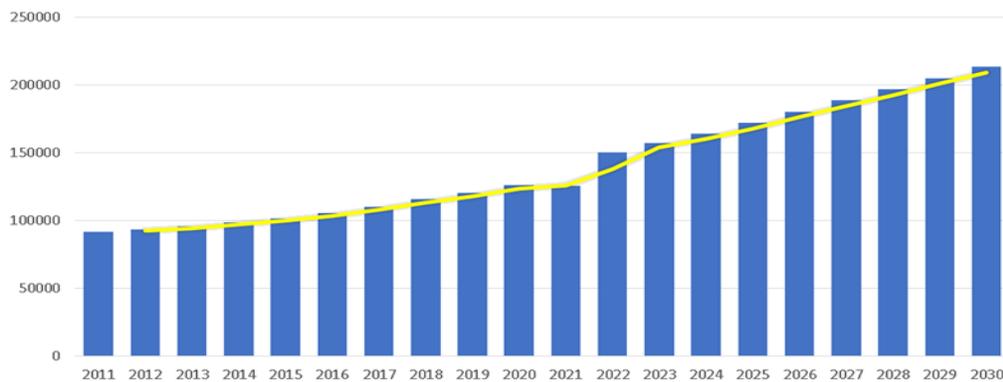
## Resultados

Estimación de generación de biogás dentro del relleno sanitario Ceibales



En primer lugar, para establecer el potencial gasífero del relleno sanitario Ceibales debemos conocer los valores de RSU que se proyecta ingresen al complejo. Como se mencionó previamente el crecimiento poblacional es un factor muy relevante al momento de establecer estos valores futuros, es por ello que es necesario conocer las diferentes proyecciones poblacionales hasta el año 2030 como se observan en el gráfico 3, gracias a la información provista por el INEC (2023) en su informe de estimaciones y proyecciones poblacionales tenemos los siguientes valores.

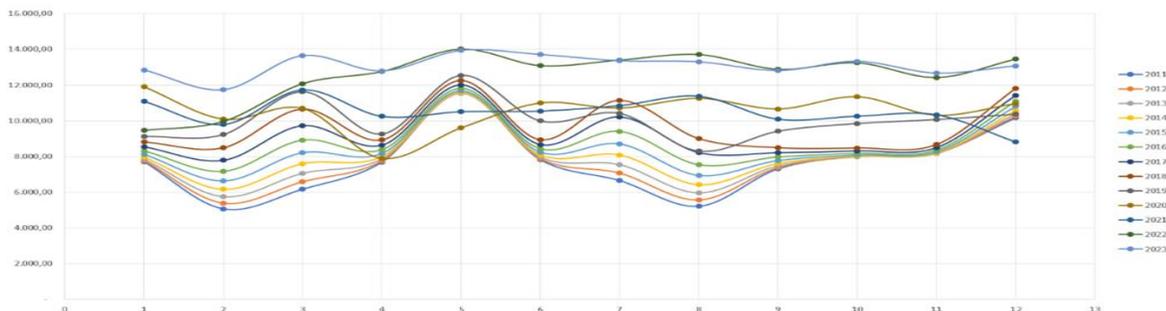
**Gráfico 3. Estimaciones y proyecciones de la población de Machala 2011-2030**



Fuente: INEC (2023).

Siguiendo esta línea se toma la información registrada por la empresa municipal Aseo EP en los diferentes informes de rendición de cuentas desde la apertura del relleno sanitario en el año 2010 hasta el 2023, con esta información se establecen los pesos mensuales en toneladas de RSU que ingresaron al complejo como se ve en el gráfico 4. Esto con el fin de establecer un modelo que permita proyectar sobre los futuros volúmenes que ingresarán hasta el año 2030.

**Gráfico 4. Ingreso de volúmenes de RSU al RS Ceibales 2011-2023**



Fuente: Empresa Pública Municipal de Aseo de Machala (EMAM EP, 2023).

A través de un modelo autorregresivo integrado de media móvil (ARIMA) se logra pronosticar los valores de los siete años restantes. Esta proyección de RSU es imperativa para



realizar el cálculo del potencial energético existente dentro del complejo. Con la información generada es posible determinar los volúmenes de biogás que el relleno sanitario dispone, de manera que esto permita establecer el potencial energético del complejo.

**Tabla 2. Generación de RSU en la ciudad de Machala 2010-2030**

<b>Año</b>	<b>Generación RSU (Toneladas)</b>
2010	26.475,11
2011	91.628,74
2012	93.356,32
2013	95.574,98
2014	98.322,30
2015	101.645,12
2016	105.600,73
2017	110.258,58
2018	115.702,34
2019	120.205,44
2020	126.457,85
2021	125.636,49
2022	150.485,69
2023	157.277,00
2024	163.988,54
2025	172.172,49
2026	180.427,06
2027	188.698,41
2028	196.973,78
2029	205.250,12
2030	213.526,68

**Fuente:** Elaboración propia.

#### *Potencial energético del biogás emanado dentro del relleno sanitario Ceibales*

Una vez determinados los volúmenes de RSU que ingresaron e ingresarán al relleno sanitario desde su apertura hasta su cierre técnico, se tendrá la información necesaria para emplear el modelo LandGem ajustado al entorno ecuatoriano con los valores de K y Lo correspondientes. Como resultado el modelo nos arroja las cantidades de biogás generadas dentro del relleno sanitario. En la tabla 3 se puede observar cómo los niveles de biogás alcanzan su pico de generación un año después del cierre técnico en el año 2031 con 14.989.214,98 m<sup>3</sup> de



biogás al año, a partir de este punto los niveles se reducen de manera constante hasta llegar al año 2150.

**Tabla 3. Estimación de biogás generado dentro del relleno sanitario Ceibales 2010-2150**

Año	Biogás Generado (m3/año)						
2011	202040,58	2046	7949525,67	2081	1645611,85	2116	340654,08
2012	892400,40	2047	7599726,52	2082	1573200,79	2117	325664,45
2013	1565566,41	2048	7265319,42	2083	1503975,99	2118	311334,39
2014	2226042,76	2049	6945627,07	2084	1437797,26	2119	297634,89
2015	2878422,23	2050	6640001,99	2085	1374530,56	2120	284538,21
2016	3527452,93	2051	6347825,18	2086	1314047,76	2121	272017,81
2017	4178111,25	2052	6068504,89	2087	1256226,34	2122	260048,34
2018	4835684,60	2053	5801475,39	2088	1200949,22	2123	248605,56
2019	5505866,26	2054	5546195,86	2089	1148104,43	2124	237666,29
2020	6180922,92	2055	5302149,28	2090	1097584,95	2125	227208,37
2021	6873989,67	2056	5068841,36	2091	1049288,44	2126	217210,63
2022	7530291,65	2057	4845799,58	2092	1003117,11	2127	207652,82
2023	8347347,40	2058	4632572,19	2093	958977,43	2128	198515,57
2024	9180277,44	2059	4428727,35	2094	916780,01	2129	189780,39
2025	10027774,51	2060	4233852,19	2095	876439,38	2130	181429,57
2026	10900434,10	2061	4047552,04	2096	837873,84	2131	173446,21
2027	11797687,89	2062	3869449,55	2097	801005,28	2132	165814,14
2028	12718581,73	2063	3699184,03	2098	765759,03	2133	158517,90
2029	13662106,09	2064	3536410,62	2099	732063,71	2134	151542,72

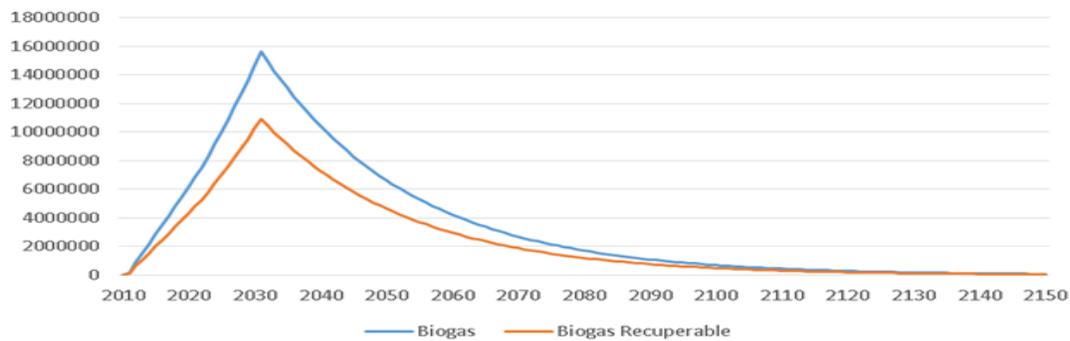


2030	14627272,5 5	2065	3380799,64	210 0	699851,06	213 5	144874,46
2031	15613130,5 6	2066	3232035,95	210 1	669055,85	213 6	138499,61
2032	14926113,5 0	2067	3089818,23	210 2	639615,71	213 7	132405,28
2033	14269326,9 2	2068	2953858,44	210 3	611471,01	213 8	126579,12
2034	13641440,6 0	2069	2823881,23	210 4	584564,74	213 9	121009,32
2035	13041182,8 6	2070	2699623,35	210 5	558842,42	214 0	115684,60
2036	12467337,9 8	2071	2580833,12	210 6	534251,95	214 1	110594,19
2037	11918743,7 1	2072	2467269,97	210 7	510743,52	214 2	105727,77
2038	11394288,9 7	2073	2358703,88	210 8	488269,52	214 3	101075,48
2039	10892911,5 7	2074	2254914,97	210 9	466784,43	214 4	96627,90
2040	10413596,0 3	2075	2155693,03	211 0	446244,74	214 5	92376,03
2041	9955371,58	2076	2060837,11	211 1	426608,85	214 6	88311,25
2042	9517310,16	2077	1970155,08	211 2	407836,98	214 7	84425,34
2043	9098524,55	2078	1883463,30	211 3	389891,13	214 8	80710,41
2044	8698166,56	2079	1800586,17	211 4	372734,94	214 9	77158,95
2045	8315425,32	2080	1721355,85	211 5	356333,66	215 0	73763,76

Fuente: Elaboración propia.

Antes de continuar se debe considerar que el biogás generado no es igual al biogás disponible para la producción de energía, debido a que dentro del proceso de extracción existe cierta pérdida, por lo cual es necesario establecer el porcentaje de eficiencia de recuperación del gas. Utilizando como referencia el porcentaje de eficiencia de proyectos de similares características dentro del país se determinó una eficiencia de recuperación del 71% como se observa en el gráfico 7.



**Gráfico 7. Estimación biogás recuperado dentro del relleno sanitario Ceibales 2010-2150**

**Fuente: Elaboración propia.**

Establecido el biogás disponible es posible determinar el potencial del complejo, para esto se hace uso de la ecuación de producción energética a partir de biogás como se observa en la fórmula 2. La misma determina la energía disponible, estableciendo el metano presente en el biogás debido su poder calorífico tomando en consideración la eficiencia del sistema de conversión a utilizar.

Formula 2. Ecuación de producción energética a partir de biogás

$$E = V * CH_4 * PC * n$$

**E:** Energía producida (kWh). **CH<sub>4</sub>:** Potencial de metano (% porcentual).

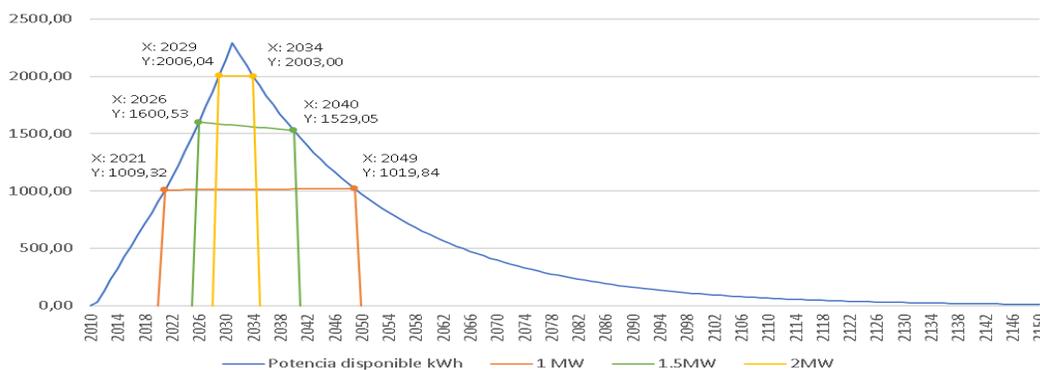
**V:** Volumen de biogás disponible (m<sup>3</sup>/año). **PC:** Poder calorífico del metano (kWh/m<sup>3</sup>).

**n:** eficiencia del sistema de conversión (% porcentual)

Para aplicar la ecuación se determinan las constantes de la ecuación. Debido al contenido de materia orgánica de los residuos de Machala se establece un contenido de metano del 50%; en cuanto al poder calorífico del metano bajo condiciones estándar se ubica en 10,5 kWh/m<sup>3</sup> y por último la eficiencia del sistema de conversión, en este caso se escogen los motores recíprocos de combustión interna con un porcentaje de eficiencia del 35% promedio.



**Gráfico 8. Estimación de potencia disponible dentro del relleno sanitario Ceibales 2010-2150**



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4. Estimación de potencia disponible dentro del relleno sanitario Ceibales 2010-2150**

Año	Biogás Generado (m3/año)						
2011	29,67	2046	1167,25	2081	241,63	2116	50,02
2012	131,03	2047	1115,88	2082	231,00	2117	47,82
2013	229,88	2048	1066,78	2083	220,83	2118	45,71
2014	326,85	2049	1019,84	2084	211,11	2119	43,70
2015	422,65	2050	974,97	2085	201,83	2120	41,78
2016	517,94	2051	932,07	2086	192,94	2121	39,94
2017	613,48	2052	891,05	2087	184,45	2122	38,18
2018	710,03	2053	851,84	2088	176,34	2123	36,50
2019	808,44	2054	814,36	2089	168,58	2124	34,90
2020	907,56	2055	778,53	2090	161,16	2125	33,36
2021	1009,32	2056	744,27	2091	154,07	2126	31,89



2022	1105,69	2057	711,52	209 2	147,29	212 7	30,49
2023	1225,66	2058	680,21	209 3	140,81	212 8	29,15
2024	1347,96	2059	650,28	209 4	134,61	212 9	27,87
2025	1472,40	2060	621,67	209 5	128,69	213 0	26,64
2026	1600,53	2061	594,31	209 6	123,03	213 1	25,47
2027	1732,28	2062	568,16	209 7	117,61	213 2	24,35
2028	1867,50	2063	543,16	209 8	112,44	213 3	23,28
2029	2006,04	2064	519,26	209 9	107,49	213 4	22,25
2030	2147,75	2065	496,41	210 0	102,76	213 5	21,27
2031	2292,51	2066	474,57	210 1	98,24	213 6	20,34
2032	2191,63	2067	453,68	210 2	93,92	213 7	19,44
2033	2095,20	2068	433,72	210 3	89,78	213 8	18,59
2034	2003,00	2069	414,64	210 4	85,83	213 9	17,77
2035	1914,87	2070	396,39	210 5	82,06	214 0	16,99
2036	1830,61	2071	378,95	210 6	78,45	214 1	16,24
2037	1750,06	2072	362,27	210 7	74,99	214 2	15,52
2038	1673,05	2073	346,33	210 8	71,69	214 3	14,84
2039	1599,43	2074	331,09	210 9	68,54	214 4	14,19
2040	1529,05	2075	316,53	211 0	65,52	214 5	13,56
2041	1461,77	2076	302,60	211 1	62,64	214 6	12,97
2042	1397,45	2077	289,28	211 2	59,88	214 7	12,40
2043	1335,96	2078	276,55	211 3	57,25	214 8	11,85



2044	1277,17	2079	264,38	211 4	54,73	214 9	11,33
2045	1220,97	2080	252,75	211 5	52,32	215 0	10,83

Fuente: Elaboración propia.

Así se tiene, como se observa en el gráfico 8 y en la tabla 4, determinada la potencia disponible dentro del relleno sanitario Ceibales; dentro del periodo 2029-2034 estaría la mayor potencia registrada de aproximadamente 2MW al día. Por otro lado, dentro del periodo 2026-2040 encontramos una potencia de disponible de 1.5MW al día y por último el periodo del 2021-2049 donde la potencia llega hasta 1MW al día. Aquí es donde se vislumbra el por qué se ha optado por utilizar motores recíprocos de combustión interna, ya que estos permiten agregar o quitar módulos según se requiera para los flujos de biogás.

Con estos resultados se establece que la planta tendría una producción de 1.5MW los primeros 3 años de funcionamiento, luego se incrementaría a 2MW durante 5 años más, volviéndose a ubicar en 1.5MW durante los 6 años más posteriores, hasta por fin llegar a 1MW en los restantes 6 años. Con estos 18 años de constante producción energética se observa que aún hay gran potencial por explotar dentro del complejo.

## Discusión

### *Oportunidades de desarrollo para la ciudad de Machala*

Ahora para responder la interrogante planteada en este trabajo se debe establecer qué oportunidades de desarrollo presenta esta iniciativa para la ciudad. Debido a las características del proyecto y las diferentes áreas en las cuales tendrá impacto se opta por establecerlo en tres categorías: oportunidades económicas, sociales y ambientales.

### *Económicas*

Al establecer este nuevo complejo energético dentro de las instalaciones del relleno sanitario, el municipio de Machala contaría con un nuevo ingreso para poder realizar su trabajo de mejoramiento de la ciudad sin depender de los desgloses del gobierno central aportando a la autogestión del municipio. Tomando como indica el Ministerio de Energía y Minas la tarifa estándar en el país de 0,092 USD/kWh con una producción de 1.5MW, el municipio tendría por venta de energía aproximadamente 1.2 millones de dólares al año, con 2MW alcanzaría aproximadamente 1.7 millones de dólares al año. Esto significaría un rubro importante para el municipio de Machala. Pero más allá del beneficio directo al presupuesto de la municipalidad se



debe considerar también las nuevas plazas de trabajo que estas instalaciones proporcionarán, tomando en cuenta que la gestión de residuos es un problema permanente, este enfoque se presta para la expansión hacia el futuro asegurando fuentes de empleo en sectores mucho más sostenibles.

### *Sociales*

En cuanto al impacto social, tenemos que debido a este nuevo complejo se podría asegurar la provisión de un servicio tan esencial como es el servicio eléctrico sin preocupación de eventos externos. Tomando como indica la Agencia de Regulación y Control de Electricidad en el 2024 el consumo promedio de un hogar urbano es de 150kWh al mes, el complejo tendría el potencial para alimentar aproximadamente a 300 hogares con 1.5MW y a 400 hogares con 2MW, lo que sería entre 1200 y 1400 personas a las cuales se les podría garantizar el suministro energético independientemente de las otras fuentes de generación del país.

### *Ambientales*

Por último, pero no menos importante tenemos el beneficio ambiental de este enfoque. Si se busca establecer mecanismos más sostenibles para el desarrollo de la ciudad el impacto ambiental debe estar como una de las prioridades. Este proyecto presenta un doble aporte ambiental de la ciudad, por un lado, presenta un medio alternativo que sustituye en parte la presencia de combustibles fósiles en el proceso de generación de energía. Pero, además están las emisiones de metano que se evitan al establecer este proceso de generación de energía. Aunque el proceso no es enteramente limpio debido a que al quemar el biogás dentro de los motores reciprocantes de combustión interna se genera como subproducto el dióxido de carbono o CO<sub>2</sub>, pero este gas es mucho menos nocivo para el ambiente que el metano, exactamente 21 veces menos lo que implica un importante avance en cuanto a la lucha contra la crisis climática y un gran aporte a mejorar el ambiente de la ciudad.

### **Conclusiones**

Con todo lo ya expuesto en este trabajo se llega a la conclusión de que efectivamente existe un gran potencial de desarrollo aún por explotar dentro de la gestión de RSU en la ciudad de Machala, principalmente en cuanto a la generación de energía dentro del relleno sanitario Ceibales y que el mismo debe ser explotado lo más pronto posible para generar antes del pico de producción del año 2026 y obtener el mayor beneficio posible del biogás contenido.



Este proyecto es de gran importancia para la ciudad y la sociedad machaleña ya que ofrece un abanico de oportunidades de desarrollo en muchas áreas de la sociedad. Por un lado, trayendo nuevos rubros para la municipalidad en cuanto a la venta de energía lo que significa más recursos para el mejoramiento de la ciudad, además de impulsar el desarrollo de la población al asegurar un servicio vital para la subsistencia y la producción. A todo esto, se suma el aporte al cuidado del ambiente al reducir las emisiones de gas metano que terminan en la atmósfera y diversificando la matriz de producción energética de los combustibles fósiles.

Es importante considerar que este trabajo también permite que la sociedad machaleña vislumbre nuevos modelos de desarrollo para su ciudad logrando así ampliar el debate sobre la eficiencia de los procesos productivos que se llevan a cabo dentro de la misma y el valor escondido que se encuentra dentro de ellos, lo cual significa un paso muy importante en la conversación de la transición hacia economías más sostenibles para las diferentes ciudades del país.

### Referencias bibliográficas

- Asamblea Nacional de la República de Ecuador. (2008, 20 de octubre). *Constitución de la República del Ecuador*. Registro Oficial 449 [https://www.defensa.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/02/Constitucion-de-la-Republica-del-Ecuador\\_act\\_ene-2021.pdf](https://www.defensa.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/02/Constitucion-de-la-Republica-del-Ecuador_act_ene-2021.pdf)
- Asamblea Nacional de la República de Ecuador. (2017, 12 de abril). *Código Orgánico del Ambiente*. Registro Oficial Suplemento 983. [https://www.emaseo.gob.ec/documentos/lotaip\\_2022/a/base\\_legal/11\\_CODIGO\\_DE\\_AMBIENTE.pdf](https://www.emaseo.gob.ec/documentos/lotaip_2022/a/base_legal/11_CODIGO_DE_AMBIENTE.pdf)
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2010, 19 de octubre). *Código Orgánico de Organización Territorial Autonomía Descentralización (Cootad)*. Registro Oficial Suplemento 303. [https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2021-01/Documento\\_Codigo-Org%C3%A1nico-Organizaci%C3%B3n-Territorial-Autonomia-Descentralizaci%C3%B3n.pdf](https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2021-01/Documento_Codigo-Org%C3%A1nico-Organizaci%C3%B3n-Territorial-Autonomia-Descentralizaci%C3%B3n.pdf)
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2017). *Gestión sostenible de plásticos: análisis regulatorio y técnico en el marco de la iniciativa de economía circular en la Alianza del Pacífico y Ecuador*. <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Gestion->



[sostenible-de-plasticos-analisis-regulatorio-y-tecnico-en-el-marco-de-la-iniciativa-de-economia-circular-en-la-Alianza-del-Pacifico-y-Ecuador.pdf](#)

- Barragán, A., Olmedo, J. M., Curillo, J. D., & Zalamea, E. F. (2020). Assessment Of Power Generation Using Biogas From Landfills In An Equatorial Tropical Context. *Sustainability*, 12(7), 2669. <https://doi.org/10.3390/Su12072669>
- Barrios, S. J. (2008). *Manejo adecuado de los gases que se generan en los rellenos sanitarios* [Tesis de pregrado, Universidad de Sucre]. <https://repositorio.unisucre.edu.co/entities/publication/31470bd9-a37b-46a5-b470-ebd5bff26cfa>
- Blanco, G., Santalla, E., Córdoba, V., & Levy, A. (2017). *Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: Un análisis teórico-práctico* (Nota Técnica N° IDB-TN-1260). Banco Interamericano de Desarrollo. <https://publications.iadb.org/es/publications/spanish/viewer/generaci%3%b3n-de-electricidad-a-partir-de-biog%3%a1s-capturado-de-residuos-s%3%b3lidos-urbanos-un-an%3%a1lisis-te%3%b3rico-pr%3%a1ctico.pdf>
- Caballero, D. E., de la Garza, F. R., Andrade, E. D. C., & Briones, F. (2011). Los rellenos sanitarios: una alternativa para la disposición final de los residuos sólidos urbanos. *CienciaUAT*, 6(2), 14-17. <http://riuat.uat.edu.mx/handle/123456789/1897>
- Chávez, C. R. (2022). *Diagnóstico ambiental del sistema operacional en el relleno sanitario Ceibales del cantón Machala y establecimiento de medidas preventivas y correctoras* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Machala]. <https://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/18821>
- Empresa Pública Municipal de Aseo de Machala. (2023). *Informe Rendición de Cuentas 2023*. <https://emamep.gob.ec/wp-content/uploads/2025/01/4.-Informe-Rendicion-de-Cuentas-2023-signed.pdf>
- Environmental Protection Agency. (2020). *Mejores prácticas para la gestión de residuos sólidos: Una guía para los responsables de la toma de decisiones en los países en vías de desarrollo* (EPA 530-R-20-002-S). [https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-02/documents/swm\\_guide-spanish-reducedfilesize\\_pubnumber\\_october.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-02/documents/swm_guide-spanish-reducedfilesize_pubnumber_october.pdf)



- Escamilla, P. E. (2019). Efficiency And Reliability Of Theoretical Models Of Biogas For Landfills. *La Granja: Revista De Ciencias De La Vida*, 29(1), 32-44.  
<https://doi.org/10.17163/lgr.n29.2019.03>
- Espinoza, E. E. (2023). La Enseñanza De Las Ciencias Sociales Mediante El Método Deductivo. *Revista Mexicana de Investigación e Intervención Educativa*, 2(2), 34-41.  
<https://doi.org/10.62697/rmie.v2i2.50>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2023). *Boletín técnico: Gestión de residuos sólidos 2022. Quito, Ecuador*. [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas\\_Ambientales/Municipios\\_2022/Residuos\\_Solidos/Boletin\\_Tecnico\\_Residuos\\_2022%20VF.pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2022/Residuos_Solidos/Boletin_Tecnico_Residuos_2022%20VF.pdf)
- Junqueira, H. S., Medeiros, D. L., & Cohim, E. (2022). Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos de Feira de Santana: demanda energética e pegada de carbono. *Engenharia Sanitaria E Ambiental*, 27(1), 125–139. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200358>
- Lenkiewicz, Z. (2024). Global Waste Management Outlook 2024: Beyond An Age Of Waste – Turning Rubbish Into A Resource. United Nations Environment Programme.  
<https://doi.org/10.59117/20.500.11822/44939>
- Marcet, X., Marcet, M., & Vergés, F. (2018). Qué es la economía circular y por qué es importante para el territorio (Papel del Pacto Industrial, No. 4). Asociación Pacto Industrial de la Región Metropolitana de Barcelona. <https://www.pacteindustrial.org/wp-content/uploads/2018/02/Papel-del-Pacto-Industrial-4-Que-es-la-economia-circular-y-por-que-es-importante-para-el-territorio.pdf>
- Organización Panamericana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (2002). *Sistemas integrados de tratamiento y uso de aguas residuales en América Latina: Realidad y potencial* (Informe OPS/CEPIS/PUB/02.85). Organización Panamericana de la Salud. [https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/55266/OPSCEPISPUB02.85\\_spa.pdf](https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/55266/OPSCEPISPUB02.85_spa.pdf)
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2024). Perspectiva Mundial de la Gestión de Residuos 2024. PNUMA. <https://www.unep.org/es/resources/perspectiva-mundial-de-la-gestion-de-residuos-2024>



Quevedo, G. G., & Rodríguez, M. (2022). Introducción de sistema de captura de biogás en el relleno sanitario de la ciudad de Portoviejo. *Ingeniería Energética*, 43(2), 90-98.

[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-59012022000200090&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012022000200090&lng=es&tlng=es).

Sociedad Americana de Ingenieros Civiles. (2025). *Acerca de ASCE*. <https://www.asce.org>

World Economic Forum. (2024). *Global Plastic Action Partnership: Circular industry solutions for a global plastics treaty*.

[https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Circular\\_Industry\\_Solutions\\_SP\\_2024.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_Circular_Industry_Solutions_SP_2024.pdf)

