



FACULTAD DE  
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

# Estudio de la viabilidad de la recuperación energética de residuos sólidos domiciliarios en Uruguay (una alternativa al relleno sanitario)

Agustina Behrens Lorenzi

Mateo Gualano Urrutia

Iael Radzyski Díaz

Proyecto de grado presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República en cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención del título de Ingeniero de Producción

Tutor:

Adrián Ferrari

Tribunal:

Gerardo Gazzano

Carlos Testuri

Alejandro Gutierrez

Montevideo, Uruguay

Marzo de 2026



# Agradecimientos

En primer lugar, queremos agradecerle a nuestro tutor Adrián Ferrari, por permitirnos participar de un proyecto el cual resultó ser sumamente interesante y por habernos apoyado y motivado durante la realización del mismo.

Asimismo, agradecemos a Mariana Robano, Carlos Roda, Pablo Fiterman, Federico Rodriguez, Ramiro Roselli, Fernando Schaich, Gonzalo Gutierrez y Federico Gutierrez, quienes, desde sus distintos ámbitos de conocimiento y experiencia profesional, aportaron valiosos puntos de vista que enriquecieron el desarrollo del proyecto.

Agradecemos también al Ministerio de Industria, Energía y Minería y al Ministerio de Ambiente por recibirnos, particularmente a Gerónimo Etchechury por su ayuda constante.

Una mención especial a Gerardo Gazzano por su apoyo y asesoramiento en la elaboración del estudio financiero.

Por último, y no menos importante, agradecemos a nuestros familiares y amigos por su apoyo y acompañamiento durante todo el desarrollo de este trabajo.

## Resumen

La gestión de residuos en Uruguay está caracterizada por una fuerte dependencia de la disposición final en rellenos sanitarios y vertederos. Esta estrategia considera a los residuos como desechos sin valor, resultando en un creciente volumen de material sin tratar que rápidamente agota la capacidad de las instalaciones y contribuye significativamente a la emisión de gas metano, un potente gas de efecto invernadero. Dentro de este panorama, los residuos sólidos domésticos, de naturaleza heterogénea, representan el principal desafío. Para ello, es indispensable que se tomen medidas hacia alternativas de gestión que no solo reduzcan la presión sobre los rellenos sanitarios, sino que también optimicen el aprovechamiento de los residuos y mitiguen el impacto ambiental. Bajo este marco, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar la viabilidad técnico-económica, ambiental y social de la instalación de una planta de incineración de residuos sólidos domiciliarios en Uruguay como alternativa al esquema actual basado en rellenos sanitarios.

La metodología se inició con una revisión bibliográfica del estado del arte a nivel internacional para comprender las mejores prácticas de valorización energética de residuos, para luego hacer foco en la gestión de los mismos en Uruguay, su matriz energética y las tendencias futuras. Posteriormente, el caso de estudio se contextualizó en un escenario futuro que asume el cumplimiento de los objetivos de valorización de los planes actuales, de modo de evaluar la incineración como una estrategia complementaria y no sustitutiva del reciclaje. A continuación, se construyó un modelo matemático, que permitió sustentar la toma de decisiones respecto a la ubicación y capacidad de las plantas y la asignación eficiente de los flujos de residuos, contemplando aspectos industriales, económicos y sociales. Para asegurar la robustez de los resultados, se ejecutó un análisis de sensibilidad del modelo. Finalmente, se complementó el estudio con un análisis financiero del proyecto que sustituye el esquema actual de rellenos sanitarios por la instalación y operación de una planta de incineración.

En conjunto, los resultados del estudio indican que la instalación de una planta de incineración de residuos sólidos domiciliarios en el departamento de Montevideo constituye la alternativa óptima. La comparación con el esquema actual basado en rellenos sanitarios muestra que ambas opciones presentan inversiones y costos comparables, e incluso que la incineración puede resultar más conveniente en el largo plazo, al tiempo que permite una reducción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero. No obstante, la viabilidad del proyecto se encuentra condicionada al cumplimiento de una serie de supuestos clave como lo son la obtención de financiamiento por parte de organismos de desarrollo, el compromiso de UTE en la compra de la energía eléctrica generada y la garantía de un flujo mínimo y constante de residuos. Asimismo, el éxito del proyecto requiere la participación activa del Estado mediante políticas que incentiven la valorización de los residuos frente a su disposición en rellenos sanitarios. En este marco, la incineración no debe interpretarse como un sustituto del reciclaje, sino como una herramienta complementaria y de transición hacia un sistema de gestión de residuos alineado con la jerarquía de valorización a nivel internacional.

**Palabras clave:** residuos sólidos domiciliarios; valorización energética; planta de incineración; gestión de residuos; análisis socio-ambiental; modelado y optimización; Uruguay.



# Índice de contenidos

Glosario.....	14
<b>Introducción.....</b>	<b>15</b>
<b>1. Marco teórico.....</b>	<b>17</b>
1.1. Proceso de incineración de residuos.....	17
1.1.1. Recepción de residuos.....	18
1.1.2. Tecnologías de combustión.....	19
1.1.3. Flujos de salida.....	25
1.2. Principales ventajas.....	33
1.3. Barreras y factores clave.....	34
<b>2. Estado del arte.....</b>	<b>37</b>
2.1. Unión Europea.....	37
2.1.1. Suecia.....	39
2.1.2. Dinamarca.....	40
2.1.3. Países del Báltico.....	41
2.2. Norteamérica.....	42
2.2.1. Estados Unidos.....	43
2.2.2. Canadá.....	43
2.3. Asia.....	44
2.3.1. Japón.....	44
2.3.2. China.....	45
2.4. Análisis regional.....	45
2.4.1. Brasil.....	45
2.4.2. Colombia.....	45
2.4.3. Argentina.....	46
2.5. Uruguay.....	46
2.5.1. Gestión de residuos.....	46
2.5.2. Matriz energética.....	49
<b>3. Caso de estudio.....</b>	<b>53</b>
3.1. Horizonte temporal.....	53
3.2. Alcance.....	53
3.3. Residuos a tratar.....	54
3.3.1. Generación proyectada.....	54
3.3.2. Composición de los RSD.....	55
3.4. Tecnología de incineración.....	59

<b>4. Modelo matemático.....</b>	<b>60</b>
4.1. Análisis multicriterio.....	60
4.1.1. Ponderación de factores.....	62
4.2. Formulación matemática.....	63
4.3. Relevamiento y generación de datos.....	67
4.3.1. Estimación inversión.....	67
4.3.2. Estimación costos operativos.....	68
4.3.3. Costos de transporte.....	69
4.3.4. Energía eléctrica generada.....	69
4.3.5. Precio de venta de energía.....	70
4.3.6. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).....	70
4.3.7. Créditos de carbono.....	72
4.3.8. Generación de residuos por departamento.....	72
4.3.9. Distancias entre departamentos.....	73
4.4. Resultados.....	73
4.5. Propuesta de Planta.....	76
<b>5. Análisis de sensibilidad.....</b>	<b>82</b>
5.1. Capacidad de plantas.....	82
5.2. Factores ponderadores.....	83
5.3. Eficiencia de los planes.....	86
5.4. Costos de transporte e instalación.....	88
5.5. Energía térmica.....	89
<b>6. Análisis financiero.....</b>	<b>92</b>
6.1. Metodología.....	92
6.1.1. Valor Actual Neto.....	92
6.1.2. Tasa Interna de Retorno.....	93
6.1.3. Período de recupero de la inversión descontado.....	93
6.2. Inversión.....	93
6.3. Egresos.....	95
6.3.1. Mano de obra.....	96
6.3.2. Mantenimiento y reparaciones.....	97
6.3.3. Transporte de residuos.....	97
6.3.4. Transporte y disposición de cenizas.....	98
6.3.6. Seguros.....	99
6.3.7. Reposición de activos tangibles.....	99
6.3.8. Insumos y reactivos.....	99

6.4. Ingresos.....	100
6.4.1. Energía eléctrica.....	100
6.4.2. Metales recuperados.....	100
6.4.3. Créditos de carbono.....	101
6.4.4. Tarifa de disposición.....	101
6.5. Depreciación y amortización.....	101
6.6. Financiamiento del proyecto.....	102
6.7. Relleno sanitario.....	102
6.7.1. Inversión.....	103
6.7.2. Costos operativos y mantenimiento.....	105
6.8. Comparación de alternativas.....	106
6.9. Flujo de fondos del proyecto.....	108
6.10. Evaluación del proyecto.....	111
6.11. Análisis de sensibilidad.....	112
6.11.1. Proyecto sin financiamiento.....	114
6.11.2. Proyecto con financiamiento.....	116
6.12. Externalidades.....	118
6.12.1. Externalidades positivas.....	118
6.12.2. Externalidades negativas.....	119
<b>7. Conclusiones.....</b>	<b>120</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>123</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>132</b>
Anexo I: Estándares de emisión para incineración de residuos.....	132
Anexo II: Construcción del factor industrial y social.....	133
Anexo III: Estudio de partes interesadas.....	136
Anexo IV: Cálculo de la tasa de inflación.....	138
Anexo V: Linealización de función de costos de inversión.....	139
Anexo VI: Costos operativos reportados de plantas de incineración.....	140
Anexo VII: Precios de Transporte reportados por el MTOP.....	141
Anexo VIII: Energía obtenida de los RSD.....	142
Anexo IX: Estimación de emisiones de GEI.....	143
Anexo X: RSD incinerados por departamento en el caso de estudio.....	149
Anexo XI: Distancias entre departamentos.....	150
Anexo XII: Asignaciones óptimas departamento – planta.....	151
Anexo XIII: Estimación de la capacidad de una línea.....	153
Anexo XIV: Estudio de escenario con venta de energía térmica.....	153

Anexo XV: Desarrollo de inversión.....	155
Anexo XVI: Egresos.....	158
Anexo XVII: Mano de obra.....	158
Anexo XVIII: Ingresos.....	160
Anexo XIX: Financiamiento.....	161
Anexo XX: Flujo de fondos.....	162

# Índice de Figuras

Figura 1.1: Diagrama del proceso típico dentro de la gestión de residuos mediante incineración. (Elaboración propia).....	18
Figura 1.2: Fosa de recepción de residuos (Demag cranes, s.f.).....	18
Figura 1.3: Combustible Derivado de Residuos (CDR) (Triveni Turbines, s.f.).....	19
Figura 1.4: Diagrama del proceso de combustión en parrilla móvil (Cyranka y Jurczyk, 2016).....	21
Figura 1.5: Ejemplos de parrilla móvil de combustión (Martech Boiler Energy Solutions).....	22
Figura 1.6: Diagrama de una planta WtE con horno de parrilla (Morrison Hershfield, 2023).....	23
Figura 1.7: Diagrama de un horno de lecho fluidizado (Morrison Hershfield, 2023).....	24
Figura 1.8: Diagrama de horno rotatorio (Morrison Hershfield, 2023).....	25
Figura 1.9: Turbina para generación de energía eléctrica (Triveni Turbines, s.f.).....	26
Figura 1.10 : Proceso de tratamiento de cenizas (Chen et al., 2023).....	29
Figura 1.11: Escorias de incineración (Steinert Sorting Solutions, s.f.).....	30
Figuras 1.12 y 1.13: Sistema de filtro de mangas (Baghouse Filter – Efficient, Reliable Baghouse Dust Collectors, s.f.) y mangas textiles utilizadas (Proceso Industrial, s.f.).....	31
Figura 1.14: Depurador o scrubber. (Scrubbers for Air Pollution Control: What Are They?, 2019).....	32
Figura 1.15: Método húmedo y seco, y precipitador electrostático. (Evans, 2022).....	32
Figura 1.16: Tratamiento de RSD en países Europeos entre 1990 y 2020 (Bartl, 2014).....	36
Figura 2.1: Jerarquización en la gestión de residuos establecida por la UE (Lombardi y Castaldi 2024).....	38
Figura 2.2: Evolución en la gestión de residuos en la UE (Eurostat, 2025).....	38
Figura 2.3: Tratamiento de los RSD en Suecia (Eurostat, 2025).....	40
Figura 2.4: Tratamiento de los RSD en Dinamarca (Eurostat, 2025).....	41
Figura 2.5: Tratamiento de los RSD en Estonia (izquierda) y Lituania (derecha). (Eurostat, 2025).....	42
Figura 2.6: Tratamiento de RSD en Estados Unidos (US Environmental Protection Agency, 2020).....	43
Figura 2.7: Composición de residuos domiciliarios (Ministerio de Ambiente, 2021).....	48
Figura 2.8: RS de Felipe Cardoso en Montevideo (Telenoche, 2022).....	49
Figura 2.9: Jerarquía de residuos establecida en la ley de Gestión Integral de Residuos (PNGR, 2021).....	49
Figura 2.10: Potencia instalada de la matriz eléctrica en Uruguay (Elaboración propia).....	50
Figura 2.11: Generación de energía eléctrica por fuente en Uruguay (Elaboración propia).....	51
Figura 3.1: Proyección de la generación de RSD anual en toneladas (Elaboración propia).....	54
Figura 3.2: RSD reciclados o compostados por país en 2023 (Report Linker, 2023).....	56
Figura 3.3: Destino de fracciones de los RSD (Elaboración propia).....	58
Figura 3.4: Composición de los RSD destinados a incineración (Elaboración propia).....	59
Figura 4.1 y 4.2: Factor industrial y social por departamento (Elaboración propia).....	62
Figura 4.3: Valores de balance de energía (MWh/tn RSD) de la planta modelada en 2050 (Elaboración	

propia).....	70
Figura 4.4: RSD generados y enviados a incineración por departamento en 2050 (Elaboración propia).....	73
Figura 4.5: Alternativa I (Elaboración propia).....	74
Figura 4.6: Alternativa II (Elaboración propia).....	75
Figura 4.8: Layout esquemático de la planta de incineración (Elaboración propia).....	77
Figura 4.9: Cuadro de referencias del Layout de la Figura 4.8 (Elaboración propia).....	78
Figuras 4.10 y 4.11: Sector de balanzas, andenes de recepción y bunker de residuos (Elaboración propia)....	79
Figuras 4.12 y 4.13: Sistema de combustión y tratamiento de gases y zona de almacenamiento y despacho de cenizas (Elaboración propia).....	79
Figura 4.14: Torre de control, oficinas y edificio anexo (Elaboración propia).....	80
Figura 4.15: Fotografía de Felipe Cardoso actualmente, donde se observa la acumulación de residuos. (La Diaria, 2021).....	81
Figura 4.16: Renderización de la instalación de la planta de incineración en el predio de Felipe Cardoso (Elaboración propia con Google Gemini).....	81
Figura 5.1: Resultado con restricción de capacidad máxima 500,000 ton/año (Elaboración propia).....	83
Figura 5.2: Composición RSD destinados a incineración, 100% eficiencia planes (Elaboración propia).....	87
Figura 5.3: Composición RSD destinados a incineración, 50% eficiencia planes (Elaboración propia).....	87
Figura 5.4: Mapa de calor del número de plantas en función del costo de transporte y la inversión inicial (Elaboración propia).....	88
Figura 5.5: Mayores consumidores de energía térmica (Elaboración propia).....	89
Figura 6.1: Egresos por concepto (Elaboración propia).....	96
Figura 6.2: Flujo de cenizas (Elaboración propia).....	98
Figura 6.3: Ingresos por concepto (Elaboración propia).....	100
Figura 6.4: Obras de infraestructura consideradas para un relleno sanitario (Roda et al, 2021).....	104
Figura 6.5: Costos unitarios de disposición final con una densidad en la celda de 1,0 ton/m <sup>3</sup> (Roda et al, 2021).....	105
Figura 6.6: Flujo neto acumulado de ambas alternativas (Elaboración propia).....	108
Figura 6.7: Flujo neto acumulado, escenario sin financiamiento (Elaboración propia).....	109
Figura 6.8: Flujo neto acumulado, escenario con financiamiento (Elaboración propia).....	110
Figura 6.9: VAN en función de la tasa de descuento (Elaboración propia).....	112
Figura III.1: Matriz interés-poder, situación actual (Elaboración propia).....	138
Figura III.2: Matriz interés-poder, situación deseada (Elaboración propia).....	138
Figura V.1: Ajuste lineal para el costo de instalación en función de la capacidad (Elaboración propia).....	139
Figura IX.1: Valores de MCF a utilizar según tipo de vertedero (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006).....	144
Figura XIII.1: Histograma de tn/día por línea en plantas de incineración de RSD (Elaboración propia)....	153
Figura XX.1 Flujo neto acumulado en el tiempo para la planta de incineración, en MUSD (Elaboración	

propia)..... 162

Figura XX.2 Flujo neto acumulado en el tiempo para rellenos sanitarios, en MUSD (Elaboración propia).163

# Índice de Tablas

Tabla 2.1: Estimación de generación de residuos según el PNGR.....	48
Tabla 2.2: Proyección de generación de energía eléctrica por fuente, en GWh (MIEM, 2024).....	52
Tabla 3.1: Porcentaje de valorización y volumen enviado a incineración por fracción.....	58
Tabla 4.1: Ponderación de las partes interesadas. Valores en %.....	64
Tabla 4.2: Estimación de las emisiones asociadas a cada alternativa, con la composición de RSD del caso de estudio. Referirse al Anexo IX para desarrollo del cálculo.....	72
Tabla 4.3: Alternativas de instalación de plantas de incineración.....	76
Tabla 5.1: Análisis de sensibilidad para el factor económico $\alpha = 0$ (valores en tn/año).....	85
Tabla 5.2: Análisis de sensibilidad para el factor social $\gamma = 0$ (valores en tn/año).....	86
Tabla 5.3: Análisis de sensibilidad para el factor industrial $\beta = 0$ (valores en la tabla en tn/año).....	87
Tabla 5.4: Comparación de resultados con y sin energía térmica (ET).....	92
Tabla 6.1: Inversión inicial por concepto.....	96
Tabla 6.2. Determinación de la mano de obra de la planta del caso de estudio.....	98
Tabla 6.3: Depreciación.....	103
Tabla 6.4: Inversión RS regionalizados, dividida en 5 alícuotas.....	106
Tabla 6.5: Costos de operación y mantenimiento por RS para 2050.....	107
Tabla 6.7: VAN resultante para el RS y planta de incineración.....	108
Tabla 6.8: Flujo de fondos sin financiamiento, valores anuales cada 5 años.....	109
Tabla 6.9: Flujo de fondos con financiamiento, valor anual cada 5 años.....	111
Tabla 6.10: VAN resultante para el caso con y sin financiamiento.....	112
Tabla 6.11: AS tasa de descuento.....	115
Tabla 6.12: AS inversión inicial y venta de energía eléctrica.....	115
Tabla 6.13: AS egresos totales y venta de energía eléctrica.....	116
Tabla 6.14: AS residuos procesados y venta de energía eléctrica.....	116
Tabla 6.15: AS tasa de descuento.....	117
Tabla 6.16: AS residuos procesados y costos de transporte.....	117
Tabla 6.17: AS tasa de descuento y tasa de inflación.....	118
Tabla 6.18: AS residuos procesados y venta de energía eléctrica.....	118
Tabla 6.19: AS créditos de carbono.....	119
Tabla I.1 Estándares de emisión para incineración de residuos.....	133
Tabla II.1: Resultados obtenidos para ambos factores en cada departamento (Elaboración propia).....	136
Tabla III.1: Matriz de interés- poder del proyecto de grado.....	137
Tabla III.1: Matriz de interés- poder del proyecto de grado (cont.).....	138
Tabla VI.I: Comparación de costos operativos para varias plantas, incluyendo la gestión de las cenizas.....	141

Tabla VII.1: Precios para Transporte de Carga General (28 tn).....	142
Tabla VIII.1: Energía obtenida por fracción de RSD a 2050.....	143
Tabla IX.1: Parámetros utilizados en el cálculo para ambos casos. (Elaboración propia).....	146
Tabla IX.2: DOC según fracción de RSD. (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006).....	146
Tabla IX.3 Resultados obtenidos para ambos casos, en CO <sub>2</sub> equivalente.....	147
Tabla IX.4: Parámetros para el cálculo, utilizando valores de defecto recomendados por el IPCC para cada fracción de RSD (Elaboración propia). Se desprecian las emisiones generadas por el carbono orgánico.....	148
Tabla IX.5: Resultados del cálculo de tn CO <sub>2</sub> evitadas por incinerar y no disponer cada tn RSD.....	148
Tabla IX.6: Resultados obtenidos para las combinaciones de sustitución de energía eléctrica y térmica.....	149
Tabla X.1: RSD generados y enviados a incineración por departamento (2050).....	150
Tabla XI.1: Distancias en km entre los departamentos.....	151
Tabla XI.1: Distancias en km entre los departamentos (cont).....	152
Tabla XII.1: Flujos de RSD tratados en la planta de Montevideo para la alternativa II.....	153
Tabla XII.2: Flujos de RSD tratados en la planta de Tacuarembó para la alternativa II.....	153
Tabla XV.2: Estimaciones de costos de inversión.....	157
Tabla XV.3: Relevamiento costos de inversión a nivel internacional.....	158
Tabla XVI.1: Egresos operativos de la planta, valor anual cada 5 años (2050-2080).....	159
Tabla XVII.1: Conceptos considerados para el pasaje de salario líquido a nominal.....	160
Tabla XVII.2: Salario por cargo.....	160
Tabla XVIII. Ingresos de la planta, valor anual cada 5 años (2050-2080).....	161
Tabla XIX: Cálculo del capital cancelado.....	162
Tabla XX.1 Flujo de fondos planta incineración en USD, valor anual cada 5 años (2050-2080).....	163
Tabla XX.2 Flujo de fondos rellenos sanitarios en USD, valor anual cada 5 años (2050-2080).....	164

# Glosario

ADME: Administración del Mercado Eléctrico  
AS: Análisis de sensibilidad  
BEN: Balance Energético Nacional  
CDR: Combustible Derivado de Residuos  
EIA: Energy Information Administration  
GEI: Gases de Efecto Invernadero  
INE: Instituto Nacional de Estadística  
MA: Ministerio de Ambiente  
MIEM: Ministerio de Industria, Energía y Minería  
MTOPEX: Ministerio de Transporte y Obras Públicas  
OPEX: Costo operativo  
PCI: Poder Calorífico Inferior  
PET: Polietileno Tereftalato  
PIB: Producto Interno Bruto  
PNGR: Plan Nacional de Gestión de Residuos  
RAEE: Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos  
REP: Responsabilidad Extendida del Productor  
RS: Rellenos Sanitarios  
RSD: Residuos Sólidos Domiciliarios  
WtE: Waste to Energy

# Introducción

En la actualidad, el crecimiento poblacional, la urbanización y la intensificación de los patrones de consumo ha generado un aumento sostenido en la generación de residuos. En este contexto, la gestión integral de los mismos se posiciona como una cuestión prioritaria a nivel mundial.

En Uruguay, la gestión de residuos se caracteriza por una fuerte dependencia de la disposición final en rellenos sanitarios. A pesar de los avances normativos, el enterramiento continúa siendo el destino principal de la mayoría de los residuos generados en el país. Este enfoque se posiciona en el último escalón en la jerarquía de la ley de Gestión Integral de Residuos, dado que los mismos se tratan como desechos sin valor una vez finalizada su vida útil (Ministerio de Ambiente, 2021)

Como consecuencia, los rellenos sanitarios reciben volúmenes crecientes de residuos que no son tratados ni valorizados, sino simplemente dispuestos de forma permanente, acercándose progresivamente a su capacidad límite y generando emisiones de metano con un alto potencial de calentamiento global (Roda et al. , 2021) Dentro de este escenario, los residuos sólidos domiciliarios (RSD) constituyen uno de los principales desafíos del sistema, dado que su composición altamente heterogénea dificulta su valorización (Robano y Gonzáles, 2021). Bajo estas condiciones, resulta necesario avanzar hacia alternativas de gestión que permitan reducir la presión sobre los rellenos sanitarios, mitigar los impactos ambientales asociados y aprovechar de forma más eficiente los residuos.

En este marco, el objetivo de este proyecto es efectuar una revisión a nivel mundial de la incineración de residuos para luego evaluar la viabilidad técnico-económica de la instalación de una planta de incineración de RSD en Uruguay, considerando aspectos tecnológicos, financieros, ambientales y sociales. El estudio busca aportar evidencia sólida para la toma de decisiones en torno a un cambio de esquema: pasar de un modelo centrado en disponer residuos en rellenos sanitarios a uno que los incorpore como recurso, promoviendo su valorización energética, la reducción de impactos ambientales y la introducción de tecnologías que fortalezcan la gestión de residuos en el país.

En primer lugar, se realizó una revisión bibliográfica del proceso de incineración de residuos y sus principales variantes, identificando las tecnologías involucradas, sus ventajas y desventajas, así como los principales prejuicios a nivel técnico, ambiental y social.

Una vez comprendido el proceso, se hizo una revisión del estado del arte mediante el estudio de casos de éxito a nivel internacional, identificando los factores impulsores y las condiciones que facilitaron la implementación de esta alternativa, con el objetivo de detectar puntos de semejanza con la realidad de nuestro país.

Posteriormente, se analizó la situación actual de la gestión de residuos y de la matriz energética en Uruguay. A su vez, se identificaron las tendencias y las principales necesidades a futuro, con el fin de establecer un diagnóstico claro del contexto en el cual se lleva a cabo el proyecto.

Habiendo establecido el punto de partida, se definieron el alcance y el horizonte temporal del caso de estudio, así como los parámetros relevantes para la construcción de un modelo de optimización que

determina la ubicación de la o las plantas y sus capacidades, además de la asignación del flujo de residuos, integrando las dimensiones financiera, social y ambiental a lo largo del ciclo de vida del proyecto.

Luego de obtenidos los resultados del modelo, estos se sometieron a un análisis de sensibilidad, permitiendo evaluar la consistencia de las conclusiones y la robustez del sistema frente a variaciones en los parámetros involucrados.

Por último, se llevó a cabo un análisis financiero del proyecto orientado a evaluar el reemplazo del esquema actual basado en rellenos sanitarios por la instalación y operación de una planta de incineración de RSD. Finalmente, se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar la rentabilidad del proyecto frente a cambios en los supuestos y condiciones del entorno.

El documento se estructura del siguiente modo: en primer lugar, la Sección 1 desarrolla el marco teórico. A continuación, la Sección 2 aborda el estado del arte, comenzando con una perspectiva global, luego un análisis regional y, finalmente, la revisión de la situación nacional. En la Sección 3 se introduce el caso de estudio propuesto. La Sección 4 presenta la formulación del modelo matemático junto con el relevamiento de datos de entrada. La Sección 5 detalla el análisis de sensibilidad del modelo. La Sección 6 expone el análisis financiero, donde se incluye el flujo de fondos del proyecto y las correspondientes evaluaciones de sensibilidad. Finalmente, la Sección 7 reúne las conclusiones y los principales aprendizajes.

# 1. Marco teórico

Esta sección establece los fundamentos teóricos y tecnológicos de la valorización energética de residuos, proporcionando la base conceptual necesaria para analizar su viabilidad como alternativa de gestión en Uruguay. Para la elaboración de esta sección, se utilizaron herramientas de inteligencia artificial como apoyo en la búsqueda y recopilación de fuentes bibliográficas relevantes, siendo la principal utilizada ChatGPT.

El capítulo inicia con la descripción del proceso general de incineración de residuos, detallando las diferentes tecnologías disponibles en el mercado global y las etapas clave que componen la operación de una planta WtE. A continuación, se definen los flujos de salida principales, identificando tanto la energía generada como los subproductos sólidos (principalmente cenizas), cuya gestión ambientalmente responsable es crucial. Posteriormente, se abordan las consideraciones del impacto ambiental asociadas a la tecnología WtE. Finalmente, el marco teórico se completa con la exposición de las ventajas inherentes al WtE como método de gestión de residuos y el análisis de las barreras técnicas, económicas y sociales que condicionan su implementación, sentando los fundamentos para la evaluación de factores clave que determinarán la aplicabilidad de esta alternativa en el contexto nacional uruguayo.

## 1.1. Proceso de incineración de residuos

La incineración de residuos sólidos domiciliarios (RSD) en plantas WtE constituye una tecnología consolidada que permite reducir la masa y el volumen de los residuos en un 80% y 90% respectivamente, generando a la vez energía eléctrica y térmica. Este proceso opera a temperaturas superiores a los 800 °C, siempre que se garantice la combustión completa, lo cual depende de tres parámetros clave: la temperatura, el tiempo de residencia y la agitación (Morrison Hershfield, 2023). A continuación en la Figura 1.1 se detalla un diagrama del proceso completo en una planta WtE, en el cual se pueden observar las etapas y procesos clave, a desarrollar en mayor profundidad en las próximas secciones.

En términos generales, una vez que los residuos llegan a la planta se clasifican y se separa el material no combustible, que se dirige hacia procesos de reciclaje o rellenos sanitarios. En la Figura 1.1 se detalla en línea punteada la clasificación y el pretratamiento dado que es un proceso opcional. La fracción que sigue el flujo principal se introduce en el horno, del cual se obtienen cenizas, generalmente destinadas a rellenos sanitarios, y gases a muy alta temperatura utilizados para calentar el agua de la caldera. En la caldera se genera vapor, el cual a través de una turbina genera energía eléctrica y que además se puede utilizar como fuente de calor. El flujo de gas continúa hacia la zona de tratamiento de gases, donde se separan las cenizas volantes que requieren un tratamiento específico, mientras que el gas purificado se dirige hacia las chimeneas.

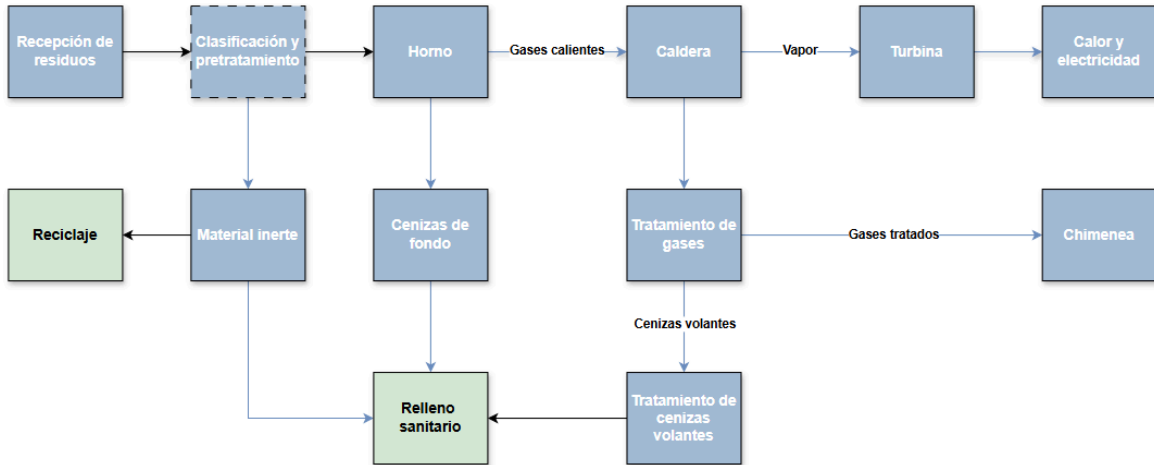


Figura 1.1: Diagrama del proceso típico dentro de la gestión de residuos mediante incineración. (Elaboración propia)

### 1.1.1. Recepción de residuos

Existen dos métodos principales para introducir los residuos en el proceso de incineración. El más común, conocido como “*mass burn*” (incineración en masa), consiste en alimentar el horno con los residuos tal como se recolectan, sin necesidad de tratamientos previos ni instalaciones adicionales. Los residuos se descargan en una plataforma de recepción, donde se realiza una inspección visual para retirar objetos voluminosos, no combustibles o metales, generalmente con la ayuda de un imán (CEMPRE, 1998). Posteriormente, el material es depositado en fosas de almacenamiento con capacidad para varios días de operación. Dentro de estas fosas, mediante el uso de grúas industriales con garras se mezclan y homogeneizan los residuos para optimizar el poder calorífico de la carga, se retiran objetos inadecuados finales, y se asegura una alimentación continua y uniforme hacia la tolva del horno (IEA Bioenergy, 2016). Este proceso se refleja en la Figura 1.2.



Figura 1.2: Fosa de recepción de residuos (Demag cranes, s.f.)

Alternativamente se puede producir combustible derivado de residuos (CDR), que corresponde a una fracción combustible de los residuos que ha sido procesada mecánicamente para obtener un material más homogéneo y con mejores propiedades como fuente de energía. La preparación del CDR suele incluir etapas de secado, reducción de tamaño de partícula y compactación, como se puede ver en la Figura 1.3. Esto mejora la eficiencia de combustión pero incrementa significativamente los costos de procesamiento (Morrison Hershfield, 2023). Además, este tipo de tecnología requiere una planta específica para la producción del CDR, lo cual representa una inversión adicional importante en comparación con las plantas de combustión en masa (Themelis y Diaz Barriga, 2012).



Figura 1.3: Combustible Derivado de Residuos (CDR) (Triveni Turbines, s.f.)

Por otro lado, el uso de CDR presenta desafíos operativos relevantes. El proceso de preparación, que incluye trituración, secado y separación magnética, entre otros, genera vapores y polvos inflamables, aumentando el riesgo de incendios o explosiones si no se cuenta con sistemas de control adecuados.

Si bien el CDR puede ser utilizado en otras industrias como la cementera, o en hornos preexistentes, deben considerarse las dificultades técnicas y económicas asociadas con su utilización. Las modificaciones requeridas en estos hornos suelen ser mucho más costosas que otros ajustes técnicos, como los cambios en los sistemas de alimentación, las cámaras de combustión o los sistemas de control de emisiones, debido a las intervenciones estructurales necesarias y las exigencias en términos de ingeniería (Morrison Hershfield, 2023).

### 1.1.2. Tecnologías de combustión

Existen distintas tecnologías de incineración aplicadas a los RSD, entre las que se destacan la combustión en masa mediante hornos de parrilla móviles, los sistemas de lecho fluidizado y, en menor medida, tecnologías como gasificación y pirólisis.

## Parrilla móvil

La tecnología de incineración más extendida a nivel mundial es la de hornos de parrilla móviles o escalonadas, también conocidas como mass burn. Este tipo de sistemas representa aproximadamente el 85% de las 190 millones de toneladas de residuos tratados mediante incineración cada año. Su implementación es especialmente relevante en Europa (más de 500 plantas), Estados Unidos (unas 76) y Asia (más de 400), consolidándose como la tecnología de referencia para la valorización energética de residuos sólidos urbanos (Lombardi y Castaldi, 2024).

Su principal ventaja es que no requiere un pretratamiento exhaustivo del residuo. Los hornos de parrilla están diseñados para admitir materiales heterogéneos, incluyendo partículas de gran tamaño, peso o alto contenido de humedad, sin comprometer la estabilidad ni la eficiencia del proceso. Además, son tecnologías escalables, que pueden estructurarse en módulos independientes y expandibles, con capacidades que varían entre 40,000 y 300,000 toneladas por año por módulo (Stantec, 2011), y que pueden alcanzar entre 100,000 y 1,000,000 de toneladas por año en plantas integradas. Esta modularidad también permite detener o reparar una línea sin interrumpir el resto del proceso operativo.

En la Figura 1.4 se presenta un diagrama del proceso ocurrido dentro del horno. El proceso térmico se desarrolla a lo largo de tres zonas principales sobre una parrilla que transporta progresivamente el residuo mientras se inyecta aire desde abajo y desde la parte superior.

- Zona de secado: el calor radiante y el aire caliente evaporan la humedad de los residuos. Esta etapa es fundamental en residuos con alta fracción orgánica o humedad superior al 30–40%.
- Zona de combustión: una vez seco, el residuo comienza a arder. El aire primario se suministra desde la base de la parrilla, representando entre el 30% y el 80% del aire total requerido, lo que favorece procesos de pirólisis y gasificación parcial, generando gases combustibles que ascienden hacia la zona superior.
- Zona de postcombustión o *burn-out*: en esta sección se inyecta aire secundario y terciario, completando la oxidación de los gases generados y del carbono residual, destruyendo compuestos orgánicos como CO, hidrocarburos y dioxinas.

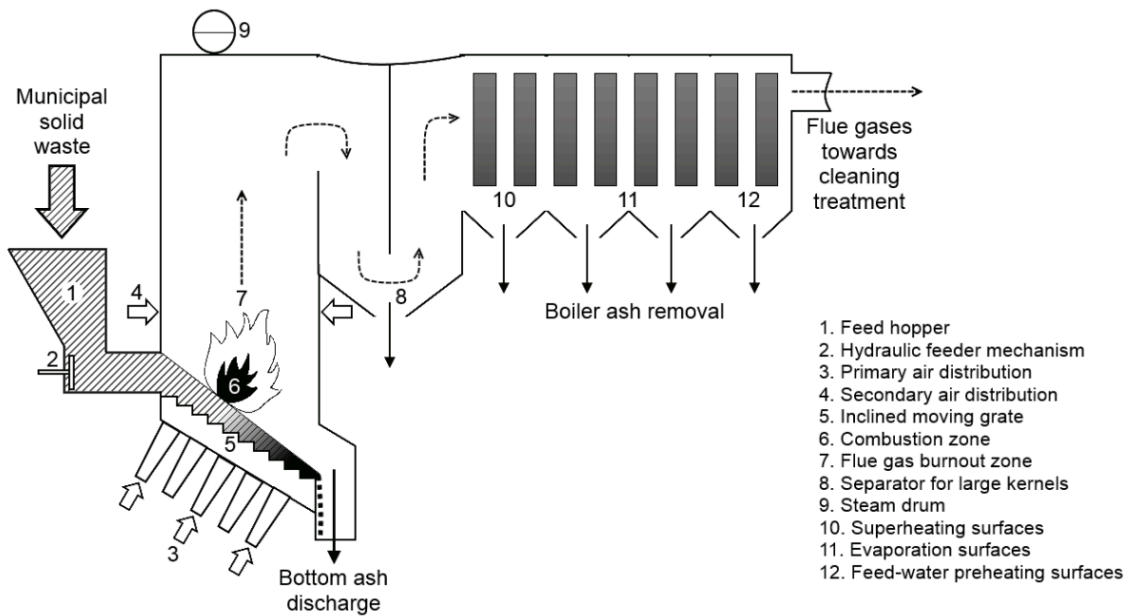


Figura 1.4: Diagrama del proceso de combustión en parrilla móvil (Cyranka y Jurczyk, 2016)

Durante el proceso de combustión, es imprescindible el control de tres parámetros clave:

- **Tiempo de residencia:** debe ser suficiente para asegurar la combustión completa de los residuos sólidos y finalización de reacciones de oxidación de los compuestos orgánicos. En general, oscila entre 4 y 6 horas, hasta que las cenizas inertes son descargadas (Morrison Hershfield, 2023).
- **Temperatura:** generalmente se encuentra entre 800 y 1450°C dentro de la zona de combustión (Morrison Hershfield, 2023).
- **Agitación:** el mecanismo de la parrilla debe garantizar un movimiento adecuado de los residuos sólidos a través de la zona de combustión, de modo que estos se expongan y se mezclen con el aire primario. Asimismo, los gases de combustión deben someterse a una alta turbulencia en las zonas de combustión y postcombustión para evitar zonas muertas o tiempos de residencia insuficientes en la caldera (Cyranka y Jurczyk, 2016) (Morrison Hershfield, 2023).

Existen diversas configuraciones de parrilla, siendo las más comunes las reciprocantes (de movimiento alternado por etapas) y las rotatorias o de rodillos (*roller grates*), que pueden ser tanto horizontales como inclinadas, como se presenta en la Figura 1.5. En ambos casos, la función principal es mover el residuo, asegurar su mezcla continua y garantizar una distribución homogénea del aire, condiciones indispensables para lograr una combustión completa y estable.



Figura 1.5: Ejemplos de parrilla móvil de combustión (Martech Boiler Energy Solutions).

El sistema tolera residuos con altos niveles de humedad (hasta 40%), aunque la eficiencia térmica mejora significativamente cuando los residuos son más secos. Se considera que el poder calorífico mínimo para una operación eficiente es de 7 GJ/tn, por lo que suele recomendarse desviar fracciones orgánicas excesivamente húmedas o con bajo poder energético.

Los hornos de parrilla modernos incorporan sistemas electrónicos de control de combustión, que regulan la temperatura, el flujo de aire y el movimiento de la parrilla para asegurar una oxidación completa y minimizar la generación de contaminantes. En la Figura 1.6 se observa un diagrama que expone las distintas etapas, sistemas requeridos y procesos que ocurren dentro de una planta con un horno de estas características.

En conjunto, la tecnología de parrilla combina robustez operativa, alta confiabilidad y flexibilidad frente a la variabilidad de los residuos domiciliarios. Estas características, junto con su madurez tecnológica y disponibilidad comercial, explican su posición dominante dentro de las soluciones de incineración y valorización energética a nivel global.

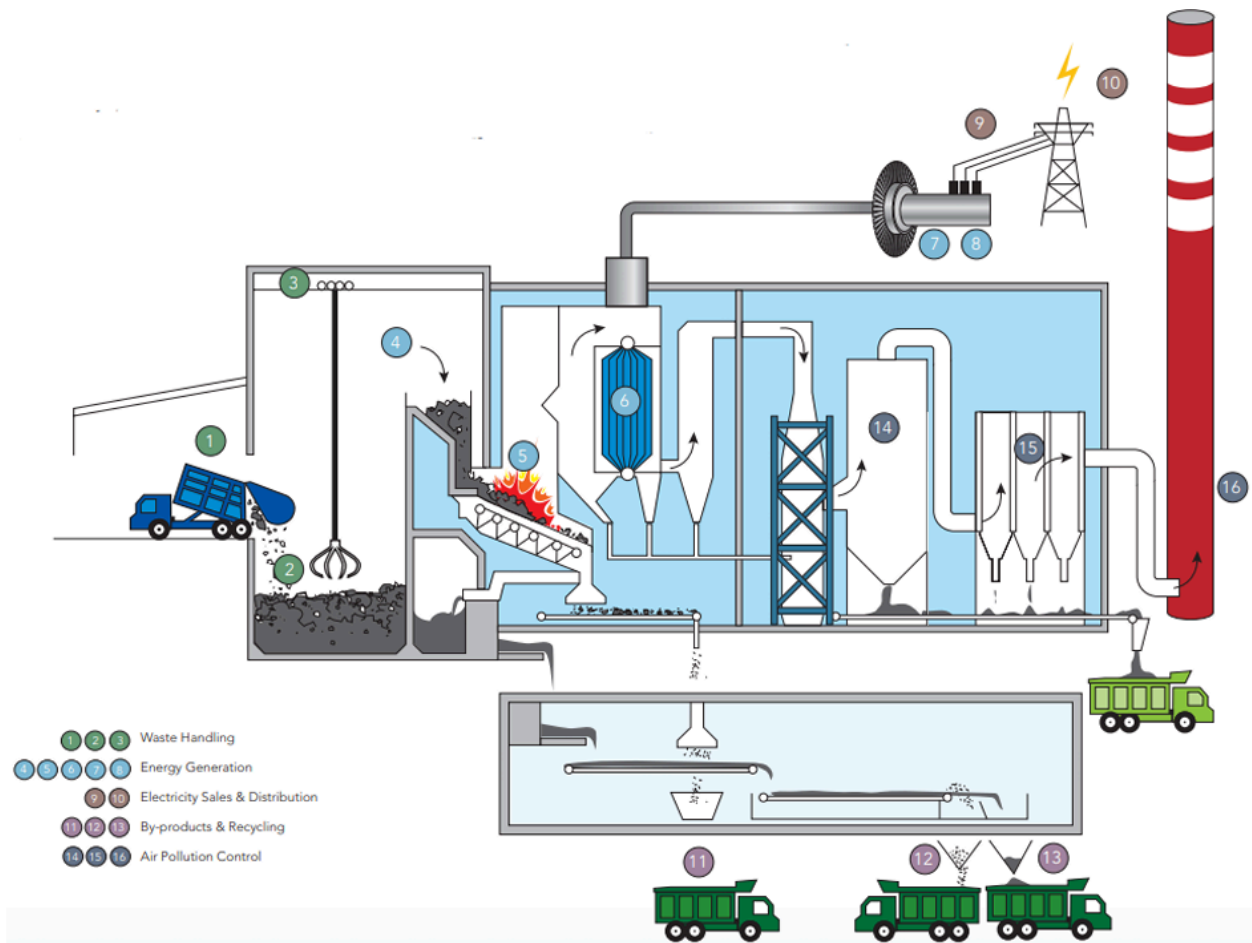


Figura 1.6: Diagrama de una planta WtE con horno de parrilla (Morrison Hershfield, 2023)

## Lecho fluidizado

Una tecnología menos frecuente para el tratamiento de RSD son los sistemas de lecho fluidizado, la cual presenta un funcionamiento distinto al de los hornos de parrilla. En general, estas plantas se utilizan para el tratamiento de mezclas homogéneas, como lodos o RSD previamente clasificados. Esta necesidad de preprocesamiento aumenta la complejidad del sistema, limita su flexibilidad operativa e incrementa los costos de inversión y operación. En Europa existen aproximadamente 450 plantas de valorización energética, de las cuales solo unas 30 emplean tecnología de lecho fluidizado (Stantec, 2011).

En este sistema, la cámara de combustión contiene una capa de arena en su base, a la cual se inyecta aire hasta que el material adquiere un comportamiento similar al de un fluido. Este diseño aprovecha la alta capacidad térmica de la arena (u otro material inerte), lo que permite secar y quemar rápidamente los residuos a medida que son introducidos en la cámara (Stantec, 2011).

Como se observa en la Figura 1.7, el residuo se alimenta a través de aberturas laterales en las paredes del reactor, y la velocidad de combustión es muy elevada. Sin embargo, esta característica también puede

incrementar el riesgo de combustión incompleta y de formación de gases no deseados, lo que exige un control riguroso de las condiciones de operación (Morrison Hershfield, 2023).

Los sistemas de lecho fluidizado suelen operar con capacidades de planta menores que las de parrilla, generalmente en el rango de 50,000 a 350,000 toneladas por año, y presentan una eficiencia eléctrica neta relativamente baja, del orden de 13,5% a 24,8%, aunque puede mejorar en función del poder calorífico del residuo alimentado (Morrison Hershfield, 2023).

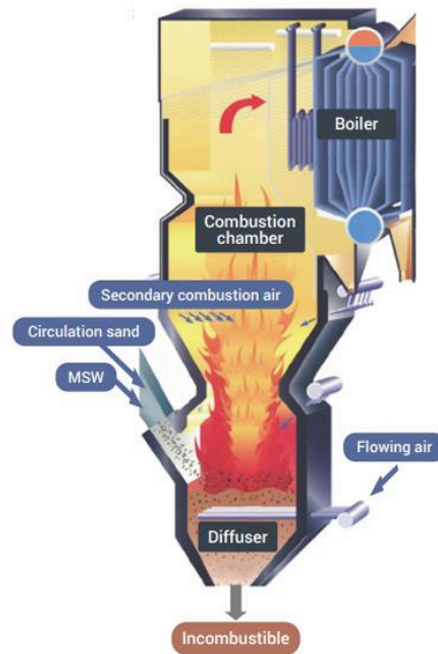


Figura 1.7: Diagrama de un horno de lecho fluidizado (Morrison Hershfield, 2023)

Si bien el lecho fluidizado y el uso de CDR representan opciones técnicamente viables para la valorización energética, su aplicación práctica se ve restringida por costos de inversión y operación más altos, capacidades de procesamiento limitadas, mayores riesgos técnicos y una menor flexibilidad en comparación con la combustión en masa mediante hornos de parrilla, que continúa siendo la tecnología más robusta y extendida a nivel industrial.

## Horno rotatorio

El horno rotatorio se considera una tecnología secundaria dentro de las opciones de incineración, bastante menos extendida que la incineración en parrilla. Como se nota en la [Figura 1.8](#), su diseño consiste en un cilindro rotatorio que permite la combustión en capas, pudiendo tratar tanto residuos sólidos como también residuos líquidos peligrosos gracias a la presencia de sistemas de postcombustión. Estos hornos operan a temperaturas entre 800 y 1650 °C, y suelen tener capacidades de procesamiento entre 900 y 180,000 toneladas por año.

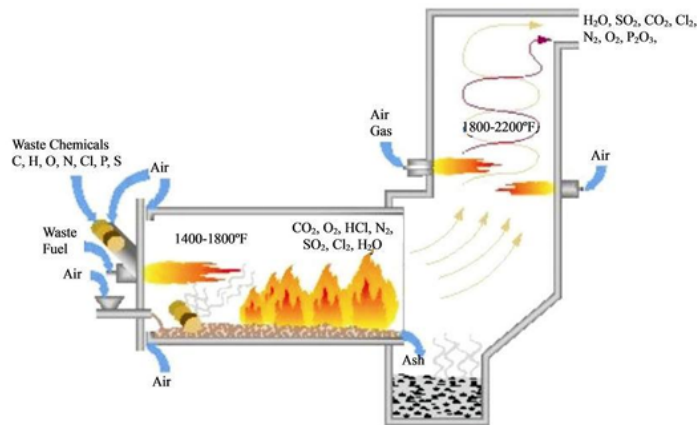


Figura 1.8: Diagrama de horno rotatorio (Morrison Hershfield, 2023)

Una tecnología similar es el horno oscilante, que comparte el principio de combustión en cámara cerrada y puede aceptar residuos urbanos con poca o ninguna clasificación previa, tolerando amplias variaciones en el poder calorífico y la composición del residuo. No obstante, estos hornos son menos tolerantes que la tecnología de parrilla frente a cambios en las condiciones del material de alimentación y, en la mayoría de los casos, se utilizan para el tratamiento de residuos peligrosos y lodos de depuradora, sin contar con un proceso de recuperación energética asociado.

Entre sus ventajas, el horno rotatorio no requiere clasificación, pretratamiento ni trituración del residuo, es capaz de adaptarse a variaciones en el poder calorífico del material, alcanza una eficiencia térmica cercana al 80% y se destaca por su versatilidad para incinerar residuos con alto grado de peligrosidad.

Sin embargo, presenta desventajas críticas para su consideración como alternativa principal en la valorización energética de residuos urbanos. En primer lugar, es la tecnología más intensiva en capital, con un costo de inversión y operación considerablemente más altos que otras alternativas como la parrilla o el lecho fluidizado. Además, su capacidad de tratamiento es limitada, por lo que resulta menos adecuada para operaciones de gran volumen y continuidad.

En resumen, si bien el horno rotatorio y sus variantes como el horno oscilante, son tecnologías robustas y adecuadas para el tratamiento de residuos especiales o peligrosos, no se consideran opciones prioritarias para la incineración masiva de residuos urbanos. Frente a ellas, la parrilla ofrece mayor madurez tecnológica, costos más competitivos y una capacidad de procesamiento superior.

### 1.1.3. Flujos de salida

Además de la reducción de volumen y masa de los residuos, la incineración da lugar a distintos flujos de salida que pueden ser aprovechados o requieren una gestión específica. Estos productos y subproductos abarcan tanto formas de energía como materiales sólidos resultantes del proceso, cuya cantidad, calidad y posibles

usos dependen de factores como el diseño de la planta, la tecnología empleada y las características de los residuos tratados.

## Energía eléctrica y térmica

En las plantas WtE, la recuperación de energía de los residuos se hace mediante la instalación de un sistema de caldera el cual transfiere el calor generado por la combustión de los gases al agua que circula por ductos que rodean el horno. En este proceso los gases de combustión son enfriados, lo cual es requerido para los procesos siguientes, y en simultáneo, el agua eleva su temperatura hasta convertirse en vapor sobrecalentado. Posteriormente tanto el vapor como el agua caliente pueden ser utilizados para calefaccionar, donde se aprovecha la energía térmica disponible en los fluidos, o se envían directamente hacia un sistema con una turbina de vapor (véase Figura 1.9) para generar energía eléctrica mediante el ciclo Rankine.



Figura 1.9: Turbina para generación de energía eléctrica (Triveni Turbines, s.f.)

El ciclo Rankine es un proceso termodinámico cerrado en el cual un fluido de trabajo, habitualmente agua, transforma la energía térmica en energía mecánica y, finalmente, eléctrica. El ciclo se compone de cuatro etapas principales. En primer lugar, el agua líquida es impulsada por una bomba hasta alcanzar la presión de la caldera. Luego, en la caldera, el fluido absorbe calor procedente de la combustión y se transforma en vapor sobrecalentado a alta presión. Este vapor se dirige a una turbina, donde se expande isoentrópicamente, generando trabajo mecánico en el eje. Finalmente, el vapor de baja presión pasa a un condensador, donde libera calor al medio de enfriamiento y retorna a estado líquido, completando así el ciclo. De esta forma, el ciclo Rankine permite convertir el calor liberado durante la combustión de los residuos en energía útil, aprovechando de manera eficiente el potencial energético del vapor generado en la planta (Kasaeian et al., 2022).

Por lo general el diseño de las calderas consiste en construir las paredes del horno con tubos por los cuales circula agua, lo cual facilita la transferencia de calor desde los gases de combustión hacia el agua. Las paredes

de la caldera están diseñadas con múltiples intercambiadores de calor ubicados antes o después de los tubos del evaporador, con el fin de maximizar la recuperación de calor. Entre estos se encuentran un sobrecalentador, que eleva la temperatura del vapor procedente de la caldera, y un economizador, que precalienta el agua de alimentación utilizando el calor residual de los gases de combustión. En las plantas WtE se utilizan configuraciones de calderas tanto horizontales como verticales.

En el caso que solo se recupere electricidad, la eficiencia del proceso por lo general se sitúa entre el 20% y el 30%. Si únicamente se aprovecha el calor, puede alcanzar valores de entre el 50% y el 90%. En cambio, mediante cogeneración (aprovechando simultáneamente la energía térmica y eléctrica) la eficiencia global del sistema mejora considerablemente, pudiendo llegar al 60%-90%. Por esta razón, integrar la planta con industrias o redes de calefacción cercanas podría ser clave para maximizar el aprovechamiento energético (Lombardi et al., 2015).

Se estima que las plantas pueden generar entre 600 y 700 kWh por tonelada de residuo y se prevé que con tecnologías cada vez más desarrolladas, las plantas del futuro puedan alcanzar mejores tasas de transformación. Sin embargo, esto depende fuertemente de la composición de la alimentación y del estado de las instalaciones. En general, entre el 5% y el 15% de la energía generada es utilizada por la propia planta .

La eficiencia energética puede mejorarse mediante varias estrategias. Como dicho anteriormente la cogeneración es una de ellas, pero también el precalentamiento del aire de combustión, la recirculación de gases a altas temperaturas, la mejora del pretratamiento, la utilización de recalentamiento en el ciclo de calderas y el diseño de las calderas pueden optimizar la transferencia de calor. También es fundamental ajustar la presión y la temperatura del vapor, aunque esto se ve limitado por la presencia de compuestos corrosivos en los gases que pueden generar distintas complicaciones (Morrison Hershfield, 2023).

## Cenizas

Durante el proceso de combustión, además de generar calor para transformar en energía eléctrica y térmica, se generan residuos sólidos, mayormente cenizas y fracciones que no se vieron afectadas durante la incineración.

Las cenizas representan entre el 5% y el 10% del volumen original y entre el 20% y el 25% de la masa del residuo alimentado. Las que permanecen sobre la parrilla luego de la combustión y que no se desplazan junto con los gases son denominadas cenizas de fondo o *bottom ash*. Representan aproximadamente el 20% de la masa del residuo original y están compuestas principalmente por minerales, metales ferrosos y no ferrosos, y materiales incombustos. Este residuo se descarga continuamente de la cámara de combustión para ser luego enfriado.

Estas cenizas presentan diversos potenciales de valorización material que permiten reducir la necesidad de disposición final. En países escandinavos se recicla prácticamente el 100% de las cenizas de fondo, mientras que en Francia e Italia las tasas de valorización superan el 85%, destinándose el resto a relleno sanitario (Neuwahl et al., 2019). Tras un tratamiento adecuado, estas cenizas pueden emplearse como agregado secundario en varias aplicaciones de la construcción (Huan et al., 2006). Asimismo, en el marco del coprocesamiento, las cementeras pueden utilizar distintas cenizas como materia prima alternativa, aprovechando su contenido mineral en calcio, sílice, alúmina y hierro para sustituir parcialmente las materias

primas vírgenes, por ejemplo, caliza, arcilla o mineral de hierro, en la fabricación de clinker (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), 2010). Sin embargo, la utilización de las cenizas está sujeto a criterios de aceptación y control de calidad estrictos, para garantizar que no comprometen las emisiones ni la calidad del cemento final.

Por otro lado, las cenizas volantes o *fly ash* corresponden a las partículas que se desplazan con los gases de combustión y son capturadas en los sistemas de tratamiento de gases. Estas representan alrededor de 5% de la masa del residuo incinerado y tienen una alta concentración de compuestos tóxicos y metales pesados. Por este motivo son consideradas residuos peligrosos por lo que luego de su tratamiento suelen disponerse en rellenos de seguridad (Federico Gutierrez Acosta (Cementos Artigas), comunicación personal, Julio 21, 2025).

En el caso de Uruguay, el único relleno autorizado para gestionar este tipo de residuos es el operado por la Cámara de Industrias del Uruguay (CIU). La disposición de cenizas volantes allí tiene asociado un costo alto de disposición final.

En todos los casos, se deben realizar controles ambientales periódicos para asegurar la inocuidad y estabilidad de las cenizas.

## Tratamiento de cenizas

Las cenizas generadas tras el proceso de incineración deben ser gestionadas adecuadamente para minimizar su impacto ambiental y posibilitar su aprovechamiento. A continuación se describen las principales etapas aplicadas al tratamiento de cenizas presentadas en la Figura 1.10:

1. Reducción del tamaño de partícula y extracción de metales: las cenizas de fondo se trituran para reducir su tamaño y liberar los materiales acumulados durante la incineración. Luego de ello, se separan y clasifican los distintos componentes con el objetivo de recuperar metales ferrosos (a través de separadores magnéticos) y no ferrosos (con separadores de corrientes de Foucault).
2. Estabilización: las cenizas se estabilizan mediante un proceso natural de exposición al aire libre durante 1 a 3 meses, en los que se forman pilas de hasta 10 metros de altura.

Durante este período, el material reacciona con el oxígeno, dióxido de carbono y agua del ambiente, produciendo disolución y precipitación de sales, oxidación e hidratación de metales. El objetivo principal es reducir la lixiviación de metales pesados.

El proceso provoca una disminución progresiva del pH, que pasa de valores muy alcalinos (12,2 - 12,6) a aproximadamente 8-8,5 luego de un año, lo que evita la redisolución de hidróxidos metálicos. Como resultado se reduce significativamente la liberación de metales como Pb, Zn, Ba y Mo.

3. Limpieza y clasificación: se realiza un lavado con agua para eliminar contaminantes finos adheridos a las partículas gruesas. Posteriormente las cenizas se clasifican mecánicamente mediante tamizado, separándolas según su tamaño de partícula. Al ajustar el tamaño de malla, se puede obtener una distribución del tamaño de las partículas similar a la de los agregados naturales, permitiendo su reutilización en materiales de construcción (Chen et al., 2023).

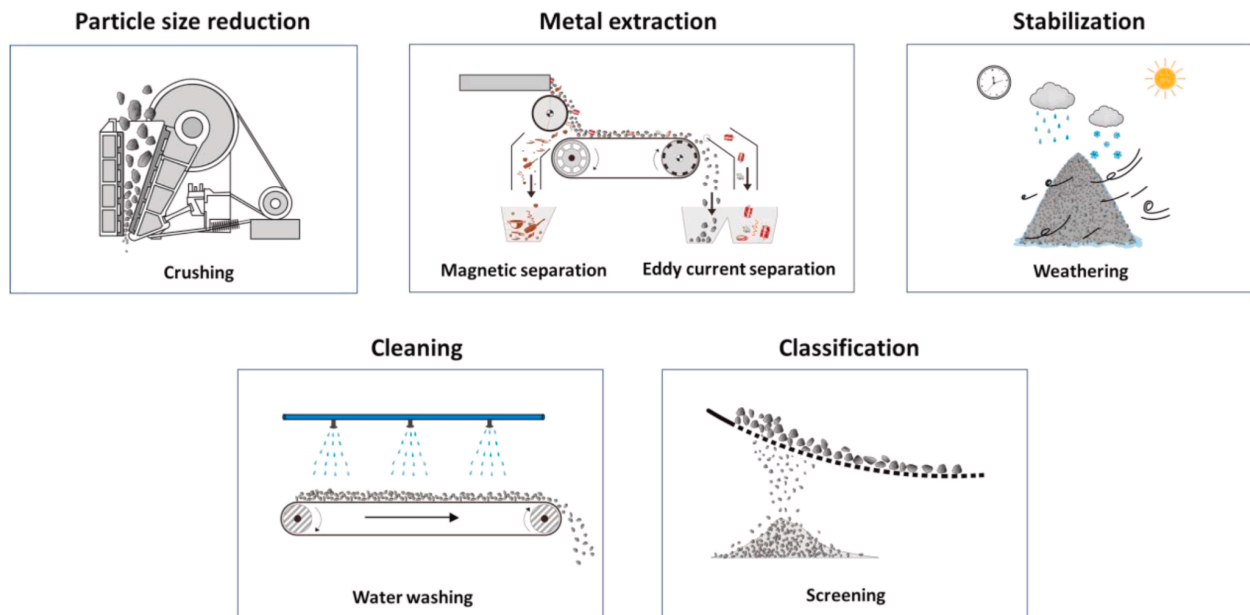


Figura 1.10 : Proceso de tratamiento de cenizas (Chen et al., 2023)

## Materiales recuperados

Durante el tratamiento de las cenizas de fondo resultantes de la incineración, se lleva a cabo la recuperación de materiales con valor económico, principalmente metales ferrosos y no ferrosos.

En promedio, las cenizas de fondo contienen alrededor de un 50% de metales ferrosos (principalmente hierro y acero) y un 8% de metales no ferrosos, como aluminio, cobre, zinc y plomo. Estos metales se separan mediante imanes y separadores de corrientes de Foucault como se detalló previamente, en el tratamiento de las cenizas. Dada las limitaciones en las plantas, no siempre se logra una recuperación eficiente, por lo que se estima que el 50% de los metales ferrosos que ingresan pueden ser recuperados de las cenizas de fondo (Themelis y Diaz Barriga, 2012).

El material remanente, una vez recuperados los metales ferrosos y no ferrosos, corresponde a una fracción mayormente mineral compuesta por óxidos y silicatos.

Los metales recuperados de la ceniza pueden ser reciclados, siguiendo los lineamientos de la economía circular. En la Figura 1.11 se observan metales ferrosos separados de las cenizas para su valorización.



Figura 1.11: Escorias de incineración (Steinert Sorting Solutions, s.f.)

## Emisiones contaminantes

Los principales componentes de los gases de combustión generados por la incineración de residuos están compuestos por cuatro sustancias no contaminantes, nitrógeno ( $N_2$ ), oxígeno ( $O_2$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y vapor de agua ( $H_2O$ ), que ocupan la mayor parte del volumen del gas de combustión.

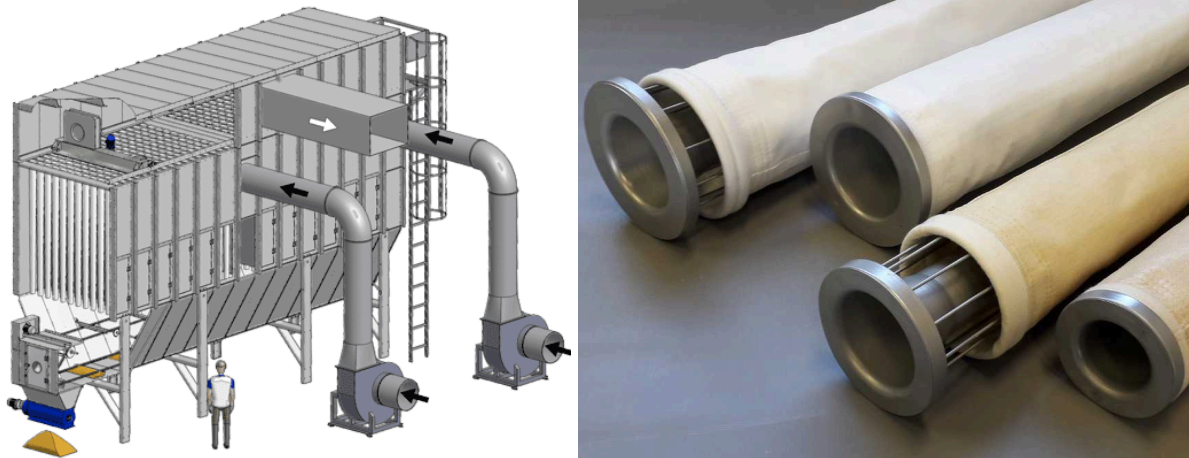
Sin embargo, dado que aún se encuentran pequeñas cantidades de contaminantes atmosféricos en el gas, los gases de combustión sólo pueden ser liberados a la atmósfera después de recibir el tratamiento adecuado. Luego de ello, las concentraciones de los parámetros aplicables deben cumplir con los límites en  $mg/Nm^3$  pautados por el reglamento de calidad del aire del Ministerio de Ambiente para la Incineración de Residuos (Decreto 135/021, Artículo 27), que se resumen en el [Anexo I](#).

## Partículas finas

La eliminación del polvo, cenizas volantes y material particulado constituye una de las principales etapas del tratamiento de los gases de combustión en una planta de incineración. Estas partículas, especialmente las  $PM_{10}$  y  $PM_{2,5}$ , presentan un alto potencial de daño ambiental y sanitario debido a su pequeño tamaño (que les permite permanecer en suspensión y ser inhaladas) y a su capacidad de adsorber sustancias tóxicas como metales pesados y compuestos orgánicos persistentes.

El método más utilizado para su tratamiento son los filtros de mangas de la Figura 1.12, un sistema económico y simple que utiliza mangas de tela como las de la Figura 1.13 para retener las partículas, alcanzando eficiencias de más de 90%. A su vez, las partículas sólidas también se pueden separar mediante precipitadores electrostáticos que usan campos eléctricos para captar las partículas o mediante ciclones, que aprovechan la fuerza centrífuga para su separación.

Por un lado, los precipitadores electrostáticos son el método más eficiente pero con costos más elevados. A su vez, los ciclones suelen tener eficiencias menores al 75% para partículas finas, por lo que su uso suele utilizarse como pretratamiento y combinarse con filtros de mangas (Romero Salvador, 2010).



Figuras 1.12 y 1.13: Sistema de filtro de mangas (Baghouse Filter – Efficient, Reliable Baghouse Dust Collectors, s.f.) y mangas textiles utilizadas (Proceso Industrial, s.f.)

## Gases ácidos

Los gases de combustión generados por la incineración de residuos sólidos urbanos pueden contener dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), cloruro de hidrógeno ( $\text{HCl}$ ), fluoruro de hidrógeno ( $\text{HF}$ ) y otros gases ácidos. Estos gases se eliminan mediante la reacción con un compuesto básico. Existen tres métodos principales, dependiendo en qué base se haga la reacción: método húmedo (el más extendido en plantas de incineración), seco y semi-seco (Romero Salvador, 2010).

En el método húmedo, estos gases se eliminan principalmente mediante lavado, un proceso en el que el gas de combustión se pone en contacto con un líquido absorbente, generalmente dentro de un depurador o *scrubber* como el que se esquematiza en la Figura 1.14. Allí, los contaminantes gaseosos se disuelven en la superficie del líquido y, posteriormente, reaccionan químicamente con un agente neutralizante (como hidróxido de calcio o de sodio), transformándose en sales estables que se eliminan junto con el líquido residual.



Figura 1.14: Depurador o *scrubber*. (Scrubbers for Air Pollution Control: What Are They?, 2019)

Por otra parte, como se esquematiza en la Figura 1.15, en el método seco se inyecta directamente el absorbente sólido (en general, bicarbonato de sodio o cal) en el flujo de gas previo a su pasaje por el filtro de gas, donde se retienen las sales formadas por la reacción con los gases ácidos.

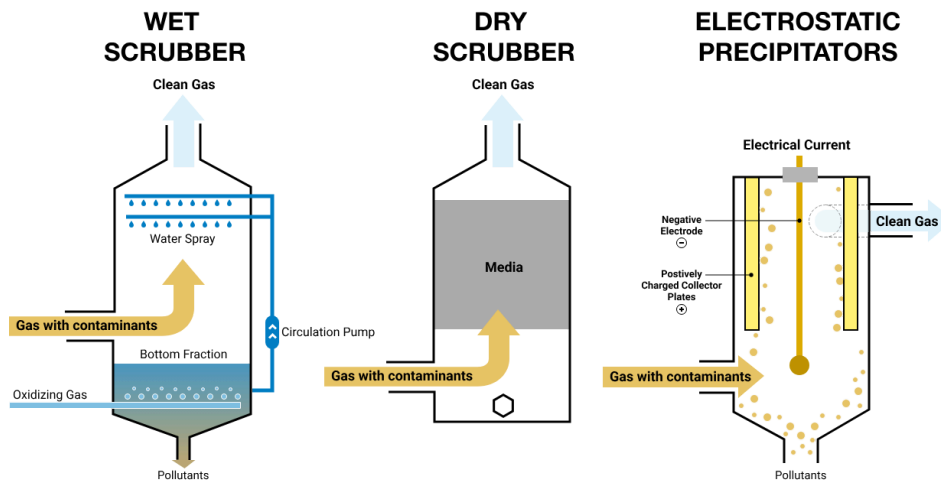


Figura 1.15: Método húmedo y seco, y precipitador electrostático. (Evans, 2022)

Por último, el método semi-seco implica rociar una solución líquida alcalina, que se evapora parcialmente al contacto con el gas caliente, permitiendo que las sales resultantes sean capturadas en el filtro de mangas y no como líquido afluyente.

Los depuradores húmedos suelen lograr mayores eficiencias de eliminación de gases ácidos que los depuradores secos; sin embargo, los secos son menos costosos, ocupan menos espacio, son menos propensos a la corrosión y tienen menores costos operativos. (David D. Randall et al., 2019).

Además, la generación de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) durante el proceso de incineración es inevitable. Para su eliminación en los gases de combustión se aplican principalmente dos métodos: la reducción selectiva no

catalítica (SNCR) y la reducción selectiva catalítica (SCR). En ambos casos se utiliza un agente reductor a base de nitrógeno, como amoníaco, que convierte los óxidos de nitrógeno en nitrógeno molecular ( $N_2$ ) y vapor de agua ( $H_2O$ ). La diferencia radica en que el método SCR logra una eficiencia de reducción de alrededor de 95% (YARA, s.f.), ya que la reacción se lleva a cabo en un reactor catalítico a temperaturas controladas, en lugar de realizarse directamente mediante la inyección del reductor en la corriente de gases.

## Metales pesados y dioxinas

Durante la incineración, los metales pesados presentes en los residuos, como el mercurio, plomo y cadmio, se capturan en los filtros de mangas. Estos compuestos se acumulan en la ceniza volante, donde se eliminan durante el proceso de estabilización (Ayorloo, M. et al., 2022).

En cuanto a las dioxinas, su formación se debe principalmente a la incineración de residuos plásticos clorados (como PVC o envases plastificados). En este sentido, la estrategia más eficiente para reducir sus emisiones, es la segregación de este tipo de residuos previo al proceso de combustión. Adicionalmente, durante la incineración se debe controlar que se mantengan altas temperaturas y tiempo de residencia de los residuos suficiente para garantizar combustión completa de los mismos (Ware et al., 2010).

La directiva 2000/76/EC de la Unión Europea establece que los gases deben alcanzar una temperatura mínima de 850 °C (o 1100 °C, dependiendo el contenido de cloro de la fracción a incinerar) durante al menos dos segundos para asegurar una combustión completa y reducir la formación de contaminantes orgánicos tóxicos, incluyendo dioxinas (European Union, 2011). Por último, también suele inyectarse carbón activado previo al filtro de mangas, cuya estructura porosa le permite que los contaminantes se adhieran a su superficie y sean más fácilmente retenidos.

## 1.2. Principales ventajas

La incineración de residuos sólidos urbanos, en el marco de las tecnologías WtE, representa una solución integral que combina eficiencia ambiental, energética y socioeconómica. Su implementación responde a un contexto global caracterizado por precios crecientes de la energía, presión sobre los recursos naturales, y la necesidad urgente de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Además, esta tecnología se ve impulsada por una serie de factores o *drivers* como los impuestos al vertido, las restricciones sobre materiales aceptados en vertederos, la disponibilidad limitada de espacio, y el creciente apoyo político y financiero a tecnologías de valorización energética y recuperación de recursos.

Desde el punto de vista ambiental, la incineración contribuye directamente a la mitigación del cambio climático al evitar las emisiones de metano asociadas a la descomposición de residuos orgánicos en vertederos (IPCC, 2007). El metano es un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global significativamente mayor que el dióxido de carbono, por lo que su reducción tiene un impacto positivo en la lucha contra el calentamiento global. Además, las plantas WtE operan bajo estrictos sistemas de control de emisiones, aplicando las mejores prácticas disponibles, lo que permite mantener los contaminantes atmosféricos dentro de los límites normativos y en muchos casos por debajo de estos (Traven, 2023). De seguir los lineamientos disponibles, las plantas modernas pueden operar de manera más limpia y eficiente que

los vertederos, eliminando de forma segura patógenos, compuestos orgánicos volátiles y otros residuos peligrosos (Neuwahl et al., 2019).

En términos energéticos, la valorización térmica de residuos ofrece una alternativa viable y constante a los combustibles fósiles. Las plantas WtE generan calor y electricidad a partir de residuos que, de otro modo, serían desechados, contribuyendo a diversificar la matriz energética y a reducir la huella de carbono. Este enfoque convierte los residuos en un recurso útil, ya sea mediante la generación directa de energía o a través de la producción de combustibles alternativos derivados de residuos. Estos combustibles pueden ser utilizados en industrias intensivas en energía, como las cementeras, donde pueden sustituir parcialmente a los combustibles fósiles, contribuyendo a reducir su huella de carbono (Gardner, 2023).

Las ventajas también se extienden al ámbito económico y social. La construcción y operación de plantas WtE genera empleo local de manera directa e indirecta, promoviendo el desarrollo industrial y tecnológico. (Elsayed, 2024). Además, estas instalaciones requieren una superficie de terreno significativamente menor a lo largo de su vida útil en comparación con los vertederos, lo cual es particularmente relevante en áreas urbanas densamente pobladas donde el suelo es escaso y costoso (Ouedraogo & Kumar, 2024).

El crecimiento del sector también se ve respaldado por múltiples mecanismos de apoyo político y financiero, incluyendo incentivos orientados a la descarbonización de usos finales de la energía (Ministerio de Industria, Energía y Minería, 2025), esquemas de fijación de precios al dióxido de carbono, y programas vinculados a la captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (Banco Interamericano de Desarrollo, 2022). Estos elementos no solo mejoran la viabilidad económica de las plantas, sino que también refuerzan su papel como herramienta clave en la transición hacia una economía baja en emisiones de dióxido de carbono.

### 1.3. Barreras y factores clave

A pesar de las múltiples ventajas ambientales, energéticas y socioeconómicas que ofrece la valorización energética de residuos, su desarrollo e implementación enfrenta una serie de barreras técnicas, económicas, sociales y políticas que limitan su adopción a gran escala. Estos desafíos deben ser abordados de forma integral si se busca incorporar al WtE como una herramienta clave dentro de los sistemas modernos de gestión de residuos.

Uno de los principales puntos críticos es la preocupación por las emisiones de contaminantes atmosféricos, especialmente sustancias tóxicas como dioxinas, furanos y metales pesados. Aunque las plantas modernas han incorporado tecnologías avanzadas de control y cumplen con regulaciones ambientales estrictas, el impacto histórico de plantas menos eficientes sigue alimentando la desconfianza pública. No obstante, la evidencia técnica demuestra que, con un diseño adecuado y controles rigurosos, la incineración controlada puede operar de forma segura y con emisiones por debajo de los límites establecidos (World Health Organization, 2014).

Otro obstáculo central son los elevados costos de inversión y operación asociados a este tipo de instalaciones. La construcción de una planta WtE requiere una inversión inicial significativa, a lo que se suman gastos operativos altos, particularmente en contextos donde los costos de vertido en rellenos sanitarios siguen siendo bajos. Esta diferencia económica podría representar una desventaja competitiva frente a la opción de

disposición final tradicional, especialmente en regiones con alta disponibilidad de tierra y baja presión regulatoria. Además, en comunidades dispersas o de baja densidad poblacional, costos de transporte y logística elevados, pueden desalentar la inversión.

A esto se suma la gestión de los residuos sólidos generados por la propia incineración. Aproximadamente entre el 20% y el 25% de la masa del residuo alimentado se transforma en cenizas, las cuales deben ser tratadas y dispuestas adecuadamente. Si bien una fracción de estas puede ser valorizada, el remanente, en particular las cenizas volantes, consideradas residuo peligroso, requiere disposición en rellenos autorizados, lo que implica costos adicionales de transporte y disposición, necesidades de infraestructura específica y requisitos regulatorios estrictos (CEMPRE, 1998).

Desde el punto de vista económico, la volatilidad en el valor de la energía generada y de los materiales recuperados introduce un riesgo adicional para los inversores, dificultando la obtención de financiamiento tanto público como privado, sobre todo cuando se trata de tecnologías no tan convencionales. A esto se suma la incertidumbre sobre los precios futuros de la energía, de los bonos de carbono y de los mercados de bioenergía, así como la falta de políticas energéticas y de cambio climático establecidas, lo que introduce desafíos para la planificación y evaluación de proyectos de largo plazo.

Un desafío operativo clave es la necesidad de contar con un flujo constante y predecible de residuos como insumo (*feedstock*) para que las plantas funcionen eficientemente (Energy Sustainability Directory, 2025). La dificultad para asegurar contratos de abastecimiento a largo plazo, sumada a la incertidumbre sobre las toneladas futuras de residuos disponibles, ha llevado incluso a la cancelación de proyectos y licitaciones. Esto se ve agravado en contextos donde las metas de reducción, reciclaje y compostaje son muy agresivas, ya que pueden reducir significativamente el volumen de residuos no valorizables que alimentarían una planta WtE. Por lo tanto, el diseño y dimensionamiento de las instalaciones debe considerar posibles reducciones futuras en la generación de residuos.

También existen barreras normativas y administrativas, como la complejidad en los procesos de permisos y autorizaciones, la falta de mecanismos eficientes de control de flujo de residuos, y la carencia de políticas públicas integradas que garanticen un suministro estable y planificado. A su vez, la falta de coordinación entre distintos niveles de gobierno, junto con marcos regulatorios que aún se están definiendo y consolidando, puede generar demoras en la implementación de proyectos, así como incertidumbre para los actores involucrados en la gestión y valorización de los residuos (Ministerio de Ambiente, 2021).

Desde el punto de vista social, la percepción pública negativa asociada a las plantas WtE podría ser un factor crítico. Las preocupaciones sobre la salud, el medio ambiente y el impacto en la calidad de vida de las comunidades cercanas generan resistencia a su instalación. A esto se suma el conflicto percibido con los programas de reciclaje, alimentado por la idea de que las plantas de valorización energética compiten con los esfuerzos de separación y recuperación de materiales. Sin embargo, la experiencia de países como Dinamarca, Suecia o los Países Bajos demuestra que es posible combinar altos niveles de reciclaje con un uso eficiente de tecnologías WtE dentro de un sistema integrado de gestión de residuos, lo que refuerza su carácter complementario. Esta idea puede apreciarse en la Figura 1.16, donde se observa que, históricamente, los países europeos que incrementaron la incineración con recuperación energética también registraron mayores tasas de reciclaje y, en paralelo, una disminución significativa del uso de rellenos sanitarios.

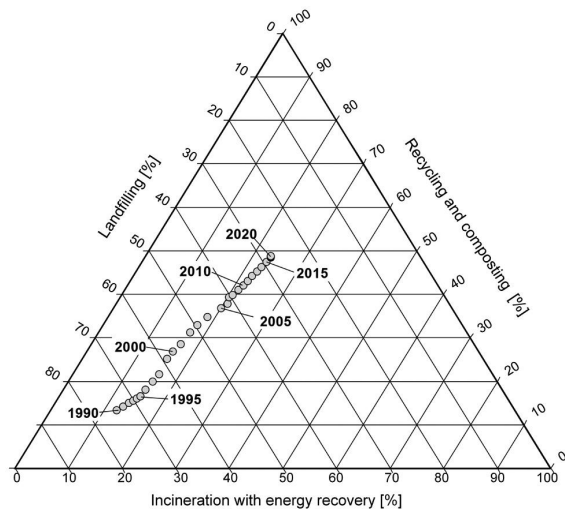


Figura 1.16: Tratamiento de RSD en países Europeos entre 1990 y 2020 (Bartl, 2014)

En conjunto, estas barreras evidencian que el desarrollo de proyectos de valorización energética no depende únicamente de la viabilidad técnica y económica, sino también de condiciones políticas, sociales e institucionales adecuadas. La implementación exitosa de estas tecnologías requiere gobernanza efectiva, estrategias integradas, legitimidad social y visión de largo plazo.

## 2. Estado del arte

El presente capítulo tiene como objetivo establecer el marco contextual y tecnológico sobre el cual se fundamenta esta investigación, analizando la situación actual de la gestión de RSD y la implementación de tecnologías WtE a nivel global, regional y local.

Para ello, se ha realizado un recorrido exhaustivo por las experiencias de diferentes bloques geográficos clave. En primer lugar, se examina el panorama en la Unión Europea, Norteamérica y Asia, identificando la composición de sus residuos, las tendencias actuales de gestión y los resultados operativos de sus plantas de valorización energética. Se pone especial énfasis en identificar los *drivers* o impulsores principales que motivaron la adopción de estas tecnologías, así como las barreras técnicas y regulatorias que debieron superarse.

El análisis no solo contempla a los pioneros mundiales como Suecia, Dinamarca y Japón, sino que incorpora estratégicamente el estudio de casos en países con similitudes estructurales a Uruguay, tales como Canadá y los países bálticos, en términos de desarrollo económico, matriz energética y desafíos logísticos. Posteriormente, se aterriza en la realidad latinoamericana para comprender los antecedentes regionales, evaluar los intentos previos de implementación y analizar las causas de su estancamiento o fracaso.

Finalmente, el capítulo culmina con un diagnóstico profundo de la situación en Uruguay, evaluando el estado actual de la gestión de residuos, los objetivos nacionales a mediano y largo plazo, y la sinergia potencial entre las tendencias de la matriz energética nacional y la valorización de residuos.

### 2.1. Unión Europea

La gestión de RSD en Europa ha evolucionado como respuesta al crecimiento del consumo, tanto de bienes como de energía, y al consecuente aumento de la generación de residuos. Aunque los RSD representan solo entre un 7% y un 10% del total de residuos en la Unión Europea, poseen un alto valor energético (~10 MJ/kg), posicionando las tecnologías de WtE como alternativas estratégicas dentro de la economía circular.

Como se puede apreciar en la Figura 2.1, la Unión Europea ha establecido una jerarquía bien definida para la gestión de residuos. En la cima se encuentran la prevención y la reducción en la generación de residuos, consideradas las estrategias de mayor impacto y prioridad. Les siguen la reutilización y el reciclaje, que permiten tratar los residuos que no pudieron evitarse. Cuando estos no pueden ser desviados o la composición de la mezcla impide otros tipos de tratamiento, la valorización energética adquiere un rol clave para evitar que los residuos terminen en vertederos o rellenos sanitarios, considerados la opción menos deseable dentro de la jerarquía (Lombardi et al, 2024).

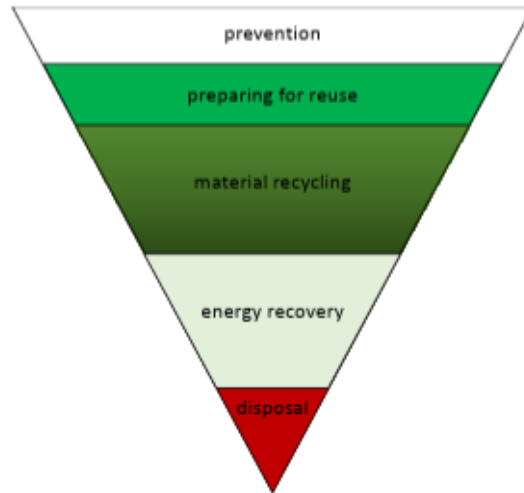


Figura 2.1: Jerarquización en la gestión de residuos establecida por la UE (Lombardi y Castaldi 2024)

En la Figura 2.2 se exponen los datos más recientes según Eurostat (2023) respecto a la gestión de residuos municipales en la Unión Europea. Se observa que la incineración representa una fracción significativa en la gestión de residuos de la Unión Europea, y ha ganado protagonismo con el paso del tiempo. En contraste, el uso de rellenos sanitarios ha disminuido de forma considerable y se tiene como objetivo para 2035 reducir su uso al 10% (Avfall Sverige, 2023), en línea con la jerarquía establecida por las políticas europeas. Asimismo, se registra un crecimiento sostenido en las tasas de reciclaje y en los métodos de tratamiento de residuos orgánicos, lo que refleja una transición hacia prácticas de gestión más sostenibles.

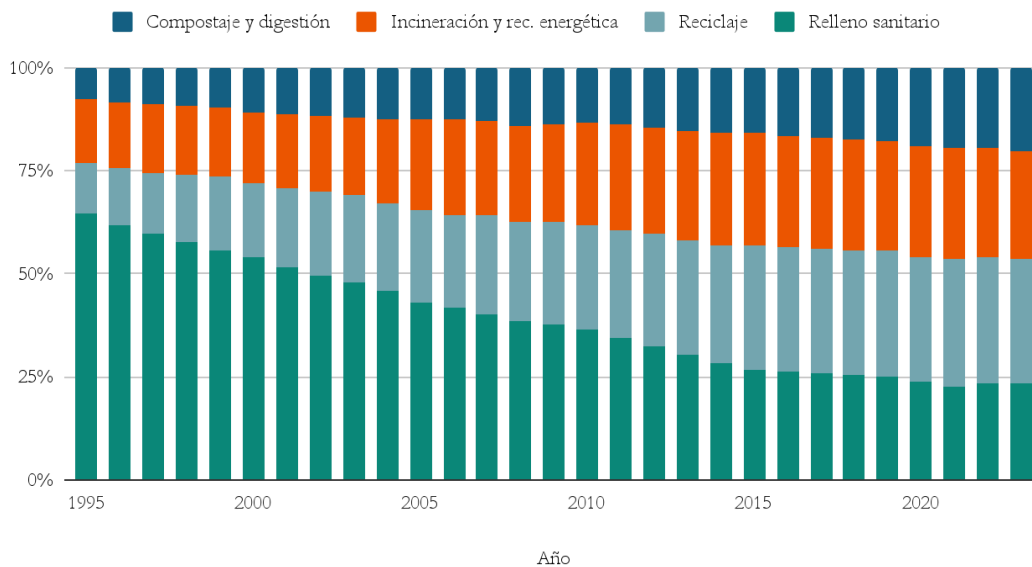


Figura 2.2: Evolución en la gestión de residuos en la UE (Eurostat, 2025)

### 2.1.1. Suecia

El primer incinerador en Suecia se instaló en Estocolmo en 1901 con el objetivo de reducir el volumen de residuos. Tras las crisis del petróleo de los años 70, el país redefinió su enfoque y comenzó a aprovechar los residuos no reciclables como fuente energética, integrando las plantas WtE a las redes de calefacción distrital.

Desde entonces, Suecia se ha consolidado como un referente en la integración de la incineración con recuperación energética dentro de una gestión de residuos sostenible. Actualmente cuenta con unas 34 plantas que generan 17 TWh anuales, de los cuales 15 TWh abastecen calefacción distrital a 1.2 millones de hogares y 2 TWh se destinan a electricidad, siendo el país europeo que más energía recupera de la incineración. Ante un déficit de suministro para sus 34 plantas WtE, las cuales requieren 5.5 millones de toneladas anuales frente a los 2.5 millones de residuos propios destinados a energía, Suecia importa 1.5 millones de toneladas de residuos combustibles de otros países europeos. Esta estrategia es necesaria para asegurar la continuidad y eficiencia del sistema de calefacción nacional, y además genera un beneficio económico, al Suecia cobrar a los países exportadores entre 40 y 100 euros por tonelada (Avfall Sverige, 2023).

Como se puede ver en la Figura 2.3, Suecia apostó por la WtE como alternativa a los RS. Se puede ver un crecimiento acelerado en los años 90' y un establecimiento de la tecnología en los años posteriores, llevando al RS a números despreciables. Por otro lado, se ve un interés por promover el reciclaje a principios de siglo, el cual posteriormente se debilitó.

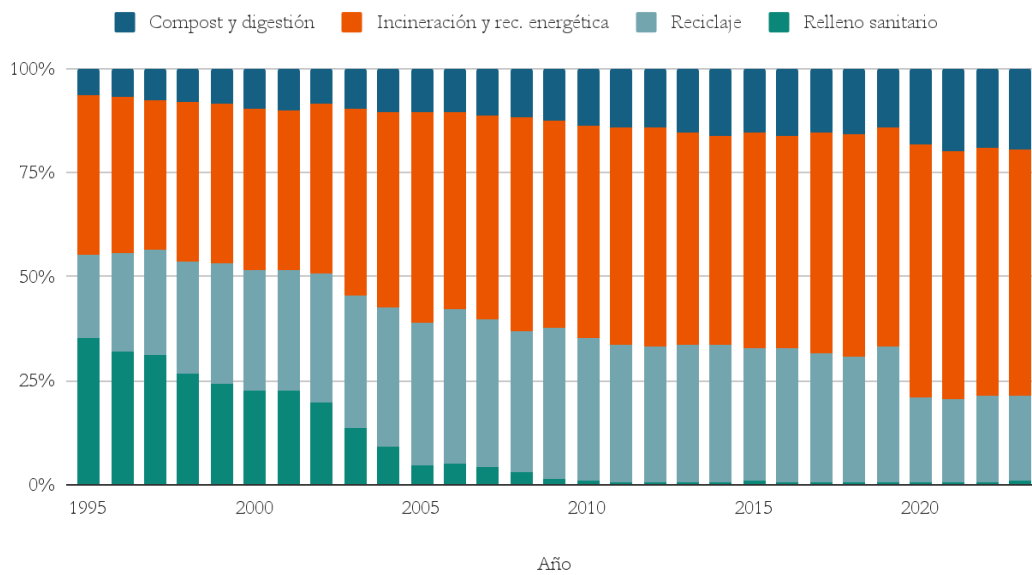


Figura 2.3: Tratamiento de los RSD en Suecia (Eurostat, 2025)

### 2.1.2. Dinamarca

La crisis del petróleo de 1973 afectó gravemente a Dinamarca, un país completamente dependiente de las importaciones de crudo para cubrir su demanda energética. Como respuesta estratégica, el país adoptó una política energética que permitió consolidar un sistema de redes de calefacción distrital a partir del calor generado por la combustión de residuos.

Actualmente, las plantas de incineración representan aproximadamente el 30% del sistema de calefacción urbana. A pesar de su compromiso con la sostenibilidad, Dinamarca presenta una de las tasas más altas de generación de residuos sólidos urbanos en la Unión Europea, con 845 kg per cápita en 2020. Según Eurostat (2025) del total de residuos generados, solo el 2% se destina a vertederos, el 27% se recicla y cerca del 50% de los residuos domésticos se incineran, como se puede ver en la Figura 2.4. Esto evidencia una alta dependencia del tratamiento térmico como método de gestión.

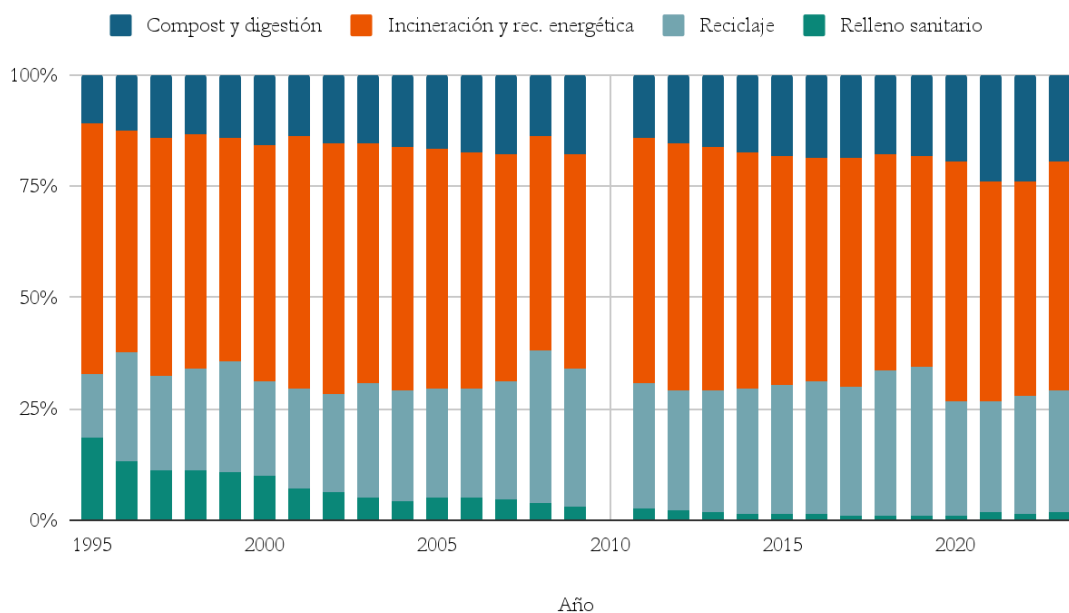


Figura 2.4: Tratamiento de los RSD en Dinamarca (Eurostat, 2025)

En los países nórdicos como Suecia, Finlandia y Dinamarca, que utilizan la incineración para alimentar la calefacción distrital, las plantas operan durante todo el año a pesar de la estacionalidad en la demanda de calor (International Energy Agency, 2025). Durante los meses de verano, el proceso se ajusta para inyectar menos calor a la red distrital, y producir más electricidad. En paralelo a la inyección de energía eléctrica, otra alternativa utilizada para gestionar la demanda estacional son las tecnologías de almacenamiento térmico, como tanques de agua caliente o grandes fosas subterráneas aisladas térmicamente con eficiencias de almacenamiento que oscilan entre 60 y 80% (Hirvonen, 2020). Un ejemplo es la fosa de almacenamiento ubicada en el área de Copenhague (proyecto conjunto de Høje Taastrup District Heating y VEKS) con una capacidad instalada de aproximadamente 70.000 m<sup>3</sup> de agua caliente, equivalente a unos 3.300 MWh de energía térmica almacenada (PlanEnergi, 2023). Asimismo, el calor generado puede destinarse a otros usos finales, como la provisión de agua caliente sanitaria o aplicaciones en procesos industriales como la producción de alimentos.

### 2.1.3. Países del Báltico

En los años 90<sup>º</sup> tanto Estonia, Lituania y Letonia contaban con un sistema de gestión de residuos muy poco desarrollado y dependían casi completamente de depositar sus residuos en vertederos no controlados. Con la reestructuración propuesta por la UE, debieron reconstruir sus sistema desde cero, acorde a la jerarquía propuesta.

Al inicio, la prioridad en los países bálticos se centró en el cierre de los antiguos vertederos y la construcción de nuevos rellenos sanitarios que cumplieran con los estándares establecidos por la Unión Europea, junto con el desarrollo de instalaciones de reciclaje y compostaje. En esta etapa, la opción de incineración fue descartada por considerarse económicamente inviable, incluso contando con apoyo financiero de la UE. Sin embargo,

con el tiempo, la incineración comenzó a debatirse con mayor intensidad como una alternativa potencial para acelerar el cumplimiento de los objetivos legales establecidos en materia de gestión de residuos.

En Estonia, la gestión de residuos experimentó un cambio significativo con la puesta en marcha, en 2013, de la planta de valorización energética *Iru Power Plant*, con una capacidad de 220,000 toneladas anuales de residuos sólidos urbanos. Esta instalación, junto con la construcción de varias plantas de tratamiento biológico, permitió reducir la disposición en vertederos del 14% en 2013 al 5% en 2015, y consolidó a la incineración como el método predominante, al pasar de representar un 16 % del tratamiento en 2012 a un 56% en 2014 (Malinauskaite et al., 2017). Esto se puede ver claramente en la Figura 2.5, donde se visualiza como en la década del 2010 se reduce drásticamente el envío de residuos a RS mediante la incorporación de la incineración como metodología clave, en simultáneo con un incremento en la proporción de residuos reciclados.

En Lituania, la valorización energética a través de la incineración ha ganado protagonismo con la expansión de plantas capaces de tratar hasta el 30 % de los residuos municipales. Si bien esta infraestructura busca reducir la elevada dependencia del vertido, existe preocupación por una posible sobrecapacidad que podría desincentivar el reciclaje, cuyo nivel se mantiene por debajo de los objetivos de la UE. A diferencia de Estonia, el país prohíbe la importación de residuos para incineración y ha complementado esta estrategia con la introducción de un impuesto al vertido en 2016, en un intento por impulsar prácticas de gestión más sostenibles. Como se ve en la Figura 2.5 la incorporación de la incineración junto a una potenciación del reciclaje y el compostaje, fueron clave para reducir la dependencia RS a un 8% en 2023.

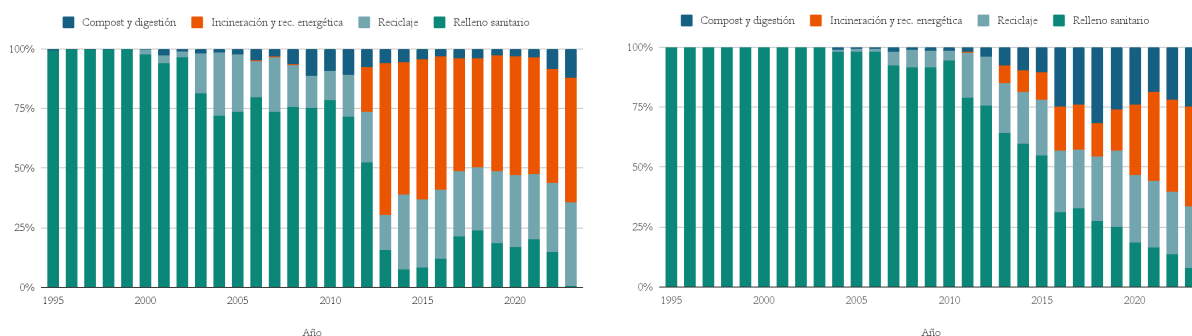


Figura 2.5: Tratamiento de los RSD en Estonia (izquierda) y Lituania (derecha). (Eurostat, 2025)

En Letonia, la gestión de residuos municipales no ha mostrado avances relevantes en los últimos años, manteniéndose rezagada en comparación con otros países de la región. Las limitaciones tecnológicas y la ausencia de iniciativas sólidas han frenado su modernización y el desarrollo de soluciones innovadoras (Malinauskaite et al., 2017).

## 2.2. Norteamérica

En las últimas décadas, la incineración de residuos con recuperación energética ha ganado relevancia en América del Norte como una alternativa complementaria a la disposición en rellenos sanitarios. Si bien su grado de adopción y el rol que cumple dentro de los sistemas de gestión varía entre países, la región presenta

experiencias consolidadas y marcos regulatorios específicos relevantes. A continuación, se presentan los casos de Estados Unidos y Canadá.

### 2.2.1. Estados Unidos

En EE. UU, hay alrededor de 75 plantas de recuperación energética mediante la combustión de residuos, de tamaño promedio relativamente pequeño (34 MW en promedio). Según la EIA (*U.S. Energy Information Administration*) la generación de energía eléctrica proveniente de las mismas representa menos del 1% de la generación del país, pero proporciona una fuente constante de energía (EIA, 2023).

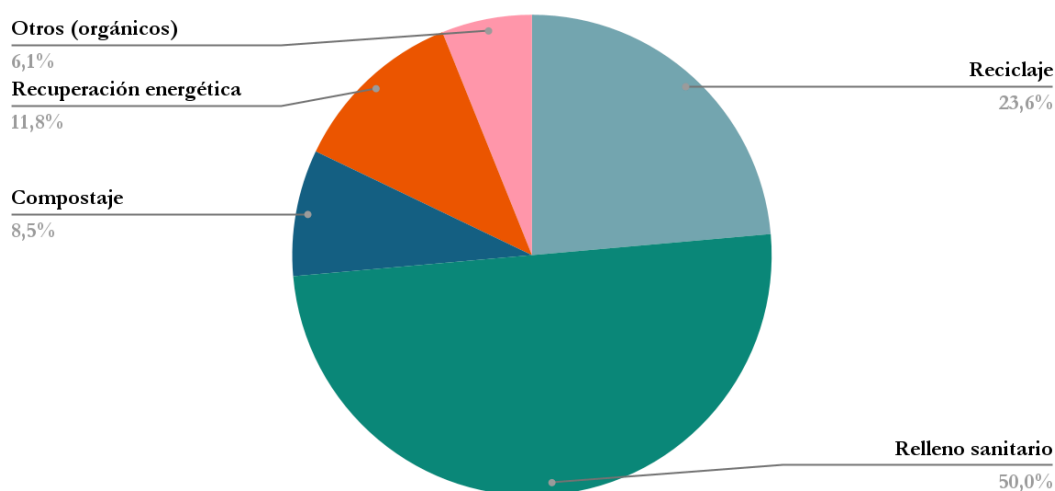


Figura 2.6: Tratamiento de RSD en Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency, 2020)

Los valores de la Figura 2.6, indican como el *landfill* es la alternativa de gestión de RSD predominante en Estados Unidos. La combustión de residuos sólidos municipales ocupa un papel limitado debido a varios factores. Según United States Environmental Protection Agency, a diferencia de regiones densamente pobladas y con escaso territorio, como Europa o Japón, la amplia disponibilidad de tierras en EE. UU. ha favorecido el uso de rellenos sanitarios, más económicos a corto plazo que las plantas de incineración. Además, el desarrollo de esta tecnología se ha visto limitado por la oposición pública, originada por el historial de altas emisiones previo a la regularización del tratamiento de gases y el rechazo de comunidades a convivir con el tráfico asociado al ingreso continuo de camiones recolectores de residuos y al transporte de subproductos de la incineración como las cenizas (United States Environmental Protection Agency, 2020).

### 2.2.2. Canadá

En Canadá, la disposición final de residuos se basa principalmente en los vertederos, aunque existe una creciente conciencia de sus impactos ambientales, especialmente por las emisiones de metano. En 2018, el país generó 35.6 millones de toneladas de residuos sólidos de las cuales el 72,5% no fue desviado y terminó en

disposición final. De esta fracción el 96% fue a vertederos mientras que el 4% fue enviado a plantas WtE. Esto convierte a este sector en una fuente relevante de gases de efecto invernadero: en 2020, los residuos representaron 27 Mt de CO<sub>2</sub> eq, siendo los vertederos responsables del 23% de las emisiones nacionales de metano. Frente a esta situación, Canadá busca avanzar hacia una economía circular, reduciendo la cantidad de residuos que llegan a vertederos y promoviendo alternativas tecnológicas más eficientes y ambientalmente seguras (Morrison Hershfield, 2023).

En este contexto, la valorización energética mediante incineración y tecnologías termoquímicas (combustión masiva, gasificación y pirólisis) emerge como una alternativa estratégica. Estas plantas permiten tratar residuos que no pueden reutilizarse ni reciclarse y además reducen el volumen destinado a vertederos mientras generan electricidad, calor o combustibles de menor intensidad de carbono. Canadá ya utiliza incineradores para residuos municipales, peligrosos, biomédicos y lodos, incorporando sistemas avanzados de control que reducen drásticamente las emisiones atmosféricas, lo que convierte al WtE en una opción más limpia. A medida que Canadá impulsa la economía circular y busca soluciones con menor impacto climático, la valorización energética se posiciona como una herramienta clave para transformar residuos no aprovechables en energía útil y reducir significativamente las emisiones asociadas al manejo tradicional de residuos (Gobierno de Canadá, 2021) (Morrison Hershfield, 2023).

En 2022, el gobierno de Canadá encargó a Morrison Hershfield un estudio integral para analizar el papel actual y futuro de la valorización energética de residuos en el país. El trabajo revisó las principales tecnologías térmicas aplicables a residuos municipales, evaluó sus impactos en emisiones de gases de efecto invernadero, elaboró un inventario de instalaciones y actores del sector y recopiló políticas relevantes a nivel nacional e internacional. Con ello, el estudio buscó identificar el potencial real del WtE para recuperar energía y recursos, y para contribuir a una gestión de residuos más sostenible en el contexto canadiense.

## 2.3. Asia

En Asia, la incineración de residuos con recuperación energética ha adquirido un rol central dentro de los sistemas de gestión de residuos, particularmente en países con alta densidad poblacional, fuerte urbanización y escasa disponibilidad de suelo para la disposición final. A continuación, se analizan los casos de Japón y China como ejemplos representativos.

### 2.3.1. Japón

Tras la Segunda Guerra Mundial, el auge económico en Japón generó un fuerte aumento de desechos industriales y escombros urbanos. Entre 1960 y 1980, los residuos pasaron de 8.9 a 43.9 millones de toneladas. Ante la falta de espacio para vertederos, los municipios invirtieron en incineradores, adoptando la incineración como principal método de eliminación (Trentinella, 2021).

Actualmente cuenta con más de 1400 incineradores –1103 municipales y 306 privados– con capacidad total superior a 287,000 toneladas diarias. En Tokio operan 19 plantas que procesan toda la recolección diaria. Estas instalaciones aprovechan el calor de la combustión para generar electricidad: cubren sus propias necesidades y venden el excedente, lo que genera ingresos significativos (Tokio, La Ciudad Más Limpia Gracias a Su Avanzado Sistema De Tratamiento De Basuras, s.f.).

### 2.3.2. China

China comenzó a desarrollar la incineración de residuos a fines de la década de 1980, impulsada por la necesidad de gestionar el rápido crecimiento de los residuos urbanos y la falta de suelo disponible para nuevos RS (Zhang et al, 2015).

Rápidamente se adoptó la incineración como medio principal para la gestión de los residuos: entre 2012 y 2019 el número de plantas pasó de 122 a 428 y en 2023 el país superó las 1000 instalaciones.

Además de reducir el uso de vertederos, las plantas tienen la capacidad de generar entre 340 y 350 kWh de energía eléctrica por tonelada de residuo procesado (Kunming, 2025). El avance en las tecnologías utilizadas (principalmente en sistemas de combustión y tratamiento de gases) ha logrado cumplir regulaciones ambientales estrictas, comparables a los vigentes en la Unión Europea.

Sin embargo, este crecimiento acelerado generó nuevos desafíos. Las grandes capacidades instaladas, sumadas a las políticas nacionales de reducción y separación en origen, han disminuido el volumen de residuos disponibles, lo que provoca que varias plantas no operen a su máxima capacidad (Zhu y Wei, 2025). En algunos casos, esto ha llevado a extraer residuos de vertederos o a aceptar otros tipos de desechos, como residuos industriales, para asegurar el abastecimiento.

## 2.4. Análisis regional

En América Latina, uno de los principales desafíos es que la generación de residuos sólidos supera la capacidad de los rellenos sanitarios. Frente a esta situación, los gobiernos han comenzado a implementar estrategias como programas de reducción de basura y reciclaje. A diferencia de Europa y Asia, donde existen políticas públicas consolidadas y una fuerte conciencia ciudadana en torno a la gestión de residuos, en América Latina las condiciones socioeconómicas son distintas: la separación en origen no está generalizada y suele estar a cargo de cooperativas (Coll, 2018).

### 2.4.1. Brasil

En Brasil la incineración de residuos tuvo un rol importante en el pasado como respuesta a crisis sanitarias urbanas, pero hoy en día es una tecnología fuertemente cuestionada. Las experiencias negativas, especialmente en ciudades como São Paulo, dejaron una imagen desfavorable debido a problemas ambientales, falta de mantenimiento y conflictos con las comunidades vecinas. Actualmente, la incineración es vista con desconfianza, tanto por organizaciones sociales como por recicladores, quienes advierten sobre la pérdida de empleos, el impacto ambiental y la contradicción con las políticas nacionales que priorizan el reciclaje por sobre el tratamiento térmico (Coll, 2018).

### 2.4.2. Colombia

En Colombia, además de impulsar el reciclaje y la reutilización, se han explorado alternativas de valorización energética para reducir la dependencia de los rellenos sanitarios, que en muchas zonas están llegando al límite de su capacidad. Si bien existen proyectos en marcha para construir plantas WtE, su implementación ha sido

lenta debido a la falta de regulación clara, preparación de los residuos y coordinación entre distintos actores. Actualmente, el país cuenta con una planta inaugurada pero aún no operativa en San Andrés, y con instalaciones privadas que incineran residuos peligrosos, principalmente de origen hospitalario e industrial (López Gómez, 2025).

### 2.4.3. Argentina

En 2018, la discusión sobre cómo enfrentar la saturación de los rellenos sanitarios en Argentina tomó fuerza con la aprobación de la Ley 5.966, que modificó la Ley de Basura Cero para permitir la incineración de residuos con recuperación de energía en la Ciudad de Buenos Aires. La medida generó una fuerte reacción de organizaciones sociales y ambientales, que se opusieron a su implementación. Los principales argumentos eran que la incineración produce emisiones nocivas, compite con el reciclaje y depende de altos subsidios estatales por los altos costos de inversión y operación. A raíz de esto, en octubre de 2019, se declaró inconstitucional la Ley 5.966, suspendiendo su aplicación (Fundación ambiente y recursos naturales, 2019).

## 2.5. Uruguay

Resulta fundamental comprender el esquema actual de gestión de residuos, tanto a nivel general como específicamente para los residuos sólidos domiciliarios, antes de analizar la viabilidad de alternativas como la valorización energética. Asimismo, es necesario considerar las características de la matriz energética nacional y las tendencias a futuro, ya que estos elementos inciden directamente en la incorporación de nuevas tecnologías y en sus efectos ambientales y económicos.

### 2.5.1. Gestión de residuos

Con el fin de evaluar la factibilidad y el rol potencial de tecnologías de valorización energética en Uruguay, resulta necesario caracterizar el sistema actual de gestión de residuos. En particular, el análisis del perfil de generación, la composición de los residuos y los niveles actuales de valorización y disposición final permite identificar las principales ineficiencias y oportunidades de mejora.

#### Perfil de generación de residuos

El Plan Nacional de Gestión de Residuos (PNGR) (Ministerio de Ambiente, 2021) constituye el marco rector vigente para la política de residuos en el país. Establece la hoja de ruta para el período 2023-2033 con el objetivo de transitar hacia un modelo de economía circular, reducir los impactos ambientales y sanitarios de la gestión de residuos, y optimizar el uso de recursos.

En su diagnóstico de línea de base, la generación nacional de residuos se clasifica en cuatro grandes corrientes, presentadas en la Tabla 2.1. La fracción más significativa corresponde a los residuos industriales y asimilables, que representan un 39% del total (medidos en base seca) e incluyen desechos provenientes de procesos industriales así como residuos generados en comercios o servicios cuya naturaleza permite gestionarlos de forma similar a los industriales.

Le siguen los residuos domiciliarios y de comercios (medidos en base húmeda), que representan un 36% del total e incluyen tanto la fracción orgánica como los materiales reciclables presentes en los residuos generados en hogares y establecimientos comerciales.

En tercer lugar se encuentran los residuos de obras de construcción, con un 21%, que comprenden materiales como escombros, áridos, maderas, metales y otros productos derivados de actividades de construcción y demolición.

Finalmente, los residuos especiales constituyen un 4% de la generación total y abarcan aquellos flujos que, por su peligrosidad o composición particular, requieren de un manejo diferenciado y normativas específicas. Dentro de esta última categoría se incluyen, por ejemplo, los neumáticos fuera de uso, las baterías plomo-ácido, los aceites usados, los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, los envases de agroquímicos y los residuos con mercurio, entre otros.

El PNGR establece objetivos específicos para cada corriente de residuos, junto con un sistema de seguimiento y evaluación mediante indicadores nacionales.

Tabla 2.1: Estimación de generación de residuos según el PNGR.

Tipo de residuo	% del total	Toneladas estimadas/año
Residuos industriales y asimilables (base seca)	39%	1.635.545
Residuos domiciliarios y de comercios (base húmeda)	36%	1.454.890
Residuos de obras de construcción	21%	880.000
Residuos especiales	4%	142.501
<b>Total</b>	100%	4.112.936

En lo que respecta específicamente a los RSD, la composición típica, presentada en la Figura 2.7, presenta una fracción orgánica que ronda el 45%, mientras que la fracción potencialmente reciclable (papel, cartón, plásticos, metales y vidrio) representa aproximadamente un 40%. Este perfil evidencia una alta proporción de materiales valorizables y sustenta la estrategia del PNGR de priorizar la prevención, la segregación en origen y la valorización como ejes centrales para desacoplar la generación de residuos del crecimiento económico.

La caracterización presentada se basa en los estudios realizados por LKSur (2013) y CSI (2015) en siete departamentos del país, adoptando un promedio no ponderado para todo el país. Esta fuente es considerada la más confiable, actual y precisa, a nivel nacional.

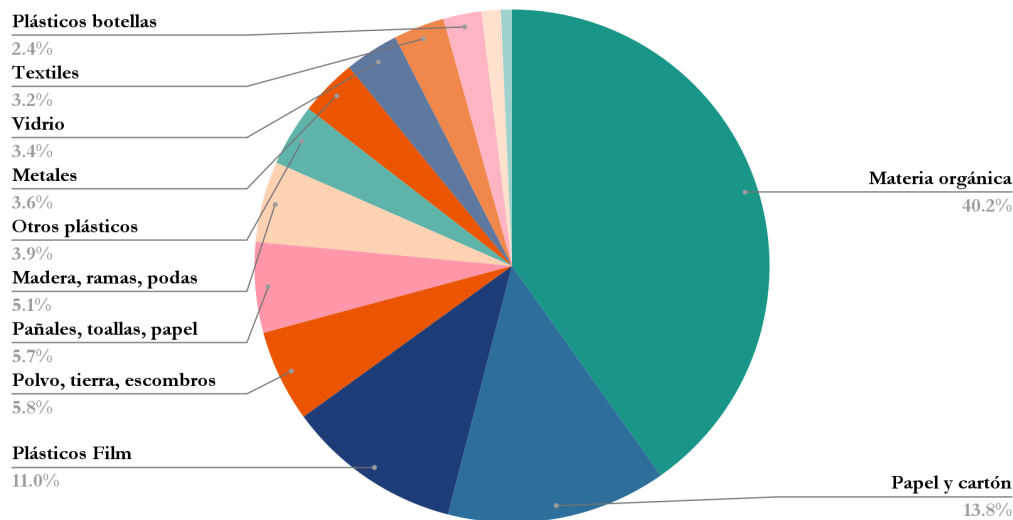


Figura 2.7: Composición de residuos domiciliarios (Ministerio de Ambiente, 2021)

### Gestión de residuos domiciliarios actual

En cuanto a la gestión actual de residuos domiciliarios, según el PNGR la mayoría de las localidades consta únicamente de las etapas de recolección de los residuos mezclados, la que puede realizarse por diversas modalidades, y el posterior transporte al sitio de disposición final más cercano con su correspondiente enterramiento.

Actualmente en Uruguay la tasa de reciclaje es baja y heterogénea. Tomando como referencia el sistema de plantas de clasificación de Montevideo y las estimaciones para el interior, la valorización material efectiva nacional ronda el 5% de los RSD.

El estado de situación de los sitios de disposición final en Uruguay difiere mucho entre los distintos departamentos, tanto en infraestructura como en operación. En la actualidad solo se encuentran operativos seis sitios en condiciones de relleno sanitario (Montevideo, Maldonado, Rocha, Florida, Fray Bentos y Paso de los Toros), entre ellos, el de Montevideo, presentado en la Figura 2.8, es el de mayor capacidad y volumen gestionado. Entre los seis alcanzan aproximadamente el 65% de los residuos con destino de disposición final. Por otro lado, considerando las capitales departamentales de los 14 departamentos restantes que suman el 30% de los residuos a disposición final, si bien los sitios de disposición final corresponden a vertederos, y no a rellenos sanitarios, se trata de sitios que, en general, presentan cierto nivel de control. Finalmente, el restante 5% de los residuos se depositan en vertederos a cielo abierto asociados a pequeñas localidades, la mayoría de ellas con una población menor a 5000 habitantes (Ministerio de Ambiente, 2021).



Figura 2.8: RS de Felipe Cardoso en Montevideo (Telenoche, 2022)

En el marco del PNGR 2023-2033, se establece como meta para 2030, que el 100% de los residuos dispuestos en el país se depositen en rellenos sanitarios controlados o instalaciones con igual o mejor estándar ambiental. Esto implica cerrar progresivamente los vertederos a cielo abierto y desarrollar un sistema de disposición centralizado en rellenos sanitarios, que permita que varios departamentos compartan instalaciones de alto estándar.

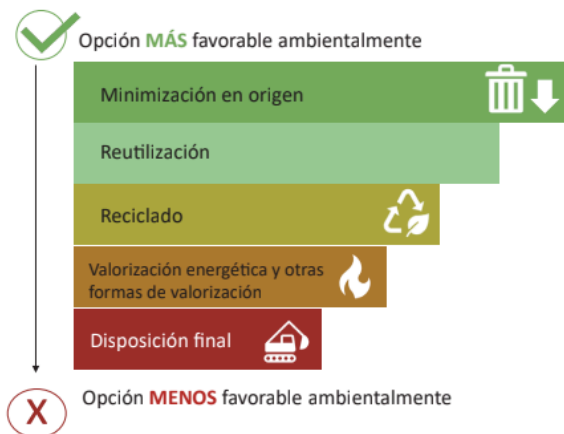


Figura 2.9: Jerarquía de residuos establecida en la ley de Gestión Integral de Residuos (PNGR, 2021)

## 2.5.2. Matriz energética

Uruguay ha experimentado en la última década una transformación profunda de su matriz energética, posicionándose como referente global en generación renovable (UTE, 2020). En 2024, el 99% de la electricidad generada en el país provino de fuentes limpias, con una producción total de 17.202 GWh, según datos preliminares del Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM). Actualmente, Uruguay se ubica entre los líderes mundiales en generación renovable, ocupando el cuarto lugar global en participación de energía eólica y solar, solo detrás de Luxemburgo, Dinamarca y Lituania.

Este cambio fue impulsado inicialmente por la crisis regional del gas natural y consolidado gracias a políticas públicas que promovieron la incorporación masiva de energías renovables no convencionales, en especial la energía eólica, complementada por hidráulica, solar y biomasa.

### Situación actual

La matriz eléctrica de Uruguay se compone casi en su totalidad por fuentes renovables: hidráulica, eólica, solar y biomasa. La energía hidráulica, tiene la ventaja de ser acumulable, lo que permite regular su aporte en función de la disponibilidad de eólica y solar. La biomasa, asociada principalmente a la industria de la celulosa, es una fuente firme o no intermitente, que entrega energía de manera continua como subproducto de procesos industriales. En cambio, la energía eólica y la solar dependen de las condiciones climáticas y, actualmente, no cuentan con sistemas de almacenamiento a gran escala en el país, lo que introduce intermitencia en su disponibilidad. Esta variabilidad se compensa principalmente con generación hidráulica y, en menor medida, con generación térmica fósil.

La potencia instalada en Uruguay se distribuye como se presenta en la Figura 2.10 (Instituto Nacional de Estadística 2023):

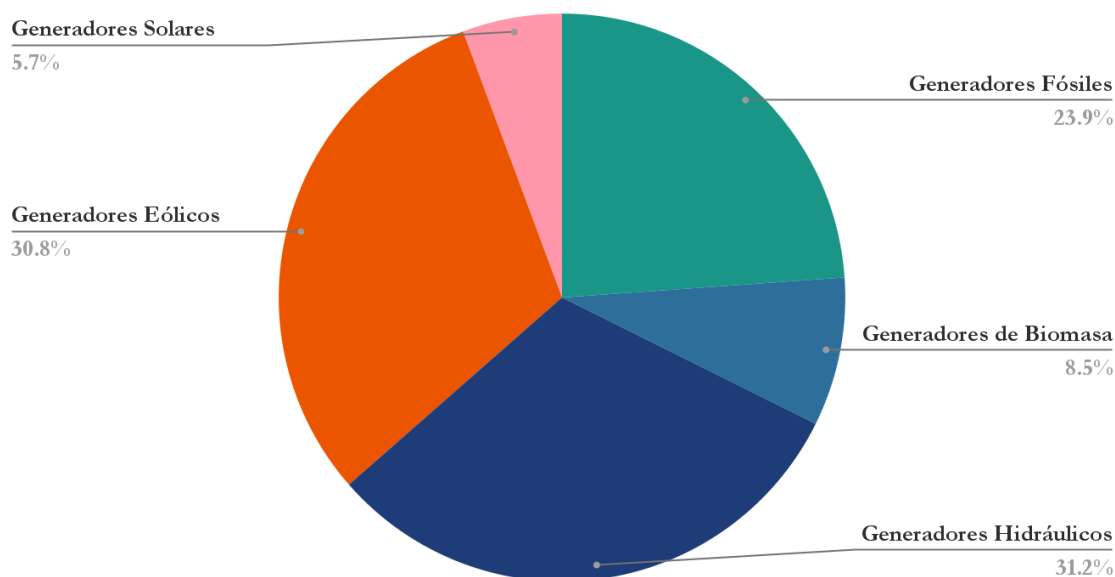


Figura 2.10: Potencia instalada de la matriz eléctrica en Uruguay (Elaboración propia)

Como se puede ver en la Figura 2.11, construida con información disponible del Balance Energético Nacional (BEN) (Ministerio de Industria, Energía y Minería, s.f.), en los últimos tres años, se generaron en promedio 1,613 GWh provenientes de fuentes fósiles, los cuales podrían ser sustituidos con la generación de energía a partir de RSD.

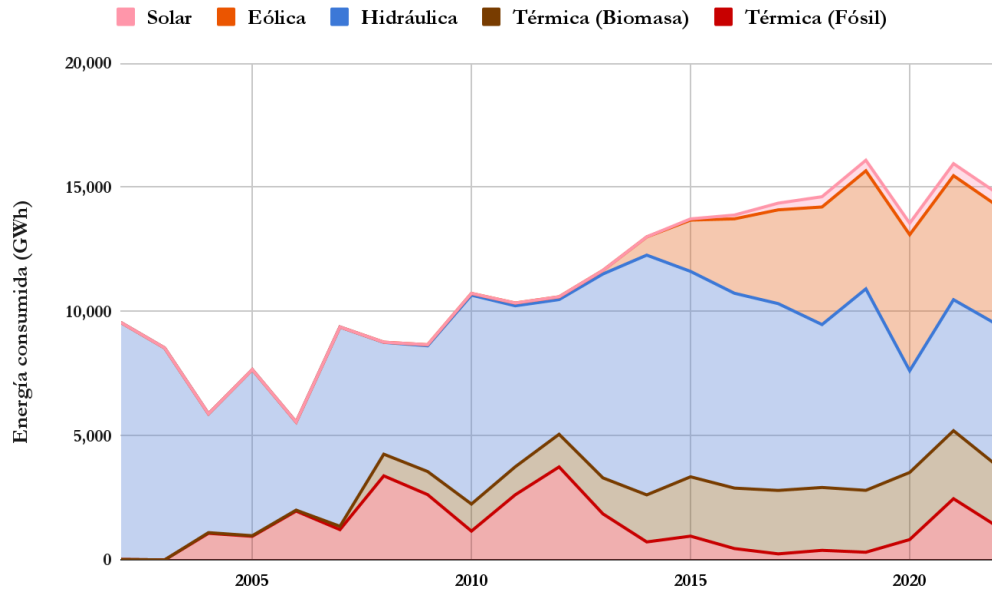


Figura 2.11: Generación de energía eléctrica por fuente en Uruguay (Elaboración propia)

## Tendencias a futuro

Las proyecciones elaboradas por la Dirección Nacional de Energía (Ministerio de Industria, Energía y Minería 2024) prevén un crecimiento sostenido de la demanda eléctrica. El escenario “Incondicional” considera las políticas energéticas vigentes y los compromisos internacionales asumidos por Uruguay en sus Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC). A este escenario se añade una demanda plana adicional de 50 MW a partir de 2027, la cual podría provenir del proyecto de Google en Uruguay, y en caso de no concretarse de otro de similar porte.

En el marco del escenario “Incondicional + 50 MW”, la composición prevista de la generación (despacho) en valor esperado, para los años 2024, 2029, 2034, 2039 y 2043, así como el total del período, se detalla en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Proyección de generación de energía eléctrica por fuente, en GWh (MIEM, 2024)

Año	Demanda	Biomasa	Salto Grande	Rio Negro	Eólica	Solar	Térmica	Exportación
2024	12.057	2.106	3.964	2.547	5.214	429	244	-2.448
2029	13.402	2.412	3.872	2.383	5.203	1.379	407	-2.254
2034	14.400	2.399	3.899	2.407	6.354	1.706	377	-2.744
2039	15.708	2.471	3.922	2.422	7.458	2.089	437	-3.094
2043	17.021	2.403	3.941	2.427	8.807	2.658	475	-3.692
2024-2043	288.027	47.980	78.399	48.074	129.255	32.967	7.763	-56.445

En esta proyección se estimaba que en 2024 la generación térmica fuera de 244 GWh. Sin embargo, los datos reales muestran que fue de 184,6 GWh, lo que evidencia una sobreestimación significativa para ese año.

El potencial de expansión para energías renovables sigue siendo considerable en el caso de la eólica y la solar, ya que existen espacios físicos suficientes para su desarrollo. Por otro lado, no se prevén nuevas centrales hidroeléctricas, dado que este recurso se considera agotado a esa escala. Sin embargo, el fortalecimiento de fuentes firmes adicionales, como plantas de valorización energética de residuos con contratos de compra garantizados por UTE, podría ser clave, mientras se desarrollan tecnologías que posibiliten la incorporación de sistemas de almacenamiento a gran escala, que permitan aprovechar mejor la generación intermitente. Se considera que la inyección puede realizarse desde cualquier punto del país.

## 3. Caso de estudio

Previo a evaluar la viabilidad de la instalación de la planta es necesario definir con claridad el marco en el cual se desarrollará el análisis. Esto implica establecer el horizonte temporal considerado, delimitar el alcance del estudio y definir la fracción de residuos que efectivamente podría ser destinada a incineración.

### 3.1. Horizonte temporal

En la planificación a futuro se suelen utilizar dos enfoques para estructurar escenarios de desarrollo. El escenario incondicional considera la implementación de políticas públicas, medidas y acciones que ya han sido adoptadas formalmente por el país, a través de leyes, planes, normativas o estrategias vigentes, y cuya ejecución se considera viable con los recursos disponibles. El escenario condicional, en cambio, incorpora medidas adicionales o más ambiciosas cuya concreción depende de la disponibilidad de recursos y/o financiamiento externo.

Como se expuso en la [Figura 2.9](#), en la jerarquía establecida en la Ley de Gestión Integral de Residuos la valorización energética se ubica por debajo de los procesos de reutilización y reciclaje. Dado que existen planes a nivel nacional que buscan incrementar la proporción de residuos valorizados (no energéticamente) el objetivo de este estudio no es competir con dichos procesos. Por el contrario, se evaluará la situación en un horizonte temporal hacia 2050, momento en el que se prevé que la gestión de residuos en el país se encuentre más avanzada y que la fracción analizada corresponda únicamente a aquellos residuos que no sean valorizables por otras vías.

En este marco, se hará un análisis a futuro: no solo se proyectará la generación de residuos para dicho horizonte, sino que también se considerarán como cumplidas diversas metas nacionales ya establecidas (por ejemplo, objetivos de reciclaje, valorización y otras acciones en materia de gestión de residuos) junto con la inclusión de medidas que, si bien aún no están formalizadas, resultan viables en un contexto de desarrollo sostenido y apoyo internacional. Bajo esta perspectiva, el caso de estudio se enmarca en un escenario condicional, combinando compromisos ya asumidos con iniciativas adicionales cuya implementación requerirá avances regulatorios o apoyo financiero externo.

### 3.2. Alcance

Definido el horizonte temporal, se decide enfocar el análisis exclusivamente en los residuos sólidos urbanos, dado que constituyen la corriente que presenta mayores dificultades para su valorización material. Si bien Uruguay cuenta con instrumentos normativos y planes específicos para corrientes de residuos industriales o especiales, bajo regímenes de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) (como es el caso de envases, neumáticos, baterías plomo-ácido, envases de agroquímicos, residuos con mercurio y residuos electrónicos) los RSD continúan representando el mayor desafío. Esto se debe principalmente a la falta de segregación en origen y a las limitaciones en la recuperación de materiales reciclables. A su vez, la composición heterogénea de los residuos hace que, incluso con mejoras en estos aspectos, siempre quede una fracción residual considerable, lo que vuelve necesario evaluar alternativas de tratamiento a largo plazo.

### 3.3. Residuos a tratar

Antes de definir las características de la planta, es fundamental determinar cuántos residuos serían efectivamente procesados y cuál sería su composición. La cantidad y el tipo de residuos disponibles condicionan directamente el dimensionamiento de la instalación, su tecnología, su operación y su aporte energético. A continuación se describen los residuos que potencialmente podrían destinarse a incineración en el horizonte considerado.

#### 3.3.1. Generación proyectada

Para la proyección de generación de residuos hacia el año 2050, se toma como base un desacople del 1% respecto al PIB (Producto Interno Bruto) hasta 2032, de acuerdo con lo establecido en el PNGR. Este aumento anual desacoplado se grafica en la Figura 3.1. A partir de ese 2032, se asume un desacople del 2% anual, dado que 2032 marca el fin de las metas establecidas en el PNGR y se prevé una mayor concientización y compromiso social en la gestión de residuos, lo que permitiría acelerar la reducción en la generación relativa de residuos.

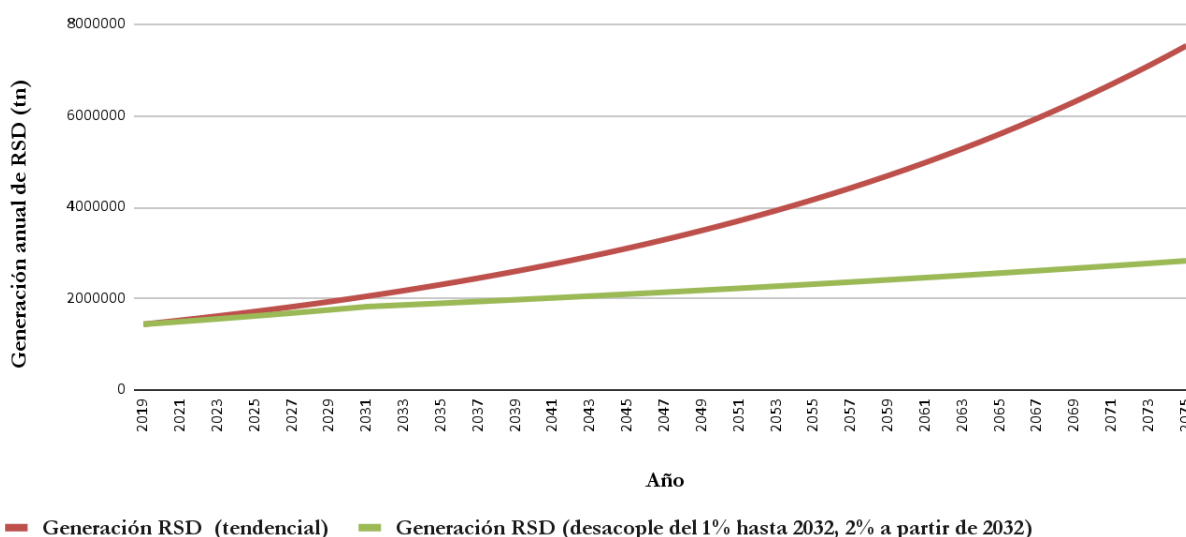


Figura 3.1: Proyección de la generación de RSD anual en toneladas (Elaboración propia)

Al tomar esta proyección y calcular la generación per cápita considerando el crecimiento poblacional estimado por el INE, se obtiene que para el año 2050 la generación diaria de residuos por persona será de aproximadamente 1.72 kg. Al comparar este valor con países con una gestión de residuos más avanzada, que podrían representar un escenario similar al que enfrentaríamos en 2050, se observa que la cifra es coherente. Por ejemplo, tomando referencias internacionales de países desarrollados, en 2023 una persona generó en promedio 552 kg de residuos municipales al año, lo que equivale a unos 1.51 kg diarios (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, 2025).

### 3.3.2. Composición de los RSD

Como se mencionó previamente, se propone la incineración de los RSD primarios remanentes, es decir, los que persisten tras la recuperación de materiales reciclables y el tratamiento de la fracción orgánica.

Respecto a la valorización material, se asume una tasa de recuperación del 85% para el tereftalato de polietileno (PET) y el cartón. Este número se sustenta a partir de tres leyes importantes aprobadas en los últimos años.

En primer lugar, en el año 2007 se reglamenta la Ley de Reciclaje de Envases (IMPO, 2004) que obliga a los productores e importadores de productos con envases, a adherirse a planes de recuperación para fomentar la valorización de los mismos. Esta normativa se enmarca dentro del principio de REP, que asigna a los generadores la responsabilidad sobre la gestión de los residuos derivados de los productos que ponen en el mercado. En Uruguay, este enfoque se ha extendido también a otros flujos específicos, como neumáticos fuera de uso, baterías y otros residuos prioritarios.

En segundo lugar, en el 2023 surge el Plan Vale como resultado de la Resolución Ministerial 271/2021 (Ministerio de Ambiente, 2023) que establece metas ambiciosas de recuperación de envases para resolver los bajos resultados del Plan de Envases implementado desde el año 2007.

Por último, en el PNGR se propone en el objetivo de valorización para los envases post consumo alcanzar a 2032 un 85% de valorización y un 50% de reciclado. Se optó por mantener la meta del 85% de recuperación establecida en el PNGR para 2032, pero proyectándola como objetivo a 2050, dado que se considera una meta muy ambiciosa considerando que, a la fecha, la recuperación efectiva de envases volcados al mercado es de aproximadamente un 4% (Rodríguez, 2023).

Si bien alcanzar tasas de recuperación tan elevadas representa un gran desafío, existen experiencias internacionales que demuestran su factibilidad. Un claro ejemplo es el caso de Alemania, que cuenta con el sistema de devolución de envases más eficaz del mundo, alcanzando tasas de retorno cercanas al 98 % para botellas de un solo uso y reutilizables (TOMRA, 2023). Desde 2003 aplica un sistema obligatorio de depósito para envases descartables, complementado con depósitos voluntarios para envases reutilizables. La extensa red de puntos de devolución y el incentivo económico han permitido obtener envases de alta calidad para su reciclaje o reutilización, consolidando un modelo ejemplar de economía circular.

Este modelo demuestra que, con un marco normativo sólido, incentivos económicos adecuados y una infraestructura eficiente, es posible alcanzar metas de valorización cercanas o incluso superiores al objetivo propuesto en este estudio.

Por otro lado, se define una meta de recuperación del 60% para los metales y otros plásticos que si bien son reciclables presentan mayores dificultades para su recuperación (como plásticos rígidos mezclados o plásticos contaminados). Este valor surge a partir de dos referencias normativas relevantes.

Primeramente, las Resoluciones Ministeriales Nº 271 y 272 en el año 2021 que buscan incrementar de manera significativa los índices de recuperación y valorización de envases, reducir el consumo de plásticos de un solo uso y la generación de estos residuos. En particular, se establece que “a partir de 2025 las bebidas no

alcohólicas y aguas de mesa que se comercialicen en envases plásticos deben contener 40% de material reciclado.” (Ministerio de Ambiente, 2025).

A su vez el PNGR fija como meta a 2032 que más del 50% del total de residuos generados se destine a procesos de valorización.

Considerando que la meta para 2025 era del 40% (y en la práctica fue de aproximadamente 4%) y que para 2032 se plantea un 50%, se considera razonable tomar para 2050 un objetivo conservador pero creciente, estableciendo una meta del 60% de recuperación para estos materiales.

Experiencias internacionales refuerzan la viabilidad de esta meta. De acuerdo con la Figura 3.2, en 2023 Eslovenia encabezó el ranking mundial de reciclaje y compostaje de residuos municipales, alcanzando una tasa del 82.91%, seguida por Alemania con un 67.69% (Report Linker, 2023). Estos resultados muestran que, con políticas públicas consistentes, participación ciudadana y una infraestructura eficiente, es posible alcanzar el objetivo planteado para este estudio.

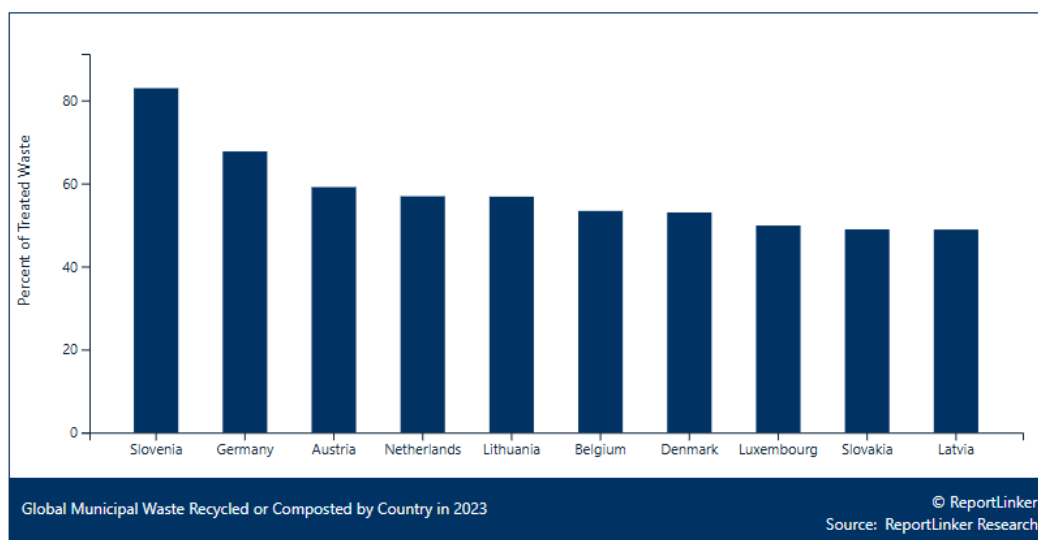


Figura 3.2: RSD reciclados o compostados por país en 2023 (Report Linker, 2023)

En cuanto a la fracción orgánica, se prevé su tratamiento mediante digestión anaerobia, en el marco del proyecto en evaluación por parte del gobierno, orientado a la producción de metanol como combustible para la industria naviera (Charquero, 2022). Se estima que este proceso generará un rechazo del 20% ya que no toda la materia orgánica será apta para la digestión anaerobia, por lo cual se destinará a incineración.

A nivel internacional, existen experiencias que demuestran la viabilidad de transformar residuos orgánicos y municipales en metanol. Por ejemplo, la empresa Shenergy en China desarrolla una planta destinada a producir metanol a partir de residuos de cocina para su uso en el sector marítimo, con una capacidad estimada de 70,000 a 100,000 toneladas anuales (Arteaga 2024).

Por otro lado, la empresa WasteFuel ha desarrollado tecnologías capaces de convertir residuos sólidos urbanos y biogás en metanol de baja huella de carbono, abasteciendo a compañías navieras como Maersk (The

Maritime Executive 2022). Estas iniciativas muestran que la conversión de residuos en metanol es una opción insaturada y en expansión, lo que permite incorporar este supuesto de tratamiento para la fracción orgánica en los escenarios futuros analizados.

A continuación, en la Tabla 3.1 se presenta un resumen de las tasas de valorización y el porcentaje de rechazo estimado para cada porción, dando resultado al volumen destinado a incineración.

Tabla 3.1: Porcentaje de valorización y volumen enviado a incineración por fracción.

Porción	Masa (tn)	% Valorización	% Rechazo	Incineración (tn)
Materia orgánica	855,121	100%	20%	171,024
Papel y cartón	293,549	85%	0%	44,032
Plásticos Film	233,988	85%	0%	35,098
Otros (polvo, tierra, escombros)	123,376	0%	0%	123,376
Pañales, toallas, papel	121,248	0%	0%	121,248
Madera, ramas, podas	108,485	100%	20%	21,697
Otros plásticos	82,959	60%	0%	33,184
Metales	76,578	60%	0%	30,631
Vidrio	72,324	85%	0%	10,849
Textiles	68,069	0%	0%	68,069
Plásticos botellas	51,052	85%	0%	7,658
RSD especiales/peligrosos	25,526	100%	0%	0
Tetrabrick	14,890	0%	0%	14,890
<b>Total</b>	<b>2,127,166.20</b>			<b>681,757</b>

La Figura 3.3 refuerza este punto, presentando cómo se plantea gestionar las fracciones de RSD en el caso de estudio. Al analizar el porcentaje de los residuos domiciliarios que se destinarían a incineración en 2050, se estima que representarían el 32% de los residuos generados, mientras que el 66% correspondería a residuos valorizables no energéticamente. Al comparar estos valores respecto a países con sistemas de gestión de residuos más avanzados, los resultados resultan coherentes. Por ejemplo, Dinamarca destina aproximadamente un 45% de sus residuos a incineración y valoriza un 54%; Alemania presenta un 31% en incineración y un 67% en valorización; y Países Bajos maneja un 39% para incineración y un 60% para valorización, cifras similares a las proyectadas para nuestro país.

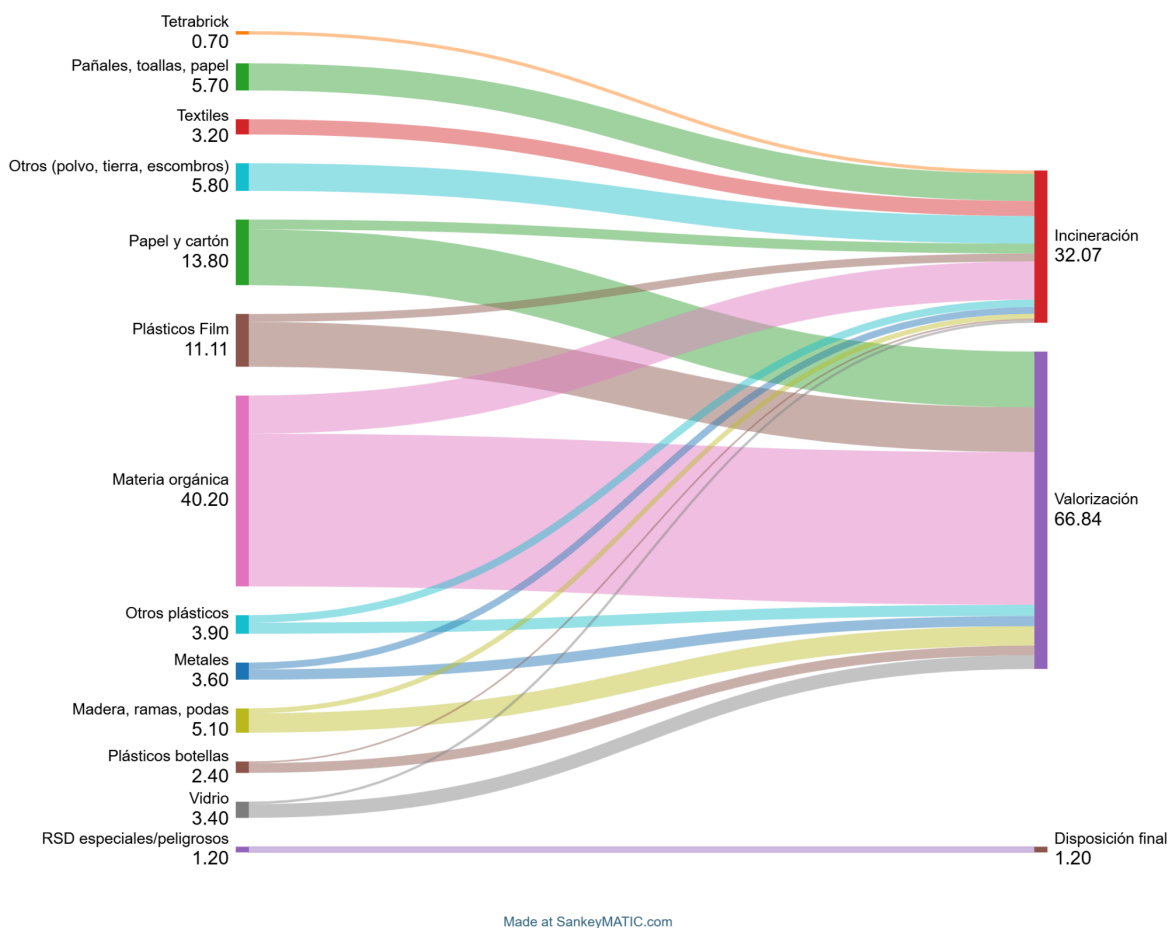


Figura 3.3: Destino de fracciones de los RSD (Elaboración propia)

Dadas las metas de recuperación y valorización asumidas para las distintas corrientes de residuos, se determina la fracción remanente que será destinada a incineración en el año 2050. En la Figura 3.4, se presenta la composición estimada de dichos residuos, considerando los rechazos del proceso de valorización de la materia orgánica previamente descrito.

Se observa que los residuos remanentes destinados a incineración están compuestos principalmente por materia orgánica, que representa el mayor porcentaje con un 25.1%. Además, una proporción importante corresponde a pañales, toallas y papel, que suman un 17.8%, junto con una cantidad significativa de otros materiales como polvo y escombros, que representan un 18.1%.

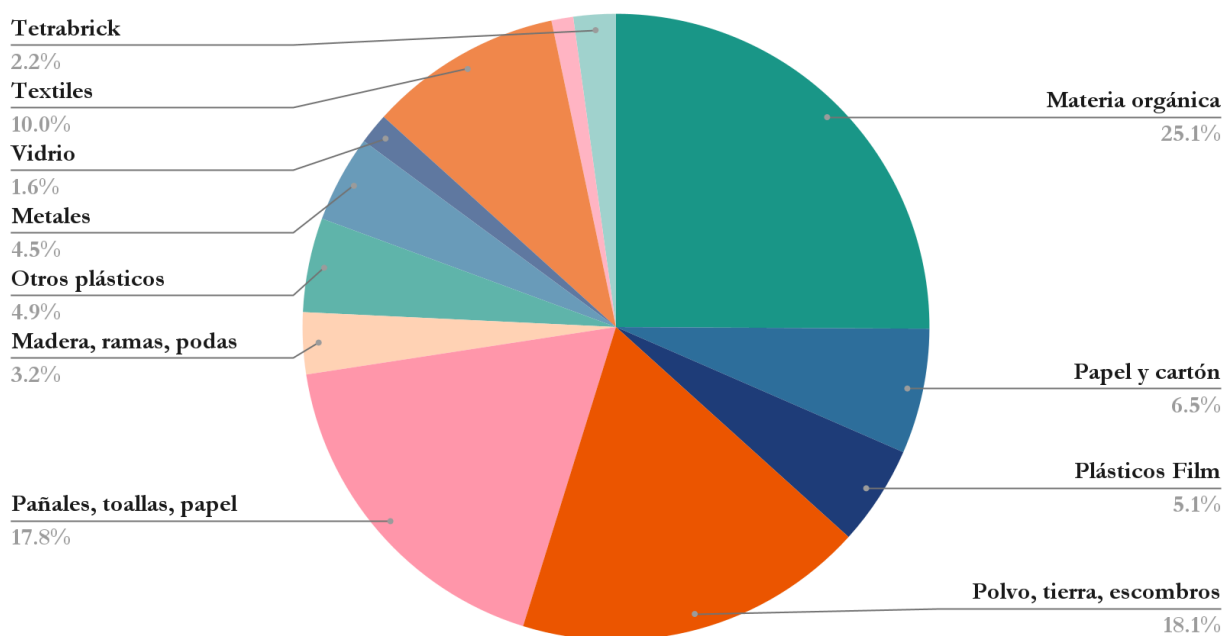


Figura 3.4: Composición de los RSD destinados a incineración (Elaboración propia)

Otros componentes relevantes, aunque en menor proporción, incluyen textiles, papel y cartón, diferentes tipos de plásticos, metales, madera, tetrabrick y vidrio. Esta composición refleja una mezcla heterogénea de materiales que requiere un tratamiento adecuado mediante incineración para su manejo y valorización energética.

Es importante destacar que la composición de los residuos remanentes se presenta diferenciada por fracción en la Figura 3.4 con el fin de estimar la masa final destinada a incineración (Tabla 3.1) y estudiar el potencial de valorización energética utilizando el poder calorífico (Ver Anexo VIII) correspondiente a cada caso. En la práctica, estos residuos son una fracción residual mezclada rechazada por otros procesos de valorización.

### 3.4. Tecnología de incineración

A partir del estudio de las tecnologías existentes para la incineración, se concluye que la combustión en masa mediante el uso de parrilla móvil constituye la alternativa más adecuada para el caso de estudio. Esta elección se debe principalmente a la heterogeneidad de la mezcla de residuos a tratar, dada la falta de separación en origen y acondicionamiento previo para RSD en Uruguay, considerando que la tecnología de parrilla requiere poco o ningún pretratamiento.

A su vez, es la tecnología más validada para el tratamiento de RSD a nivel mundial, con un sistema menos complejo que las tecnologías de lecho fluidizado y horno rotatorio.

## 4. Modelo matemático

Para determinar la cantidad, capacidad y ubicación óptima de las plantas de incineración, se desarrollará un modelo matemático de optimización que considera los 30 años de operación de las mismas, desde 2050 a 2080. Este modelo permite evaluar diferentes alternativas de localización teniendo en cuenta los principales ingresos y egresos a lo largo del ciclo de vida de la planta, lo que permite realizar una evaluación integral de la viabilidad financiera del proyecto a largo plazo. Además se incorporarán al modelo otros factores, como el impacto ambiental, social y la preparación industrial de cada departamento. Para la formulación del modelo matemático se utilizaron herramientas de inteligencia artificial como apoyo en el desarrollo del código y la estructuración del modelo, principalmente Gemini.

### 4.1. Análisis multicriterio

La definición de la ubicación óptima para la instalación de la planta de incineración de residuos no debe limitarse únicamente al análisis económico. Si bien la inversión inicial, los costos de transporte de residuos hacia la planta y de las cenizas luego de la incineración constituyen un aspecto central, resulta indispensable incorporar en la evaluación factores sociales e industriales propios de cada departamento. De esta manera, se construye un enfoque multicriterio que permita tomar una decisión más integral y sostenible.

Esta idea surge a partir del texto “De residuos a recursos: articulando lo ambiental, lo social y lo económico” (Robano y Gonzáles, 2021), donde se propone la aplicación de metodologías de análisis multicriterio para la toma de decisiones en materia de valorización de residuos. Las autoras destacan la importancia de integrar dimensiones ambientales, económicas y sociales, así como de incorporar la perspectiva de expertos y actores relevantes para lograr una evaluación equilibrada y contextualizada. Además se toma como referencia el estudio realizado en el proyecto de grado “Determinación de la ubicación, distribución y diseño de plantas de trituración de envases para la obtención de arena de vidrio” (Espasandin, Ruibal y Zecchi, 2025).

Se identifican tres factores principales a considerar en el proceso de ponderación, cuya forma de cálculo se explica en mayor profundidad en el [Anexo II](#):

- Factor económico: relacionado a los costos e ingresos evaluados de forma puramente económica.
- Factor industrial (FI): refleja el grado de preparación de un departamento para recibir una planta de gran envergadura. Para su construcción se tuvo en cuenta:
  - La cantidad de plantas industriales por cada 10.000 habitantes (Rodríguez Miranda y Beder, 2017).
  - La cantidad de industrias grandes (más de 99 empleados) cada 10.000 habitantes (Rodríguez Miranda y Beder, 2017).
  - La calidad de la infraestructura vial, medida como el cociente entre kilómetros de rutas de hormigón o concreto asfáltico sobre el total de kilómetros de la red vial a cargo del MTOP (Instituto Nacional de Estadística, 2023).

Los dos primeros indicadores se normalizaron entre 0 y 1, asignando el valor 1 al departamento con mayor cantidad de industrias, de forma de poder compararlos en una misma escala. Luego, se calculó el promedio entre los tres indicadores para obtener un índice representativo de la madurez industrial de cada departamento. Un factor industrial alto implica que se trata de un departamento desarrollado industrialmente y por ende más atractivo para instalar la planta de incineración.

- Factor social (FS): busca considerar las condiciones de la población que podrían verse afectadas por la instalación de la planta. En este caso, se consideraron:
  - Índice de Dispersión Poblacional (IDP), definido como el cociente entre la superficie total del departamento y el número de municipios. Un valor elevado refleja una menor concentración poblacional y, por ende, mayor facilidad para ubicar la planta en zonas con menor exposición humana a impactos como olores, ruidos o calidad del aire.
  - Población económicamente activa, entendida como un indicador positivo de disponibilidad de mano de obra y de capacidades instaladas para la operación de la planta (Rodríguez Miranda y Beder, 2017).
  - Iniciativas de gestión de residuos en el departamento, como indicador del grado de avance, experiencia y conocimiento previo en la materia, lo que puede facilitar la aceptación y la implementación del proyecto (Ministerio de Ambiente, 2021).

Análogamente, un valor del factor social alto implica un departamento con condiciones sociales más favorables para la apertura de una planta de incineración.

A continuación se representan los factores obtenidos por departamento, siendo los departamentos más oscuros los que obtuvieron una puntuación más favorable.

En la Figura 4.1 se representa el factor industrial, donde se observa que Montevideo y San José obtienen el mejor puntaje. Análogamente, la Figura 4.2 muestra el factor social, donde Flores, Durazno, Tacuarembó y Río Negro resultan los departamentos más atractivos a nivel social, dado los factores evaluados. Los valores obtenidos se muestran en el Anexo II.

Por último, dado que se busca penalizar a aquellos departamentos con menos desarrollo industrial y social en función a lo que es relevante para la instalación de la planta, para el modelo presentado más adelante se realiza el siguiente cambio de variable:

$$FI_{\text{modelo}} = 1 - FI$$

$$FS_{\text{modelo}} = 1 - FS$$

La importancia asignada a cada factor se aplica en la función objetivo a través de ponderadores.

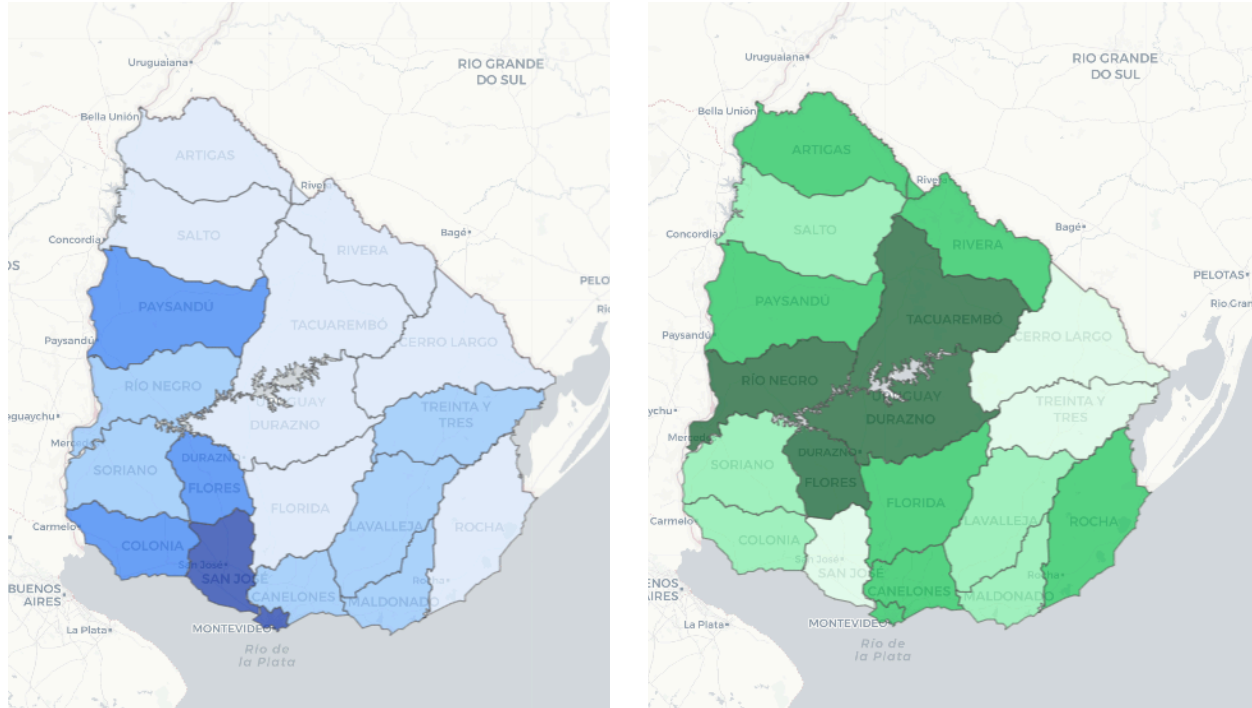


Figura 4.1 y 4.2: Factor industrial y social por departamento (Elaboración propia)

#### 4.1.1. Ponderación de factores

Con el fin de asignar un peso relativo a los factores económico, industrial y social, se definen los siguientes ponderadores:

- $\alpha$ : peso relativo del factor económico, con  $\alpha \in [0, 1]$
- $\beta$ : peso relativo del factor industrial, con  $\beta \in [0, 1]$
- $\gamma$ : peso relativo del factor social, con  $\gamma \in [0, 1]$

donde  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ .

Para asignarles un valor se optó por una metodología participativa, consultando a aquellas partes interesadas cuyas opiniones que se consideraron pertinentes con las que se mantuvo contacto durante el desarrollo del estudio. A cada actor se le solicitó valorar la relevancia de los factores económico, industrial y social, justificando su elección, siguiendo el enfoque propuesto en “De residuos a recursos: articulando lo ambiental, lo social y lo económico” (Robano y Gonzáles, 2021) sobre la integración de dimensiones múltiples en la toma de decisiones ambientales. Los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 4.1 a continuación.

Tabla 4.1: Ponderación de las partes interesadas. Valores en %.

Actor / Parte interesada	Económico ( $\alpha$ )	Industrial ( $\beta$ )	Social ( $\gamma$ )
Ing. Gerónimo Etchechury (Ministerio de Ambiente)	50	20	30
Ing. Pablo Fiterman (Felipe Cardoso)	34	33	33
Ing. Federico Rodríguez Barcos (OLMOS, ECOCEDUR)	80	10	10
Ing. Ramiro Roselli (Ministerio Ambiente)	40	40	20
Ing. Mariana Robano (ReAcción)	50	20	30
<b>Promedio</b>	<b>51</b>	<b>25</b>	<b>24</b>

Promediando las respuestas del estudio, se obtuvieron los pesos relativos de  $\alpha = 0.51$ ,  $\beta = 0.25$  y  $\gamma = 0.24$ .

Así pues, se construye el ponderador  $w_i$  a utilizarse en el modelo. Si definimos  $i \in P$ , siendo  $P$  el conjunto de posibles departamentos para ubicar la planta de tratamiento, entonces:

$$w_i = \alpha + \beta \cdot FI_i + \gamma \cdot FS_i$$

donde:

- $\alpha$  : coeficiente asociado al factor económico
- $\beta$  : coeficiente asociado al factor industrial  $FI_i$
- $\gamma$  : coeficiente asociado al factor social  $FS_i$

En consecuencia, la decisión de ubicación resultante del modelo refleja una preferencia marcada por el criterio económico, acompañado por una consideración equilibrada y de magnitud similar de los factores industrial y social.

## 4.2. Formulación matemática

### Conjuntos

- $G$ : departamentos generadores de RSD, con  $j \in G$ .
- $P$ : posibles ubicaciones para plantas de tratamiento, con  $i \in P$ .
- $C = \{\text{Paysandú, Treinta y Tres, Lavalleja, Montevideo}\}$ : sitios de disposición o valorización de cenizas, con  $k \in C$ .
- $T = \{1, 2, \dots, 30\}$ : años de operación con  $t \in T$ .

## Parámetros

- $g_{jt}$  : cantidad de RSD generados en el departamento  $j$  en el año  $t$  (tn/año).
- $d_{ji}$  : distancia entre cada generador  $j$  y posible ubicación de planta  $i$  (km).
- $l_{ik}$  : distancia entre posible ubicación de planta  $i$  y sitio de disposición de cenizas  $k$  (km).
- $K_{min}, K_{max}$  : capacidad anual mínima y máxima de cada planta (tn/año).
- $CT$  : costo de transporte de RSD (USD/km.tn).
- $Kcem_k$  : capacidad de recepción de cenizas en el sitio de disposición  $k$  (tn/año).
- $Fa$  : fracción de la masa de RSD que se transforma en cenizas volantes (%).
- $Fb$  : fracción de la masa de RSD que se transforma en cenizas de fondo (%).
- $FI_i$  : factor que representa el atractivo industrial del departamento  $i$ .
- $FS_i$  : factor que representa el atractivo social del departamento  $i$ .
- $w_i$  : ponderador económico-social-industrial del departamento  $i$ , definido como:

$$w_i = \alpha + \beta \cdot FI_i + \gamma \cdot FS_i$$

- $P_{max}$  : número máximo de plantas a abrir.
- $COp$  : costo operativo de la planta de incineración (USD/ton).
- $tinfl$  : tasa de inflación.
- $a$  : costo de instalación variable de la planta de incineración (USD/ton).
- $b$  : costo de instalación fijo de la planta de incineración (USD).
- $P_e$  : precio de venta de energía eléctrica (USD/MWh).
- $E_{disp}$  : energía disponible por tonelada de residuo (MWh/tn RSD).
- $\eta$  : eficiencia del proceso de obtención de energía eléctrica (%).
- $C_{int}$  : consumo interno de energía eléctrica en el funcionamiento de la planta (%).
- $P_{CredCO_2}$  : precio de venta de crédito de carbono (USD/tn CO<sub>2</sub>).

- $CO_{2_{ev-relleno}}$  : dióxido de carbono evitado por gestionar los RSD con incineración en vez de depositarlas en un relleno sanitario (tn CO<sub>2</sub>/tn RSD).
- $CO_{2_{ev-eléctrica fósil}}$  : dióxido de carbono evitado por sustitución de energía fósil por la inyección de energía eléctrica a la red (tn CO<sub>2</sub>/tn RSD).

### Variables de decisión

- $y_i \in \{0, 1\}$  : variable binaria que toma el valor de 1 si se abre una planta en el departamento  $i$ , 0 si no, con  $i \in P$ .
- $z_{jit} \geq 0$  : variable continua que representa el flujo de RSD desde el departamento generador  $j$  hasta la planta ubicada en  $i$  en el año  $t$ , con  $j \in G, i \in P$  y  $t \in T$  (tn/año).
- $ba_{ikt} \geq 0$  : variable continua que representa el flujo de cenizas de fondo (bottom ash) desde la planta ubicada en  $i$  hasta el sitio de disposición  $k$  en el año  $t$ , con  $i \in P, k \in C$  y  $t \in T$  (tn/año).

### Función objetivo

Se busca minimizar los costos totales relacionados a la instalación y operación de las plantas, teniendo en cuenta ingresos, egresos y el valor del dinero en el tiempo durante el ciclo de vida completo del proyecto.

$$\begin{aligned}
 \min f = & \sum_{i \in P} [(a \cdot \sum_{j \in G} z_{ji2080} + b \cdot y_i) \cdot w_i] + \sum_{t \in T} [(\sum_{j \in G} \sum_{i \in P} CT \cdot d_{ji} \cdot z_{jit} + \sum_{k \in C} \sum_{i \in P} CT \cdot l_{ik} \cdot ba_{ikt} \\
 & + \sum_{i \in P} CT \cdot l_{iMontevideo} \cdot Fa \cdot \sum_{j \in G} z_{jit} + \sum_{j \in G} \sum_{i \in P} COP \cdot z_{jit}) \cdot w_i - \sum_{j \in G} \sum_{i \in P} P_e \cdot E_{disp} \cdot z_{jit} \cdot \eta \cdot (1 - C_{int}) \\
 & - \sum_{j \in G} \sum_{i \in P} P_{CredCO_2} \cdot (CO_{2_{ev-relleno}} + CO_{2_{ev-eléctrica fósil}}) \cdot z_{jit} \cdot (1 + tin f)^t
 \end{aligned}$$

Donde:

1.  $(a \cdot \sum_{j \in G} z_{ji2080} + b \cdot y_i)$  representa la suma de los costos de instalación fijos y variables de instalar una planta de incineración en el departamento  $i$ , tomando el flujo máximo alcanzado en 2080.
2.  $\sum_{j \in G} \sum_{i \in P} CT \cdot d_{ji} \cdot z_{jit}$  representa la suma de los costos de transporte de los residuos enviados desde el departamento generador hasta la planta donde se procesan.

3.  $\sum_{k \in C} \sum_{i \in P} CT \cdot l_{ik} \cdot ba_{ikt}$  representa la suma de los costos de transporte de cenizas de fondo desde la planta donde se generan hasta el sitio de valorización o disposición.
4.  $\sum_{i \in P} CT \cdot l_{iMontevideo} \cdot Fa \cdot \sum_{j \in G} z_{jit}$  representa la suma de los costos de transporte de cenizas volantes desde la planta donde se generan hasta el relleno sanitario de seguridad de la CIU en Montevideo.
5.  $\sum_{j \in G} \sum_{i \in P} COP \cdot z_{jit}$  representa la suma de los costos operativos variables de la planta en los años de operación.
6.  $\sum_{j \in G} \sum_{i \in P} Pe \cdot E_{disp} \cdot z_{jit} \cdot \eta \cdot (1 - C_{int})$  representa la suma de los ingresos por la venta de energía eléctrica a un precio  $Pe$ , considerando la eficiencia del proceso  $\eta$  y el consumo interno  $C_{int}$ .
7.  $\sum_{j \in G} \sum_{i \in P} P_{CredCO_2} \cdot (CO_{2_{ev-relleno}} + CO_{2_{ev-eléctrica fósil}}) \cdot z_{jit}$  representa la suma de los ingresos obtenidos por la venta de créditos de carbono correspondientes a las emisiones evitadas por la sustitución del relleno y disminuir el uso de energías fósiles.

Los términos del dos al siete se suman en el total de años de operación y su valor se ajusta teniendo en cuenta la tasa de inflación calculada.

Los términos del uno al cinco se multiplican por el ponderador  $w_p$ , por lo cual no tienen un significado financiero sino que combinan los aspectos económico, social e industrial.

## Restricciones

1. La capacidad mínima y máxima por planta está acotada, en caso de que ésta se abra por lo cual solo es posible procesar residuos en plantas abiertas (restricción de activación).

$$K_{min} \cdot y_i \leq \sum_{j \in G} z_{jit} \leq K_{max} \cdot y_i \quad \forall i \in P, \forall t \in T$$

2. Las plantas deben procesar la totalidad de los RSD generados en todos los departamentos.

$$\sum_{i \in P} z_{jit} = \sum_{j \in G} g_{jt} \quad \forall j \in G, \forall t \in T$$

3. 20% de los residuos tratados se transforman en cenizas de fondo.

$$Fb \cdot \sum_{j \in G} z_{jit} = \sum_{k \in C} ba_{ikt} \quad \forall i \in P, \forall t \in T$$

4. Se prioriza enviar cenizas de fondo a las cementeras (ubicadas en Paysandú, Treinta y Tres y Lavalleja) para su valorización.

$$\sum_{i \in P} ba_{ikt} = Kcem_k \forall k \in \{Paysandú, Treinta y Tres, Lavalleja\}, \forall t \in T$$

5. Las cenizas de fondo restantes se envían al relleno de seguridad de la CIU, ubicado en Montevideo.

$$\sum_{i \in P} ba_{ikt} \leq Kcem_k \text{ tal que } k = Montevideo, \forall t \in T$$

6. El número de plantas a instalar se ve limitado por un número arbitrario, a lo sumo 19.

$$\sum_{i \in P} y_i \leq P_{max}$$

### 4.3. Relevamiento y generación de datos

Para obtener los valores de los parámetros necesarios para la ejecución del modelo, se relevó bibliografía del proceso de incineración, estudios de prefactibilidad de proyectos similares y referencias de plantas WtE a nivel mundial. En otros casos, los datos fueron construidos a partir de cálculos y estimaciones aplicadas al contexto nacional. Dado que el modelado se realiza en la etapa de estudio de prefactibilidad, se reconoce que estos valores presentan un margen de error, cuyo propósito principal es identificar configuraciones viables antes de un análisis financiero y técnico más detallado en etapas posteriores.

Al realizarse la suposición de que la planta de incineración comenzaría a operar a partir del año 2050, tanto la inversión como los costos operativos, de transporte y demás parámetros económicos deben proyectarse a dicha fecha. Esta actualización se aplicó a todos los valores obtenidos, tanto los estimados al día de hoy como aquellos obtenidos de fuentes bibliográficas o estudios previos que presentan datos de años anteriores.

Para cada caso, se consideró el intervalo entre el año del dato y el 2050, aplicando la siguiente fórmula de actualización:

$$Valor \text{ actualizado} = Valor \text{ original} * (1 + tinf)^{(2050 - \text{año dato})}$$

Para estimar la evolución de precios, se utiliza como referencia la inflación histórica de Estados Unidos, dado que los valores considerados se expresan en dólares estadounidenses, obteniendo una tasa de 2.57% anual (los cálculos se detallan en el [Anexo IV](#)).

#### 4.3.1. Estimación inversión

El escalado de costos a diferentes capacidades suele realizarse mediante la regla del exponente 0.6 o “regla del 0.6” (Alpino, 1986):

$$\frac{C_1}{C_2} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{0.6}$$

donde C representa los costos y V la capacidad del equipo o de la planta. Esta relación empírica permite estimar el costo de una instalación para cualquier capacidad a partir de un caso de referencia.

Se toma como referencia el estudio de prefactibilidad desarrollado para una planta de incineración de residuos en Uruguay (Themelis y Diaz Barriga, 2012) en el cual se estima que una planta con capacidad de 640,000 tn/año en Montevideo tendría un costo de 420 millones de dólares (MUSD).

Dado que la regla del exponente 0.6 define una relación no lineal entre el costo y la capacidad instalada, se aproximó la función de costos por una función lineal para preservar la eficiencia computacional y garantizar la utilización de algoritmos lineales de resolución. Este cálculo se detalla en el Anexo V.

### 4.3.2. Estimación costos operativos

Los costos operativos comprenden todos los gastos necesarios para mantener la planta en funcionamiento una vez instalada. Los principales componentes del costo operativo de una planta de incineración son:

- Mano de obra: salarios del personal operativo, técnico y administrativo.
- Mantenimiento: reparaciones, repuestos y servicios externos.
- Insumos operativos: reactivos químicos, agua, lubricantes.
- Costos de disposición: gestión de cenizas de fondo y volantes.
- Control ambiental y cumplimiento normativo: monitoreo de emisiones, licencias, seguros ambientales.
- Costos administrativos e indirectos: servicios generales, gestión, seguros, etc.
- Transporte: traslado de residuos y cenizas.

Cabe aclarar que no se considera el consumo de energía, ya que se autoabastece desde la propia generación eléctrica de la planta.

Para estimar los costos operativos de la planta de incineración, se utiliza como punto de partida el costo operativo propuesto en el estudio de prefactibilidad mencionado (Themelis y Diaz Barriga, 2012). A su vez, con el objetivo de verificar la coherencia de este valor se relevaron los costos operativos reportados para plantas de incineración de características similares a nivel internacional en el Anexo VI. Se concluye de este relevamiento que los valores del estudio de Themelis y Diaz Barriga resultan coherentes para aplicar al presente modelo.

El valor tomado del estudio es el propuesto en la Alternativa 1, compuesta por una planta en Montevideo y otra en Canelones, dado que la capacidad es comparable al volumen de generación estimado en el país en

2080. En dicho estudio, el OPEX total para ambas plantas fue de 36.6 millones de USD para un período de 20 años de operación. Restando el costo asociado a la disposición de cenizas (3.66 millones de USD), se obtiene un OPEX neto de 32.94 millones de USD. Esto equivale a un costo por tonelada de RSD de aproximadamente 33.75 USD/tn para el año 2012. Actualizando este valor hasta 2050, se obtiene un OPEX estimado de 90,8 USD/tn. Este valor se desglosará en sus componentes con un estudio financiero más detallado (Sección 6).

### 4.3.3. Costos de transporte

Para estimar los costos de transporte asociados al traslado de residuos y de cenizas se utilizan como referencia los precios publicados por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) para servicios de transporte de carga en Uruguay (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Institucional, 2025). Los mismos, varían según la distancia anual recorrida por el vehículo y la capacidad del mismo.

En particular, se consideran los precios reportados para camiones de Transporte de Carga General (28 toneladas) la cual se presenta en el Anexo VII. Promediando los valores de referencia, se obtiene un costo de 3,87 \$U/tn·km, valor definido para el año 2025. Si se proyecta a 2050 usando la inflación de EEUU definida previamente, este costo asciende a 7,35 \$U/tn·km, lo que equivale a 0.183 USD/tn·km.

### 4.3.4. Energía eléctrica generada

El valor de energía disponible en los residuos depende de la composición de la mezcla. En el Anexo VIII se detallan los valores de poder calorífico inferior (PCI) aportado por cada fracción, obtenidos del estudio de Caracterización de Residuos Sólidos Urbanos con Fines Energéticos (LKSUR, 2013).

Ponderando el PCI según la proporción de cada componente, se obtiene un valor promedio de energía disponible de 12,6 MJ/kg, lo que equivale a 3,5 MWh/tn de residuo procesado.

Cabe aclarar que el proceso de combustión y generación de energía eléctrica presenta pérdidas importantes. En el horno se estima una pérdida del 10%, en el sistema caldera–turbina del 65% y en el consumo interno de la planta alrededor del 5%. Esto se corresponde a una eficiencia neta de generación de energía eléctrica de alrededor del 20% para la planta modelo, lo cual es un enfoque conservador, dado que el proceso de generación de energía eléctrica a partir de la incineración de residuos suele tener una eficiencia global de 20-30% (Morrison Hershfield, 2023) (Lombardi et al., 2015). Este valor se acerca al límite superior en caso de recircular el calor de la combustión, proyectándose incluso un aumento de esta eficiencia en la medida en que se implementen mejoras tecnológicas en el diseño y operación de las plantas. En la Figura 4.3 se presenta un diagrama con el balance de energía mencionado.

Luego de consideradas las pérdidas, se obtiene un valor de energía eléctrica neta de 0.7 MWh/tn de residuo procesado. Como se observa en el Anexo VIII el mayor aporte de energía resulta de las fracción de plásticos. Fracciones como el vidrio y los metales representan un aporte energético negativo.

Se observa cómo la eficiencia del proceso aumentaría significativamente al darle un uso al calor generado, dado que el cociente entre la energía aprovechada y la energía contenida en los residuos aumenta. Dada la falta de demanda de un consumidor puntual –y considerando las restricciones de ubicación que esto

implicaría– o de servicios como calefacción distrital, se opta por aprovechar únicamente la energía eléctrica y asumir las pérdidas de energía térmica generadas. El aprovechamiento de la energía térmica generada se tendrá en cuenta como un análisis de sensibilidad del modelo ([Sección 5](#)).

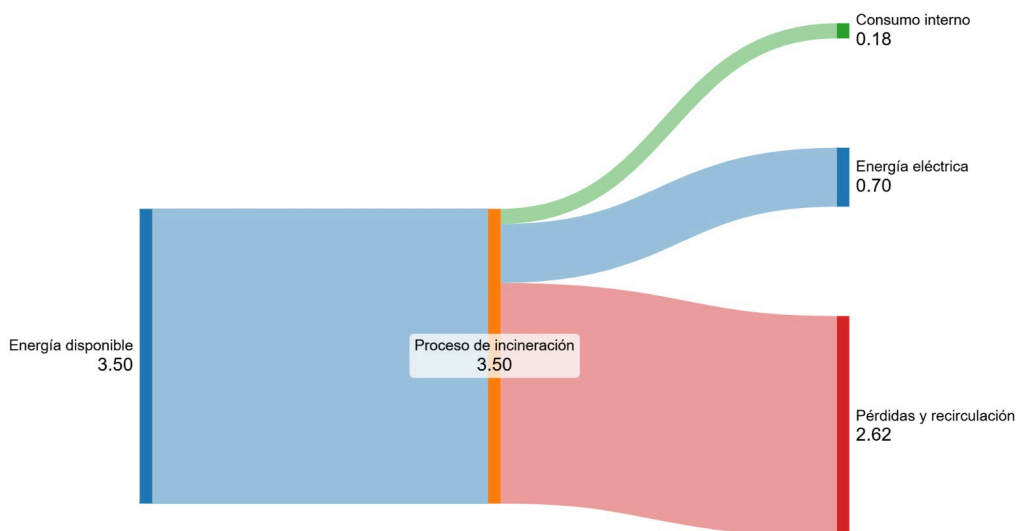


Figura 4.3: Valores de balance de energía (MWh/tn RSD) de la planta modelada en 2050 (Elaboración propia)

#### 4.3.5. Precio de venta de energía

El precio de venta de energía eléctrica se toma al promedio del precio spot sancionado. Para el modelo, se utilizó un precio de venta de 70 USD/MWh, que corresponde al promedio del precio Spot para mayo del 2025 (Administración del mercado eléctrico, 2025). Proyectando este valor a 2050, se obtiene un precio aproximado de 132 USD/MWh. Este valor se ajustará más adelante en el análisis financiero con un promedio que abarca un horizonte temporal más amplio ([Sección 6](#)).

Otros valores considerados en estudios alternativos oscilan entre 100 USD/MWh (Themelis y Diaz Barriga, 2012) y 65 USD/MWh (Ríos et al., 2024).

#### 4.3.6. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)

La instalación de una planta de incineración de residuos permite reducir las emisiones de dióxido de carbono a través de dos mecanismos: en primer lugar, se evita la generación de metano ( $\text{CH}_4$ ) asociada al tratamiento en RS y en segundo lugar, la energía eléctrica generada sustituye el uso de combustibles fósiles. Los cálculos correspondientes a las emisiones asociadas se presentan en el [Anexo IX](#) y se hicieron siguiendo los lineamientos del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006).

## Sustitución del relleno sanitario

La incineración de residuos sólidos urbanos evita emisiones asociadas a la disposición en rellenos sanitarios. Esto se debe a que el proceso de descomposición de los residuos en RS genera metano ( $\text{CH}_4$ ), que tiene un potencial de generación de efecto invernadero (GWP) 28 veces más potente que el anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ) emitido en el proceso de incineración (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006).

Por un lado, las emisiones asociadas a la incineración varían según la fracción de residuos a incinerar, sobre todo con su contenido de carbono (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006). Mediante los lineamientos del IPCC, se estiman las emisiones de la incineración correspondiente a la composición de RSD estudiada ([Figura 3.4](#)), resultando en un aproximado de  $0.46 \text{ tn } \text{CO}_2/\text{tn RSD}$ .

Análogamente, se estiman las emisiones asociadas a la disposición en rellenos sanitarios. Este valor depende fuertemente de la eficiencia en la recuperación y oxidación del metano, así como las tecnologías de compactación, cobertura y la profundidad de la capa de residuos. (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006). Para asegurar un enfoque conservador en las emisiones de GEI evitadas y evitar sobreestimaciones, se estudian dos escenarios de RS bien gestionados, con recuperación de metano y cobertura de suelo para oxidación. Así, se obtiene un rango de valores de entre 1.25 y  $0.69 \text{ tn } \text{CO}_{2\text{-eq}}/\text{tn RSD}$ . El límite inferior corresponde a un relleno ideal con 50% de recuperación de metano (Caso R=50% en la [Tabla 4.2](#)). A su vez, el límite superior corresponde a un relleno con 10% de recuperación de metano, representando un escenario de buena gestión pero más alineado a la realidad de la región (Caso R=10% en la [Tabla 4.2](#)).

En promedio, considerando el promedio de ambos escenarios, se estima que la incineración evita aproximadamente  $0,5 \text{ tn } \text{CO}_{2\text{-eq}}/\text{tn RSD}$  respecto a un RS bien gestionado, parámetro que se utilizará en el modelo.

Tabla 4.2: Estimación de las emisiones asociadas a cada alternativa, con la composición de RSD del caso de estudio. Referirse al [Anexo IX](#) para desarrollo del cálculo.

	RS	INCINERACIÓN	EVITADAS
	$\text{tn } \text{CO}_{2\text{-eq}}/\text{tn RSD}$	$\text{tn } \text{CO}_2/\text{tn RSD}$	$\text{tn } \text{CO}_2/\text{tn RSD}$
<b>Caso R=10%</b>	1.25	0.46	0.51
<b>Caso R=50%</b>	0.69		

## Sustitución del uso de energías fósiles

La energía eléctrica generada a partir de la incineración de residuos que se inyecta a la red tiene el potencial de desplazar el uso de fuentes de energía fósiles. Bajo el supuesto de que toda la energía generada sustituye el uso de energías fósiles basadas en fuel oil, se evita una emisión de  $0,19 \text{ CO}_2 \text{ tn}$  por cada tonelada de RSD incinerado (ver [Anexo IX](#)).

De la misma manera, la energía térmica producida puede sustituir el consumo de combustibles fósiles en procesos industriales, de calefacción o refrigeración. En el caso de aprovecharse la energía térmica del proceso, se estima que se evitarían 0,44 tn CO<sub>2</sub> por cada tonelada de RSD incinerado (ver [Anexo IX](#)). Sin embargo, a diferencia de la electricidad, la sustitución de energía térmica depende de la proximidad a los consumidores, ya que el transporte de vapor tiene restricciones de distancia. Por tanto, la reducción de emisiones asociada al aprovechamiento de la energía térmica solo se logra si la planta se ubica junto al consumidor, por lo que este escenario se estudiará posteriormente como un análisis de sensibilidad del modelo ([Sección 5](#)).

#### 4.3.7. Créditos de carbono

El mercado de créditos de carbono constituye un mecanismo de compensación para las emisiones de gases de efecto invernadero que una organización no logra reducir completamente mediante mejoras operativas o la adopción de nuevas tecnologías. A través de este sistema, las empresas compensan sus emisiones mediante créditos de carbono (certificados negociables que representan la reducción o eliminación de una tonelada de dióxido de carbono equivalente), financiando proyectos que generan reducciones verificadas de carbono.

El objetivo central de este mercado es otorgar viabilidad económica a iniciativas de mitigación que, en ausencia de este incentivo, probablemente no se desarrollarían debido a su baja rentabilidad. De este modo, se promueve un flujo de recursos desde organizaciones interesadas en disminuir o compensar su huella de carbono hacia proyectos con impacto ambiental positivo, contribuyendo así a los esfuerzos globales de mitigación del cambio climático (Fernanda Hovarth (Carbosur), comunicación personal, Febrero, 2026).

Empresas en Uruguay como Carbosur (mide la huella de carbono de sus clientes, los asesora para reducir emisiones y compensar mediante créditos de carbono) o The Carbon Sink (desarrolla herramientas digitales para la gestión y reducción de emisiones) ya aplican estos conceptos.

Considerando un valor conservador de mercado actual de 12 USD/crédito (Scherz Brener, 2024) y actualizando a precios de 2050, se obtiene un valor de aproximadamente 23 USD/tn de CO<sub>2</sub>, parámetro que se utiliza para la valoración económica de los créditos asociados al proyecto. Se tomará el supuesto de que todas las toneladas de dióxido de carbono evitadas se venderán como créditos de carbono, ajustando posteriormente este parámetro en el análisis de sensibilidad.

#### 4.3.8. Generación de residuos por departamento

Dado que no hay estudios nacionales que cuantifiquen la generación de residuos domiciliarios se debe realizar una estimación en función al crecimiento demográfico nacional. Para esto, se parte de la generación promedio de residuos domiciliarios en toneladas por día para cada departamento para el año 2011 (CSI Ingenieros & Estudio Pittamiglio, 2011), de manera de utilizar como base las mismas cifras de generación de residuos que utiliza el PNGR. De esta manera, se calcula el aporte relativo de cada departamento, expresado como porcentaje de la generación total.

Posteriormente, a partir de la proyección de generación de RSD realizada ([Figura 3.1](#)) y del porcentaje de residuos destinados a incineración dadas las metas de valorización ([Figura 3.4](#)), se estima la cantidad de residuos que generará y aportará cada departamento, que se esquematizan en la [Figura 4.4](#). Estos valores se detallan en el [Anexo X](#).

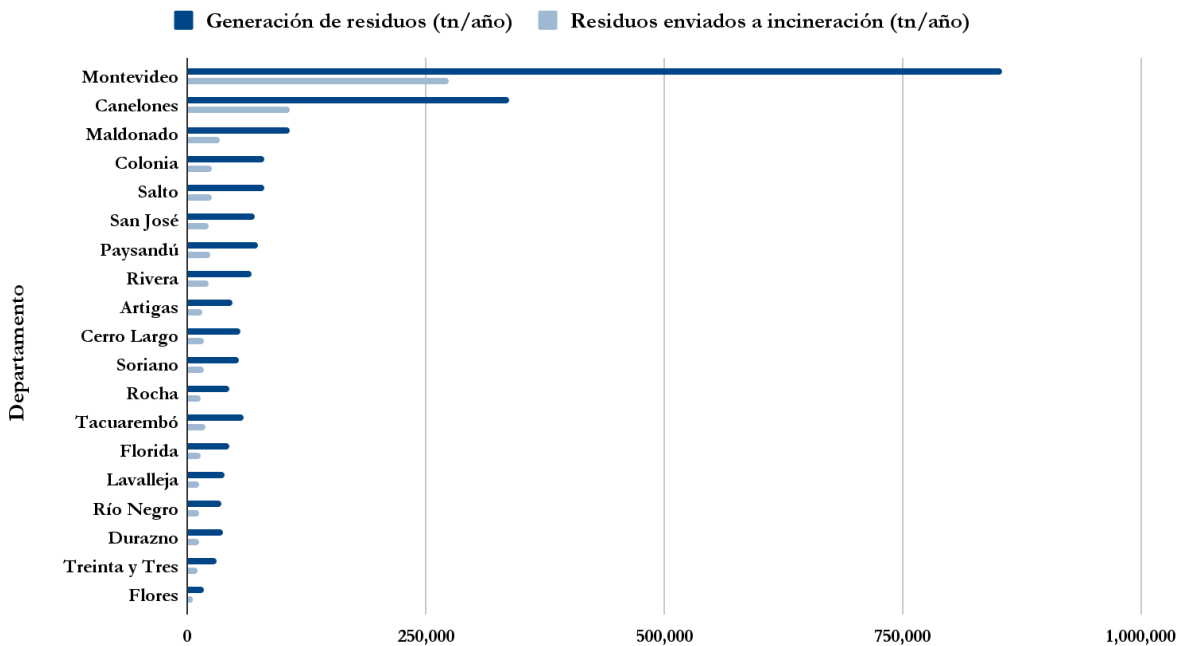


Figura 4.4: RSD generados y enviados a incineración por departamento en 2050 (Elaboración propia).

#### 4.3.9. Distancias entre departamentos

Se determinaron las distancias entre cada uno de los departamentos con el objetivo de evaluar, más adelante, los costos de transporte desde el punto de generación hasta el punto de procesamiento. Para simplificar el análisis, se considera que tanto la generación como el procesamiento se concentran en las capitales departamentales. Las distancias fueron obtenidas mediante Google Maps, y se anexan en el Anexo XI.

### 4.4. Resultados

Al implementar el modelo matemático se exploraron múltiples configuraciones –incluyendo variaciones en el número de plantas permitidas y en los pesos asignados al factor económico, social e industrial– con el objetivo de comprender cómo se modifican las soluciones óptimas ante cambios en restricciones o parámetros claves. Esto permite no solo detectar las alternativas más eficientes, sino también observar cómo se redistribuiría el tratamiento de residuos bajo enfoques más centralizados o descentralizados. A continuación se presentan las alternativas estudiadas y los resultados obtenidos.

La alternativa I corresponde a la solución óptima del modelo, sin restricciones de capacidad ni número de plantas. Como era de esperarse, se concluye que la alternativa de abrir una sola planta en Montevideo es la más conveniente. Esto se debe a que el ahorro en costos de transporte que se obtendría al incorporar una planta adicional no compensa la inversión requerida para su instalación. En el análisis de sensibilidad se

estudia qué tanto deberían variar los parámetros del modelo para que se opte por un departamento que no sea Montevideo (Sección 5).

En las Figuras 4.5 y 4.6 se observa la ubicación óptima de la planta para cada alternativa, la cual se representa mediante el dibujo de una planta. Por otro lado, se identifican los sitios de disposición y valorización de cenizas (en Montevideo, Paysandú, Treinta y tres y Lavalleja) mediante un icono de contenedor de basura. Por último, las líneas indican el flujo de residuos desde cada departamento donde se generan hacia el destino de procesamiento. El grosor de las líneas representa el volumen de residuos procesado, siendo mayor en los flujos con mayor cantidad enviada.

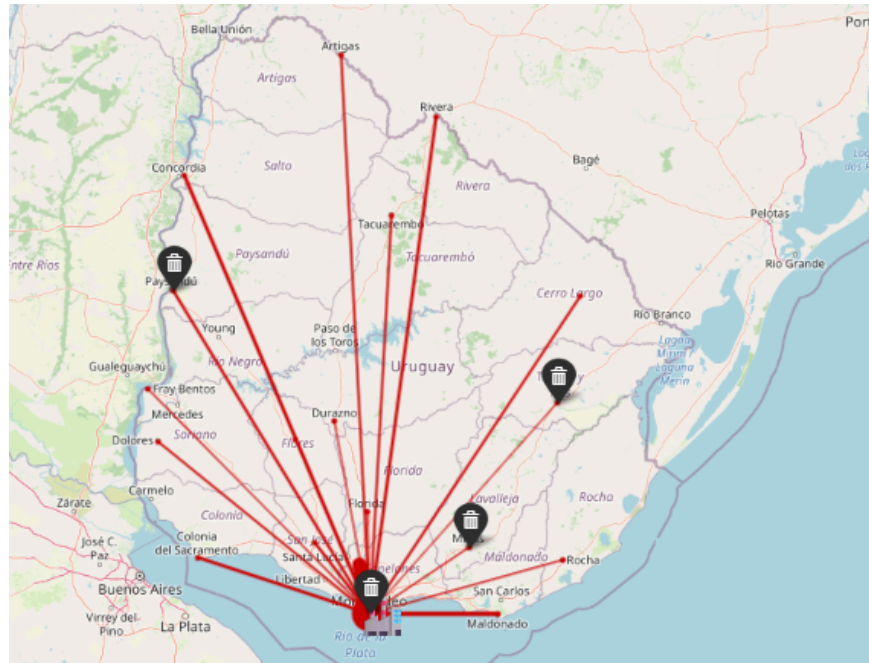


Figura 4.5: Alternativa I (Elaboración propia).

De abrir una planta en Montevideo, la opción más viable sería la instalación sobre el predio de Felipe Cardoso, dado que la zona ya se encuentra impactada tanto social como ambientalmente (Carlos Roda, comunicación personal, Octubre 27, 2025).

Una vez obtenido este resultado y con el objetivo de hacer un análisis más completo que abarque al resto de los departamentos, se estudia el escenario de apertura de dos plantas, forzando la restricción de número de plantas a dos. De este modo, se obtiene la alternativa II, en la que se incorpora la apertura de una planta de menor procesamiento en Tacuarembó que procesa los residuos generados por los departamentos del norte del país (Salto, Paysandú, Rivera, Artigas Cerro Largo y Tacuarembó).

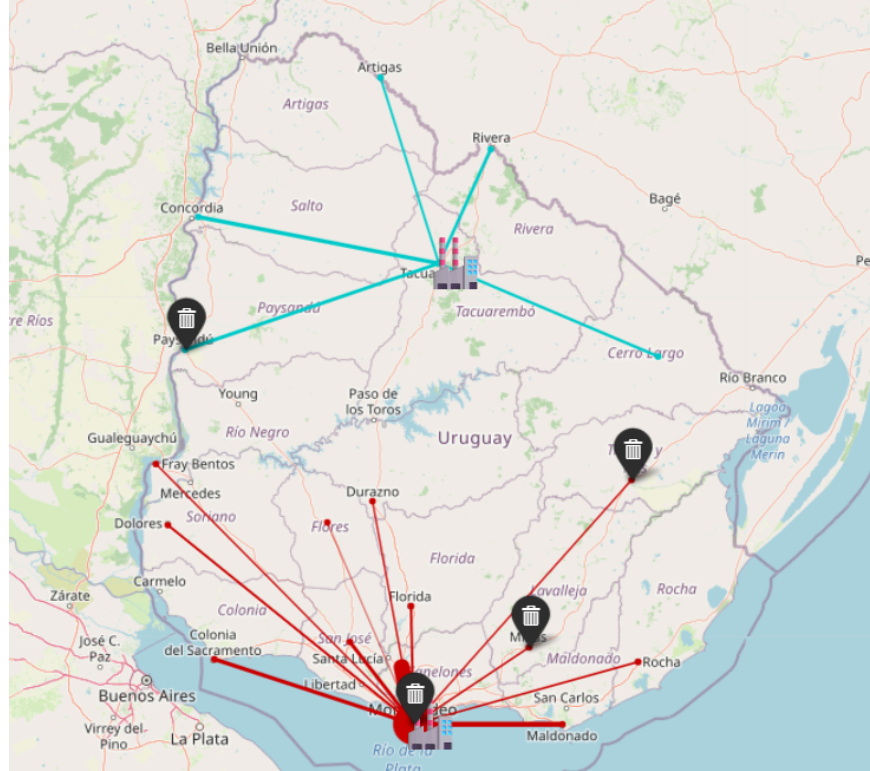


Figura 4.6: Alternativa II (Elaboración propia).

En la Tabla 4.3 se presentan los resultados numéricos obtenidos a partir de diferentes ejecuciones del modelo matemático. En el Anexo XII se detallan las asignaciones departamento-planta para ambas alternativas, es decir, cuántos RSD se envían desde cada departamento generador hacia cada planta.

Tabla 4.3: Alternativas de instalación de plantas de incineración.

	Alternativa I	Alternativa II	
Número de plantas	1	2	
Ubicación	Montevideo	Tacuarembó	Montevideo
Capacidad (tn/año)	840,000	150,000	690,000
Nº líneas	4	1	3
Procesamiento por horno (tn/día por línea)	575	411	630
Valor función objetivo (*)	-557,992,604	-404,483,543	

(\*) Los valores obtenidos en la función objetivo no tienen significado financiero dado que la misma es una minimización de costos, ponderados por  $w$ , a los cuales se les restan ingresos sin ponderar (dado que son independientes de la ubicación). Este valor solamente sirve para comparar departamentos entre sí para los mismos valores de  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ .

El cálculo del número de líneas por planta de la Tabla 4.3 surge de un relevamiento de volumen procesado por línea en más de 100 plantas de incineración de RSD a nivel mundial, cuyo resultado se presenta en el Anexo XIII. Asimismo, la elección de número de líneas por alternativa se realiza para obtener los valores más cercanos a la media.

La planta de Montevideo tiene capacidad instalada para autoabastecerse y además inyectar hasta 67 MW de energía eléctrica a la red. Considerando el consumo eléctrico anual per cápita de Uruguay en 2022, esta potencia equivale al suministro de la demanda residencial de aproximadamente 178 mil uruguayos (Instituto Nacional de Estadística, 2023).

## 4.5. Propuesta de Planta

Una vez obtenidos los resultados de capacidad del modelo, se elaboró el layout que se presenta en la Figura 4.8 para la alternativa I con cuatro líneas de operación. El mismo, permite visualizar de forma integrada los pasos del proceso de incineración, la distribución del personal y la organización espacial de las instalaciones. El cuadro de referencias de la Figura 4.8 se presenta en la Figura 4.9.

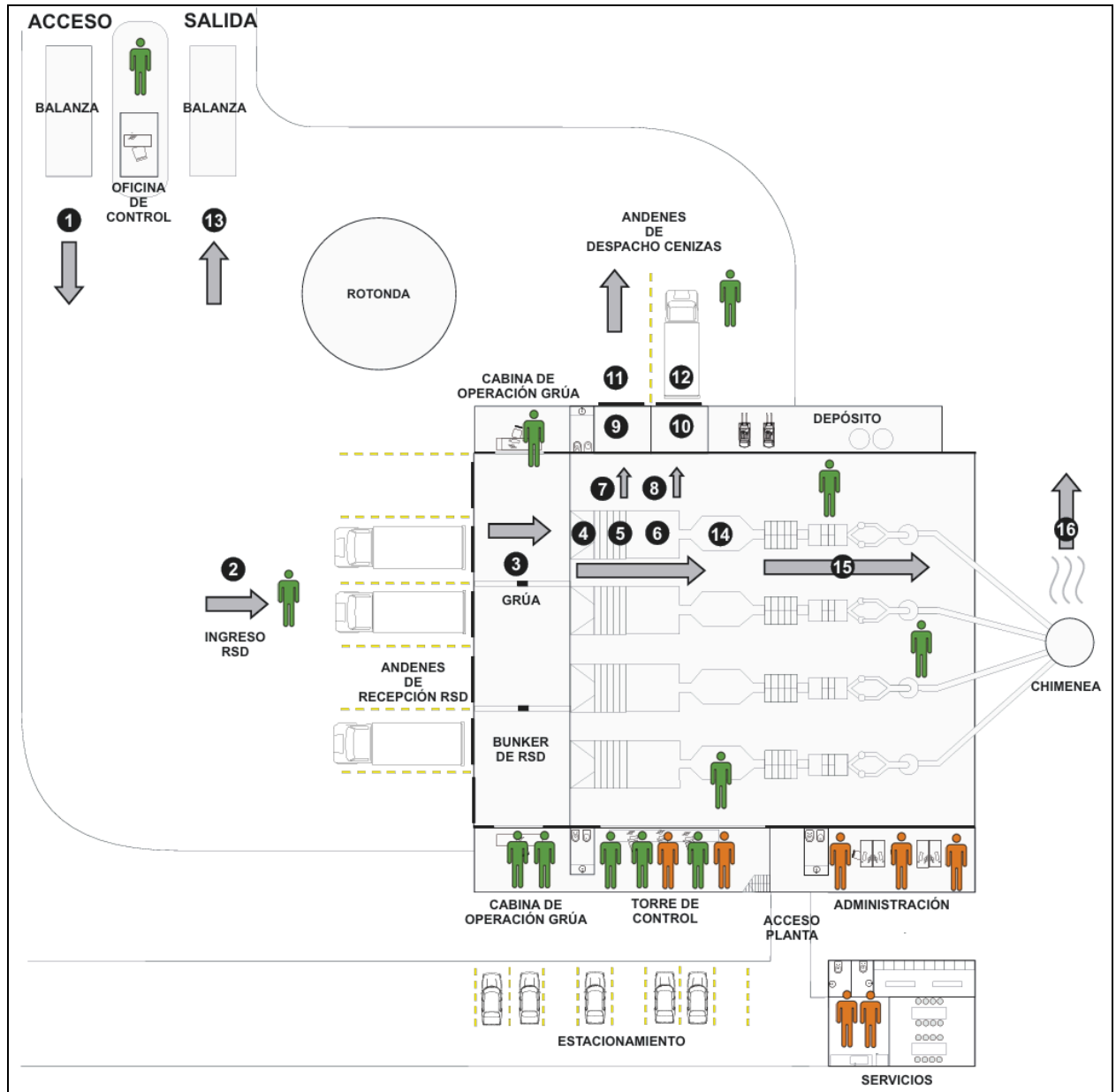


Figura 4.8: Layout esquemático de la planta de incineración (Elaboración propia).

	MANO DE OBRA FIJA
	MANO DE OBRA ROTATIVA
1	INGRESO DE RSD A PREDIO
2	DESCARGA DE RSD AL BUNKER
3	TRANSPORTE DE RSD A SISTEMA DE ALIMENTACIÓN EN GRÚA
4	TOLVA DE ALIMENTACIÓN
5	PARRILLA
6	CALDERA
7	GENERACIÓN BOTTOM ASH
8	GENERACIÓN FLY ASH
9	BUNKER DE BOTTOM ASH
10	BUNKER DE FLY ASH
11	DESPACHO DE BOTTOM ASH
12	DESPACHO DE FLY ASH
13	SALIDA CAMIONES RSD Y CENIZAS
14	TURBINA
15	SISTEMA DE TRATAMIENTO DE GASES
16	EMISION DE GASES

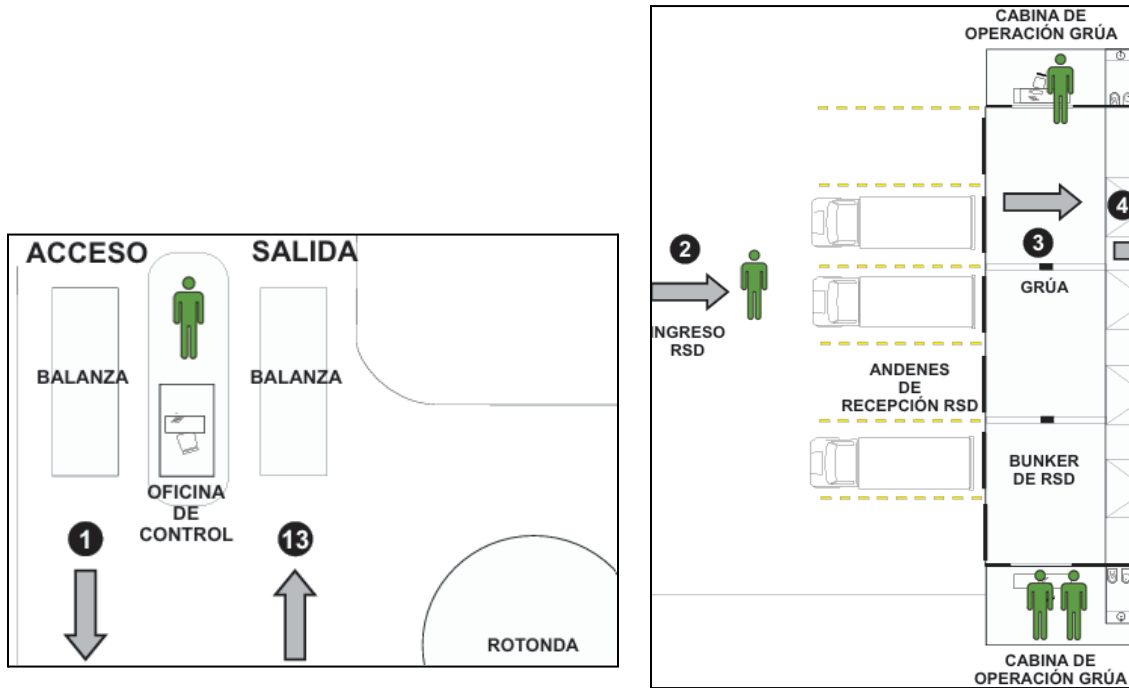
Figura 4.9: Cuadro de referencias del Layout de la Figura 4.8 (Elaboración propia).

En primer lugar, se identifican los flujos de camiones de ingreso de residuos. Los vehículos acceden al predio, y tanto en el ingreso como en la salida son pesados en balanzas ubicadas en los accesos (Figura 4.10). Posteriormente, los camiones se dirigen a los andenes correspondientes, donde se realiza la descarga de los RSD. Los residuos descargados son almacenados en el búnker de residuos, sobre el cual se disponen dos grúas puente operadas desde cabinas elevadas (Figura 4.11). Estas grúas permiten la alimentación controlada del sistema de combustión, ingresando los residuos hacia el sistema de alimentación de las cuatro líneas de operación de la planta.

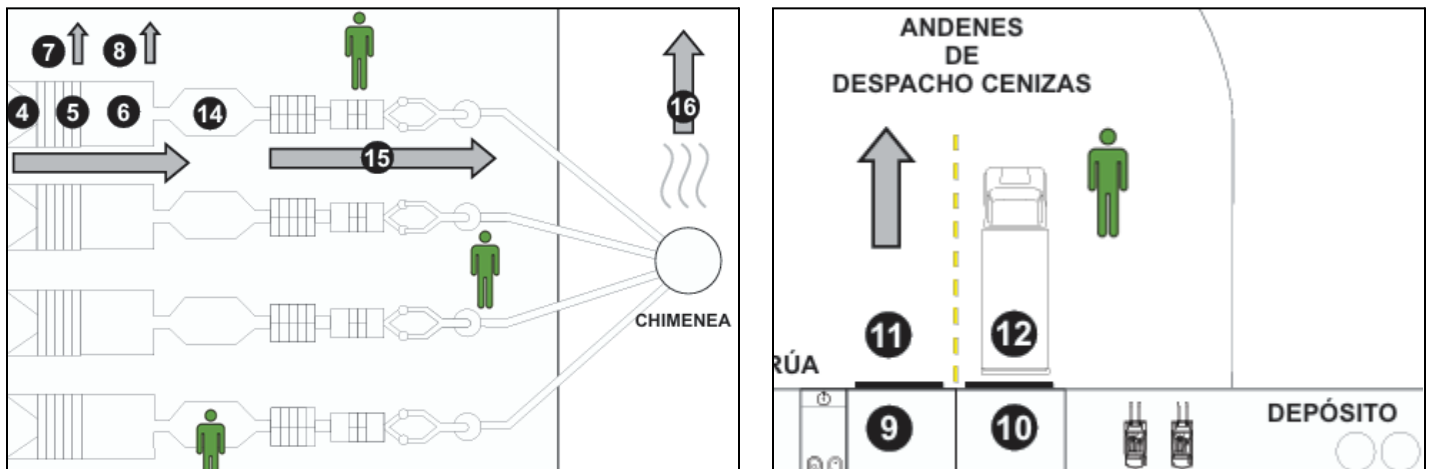
Una vez introducidos en el proceso, los residuos atraviesan sucesivamente la parrilla de combustión, la caldera y la turbina, donde el vapor generado se transforma en energía eléctrica que es posteriormente inyectada a la red (Figura 4.12). Los gases generados durante la combustión son conducidos al sistema de tratamiento de gases, donde se filtran y neutralizan los contaminantes, asegurando el cumplimiento de los límites de emisión. Finalmente, los gases tratados son evacuados a la atmósfera a través de la chimenea. Las cenizas resultantes del proceso son recolectadas, almacenadas en sus respectivos búnkeres y despachadas mediante camiones a través de los andenes de salida (Figura 4.13).

Adicionalmente, el layout permite visualizar la distribución del personal dentro de la planta. Como se aclara en la Figura 4.9, los operarios representados en color verde corresponden a puestos de operación con turnos rotativos, ocupados de forma continua (una persona por turno de 8 horas), mientras que los operarios señalados en naranja representan puestos de turno fijo, como el personal administrativo y la jefatura de planta. Se propone una torre de control, donde se concentra gran parte del personal operativo encargado del monitoreo y supervisión de la producción, así como oficinas administrativas y un edificio anexo de servicios,

que incluye vestuarios, baños y áreas de comedor (Figura 4.14). El detalle del personal requerido se desarrolla con mayor profundidad en la Sección correspondiente a mano de obra (Sección 6).



Figuras 4.10 y 4.11: Sector de balanzas, andenes de recepción y bunker de residuos (Elaboración propia)



Figuras 4.12 y 4.13: Sistema de combustión y tratamiento de gases y zona de almacenamiento y despacho de cenizas (Elaboración propia).

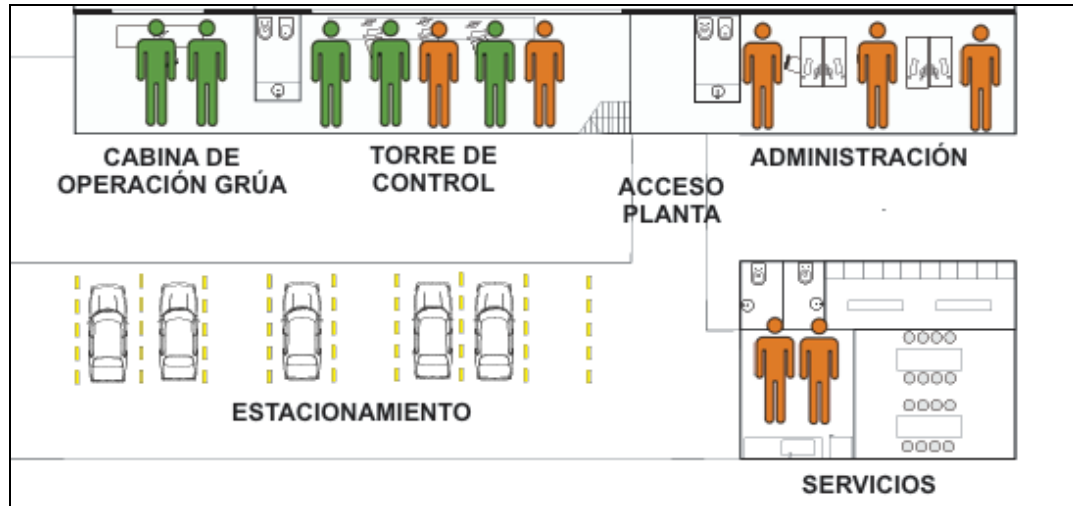


Figura 4.14: Torre de control, oficinas y edificio anexo (Elaboración propia).

Por otro lado, tal como se aprecia en la Figura 4.15, el entorno actual de Felipe Cardoso se caracteriza por la presencia dominante de grandes montículos de residuos, que constituyen un elemento visual central del ecosistema. Con el objetivo de evidenciar el impacto paisajístico asociado a la instalación de una planta de incineración en esta zona, se construye el render de la Figura 4.16, el cual permite contrastar la situación existente con la construcción de la planta, dicha imagen fue generada mediante herramientas de inteligencia artificial (Gemini).



Figura 4.15: Fotografía de Felipe Cardoso actualmente, donde se observa la acumulación de residuos. (La Diaria, 2021).



Figura 4.16: Renderización de la instalación de la planta de incineración en el predio de Felipe Cardoso (Elaboración propia con Google Gemini)

## 5. Análisis de sensibilidad

Luego de ejecutar el modelo con los datos de referencia y obtener una solución base, se optó por llevar a cabo un análisis de sensibilidad. Esto permite estudiar cómo la variación en los valores de determinados parámetros incide sobre los resultados obtenidos. De esta manera, se logra reconocer qué variables tienen mayor influencia en la solución y evaluar la robustez del modelo ante distintos escenarios.

### 5.1. Capacidad de plantas

En este caso, se modifica la capacidad máxima posible de tratamiento por planta, con el objetivo de estudiar cómo influye este parámetro en la configuración final del sistema. Se utilizaron los valores de ponderación definidos por los expertos consultados, con  $\alpha = 0.51$ ,  $\beta = 0.25$  y  $\gamma = 0.24$ .

En el escenario con capacidad ilimitada, es decir, sin restricción en el volumen que puede procesar una única instalación, el modelo selecciona abrir una sola planta en Montevideo, la cual recibe la generación de residuos de todos los departamentos del país.

Al restringir la capacidad a 700,000 toneladas por año, se observa que la gran mayoría de los residuos sigue siendo atendida desde Montevideo, con una planta de aproximadamente 666,000 tn/año, mientras que el remanente, correspondiente a un volumen relativamente pequeño (40,000 tn/año), es absorbido por una segunda planta ubicada en Paysandú, cubriendo así las necesidades de una fracción menor en la zona norte. Esto indica una clara priorización de la zona sur del país, donde se encuentran los principales generadores, mientras que la cobertura del norte se resuelve mediante una instalación complementaria de menor tamaño.

En el escenario más restrictivo, con una capacidad máxima de 500,000 toneladas por año por planta, el modelo decide ubicar en Montevideo una instalación de 500,000 tn/año que atiende la zona sur-este (Maldonado, Lavalleja, Rocha, Canelones y Montevideo), mientras que el volumen restante se deriva a una segunda planta en Flores, que se encarga de cubrir a todos los demás departamentos, desde Colonia, San José y Florida hacia el sur, hasta Rivera, Artigas y Salto en el norte, como se puede visualizar en la Figura 5.1 a continuación. En este caso, la localización de la segunda planta no se sitúa tan al norte como en el escenario anterior, sino que se desplaza hacia el centro del país. Esto se debe a que, al restringir la capacidad de la planta ubicada en el sur, parte de la demanda de esa región debe ser atendida por la segunda planta, lo que desplaza su localización hacia el sur.

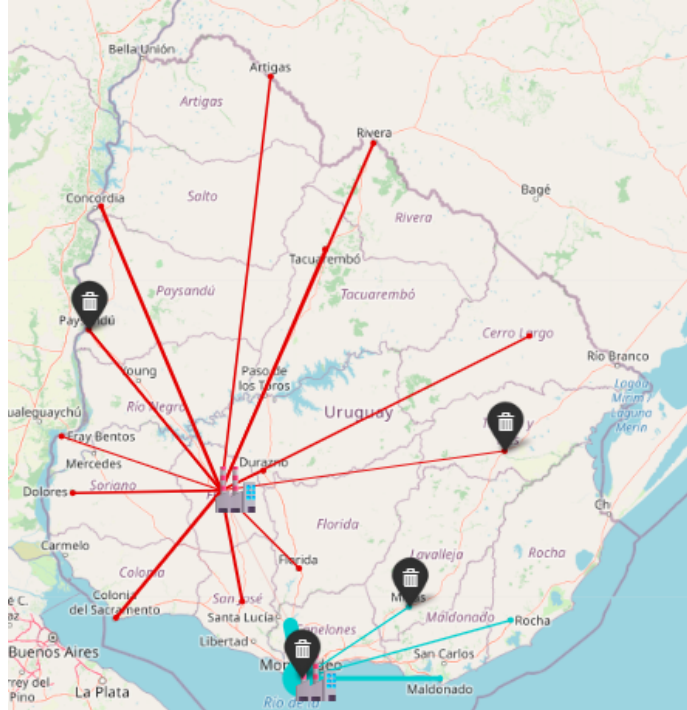


Figura 5.1: Resultado con restricción de capacidad máxima 500,000 ton/año (Elaboración propia).

## 5.2. Factores ponderadores

En este estudio se evalúan distintas combinaciones de los parámetros que ponderan los factores económico, industrial y social, mediante una tabla tipo semáforo que permite visualizar de forma comparativa cómo varía el resultado del modelo frente a cambios en su ponderación relativa.

Para realizar este análisis de sensibilidad, se distinguen dos casos principales y tres escenarios dentro de cada uno. En el primer caso la capacidad máxima de las plantas no se ve limitada, mientras que en el segundo la capacidad máxima se establece en 500.000 tn/año. Lo que se busca con esto es forzar al modelo a tomar una decisión frente a la ubicación de más de una planta, que permita conocer qué departamentos traccionan más según las condiciones dadas, y que no elija únicamente a Montevideo.

### Escenario 1

La Tabla 5.1 corresponde al primer análisis, donde se deja el factor económico ( $\alpha$ ) fijo en 0, y se varían simultáneamente el factor industrial ( $\beta$ ) y el social ( $\gamma$ ) entre 0 y 1, uno comenzando desde un extremo y el otro del opuesto. Los valores muestran las capacidades de las plantas en cada caso en ton/año. Se puede observar como Montevideo es seleccionado en ambos casos, y para todo el rango de combinaciones, excepto cuando solo se tiene en cuenta el factor social. Esto se debe a que además de ser el foco principal de generación de residuos, representando cerca del 40% de la generación total, califica muy alto en el ranking para ambos factores tenidos en cuenta, mientras que Durazno es el departamento con mejor puntuación en cuanto a lo social. Por otro lado, cuando la capacidad se ve limitada a 500.000 tn/año y es necesario instalar

dos plantas, se activan tanto Durazno, Flores, y San José en combinación con Montevideo. Durazno se elige al priorizar únicamente el factor social (igual que cuando la capacidad no está limitada), dado que clasifica primero en este ranking. Existe un tramo intermedio en el cual comienza a pesar más el factor industrial que el social, donde surge Flores como una opción atractiva. Esto se debe a que también cuenta con un factor social atractivo, pero significa una fuerte ventaja en el factor industrial respecto a Durazno. Luego, cuando se revierte la situación, y el factor industrial cobra protagonismo, San José es elegido. Esto resulta lógico, dado que San José cuenta con el segundo mejor factor industrial, y sucede que al considerar únicamente el término industrial, escoge a los dos departamentos mejor rankeados en este aspecto, Montevideo y San José.

Tabla 5.1: Análisis de sensibilidad para el factor económico  $\alpha = 0$  (valores en tn/año).

Alpha = 0

---

Capacidad máxima no acotada

---

Departamento	Betha										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
	Gamma										
Departamento	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
Durazno	773,349	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flores	0	271,908	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Montevideo	0	501,441	773,349	773,349	773,349	773,349	773,349	773,349	773,349	773,349	773,349
San José	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

---

Capacidad máxima 500,000 tn/año

---

Departamento	Betha										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
	Gamma										
Departamento	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
Durazno	462,832	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flores	0	273,349	273,349	273,349	273,349	273,349	0	0	0	0	0
Montevideo	310,517	500,000	500,000	500,000	500,000	500,000	500,000	500,000	500,000	500,000	500,000
San José	0	0	0	0	0	0	273,349	273,349	273,349	273,349	273,349

## Escenario 2

En la Tabla 5.2 se evalúa el impacto del factor económico vs el industrial, y se deja fijo en 0 el factor social. Como se puede observar en la tabla, en el primer caso la única opción es abrir una planta en Montevideo. Montevideo es el departamento mejor rankeado en cuanto al factor industrial, y como se vió en el resultado del modelo, es la mejor opción en cuanto a costos. Por otro lado, cuando se limita la capacidad de la planta, el modelo se ve obligado a abrir una segunda planta, la cual se ubica en San José debido a su poderoso factor industrial, excepto cuando el ponderador económico alpha es 0.9 o 1, que por cuestiones de localización más cercana a las porciones producidas en el norte del país, Flores aparece como una alternativa.

Tabla 5.2: Análisis de sensibilidad para el factor social  $\gamma = 0$  (valores en tn/año).

Gamma = 0

Capacidad máxima no acotada

		Alpha										
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
		Betha										
Departamento		1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
Flores		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Montevideo		773,349	773,349	773,349	773,349	773,349	773,349	773,349	773,349	773,349	773,349	773,349
San José		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Capacidad máxima 500,000 tn/año

		Alpha										
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
		Betha										
Departamento		1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
Flores		0	0	0	0	0	0	0	0	0	273,349	273,349
Montevideo		500,000	500,000	500,000	500,000	500,000	500,000	500,000	500,000	500,000	500,000	500,000
San José		273,349	273,349	273,349	273,349	273,349	273,349	273,349	273,349	273,349	0	0

### Escenario 3

En la Tabla 5.3 se presentan los resultados del último análisis, donde es el factor industrial el que se aparta. En esta situación Durazno toma protagonismo, y se opta por instalar una única planta en este departamento cuando gamma es 1, igual que en el escenario 1 (caso alpha = 0). Al ir disminuyendo gamma y aumentando alpha surge Montevideo y la capacidad de la planta de Durazno se ve reducida, hasta que Tacuarembó entra como una opción intermedia, que permite contemplar el término social, dado su buen ranking y economizar los costos de transporte a medida que toma valor el foco económico, dado que se ubica más hacia el norte del país y puede absorber las fracciones de ese sector. Al limitar la capacidad, Tacuarembó no es una alternativa, dado que Montevideo no puede consumir todo lo generado en la región central y sur del país y Durazno es una alternativa más económica en cuanto a los costos de transporte respecto a Tacuarembó. Luego, cuando el factor económico es el de mayor preponderancia, es Flores quien se activa otra vez por su localización, como en el escenario 2 (caso gamma = 0). Otra vez se ve el impacto de las fracciones del sur en el costo de transporte, traccionando hacia el sur la ubicación de la segunda planta.

Tabla 5.3: Análisis de sensibilidad para el factor industrial  $\beta = 0$  (valores en la tabla en tn/año).

Betha = 0

---

Capacidad máxima no acotada

---

Alpha											
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Gamma											
Departamento	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
Durazno	773,349	285,798	271,908	246,483	0	0	0	0	0	0	0
Flores	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Montevideo	0	487,551	501,441	526,866	634,687	634,687	773,349	773,349	773,349	773,349	773,349
Tacuarembó	0	0	0	0	138,662	138,662	0	0	0	0	0

---

Capacidad máxima 500,000 tn/año

---

Alpha											
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Gamma											
Departamento	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
Durazno	462,832	285,798	273,349	273,349	273,349	273,349	273,349	273,349	273,349	0	0
Flores	0	0	0	0	0	0	0	0	0	273,349	273,349
Montevideo	310,517	487,551	500,000	500,000	500,000	500,000	500,000	500,000	500,000	500,000	500,000
Tacuarembó	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Como conclusión final se observa que si bien la alternativa principal es abrir una sola planta en Montevideo, en caso de ser necesario abrir dos plantas o que Montevideo no fuera una opción viable, las alternativas más atractivas son:

- Durazno, debido a su factor social de bajo impacto en la población.
- San José, debido a que su puntuación en el término industrial lo coloca en una posición favorable para recibir una planta.
- Flores, debido a su localización estratégica en el sur del país que permite además recoger las porciones del norte a un menor costo, respetando un equilibrio entre sus flujos de entrada.

### 5.3. Eficiencia de los planes

En este estudio se analiza el efecto de reducir en un 50% el grado de cumplimiento de los objetivos de valorización de residuos propuestos anteriormente (Sección 3). Dado que el caso base se posiciona en un escenario muy optimista, esto permite evaluar qué ocurriría si dichas metas no se alcanzan en su totalidad, generando un mayor remanente de residuos a ser enviado a incineración.

En la Figura 5.3 se presenta la composición de los RSD a incinerar suponiendo un menor cumplimiento de las metas de valorización que en la composición tomada como caso de estudio (Figura 5.2). Analizando estas figuras se observa que ciertas fracciones mantienen su volumen constante, independientemente de la eficiencia de los planes, dado que no son valorizables. Entre estas se encuentran: polvo y escombros, textiles, pañales, toallas, papel y envases Tetra Brik. En cambio, aquellas fracciones con potencial de valorización

(orgánicos compostables, plásticos reciclables, metales, vidrios, entre otros) sí se ven afectadas por la reducción en la eficiencia, lo cual modifica la proporción relativa de las fracciones en la composición final. Si bien las proporciones cambian, el poder calorífico de la mezcla se mantiene estable, aumentando desde 12.6 MJ/kg a 12.9 MJ/kg. Esto se debe a que las fracciones que se ven impactadas ponderan el poder calorífico de manera similar hacia arriba (plásticos, cartón y papel) y abajo (materia orgánica).

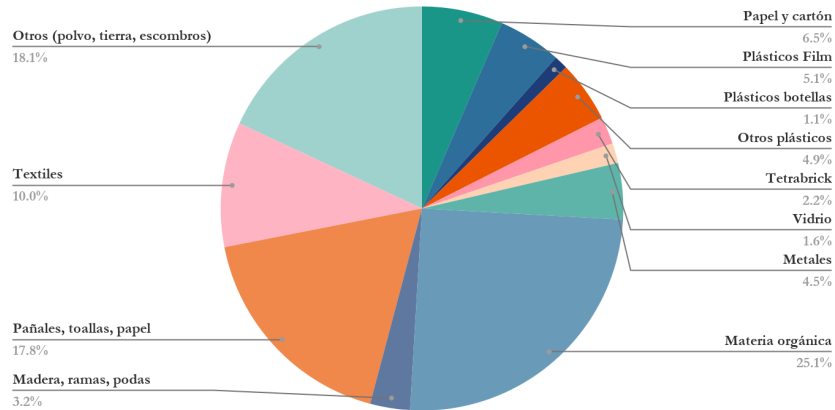


Figura 5.2: Composición RSD destinados a incineración, 100% eficiencia planes (Elaboración propia).

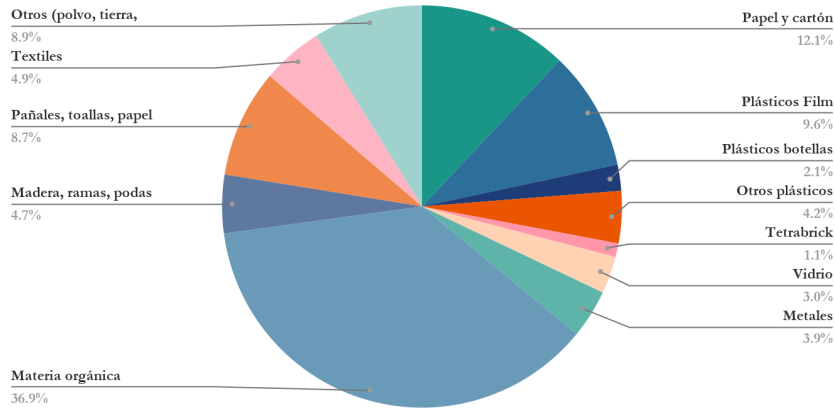


Figura 5.3: Composición RSD destinados a incineración, 50% eficiencia planes (Elaboración propia).

Sin embargo, la capacidad de la planta de producir energía se ve duplicada, dado que el flujo de residuos a incinerar también se duplica. Un aspecto crítico de este escenario es que este incremento en flujo además de requerir mayor capacidad total de las plantas, genera un volumen de cenizas mucho más elevado, lo que obliga a asegurar la capacidad del sitio de disposición final que reciba dichos residuos. Como resultado, el modelo plantea la instalación de dos plantas de incineración, una en Montevideo y otra en San José, para dar respuesta a la magnitud de los volúmenes generados.

## 5.4. Costos de transporte e instalación

Se estudian las variaciones en los costos de transporte e instalación para observar el grado de sensibilidad de la localización y dimensionamiento de las plantas frente a cambios en la estructura de costos. Cabe destacar que la variación de estos parámetros no modificó la decisión de instalar una planta en Montevideo, dado que en todos los casos se optó por esta opción.

Para evaluar el impacto de cada parámetro en la decisión, así como la magnitud del error en caso de haberlos definido incorrectamente, se alteran en forma simultánea el costo de transporte y la inversión inicial. Ambos se multiplican por un factor: en el caso de la inversión inicial únicamente reductor, y en el costo de transporte tanto reductor como amplificador. Esto se debe al interés de estudiar el punto de equilibrio para la apertura de más de una planta. Se decide no incrementar sobre el 100% el costo de inversión inicial, dado que la opción de instalar una única planta sería cada vez más atractiva, y es el escenario que devuelve el caso inicial. Para este estudio la capacidad máxima de la planta no se vió limitada.

Los resultados obtenidos se condensan en la Figura 5.4. Al analizarla se observa que, para que la decisión óptima sea instalar tres plantas, la inversión inicial debería reducirse al menos un 60% y el costo de transporte aumentar un 30% o alternativamente, bastaría con que la inversión se redujera un 50% y el transporte aumentara en la misma proporción. Esto sugiere que la decisión más probable sea instalar una o dos plantas. En cambio, la opción de instalar cuatro plantas resulta poco factible, ya que requeriría prácticamente duplicar el costo de transporte y reducir la inversión en un 70%.

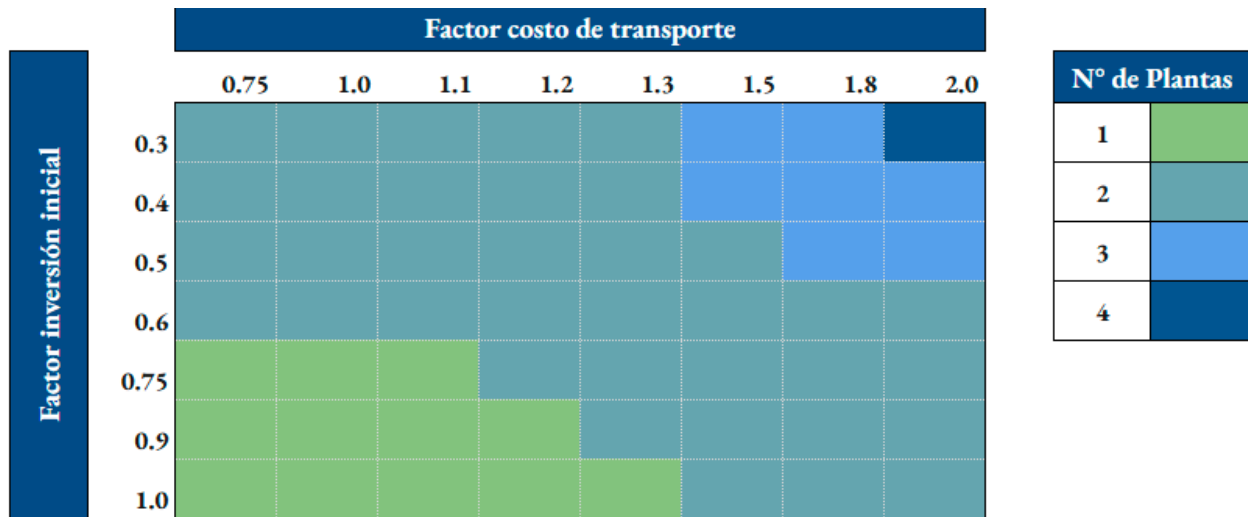


Figura 5.4: Mapa de calor del número de plantas en función del costo de transporte y la inversión inicial (Elaboración propia).

## 5.5. Energía térmica

Se considera pertinente realizar este análisis dado que en numerosas plantas alrededor del mundo se recupera energía térmica –principalmente vapor de baja presión– lo que aumenta de forma significativa la eficiencia global del sistema y genera una nueva fuente de ingresos para el proyecto. Adicionalmente, la provisión de calor útil a industrias cercanas permite sustituir combustibles fósiles, contribuyendo así a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, al realizar un relevamiento de los principales consumidores de energía térmica en el país, no se detectó un interés real por aceptar las condiciones técnicas y operativas que esto requeriría. A su vez, al significar un supuesto muy fuerte asumir que existe una demanda real se lo considera como un análisis de sensibilidad y no como parte del caso de estudio primario.

Dicho esto, varias industrias nacionales tienen una demanda sostenida de vapor para sus procesos productivos, lo que representa un mercado potencial para la energía térmica generada por la planta. Entre los principales consumidores se destacan refinerías, cementeras, industrias lácteas y parques industriales. En el [Anexo XIV](#) se presenta el relevamiento realizado de los posibles consumidores de energía térmica en Uruguay, cuya distribución geográfica se esquematiza en la Figura 5.5.

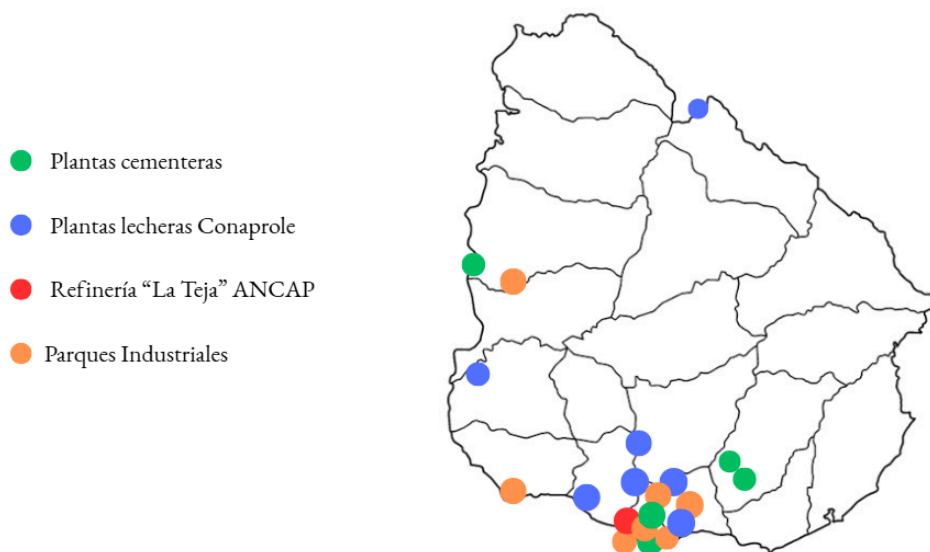


Figura 5.5: Mayores consumidores de energía térmica (Elaboración propia).

Cabe destacar que, a diferencia de la energía eléctrica, el vapor requiere proximidad física con la planta consumidora. Esto se debe a que no sería viable realizar el transporte del vapor a largas distancias, lo cual requiere delimitar este beneficio económico y ambiental solamente a departamentos que cuenten con instalaciones receptoras. Para reflejar esta preferencia por estos departamentos, el modelo debe incorporar:

- Parámetro binario que indique si en el departamento existe al menos una planta que pueda ser abastecida con energía térmica.
- Un término adicional de ingresos por la venta de energía térmica.

- Un término por créditos de carbono, derivado de las emisiones evitadas al desplazar combustibles fósiles en las industrias consumidoras.

Además, se suman los siguientes parámetros:

- Precio de venta de la energía térmica: se estima en 60 USD/MWh a 2025, para mantener un precio competitivo con la venta del Fueloil industrial en ANCAP (entre 65-70 USD/MWh).
- Pérdidas asociadas al proceso de recuperación de energía térmica dentro de la planta: en particular para la energía térmica se pueden obtener eficiencias de entre 50% y 90 % (Morrison Hershfield, 2023). Para este estudio se toma el valor inferior de 50%, para un enfoque conservador. En este punto, resulta importante aclarar que no se tienen en cuenta las pérdidas asociadas a la distribución del vapor hacia los consumidores.
- Emisiones evitadas por la sustitución de combustibles fósiles en la generación convencional de calor: al igual que la eléctrica, la energía térmica producida puede sustituir el consumo de combustibles fósiles en procesos industriales, de calefacción o refrigeración. En el caso de aprovecharse la energía térmica del proceso, se estima que se evitarían 0,44 tn CO<sub>2</sub>/tn RSD incinerado (referirse al [Anexo IX](#) para el detalle).

El resto de parámetros, restricciones y variables de decisión se mantienen inalterados y se asume que se puede aprovechar toda la energía disponible. La formulación resultante se presenta en el [Anexo XIV](#).

Al ejecutar el modelo, se obtiene que la decisión de dónde ubicar la planta no se ve alterada. Esto se debe a que Montevideo se vuelve aún más atractivo al existir demanda de energía térmica. Se observa que el ingreso por la venta de energía representa el mayor ingreso para la planta, resultando en un valor de la función objetivo más de diez veces menor (Tabla 5.4). Esto se debe a que se triplica la energía generada, debido al alto grado de conversión energética que representa la cogeneración, pudiendo ser de hasta 80%.

Por otro lado, el consumir energía térmica implica un ahorro de emisiones extra, comparable al obtenido por el consumo de energía eléctrica, lo cual podría ser altamente atractivo en un escenario futuro de descarbonización de usos finales y de la matriz primaria.

Este análisis evidencia el potencial energético y económico que representa la cogeneración de energía eléctrica y térmica, sujeto a la existencia de demanda real para este tipo de proyecto en un futuro.

Tabla 5.4: Comparación de resultados con y sin energía térmica (ET).

	Alternativa I	Alternativa con ET
Número de plantas	1	1
Ubicación	Montevideo	Montevideo
Valor función objetivo (*)	-557,992,604	-7,981,573,515
Emisiones evitadas	0.19 tn CO <sub>2</sub> / tn RSD	0.44 tn CO <sub>2</sub> / tn RSD
Energía generada (MWh/tn RSD)	0.7	2.5

(\*) Los valores obtenidos en la función objetivo no tienen significado financiero dado que la misma es una minimización de costos, ponderados por  $w$ , a los cuales se les restan ingresos sin ponderar (dado que son independientes de la ubicación). Este valor solamente sirve para comparar departamentos entre sí para los mismos valores de  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ .

## 6. Análisis financiero

El análisis del flujo de fondos constituye una etapa fundamental dentro de la evaluación económica de cualquier proyecto, ya que permite estimar la rentabilidad y la viabilidad financiera de su instalación y operación a lo largo del tiempo.

### 6.1. Metodología

El estudio se desarrolla para la alternativa de instalar una única planta de valorización energética en Montevideo en el año 2050, con una vida útil proyectada de 30 años, una capacidad de procesamiento de 840,000 toneladas anuales de residuos y una generación eléctrica de 56.5 MW, considerando una tasa de inflación anual del 2.6%.

La evaluación incorpora la inversión, los ingresos y egresos operativos, y la depreciación de los activos. A su vez, para asegurar una comparación consistente con la situación sin proyecto, se contabilizan como ingresos los ahorros netos por no operar los rellenos sanitarios, reflejando la sustitución del método actual de disposición final.

Para no sesgar la comparación, se adopta enfoque conservador para la alternativa de la planta de incineración y relativamente favorable para el relleno sanitario. En los casos donde existían rangos de valores posibles, se eligieron siempre valores que penalizan a la planta y favorecen al relleno.

En cuanto a la forma de abordar el análisis, se plantean dos escenarios. En el primero, se asume que la totalidad del capital requerido para la instalación de la planta es propio, sin necesidad de financiamiento externo. En el segundo, se considera que la inversión inicial es financiada al 100% por una entidad financiera (se asume que el BID), incorporando en el flujo el pago del préstamo correspondiente.

A partir de los componentes evaluados, se elabora el flujo de caja neto anual del proyecto, sobre el cual se calculan los principales indicadores financieros presentados a continuación, con el objetivo de evaluar la sostenibilidad financiera de la planta a lo largo de su vida operativa.

Por último, se realiza un análisis de sensibilidad con el fin de evaluar la robustez del proyecto frente a la variación de los principales supuestos. Esto permite identificar los parámetros que más inciden en la rentabilidad y analizar el desempeño del proyecto en distintos contextos

#### 6.1.1. Valor Actual Neto

El método de Valor Actual Neto, consiste en sumar los flujos de fondos descontados al presente y restarle la inversión inicial realizada. En definitiva, se evalúa si el proyecto vale más de lo que cuesta (Gazzano y Alvez Becerra, 2021).

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{FF_t}{(1+i)^t} - I_0$$

- *VAN*: valor actual neto

- $FF_t$ : Flujo de fondos en el año  $t$
- $i$ : tasa de descuento
- $I_0$ : Inversión o desembolso inicial

El criterio de evaluación es el siguiente:

- Si el VAN  $> 0$ , se acepta el proyecto.
- Si el VAN  $< 0$ , se rechaza el proyecto.
- Si el VAN  $= 0$ , el proyecto es indiferente.

### 6.1.2. Tasa Interna de Retorno

La Tasa Interna de Retorno es la tasa que hace que el VAN sea cero, es decir aquella que iguala los flujos de fondos descontados a la inversión inicial. La TIR mide cuán eficiente es el uso del capital.

El criterio de decisión en este caso, resulta de comparar la TIR con la tasas de interés requerida por la empresa para tal inversión:

- Si la TIR  $> i$ , se acepta el proyecto.
- Si la TIR  $< i$ , se rechaza el proyecto.
- Si la TIR  $= i$ , el proyecto es indiferente.

### 6.1.3. Período de recupero de la inversión descontado

El Período de Recuperación de la Inversión (PRI) es un método que determina cuántos períodos se requieren para recuperar la inversión inicial de un proyecto a partir de los flujos de caja generados. Su propósito es evaluar si el tiempo necesario para recuperar la inversión resulta aceptable según los criterios de la organización.

El Período de Recuperación de la Inversión Descontado (PRID) es una variante del período de recuperación tradicional con la variante de que tiene en cuenta el valor del dinero en el tiempo. En este caso los flujos de caja futuros se descuentan al valor presente antes de compararlos con la inversión inicial, de forma que todas las magnitudes queden expresadas en el mismo momento.

Para su cálculo, se determina el flujo de fondos descontado acumulado (FFDA) año a año. El PRID se identifica como el primer período en el cual se cumple que el FFDA es mayor o igual a la inversión.

## 6.2. Inversión

La inversión tiene en cuenta los costos de ingeniería, diseño y permisos, adquisición de los equipos, montaje, obras civiles, conexión a la red eléctrica y puesta en marcha de la planta.

La inversión inicial se estima considerando la adquisición de equipamiento nuevo, descartando la posibilidad de adaptar capacidades industriales existentes en Uruguay. Esta decisión se fundamenta en que actualmente no existen instalaciones ni equipos compatibles con las exigencias tecnológicas de una planta WtE. En particular, las calderas y los sistemas de tratamiento de gases presentan un alto nivel de complejidad y son diseñados de forma específica para cada proyecto y la composición del residuo, así como de las condiciones ambientales locales.

Incluso en el caso de identificarse una caldera o componente susceptible de reutilización, su adaptación implicaría costos de ingeniería y adecuación muy elevados, además de riesgos técnicos significativos para lograr una integración eficiente dentro del sistema proyectado (Gonzalo Gutierrez, comunicación personal, Junio 3, 2025).

Por estas razones, el análisis económico asume la construcción y montaje de una planta nueva con equipamiento de diseño a medida.

Para estimar el costo de la inversión se tuvieron en cuenta varias fuentes, en particular el desglose por concepto en función de la potencia instalada (USD/MWh) de EPC Intel (EPC Intel, 2024). El cálculo se realiza tomando un enfoque conservador ante rangos de costos por concepto, y se detalla en el Anexo XV. Resulta relevante aclarar que los costos incluyen el IVA, aunque podrían existir exoneraciones tributarias en el marco de la valorización energética de los RSD.

Por otro lado, para el costo de adquisición del terreno se tiene en cuenta un informe realizado por InfoNegocios en Abril de 2025, en el cual se determinó que el costo promedio de adquirir terrenos en parques industriales es de 66 USD/m<sup>2</sup>. Considerando un terreno de 8 hectáreas –tomando como referencias plantas similares– el monto total a destinar a la compra del terreno en 2050 sería de 19 MUSD. Finalmente, se considera un 15% de los conceptos anteriores para imprevistos.

Finalmente, se obtiene un costo de inversión inicial para el caso de estudio de 1,678 MUSD. El desglose de esta cifra por concepto se presenta en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1: Inversión inicial por concepto

Concepto	Costo (MUSD)
Terreno	19
Recepción de residuos	107
Construcción edificio	160
Caldera, horno y parrilla	533
Turbina y generador	213
Sistema de tratamiento de gases	320
Ingeniería, diseño y permisos	107
Imprevistos	219
<b>Total</b>	<b>1,678</b>

Por otra parte, el estudio de prefactibilidad de Themelis y Díaz Barriga (2012) estima un costo de inversión inicial de entre 500 y 1000 USD por tonelada de capacidad instalada para una planta a instalarse en América Latina. Considerando la capacidad de la planta y el valor del dinero en 2050, esta estimación resulta entre 1100 y 2100 MUSD, valores en línea con lo obtenido anteriormente.

Por último, para tener referencias de plantas existentes, se realiza un relevamiento de plantas de capacidad de procesamiento y potencia instalada similar para conocer cuál fue el costo de inversión de las mismas el cual se detalla en el [Anexo XV](#). De este estudio se obtiene un costo de inversión promedio de 1431 MUSD, que se alinea con la estimación de la Tabla 6.1.

### 6.3. Egresos

Los egresos comprenden todos los costos asociados a la operación y mantenimiento de la planta a lo largo de su vida útil. Estos gastos se incorporan al flujo de fondos anual, considerando tanto los costos directos de operación como los indirectos relacionados al aseguramiento, transporte y reposición de activos.

Dado que se trata de una infraestructura pública destinada a gestionar los residuos del país, la cual integra la operativa de las distintas intendencias, se asume que se exoneran impuestos (como el impuesto a la renta, al patrimonio, contribución inmobiliaria y primaria) teniendo en cuenta que se está otorgando un servicio público esencial.

Sin embargo, el IVA no se exonera de los egresos, dado que se encuentra incluido dentro de los costos tomados como referencia (inversión, salarios nominales, insumos, transportes, etc.), por lo que no se realiza

ningún ajuste adicional por este concepto en el flujo de fondos. No obstante – al igual que para la inversión– podrían existir exoneraciones tributarias.

En la Figura 6.1 se presenta la composición de los egresos y el peso relativo de cada concepto. Los valores de los egresos anuales se detallan en el [Anexo XVI](#).

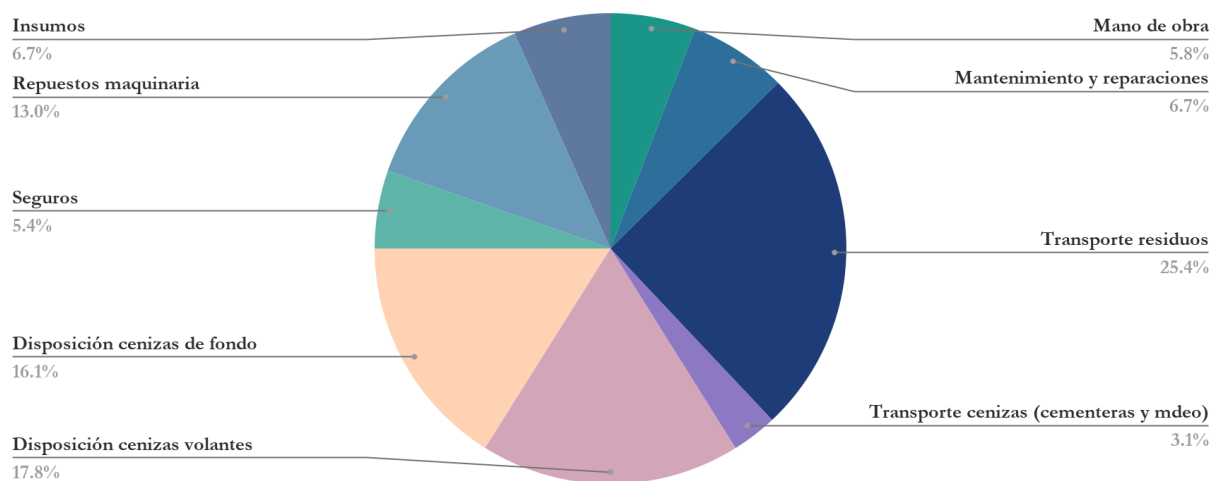


Figura 6.1: Egresos por concepto (Elaboración propia).

### 6.3.1. Mano de obra

Para determinar los egresos asociados a la mano de obra, se establece la cantidad de trabajadores necesarios para operar una planta de la escala considerada, basándose en referencias y ejemplos internacionales de instalaciones *mass burn* de capacidad equivalente. A partir de ello, se define una estructura compuesta por 43 personas: 38 operarios distribuidos en 3 turnos y 5 puestos administrativos/gerenciales. En la Tabla 6.2 se detallan las funciones de cada cargo y el jornal.

Asimismo, la Tabla 6.2 indica la ubicación de cada cargo durante la mayor parte de su jornada laboral, información que fue considerada para lograr una distribución del personal coherente en el diseño del layout presentado en la [Figura 4.8](#).

Sobre esta base, se calcularon los salarios proyectados a 2050. Para esto, se divide al personal en dos categorías: operarios y cargos administrativos. Partiendo del salario líquido en 2025, se trasladan a 2050 y se obtiene el salario nominal que resulta un egreso de la planta, sumándole el aporte al BPS, aguinaldos, licencia, beneficios y horas extra, entre otros. Para el aumento anual, se tiene en cuenta un aumento salarial del 7% (Instituto Nacional de Estadística, 2025). Los cálculos se detallan en el [Anexo XVII](#).

Tabla 6.2. Determinación de la mano de obra de la planta del caso de estudio.

Descripción del cargo	Cantidad	Jornada	Ubicación
Gerente general	1	Fijo	Torre de Control
Operario de grúa	6	Rotativo	Cabina operación grúa
Jefe de Producción	1	Fijo	Torre de Control
Operarios	15	Rotativo	Líneas de producción / Torre de control
Supervisor de gestión de cenizas	3	Rotativo	Zona de despacho cenizas
Operario de recepción y pesaje RSD	6	Rotativo	Andenes de recepción RSD/Balanza
Técnico de mantenimiento	3	Rotativo	Líneas de producción / Torre de control
Encargado de administración y finanzas	1	Fijo	Oficina administración
Auxiliar de administración y finanzas	2	Fijo	Oficina administración
Seguridad (tercerizado)	3	Rotativo	Cabina Seguridad Entrada
Auxiliar de limpieza (tercerizado)	2	Fijo	Zona de servicios
<b>Total</b>	<b>43</b>		

### 6.3.2. Mantenimiento y reparaciones

El costo de mantenimiento se calcula como un porcentaje de la inversión inicial en equipos, siguiendo referencias internacionales para instalaciones de valorización energética (Peters y Timmerhaus, 2003). Se considera 15% de la inversión inicial en equipos, distribuido anualmente dentro de los costos operativos.

Si bien podrían considerarse otras distribuciones para las cuotas, por ejemplo, con menor carga en los años iniciales y mayor hacia el final debido al desgaste de los equipo, siguiendo una función logarítmica, se opta por una distribución uniforme dado que el presente análisis corresponde a una etapa de preinversión. En este contexto, y considerando que este rubro no representa una fracción significativa de la inversión total, no se justifica un nivel de desagregación o precisión mayor.

### 6.3.3. Transporte de residuos

Para estimar el costo anual de transporte de residuos hacia la planta, se toma la distancia total recorrida anual obtenida mediante el modelo matemático desarrollado (véase el [Anexo XVI](#)) y el costo por kilómetro

empleado en el modelo (Sección 4). El producto entre ambos valores determina el egreso anual asociado al ingreso de residuos a la planta.

#### 6.3.4. Transporte y disposición de cenizas

Como se observa en la Figura 6.1 el transporte y la gestión de cenizas resultan en un costo significativo, representando aproximadamente 40% de los egresos de la planta de incineración. Esto evidencia el gran costo que tienen las mismas, como se relevó en el marco teórico (Sección 1). A continuación se puede observar como es el flujo de las mismas dentro de la cadena del proceso (Figura 6.2).

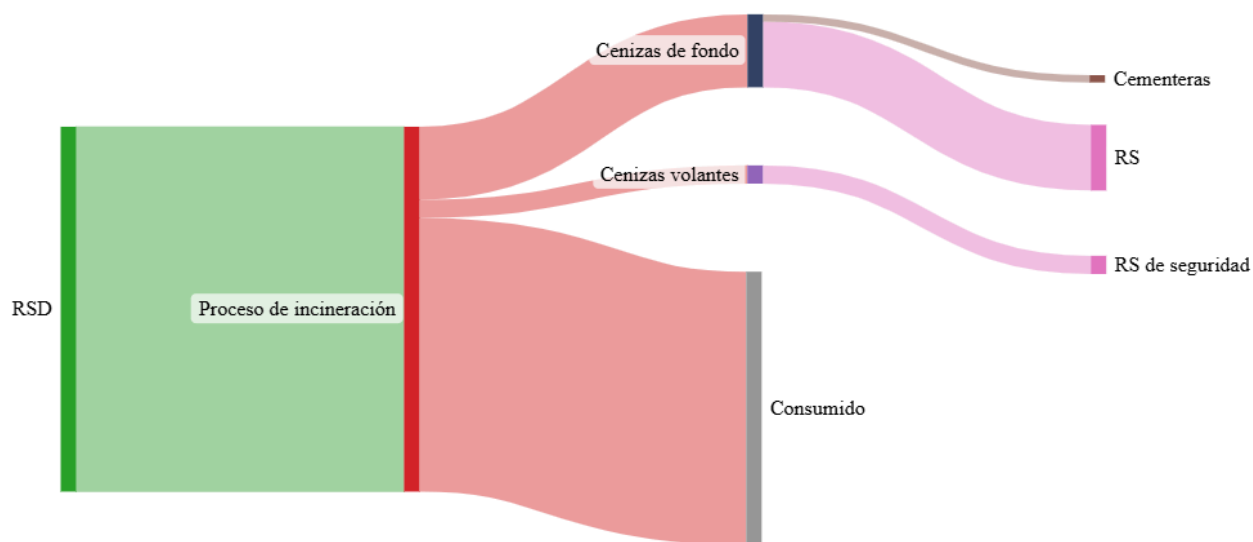


Figura 6.2: Flujo de cenizas (Elaboración propia)

En primer lugar, se prioriza la valorización de una fracción de las cenizas de fondo, destinándolas como insumo para cementeras ubicadas en el interior del país, bajo el supuesto de que serán recibidas para este fin. Las plantas cementeras consideradas en este análisis son Cielo Azul (Treinta y Tres) y Cementos Artigas (Lavalleja y Paysandú). El cálculo del costo asociado a esta valorización se basa en la distancia desde Montevideo hacia cada una de estas instalaciones, el volumen anual de cenizas de fondo aprovechables y el costo por tonelada-kilómetro. Cabe aclarar que, en este esquema, las cenizas no generan un ingreso por venta, sino que son entregadas a las cementeras, con el objetivo de evitar los costos asociados a su disposición final en relleno sanitario y priorizar su valorización.

No obstante, la capacidad de recepción de estas instalaciones es acotada, por lo que asumir la valorización de todas las cenizas de fondo en cementeras sería muy optimista. Ante la falta de información específica, se estableció una aproximación de capacidad con base en referencias internacionales. Específicamente, se supone que la capacidad de las cementeras para recibir cenizas de fondo equivale al 1 % de su capacidad instalada de producción anual de cemento (Zhu y Wei, 2025). Al valor resultante se le añade un margen del 20 % para anticipar posibles ampliaciones, lo que permite obtener una estimación del volumen máximo de cenizas que podrían ser absorbidas.

Por otro lado, la fracción de cenizas que no se valoriza (que incluye la totalidad de las cenizas volantes y la porción de cenizas de fondo que excede la capacidad de las cementeras, en rosa en la Figura 6.2) se envía a rellenos para su disposición final, lo que genera costos de transporte y de disposición.

Las cenizas volantes son consideradas un residuo peligroso, por lo que su disposición debe realizarse en un relleno de seguridad. En Montevideo, el relleno autorizado de la Cámara de Industrias del Uruguay cumple con estos requisitos (Federico Gutierrez (Cementos Artigas), comunicación personal, Julio 21, 2025), cuyo costo de disposición final es de 190 USD/tn (Cámara de Industrias del Uruguay, 2021), lo cual resulta en un egreso relevante. Las cenizas de fondo restantes, en cambio, se disponen en un relleno sanitario próximo a la planta de incineración. El costo de disposición para estas últimas se obtiene tomando como referencia el costo de disposición actual en Felipe Cardoso, que se ubica entre 1 y 2 UR por tonelada.

Se estima una distancia promedio de 50 km de transporte desde la planta a los rellenos correspondientes para el cálculo de los costos de transporte.

### 6.3.6. Seguros

Los costos de seguros se estiman como un porcentaje del valor asegurado de los principales sistemas de la planta: recepción de residuos, caldera, horno y parrilla, turbina y generador y sistema de tratamiento de gases. Siguiendo como referencia el rango de costo del 0.2 % a 0.5 % del valor asegurado (Cowan Architects, s.f.), se toma el valor medio de este rango, como costo anual de seguros.

### 6.3.7. Reposición de activos tangibles

A lo largo de la vida útil del proyecto se consideran reposiciones programadas de determinados activos, necesarias para asegurar la continuidad operativa de la planta. En el año 15 se prevé la reposición completa del sistema de recepción de residuos, así como del sistema de tratamiento de gases, dado que ambos componentes presentan un desgaste por su funcionamiento continuo.

Dentro del sistema de tratamiento de gases, los filtros de mangas requieren una reposición con mayor frecuencia debido a su vida útil relativamente corta. Cada recambio implica la sustitución de 500 bolsas por línea en un total de cuatro líneas de filtración, lo que representa 2.000 bolsas. Considerando un costo unitario de 30 USD por bolsa (valor 2025), el costo total asciende a 60.000 USD por cada recambio trianual. Este valor se actualiza a precios de 2050 aplicando la inflación correspondiente (Frank, s.f.).

### 6.3.8. Insumos y reactivos

Los insumos y reactivos comprenden todos los productos químicos y consumibles necesarios para la operación regular de la planta.

Utilizando como referencia la planta mass burn de Palm Beach (Solid Waste Authority of Palm Beach County, 2022), que procesa aproximadamente 820.000 toneladas anuales. Según la información reportada por dicha instalación, el costo de insumos y reactivos ascendía a 3,13 USD por tonelada en 2022. A partir de este valor, y proyectando los precios hacia 2050, se estima un costo de 6,4 USD por tonelada de residuo procesado.

## 6.4. Ingresos

Los ingresos son obtenidos por la venta de los productos generados y por la valorización de los beneficios ambientales de la operación de la planta. El detalle para los primeros 5 años de operación de la planta se presentan en el Anexo XVIII.

En la Figura 6.3 se presenta la composición de los ingresos y el peso relativo de cada componente. En esta Figura, no se consideran los ingresos asociados a la comparación de la situación con y sin proyecto. Se observa que la venta de energía eléctrica y el cobro de la tarifa de disposición representan las principales fuentes de entrada, concentrando en conjunto alrededor del 90% del total. En comparación, los créditos de carbono no tienen una gran incidencia, mientras que la venta de metales recuperados aporta un valor despreciable.

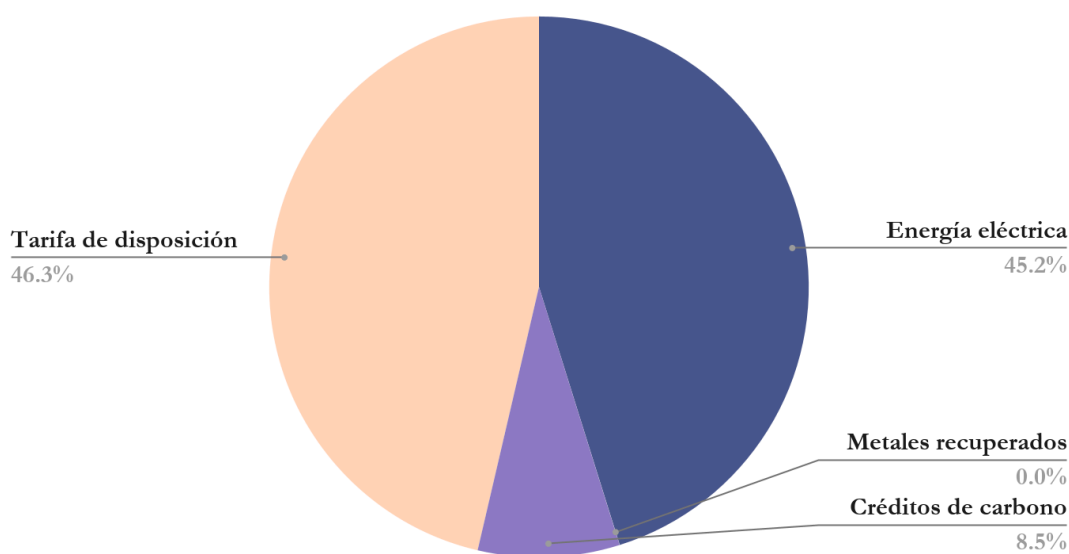


Figura 6.3: Ingresos por concepto (Elaboración propia).

### 6.4.1. Energía eléctrica

La planta genera energía eléctrica a partir de la combustión, la cual es inyectada en la red eléctrica. Para el modelo matemático de la Sección 4, se adopta un precio de venta de 70 USD/MWh, correspondiente al promedio del precio spot sancionado en mayo de 2025 (ADME, 2025). Este valor se ajusta para el análisis financiero, utilizando el promedio del precio spot de un período más amplio (enero-octubre de 2025), resultando en un precio de 64 USD/MWh el cual luego se ajusta a 2050.

### 6.4.2. Metales recuperados

Como se mencionó previamente, durante la incineración se recupera aproximadamente el 50% de los metales presentes en los residuos tratados (Themelis y Sunk, 2006).

El precio de venta se toma a partir del estudio de prefactibilidad de Themelis y Diaz Barriga (2012) el cual evalúa los costos de las barras de acero y hierro en Uruguay a partir del listado de precios del MTOP y considera que los metales recuperados de la incineración se comercializan a un valor menor al material virgen por lo que adopta un precio de venta de 0,6 USD/tn (2012), aproximadamente un cuarto del valor del metal nuevo.

No obstante, como se observa en la Figura 6.3 la venta de metales recuperados representan un ingreso insignificante para la planta.

### 6.4.3. Créditos de carbono

Se mantiene el valor utilizado en el modelo de 23 USD/tn de CO<sub>2</sub> (Sección 4).

### 6.4.4. Tarifa de disposición

Al día de hoy, Felipe Cardoso cobra una tarifa por la disposición de residuos. Particularmente, para los residuos no domiciliarios, esta tarifa ronda los 1-2 UR por tonelada (Intendencia Montevideo, 2025). Por su parte, el procesamiento de los RSD es financiado por el cobro de impuestos a la población y representa un ingreso para el relleno.

Por lo tanto, resulta razonable cobrar una tarifa similar por tonelada incinerada. En efecto, el cobro de tarifa de ingreso es una práctica ampliamente utilizada en plantas WtE a nivel internacional, especialmente en Europa, donde este instrumento es un mecanismo para que el proceso resulte rentable, complementando los ingresos por venta de energía (WRAP, 2024).

## 6.5. Depreciación y amortización

La amortización se refiere a la pérdida de valor de los activos intangibles a lo largo del tiempo (Gazzano & Alvez Becerra, 2021). Particularmente en este proyecto, el único activo intangible es la ingeniería, diseño y permisos durante la instalación de la planta, cuya amortización se desprecia dado que se incurren solo al inicio y no tienen pérdida de valor a lo largo de los años.

De manera similar, la depreciación se aplica a los activos fijos tangibles, calculándose en función de su vida útil para reflejar la pérdida de valor debido al desgaste y al paso del tiempo.

Para cada activo se toma como base su inversión inicial y su vida útil estimada y se aplica una depreciación lineal que asigna una cuota fija por año. En este proyecto, los principales activos y sus parámetros de depreciación se presentan en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3: Depreciación

Activos tangibles	Inversión (MUSD)	Vida útil (años)	Depreciación anual (%)	Cantidad de reposiciones	Cuota depreciación (MUSD/año)
Recepción de residuos	107	15	7.13	1	7.13
Construcción edificio	160	30	5.33	0	5.33
Caldera, horno y parrilla	533	30	17.77	0	17.77
Turbina y generador	213	30	7.10	0	7.10
Sistema de tratamiento de gases	320	15	21.33	1	21.33

## 6.6. Financiamiento del proyecto

Los costos financieros corresponden a los intereses asociados al capital obtenido por un préstamo u otra fuente de financiamiento externa. En este caso se evaluará un esquema donde la inversión inicial es financiada 100% a través de un préstamo el cual se toma como supuesto que es otorgado por el Banco Interamericano de Desarrollo.

Para la amortización del préstamo se adopta el sistema francés, el cual se caracteriza por tener una cuota fija, con una estructura donde la amortización del capital es creciente y los intereses son decrecientes a lo largo del tiempo (Gazzano y Alvez Becerra, 2021).

El préstamo se estructura con un plazo total de 30 años, acorde a la vida útil del proyecto e incluye un período de gracia de 1 año, en el cual no se amortiza el capital. Por último, se adopta una tasa efectiva anual del 4% que se utiliza para el cálculo de los intereses y la cuota constante. El desglose del cálculo del capital cancelado para el pago del préstamo se detalla en el [Anexo XIX](#).

## 6.7. Relleno sanitario

Dado que la instalación de la planta se plantea como un reemplazo del esquema actual de disposición final en rellenos sanitarios, el análisis financiero se realiza restando la línea de base del escenario sin proyecto. Esto implica evaluar explícitamente los costos e ingresos asociados al sistema actual de relleno sanitario y compararlos con los del escenario con planta de incineración.

Para ello, se estiman los costos de inversión y los costos operativos que los rellenos sanitarios deberían afrontar durante el horizonte temporal establecido, considerando los mismos volúmenes de residuos que serían enviados a incineración. A su vez, se incorpora la tarifa de disposición actual (cobrada mediante

impuestos) como parte de los flujos del escenario base. De esta manera el flujo de fondos del proyecto refleja correctamente el resultado neto de sustituir un esquema por otro.

Se toma como referencia un estudio que evalúa la viabilidad y ventaja de realizar una regionalización de los rellenos del país (Roda, 2021), en el cual se propone instalar once RS en lugar de diecinueve. Del estudio se deduce que esta alternativa si bien aumenta los costos de transporte, reduce los costos totales en promedio en un 10%. Esto se debe al uso de economías de escala que favorecen a los rellenos de mayor capacidad y unifica inversiones en instalaciones que representan gran parte del costo de un RS.

### 6.7.1. Inversión

La inversión en rellenos sanitarios se realiza generalmente para celdas con una vida útil de cinco años, con una sub-celda para cada año. La capacidad de la celda se diseña para poder recibir la generación de los departamentos asignados durante esos cinco años. Dentro de los costos de inversión se encuentran los de diseño e instalación del sistema completo, como se detalla en la Figura 6.4.

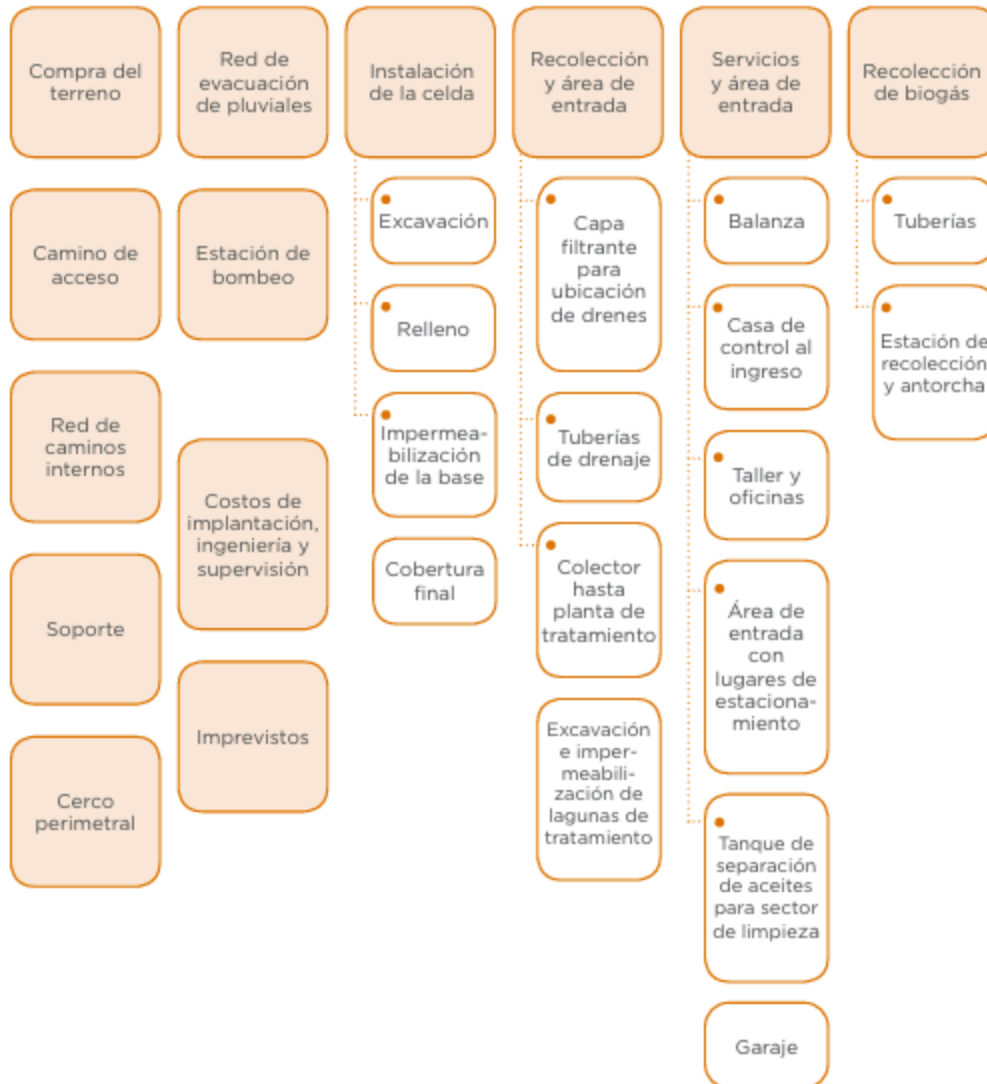


Figura 6.4: Obras de infraestructura consideradas para un relleno sanitario (Roda et al, 2021)

El modelo desarrollado en este estudio permite obtener un costo de inversión expresado en USD/tn. De esta manera se puede estimar la capacidad requerida para cada uno de los RS necesarios y, en consecuencia, calcular el costo total de instalación. Se toma como base el volumen de residuos que, en lugar de ser enviados a un RS, son tratados en la planta de incineración a lo largo de toda su vida útil. A continuación en la Figura 6.5 se puede ver el costo por tonelada procesada que resulta del modelo, y se evidencia cómo la instalación de rellenos más grandes beneficia los costos de inversión gracias a las economías de escala.

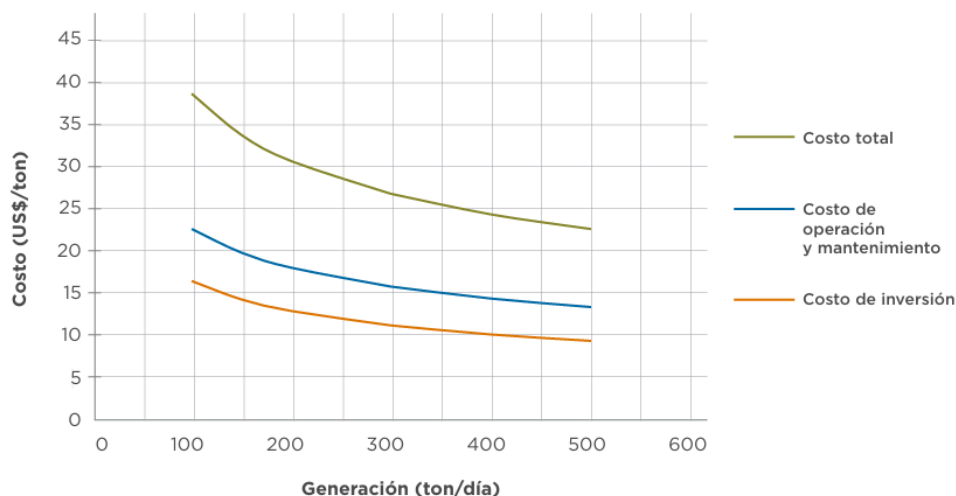


Figura 6.5: Costos unitarios de disposición final con una densidad en la celda de 1,0 ton/m<sup>3</sup> (Roda et al, 2021)

Realizando el producto de la capacidad requerida durante los cinco años y el costo de instalación en USD/tn según la cantidad procesada por día, se obtiene el costo de inversión total para una celda. Dado que una celda tiene una capacidad de cinco años, se repite este cálculo seis veces durante los 30 años de operación, lo cual genera alícuotas de inversión cada cinco años. A continuación se exponen los resultados obtenidos para la instalación de los once RS correspondientes a la propuesta de regionalización (Tabla 6.4):

Tabla 6.4: Inversión RS regionalizados, dividida en 5 alícuotas.

	Montevideo	San José	Canelones	Artigas	Salto	Soriano	Durazno	Colonia	Rivera	Cerro Largo	Rocha	Alícuotas
2050	34,659,302	8,986,718	22,773,360	7,992,573	18,761,745	12,691,769	16,313,609	9,965,535	16,904,840	12,231,922	31,860,806	193,142,178
2055	40,495,166	10,499,884	26,607,893	9,338,347	21,920,810	14,828,783	19,060,462	11,643,511	19,751,243	14,291,508	37,225,465	225,663,072
2060	47,101,657	12,212,863	30,948,776	10,861,830	25,497,030	17,247,991	22,170,037	13,543,065	22,973,515	16,623,064	43,298,528	262,478,357
2065	54,611,430	14,160,052	35,883,173	12,593,614	29,562,214	19,997,969	25,704,773	15,702,339	26,636,356	19,273,404	50,201,940	304,327,264
2070	63,135,970	16,370,358	41,484,337	14,559,407	34,176,712	23,119,540	29,717,145	18,153,386	30,794,143	22,281,876	58,038,183	351,831,057
2075	72,771,365	18,868,694	47,815,403	16,781,367	39,392,536	26,647,892	34,252,380	20,923,836	35,493,742	25,682,389	66,895,588	405,525,192

### 6.7.2. Costos operativos y mantenimiento

Por otro lado, se deben considerar los costos de operación y mantenimiento de cada RS. Dada la cantidad diaria de residuos a procesar para cada relleno del eje de abscisas, se determina el costo correspondiente a partir de la curva de la Figura 6.5 y se actualiza al año de operación. A modo de ejemplo, en la Tabla 6.5 se muestran los resultados obtenidos. La tercera columna surge de calcular la recepción anual de cada relleno sanitario, a partir de la recepción diaria, y multiplicarlo por el costo operativo unitario a 2051 propuesto en la Figura 6.5. (Roda et al, 2021). Para años posteriores, los costos se ajustan según el aumento proyectado en la generación de RSD y la variación del valor del dinero debido a la inflación.

Tabla 6.5: Costos de operación y mantenimiento por RS para 2050.

Departamento	Recepción (tn/día 2051)	Costo por tn 2021 (USD/tn)	Costo por tn 2051 (USD/tn)	Costo de op. y mant. anual (USD 2051)
Montevideo	923	18	38	12,625,443
Canelones	364	22	48	6,257,341
San José	76	41	89	2,421,984
Artigas	51	50	108	1,996,441
Salto	167	30	65	3,905,368
Soriano	97	39	84	2,943,794
Durazno	104	38	82	3,096,946
Colonia	86	41	89	2,758,371
Rivera	135	33	71	3,483,654
Cerro Largo	93	40	86	2,909,882
Rocha	204	27	58	4,297,546

A su vez, es necesario considerar los costos de transporte derivados de la transferencia desde cada departamento al RS regional. Para ello se contabilizó la cantidad de viajes y kilómetros recorridos y se multiplicó por la tarifa de transporte, al igual que en el modelo matemático.

Los ingresos asociados a la operación de un relleno sanitario se reducen a la tarifa de disposición por tonelada de residuo. Al día de hoy, Felipe Cardoso cobra 1-2 UR por tonelada a los residuos no domiciliarios procesados (Intendencia Montevideo, 2025). Para el caso de RSD, los ingresos provienen del cobro de impuestos, específicamente la fracción destinada para la división limpieza y dentro de ella, para disposición final (Ing. Pablo Fitermann (Felipe Cardoso), comunicación personal, Agosto, 2025).

Los costos de invertir y operar un RS se considerarán como un ahorro en el flujo de fondos del proyecto, con excepción de la tarifa de disposición que, dado que se mantiene en ambos escenarios, se contrarresta.

## 6.8. Comparación de alternativas

Una vez estimados los ingresos y egresos implicados, tanto en la incineración como en la operación e instalación de rellenos sanitarios, se construyeron los flujos de fondos para ambas alternativas, que se presentan en el Anexo XX. En este Anexo, también se presentan las gráficas del flujo neto acumulado en el tiempo, correspondientes tanto a la planta de incineración como al RS.

Se comparan los flujos de fondos descontados de ambas opciones mediante el cálculo del VAN, aplicando en ambos casos una tasa de descuento del 6%. Los resultados obtenidos se presentan a continuación en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7: VAN resultante para el RS y planta de incineración

Alternativa de gestión RSD	Relleno sanitario	Planta de incineración
VAN	-USD 807,496,757	- USD 1,384,856,782

Aunque ambas alternativas tienen un VAN negativo, lo que indica que ninguna recupera completamente su inversión bajo los supuestos adoptados, la planta de incineración presenta un valor más negativo. La diferencia entre ambos VAN, muestra que no se puede concluir que sustituir el relleno sanitario por la planta reduce los costos totales del sistema de gestión de residuos en el largo plazo. Sin embargo, resulta relevante tener en cuenta que el análisis se realizó bajo supuestos conservadores para la planta y favorables para el relleno.

En la Figura 6.6 se observan los flujos netos acumulados de ambas alternativas juntos, para facilitar la comparación. Puede observarse que la planta de incineración presenta dos grandes desembolsos, la inversión inicial y la reposición de activos en el año 15, los ingresos sostenidos percibidos por la venta de energía eléctrica permite que su flujo neto anual mejore su desempeño en el largo plazo. En contraste, el relleno tiene un comportamiento opuesto: demanda menos desembolso inicial pero genera egresos continuos y crecientes sin tener un ingreso que lo compense, lo que hace que su flujo acumulado vaya deteriorándose año a año. Este comportamiento se explica principalmente por las diferencias en los esquemas de inversión de las alternativas.

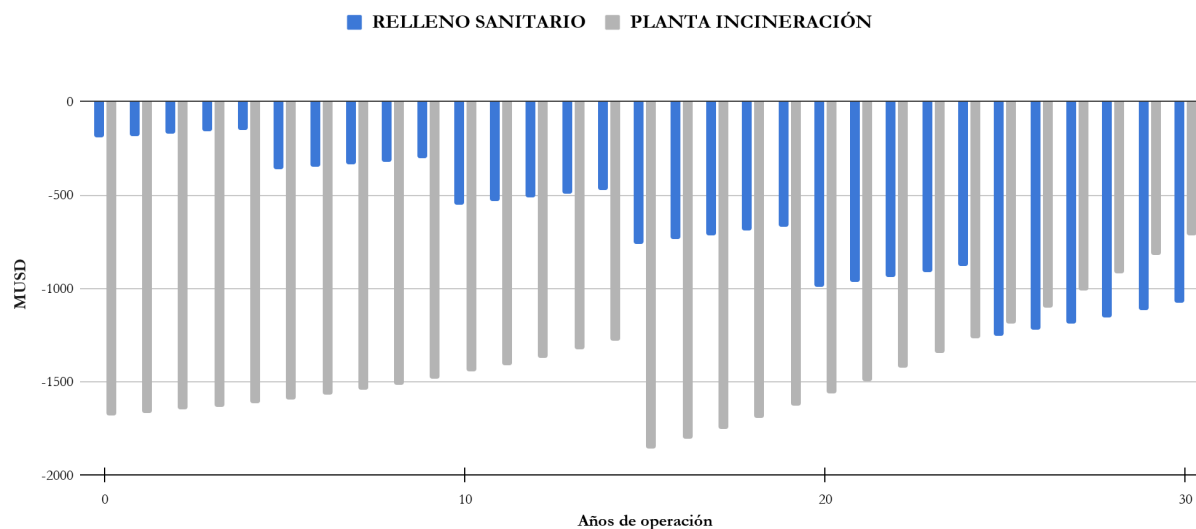


Figura 6.6: Flujo neto acumulado de ambas alternativas (Elaboración propia).

## 6.9. Flujo de fondos del proyecto

El flujo de fondos del proyecto se elabora comparando la situación con y sin proyecto. El escenario sin proyecto corresponde a la continuidad del esquema actual de gestión de los RSD, basado en la disposición en rellenos sanitarios, mientras que el escenario con proyecto contempla la sustitución de dicho esquema por la instalación y operación de una planta de incineración. En este sentido, el flujo de fondos refleja la variación neta entre ambos escenarios, incorporando como ingresos los ahorros generados por evitar la operación y expansión de los rellenos sanitarios. En la Tabla 6.8 se presenta el flujo de fondos para el proyecto sin financiamiento externo.

Tabla 6.8: Flujo de fondos sin financiamiento, valores anuales cada 5 años.

Concepto	2050	2055	2060	2065	2070	2075	2080
Beneficios no gravados por impuestos (USD)	-	77,555,869	90,434,992	105,035,781	121,649,185	140,467,031	161,710,947
Ahorro costo operativo RS (*) (USD)	-	56,088,119	63,675,542	72,289,368	82,068,445	93,170,405	105,774,203
Ahorro inversión RS (*) (USD)	193,142,178	225,663,072	262,478,357	304,327,264	351,831,057	405,525,192	-
Egresos no gravados por impuestos (USD)	-	-65,996,631	-77,323,644	-715,419,032	-105,803,687	-123,755,709	-145,093,392
Depreciación de activos (USD)	-	-58,686,667	-58,686,667	-58,686,667	-58,686,667	-58,686,667	-58,686,667
Inversión (USD)	-1,676,053,535	-	-	-	-	-	-
<b>Flujo neto (USD)</b>	<b>-1,482,911,357</b>	<b>234,623,762</b>	<b>280,578,581</b>	<b>-292,453,286</b>	<b>391,058,333</b>	<b>456,720,251</b>	<b>63,705,091</b>
<b>Flujo neto acumulado (USD)</b>	<b>-1,482,911,357</b>	<b>-1,229,386,286</b>	<b>-895,330,532</b>	<b>-1,095,770,106</b>	<b>-570,474,592</b>	<b>66,331,675</b>	<b>359,799,540</b>

(\*) Se consideran como beneficios los ahorros de no instalar y operar un relleno sanitario de la misma capacidad de procesamiento de RSD.

Los conceptos que se mantienen en ambos proyectos, como la tarifa de disposición, se contrarrestan. Para los que se repiten en ambas alternativas, se calcula la diferencia. Por ejemplo, el costo de transporte de los RSD asociado a la instalación de una planta de incineración es casi cinco veces mayor, dado que implica transportar todos los RSD desde el departamento donde se generan hacia Montevideo. En este caso, se le resta a esta cifra los costos de transporte asociados a los RS.

Por otro lado, en la Figura 6.7 se muestra la evolución anual del flujo neto acumulado de la Tabla 6.8, que permite ver la recuperación progresiva de la inversión y el desempeño financiero del proyecto sin financiamiento.

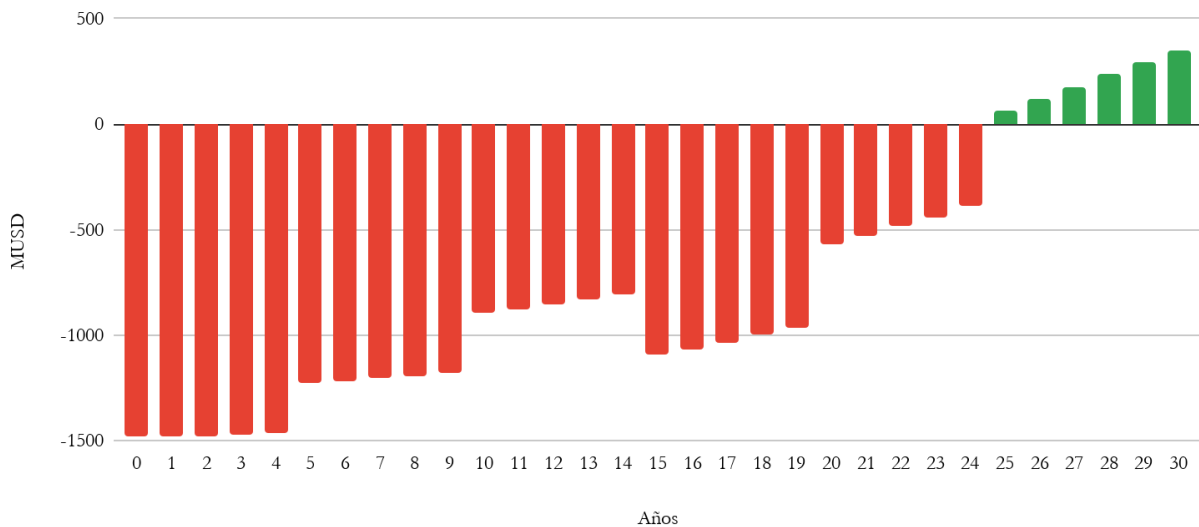


Figura 6.7: Flujo neto acumulado, escenario sin financiamiento (Elaboración propia).

A continuación, en la Tabla 6.9 se presentan los valores resultantes del proyecto con financiamiento, donde se incorpora el préstamo y el pago de capital correspondiente. También se expone la evolución anual del flujo neto acumulado en la Figura 6.8 considerando el impacto del financiamiento.

Tabla 6.9: Flujo de fondos con financiamiento, valor anual cada 5 años.

Concepto	2050	2055	2060	2065	2070	2075	2080
Beneficios no gravados por impuestos (USD)	-	77,555,869	90,434,992	105,035,781	121,649,185	140,467,031	161,710,947
Ahorro costo operativo RS (*) (USD)	-	56,088,119	63,675,542	72,289,368	82,068,445	93,170,405	105,774,203
Ahorro inversión RS (*) (USD)	193,142,178	225,663,072	262,478,357	304,327,264	351,831,057	405,525,192	-
Egresos no gravados por impuestos (USD)	-	-65,996,631	-77,323,644	-715,419,032	-105,803,687	-123,755,709	-145,093,392
Depreciación de activos (USD)	-	-58,686,667	-58,686,667	-58,686,667	-58,686,667	-58,686,667	-58,686,667
Inversión (USD)	-1,676,053,535	-	-	-	-	-	-
Préstamo (USD)	1,676,053,535	-	-	-	-	-	-
Pago de capital del préstamo (USD)	-	-34,959,171	-42,533,177	-51,748,114	-62,959,493	-76,599,849	-93,195,429
<b>Flujo neto (USD)</b>	<b>193,142,178</b>	<b>199,664,591</b>	<b>238,045,403</b>	<b>-344,201,400</b>	<b>328,098,840</b>	<b>380,120,402</b>	<b>-29,490,338</b>
<b>Flujo neto acumulado (USD)</b>	<b>193,142,178</b>	<b>284,809,948</b>	<b>421,941,548</b>	<b>-18,086,369</b>	<b>215,713,291</b>	<b>497,870,282</b>	<b>359,853,075</b>

(\*) Se consideran como beneficios los ahorros de no instalar y operar un relleno sanitario de la misma capacidad de procesamiento de RSD.

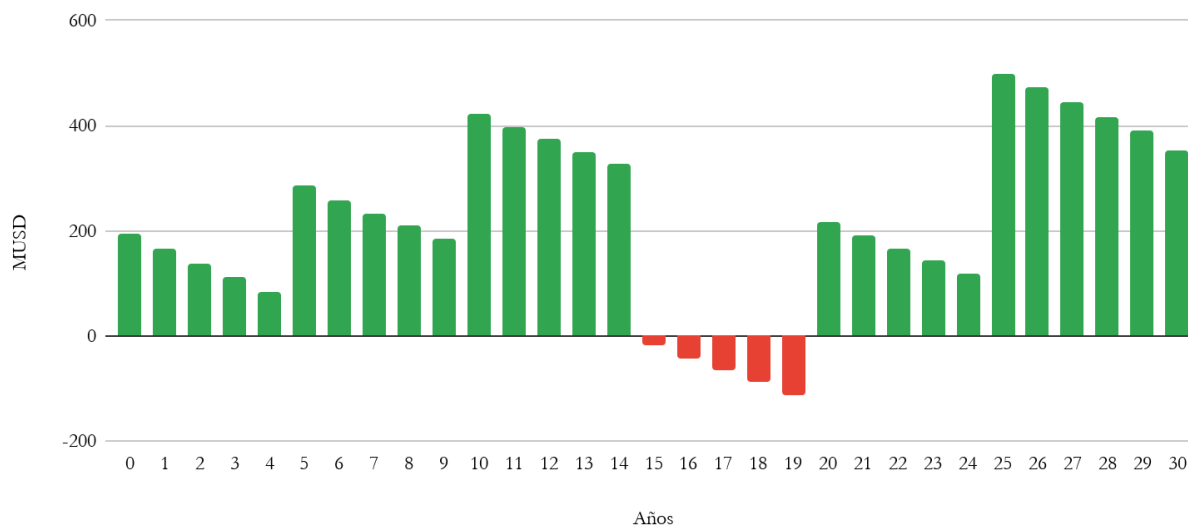


Figura 6.8: Flujo neto acumulado, escenario con financiamiento (Elaboración propia).

Este estudio se realizó considerando la variación del valor del dinero en el tiempo, tomando una inflación del 2.57% anual (Anexo IV). Esto asegura que todos los valores están expresados en términos financieros consistentes y comparables en el horizonte de evaluación.

## 6.10. Evaluación del proyecto

Para analizar la rentabilidad y viabilidad financiera del proyecto se calcularon los principales indicadores financieros: el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Período de Recuperación de la Inversión Descontado (PRID). Estos indicadores se evaluaron tanto para el escenario sin financiamiento como para el escenario con financiamiento, para comparar el desempeño del proyecto en ambas situaciones.

A continuación en la Tabla 6.10 se presentan los resultados obtenidos utilizando una tasa de descuento de 6%, la cual se toma como base y se variará en los análisis de sensibilidad más adelante.

Tabla 6.10: VAN resultante para el caso con y sin financiamiento.

Proyecto	Sin financiamiento	Con financiamiento
VAN	-USD 796,019,542	USD 229,584,105

Como se aprecia en la Tabla 6.10, la evaluación del proyecto muestra resultados muy distintos según se considere o no financiamiento.

Para el escenario sin financiamiento, el VAN es negativo, lo que indica que, a los precios y costos proyectados, el proyecto no recupera la inversión realizada bajo la tasa de descuento del 6%. La TIR de 1.17% confirma esta situación: aunque es positiva, se encuentra muy por debajo de la tasa de descuento, lo que significa que la rentabilidad que genera el proyecto (medida por la TIR) es menor que la rentabilidad mínima exigida (la tasa de descuento), por lo que se rechaza el proyecto. En este caso, dado que no se recupera la inversión, el PRID no es aplicable.

En contraste, para el escenario con financiamiento, el VAN resulta positivo ya que el préstamo logra mejorar significativamente la liquidez del proyecto. Por otro lado, la TIR resulta indeterminada dado que, como se observa en la Figura 6.9, la VAN es positiva para cualquier tasa de descuento. Ante estos casos no convencionales se recomienda hacer la evaluación del proyecto mediante el método del VAN (Gazzano y Alvez Becerra, 2021). A su vez, dado que el financiamiento es total, el recuperado descontado de la inversión es inmediato, por lo que el PRID es igual a 0.

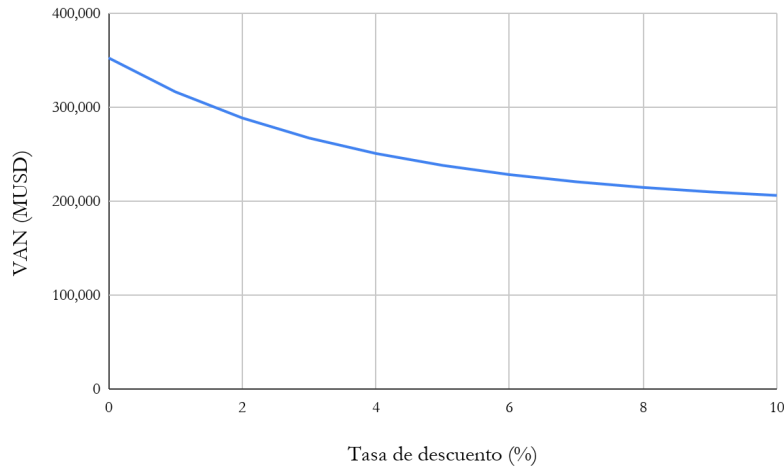


Figura 6.9: VAN en función de la tasa de descuento (Elaboración propia).

En la [Figura 6.8](#) se evidencia que el escenario con financiamiento el proyecto presenta pérdidas en la mayoría de los años dado que resulta en un flujo de fondos acumulado decreciente, salvo en los años que se contabiliza el ingreso por evitar la apertura de nuevos rellenos sanitarios cada cinco años. El hecho de sustituir el desembolso inicial por un préstamo (permitiendo comenzar con un flujo neto inicial positivo), genera un impacto acumulado que resulta en un VAN positivo.

En contraste, en el escenario sin financiamiento, si bien el proyecto genera flujos operativos positivos de manera recurrente, dichos ingresos no son suficientes para compensar el desembolso de capital requerido al inicio, lo que conduce a un VAN final negativo. Se concluye que la mayor diferencia entre estos dos casos es el pago de las cuotas del préstamo, que constituye un egreso anual significativo que genera pérdidas en el caso de financiar el proyecto.

Como conclusión, dado que los indicadores de PRID y TIR no resultan aplicables a nuestro proyecto, se opta por evaluar las dos alternativas mediante el método del VAN. Con este criterio, se puede observar que la alternativa con financiamiento resulta más conveniente, ya que presenta un VAN positivo frente al VAN fuertemente negativo de la alternativa sin financiamiento.

## 6.11. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad tiene como objetivo evaluar la sensibilidad de los resultados financieros ante cambios en el entorno o variaciones en ciertos supuestos del proyecto, evaluar la robustez del mismo, conocer el riesgo asociado ante estas alteraciones y cuales variables resultan críticas. Dado que se trata de un proyecto sin antecedentes en la región y, por ende, existe un grado importante de incertidumbre, resulta especialmente relevante analizar el impacto de cambios en los escenarios considerados. Para ello, se modificaron distintos parámetros y se registraron sus efectos en los resultados.

A efectos de clasificar los escenarios visualmente, se utilizó un criterio tipo semáforo:

- Los resultados entre  $\pm 150$  MUSD se colorean en amarillo, ya que se consideran valores frontera, cercanos a un VAN nulo.
- Cuando el VAN supera  $\pm 1,000$  MUSD, se utiliza un color verde oscuro si es positivo y rojo oscuro si es negativo, para indicar escenarios extremos: muy favorables o muy desfavorables.
- Para valores intermedios, se utiliza verde claro cuando el VAN es positivo y rojo claro cuando es negativo.

Adicionalmente, la combinación de parámetros que corresponde al escenario base, sin variaciones en parámetros, se resalta en negrita, de modo de facilitar la comparación entre la situación de referencia y los distintos escenarios analizados.

Los parámetros sometidos a variación son los siguientes.

- Tasa de descuento: la misma se estima utilizando 6% como estándar para proyectos industriales (Gerardo Gazzano, comunicación personal, Octubre, 2025). Se decidió no realizar un cálculo específico para este proyecto y evaluar el impacto de utilizar valores alternativos en este análisis.
- Tasa de inflación: se toma la tasa promedio anual compuesta de los últimos 30 años en EEUU –porque la mayoría de los costos están en dólares–, aunque esta referencia podría no reflejar la variación del dinero con el tiempo en Uruguay. A su vez, a lo largo del proyecto, se supone la estabilidad de la economía a nivel internacional y nacional.
- Residuos procesados: todos los egresos e ingresos del proyecto dependen de este parámetro. Por un lado, podrían procesarse más residuos dado que las metas de valorización están basadas en supuestos ambiciosos que podrían no cumplirse en su totalidad para 2050. Por otro lado, podrían procesarse menos residuos por la incorporación de otras estrategias paralelas de valorización y gestión de RSD. Su variación incide, además, en la capacidad de la planta, y por ende en la inversión asociada.
- Inversión inicial: corresponde al egreso más relevante del proyecto y su cálculo se basa en supuestos y fuentes internacionales que podrían no representar adecuadamente la situación nacional. Ante rangos de costos posibles, se adoptó un valor conservador (el escenario más pesimista) y se consideró una alta tasa de imprevistos para cubrir posibles desvíos. A su vez, su magnitud tiene incidencia en toda la vida útil del proyecto, ya que determina tanto la cuota de depreciación como el costo asociado a la reposición de activos, ambos con un peso significativo en el flujo de fondos.
- Egresos totales: son los egresos operativos, sin tener en cuenta inversión inicial, la depreciación y reposiciones de equipos.
- Venta de energía eléctrica: representa más del 80% de los ingresos de la planta. Este parámetro depende del precio de venta de la energía eléctrica, la composición de los residuos procesados y la eficiencia del proceso de combustión. El mercado de energía eléctrica es muy volátil y está sujeto a la oferta y demanda en la matriz energética nacional, así como fuentes de energía renovables alternativas que podrían potenciarse o surgir en un futuro.

- Costo de transporte: representa un egreso relevante del proyecto y parte de un promedio de valores de referencia del ministerio de transporte, los cuales podrían fluctuar.
- Créditos de carbono: se asumió una demanda estable y que todo el CO<sub>2</sub> evitado se comercializa a través de créditos de carbono. Este ingreso depende directamente de las toneladas de CO<sub>2</sub> evitadas, cuyo cálculo es propio de este estudio e incluye varios supuestos sobre las condiciones de operación tanto de la planta como del relleno.

Cabe aclarar que todos los valores monetarios utilizados en el análisis corresponden a montos anuales expresados a precios del año 2050.

### 6.11.1. Proyecto sin financiamiento

En primera instancia se evaluó el proyecto sin financiamiento. Los análisis realizados y las conclusiones obtenidas se detallan a continuación:

Tabla 6.11: AS tasa de descuento

TASA DE DESCUENTO	4%	5%	6%	7%	8%
VAN (MUSD)	-563	-692	-797	-884	-955

En la Tabla 6.11 se observa cómo el valor de la tasa de descuento no afecta decisivamente la rentabilidad del proyecto. En todos los casos el valor es muy negativo y las variaciones no son significativas.

Tabla 6.12: AS inversión inicial y venta de energía eléctrica

VAN (MUSD)		INVERSIÓN INICIAL (MUSD)			
		-50%	-25%	0%	
		838	1,257	1,676	
VENTA ENERGÍA ELÉCTRICA (MUSD)	+50%	4,151	1,171	467	-238
	+25%	3,459	891	187	-518
	0%	2,767	611	-93	-797
	-25%	3,113	332	-373	-1,077
	-50%	2,075	52	-653	-1,357

En la Tabla 6.12 se aprecia que para obtener un valor del VAN positivo habría que reducir drásticamente la inversión inicial o vender la energía a un precio muy superior al asumido. Se observa que en el caso base, no alcanza con un crecimiento de un 50% en el precio de la energía eléctrica para obtener un escenario positivo.

Cabe destacar que el enfoque conservador adoptado en etapas previas –seleccionando los valores más altos dentro de los rangos de costos disponibles– puede haber sobreestimado la inversión inicial. Por ello, resulta

razonable considerar un escenario en el cual dicha inversión se reduzca en torno a un 25%. En este caso, se obtiene un valor próximo al cambio de signo. A su vez, se observa que el proyecto no es tan sensible al precio de venta de energía como a la inversión inicial. Una variación en el mismo depende de factores externos, fuera del control de los ejecutores del proyecto.

No se agregan los casos de +25% y +50% para la inversión inicial ya que no habrá modificación sobre el signo del VAN y se considera un escenario poco probable dado el factor de seguridad que se consideró al calcular la inversión requerida.

Tabla 6.13: AS egresos totales y venta de energía eléctrica

VAN (MUSD)			EGRESOS TOTALES (MUSD)		
			-50%	-25%	0%
			1,746	2,619	3,492
VENTA ENERGÍA ELÉCTRICA (MUSD)	+50%	4,151	483	127	-238
	+25%	3,459	203	-153	-518
	0%	2,767	-77	-433	-797
	-25%	3,113	-356	-713	-1,077
	-50%	2,075	-636	-993	-1,357

En principio, comparando la Tabla 6.13 con la 6.12, se observa que la inversión inicial tiene significativamente más peso en el VAN que el resto de los egresos, dado que reducir en 50% los egresos aún permite escenarios negativos, mientras que el mismo efecto en la inversión no. Esto se debe a que la inversión no afecta solo el desembolso en el año 0, sino que la depreciación y reposición de equipos, que en su conjunto suman más que los otros egresos juntos.

Tabla 6.14: AS residuos procesados y venta de energía eléctrica

VAN (MUSD)			RESIDUOS PROCESADOS (ton/día)				
			-50%	-25%	0%	+25%	+50%
			1150	1725	2300	2875	3450
VENTA ENERGÍA ELÉCTRICA (MUSD)	+50%	4,151	-786	-545	-238	112	493
	+25%	3,459	-926	-754	-518	-238	74
	0%	2,767	-1,066	-964	-797	-587	-346
	-25%	3,113	-1,206	-1,174	-1,077	-937	-766
	-50%	2,075	-1,346	-1,384	-1,357	-1,287	-1,185

De la Tabla 6.14 se concluye que el sistema es altamente sensible a la cantidad de residuos procesados, por lo que se podría decir que el éxito del proyecto depende de que haya suficientes residuos para operar. El escenario de un aumento del 25% de los residuos procesados representa un escenario de no cumplimiento de alguno de los objetivos de valorización establecidos. Esto es un caso probable, ya que los objetivos planteados

son ambiciosos. También se deduce que no basta con aumentar el ingreso por venta de energía eléctrica para obtener rentabilidad y que una disminución del mismo tiene un efecto significativo sobre la rentabilidad del proyecto.

De este análisis se concluye que el proyecto sin financiamiento es inviable, dado que la rentabilidad solo se da ante cambios extremos o cuando dos parámetros varían favorablemente en simultáneo, lo cual tiene muy baja probabilidad.

### 6.11.2. Proyecto con financiamiento

Tabla 6.15: AS tasa de descuento

TASA DE DESCUENTO	6%	8%	10%	12%	14%
VAN (MUSD)	230	215	206	201	197

Los valores de la Tabla 6.15 muestran que al incorporar financiamiento, el VAN pasa a ser positivo y el proyecto robusto frente a variaciones en la tasa de descuento a ser considerada. La estructura de financiamiento permite que el proyecto mantenga su atractivo incluso bajo tasas de descuento más exigentes.

Tabla 6.16: AS residuos procesados y costos de transporte

VAN (MUSD)			RESIDUOS PROCESADOS (ton/día)				
			-50%	-25%	0%	+25%	+50%
			1150	1725	2300	2875	3450
COSTOS DE TRANSPORTE (USD/km)	+50%	7.7	-494	-249	38	353	687
	+25%	6.4	-325	-109	140	469	824
	0%	5.1	-389	-101	230	585	962
	-25%	3.8	-337	-27	323	702	1,100
	-50%	2.6	-284	46	419	818	1,237

En la Tabla 6.16 se observa que al igual que en el caso sin financiamiento, el VAN es muy sensible a la cantidad de residuos.

Aumentar el procesamiento de residuos genera rentabilidad en todos los escenarios, incluso con un aumento del 50% en el costo de transporte. Por el contrario, reducir el costo de transporte no compensa una reducción en los residuos procesados. Se puede decir, que el proyecto no es tan sensible a los costos de transporte como lo es al procesamiento de residuos.

Sin embargo, el costo de transporte es un parámetro en el que se puede tener mayor incidencia a través de tercerización, economía de escala, uso de combustibles eléctricos o inclusive uso de la energía generada en la incineración para abastecer la flota. En cambio, el volumen de procesamiento de residuos depende de

políticas gubernamentales y hábitos de consumo, en los que no se puede incidir. No obstante, una alternativa ante una baja importante de lo generado o suba de costos, podría ser procesar residuos industriales, como ya se realiza en industrias del país (UPM, 2024), o incluso importarlos, tal como se hace en países desarrollados como Suecia (Avfall Sverige, 2023) o Dinamarca (IEA Bioenergy, 2021).

Tabla 6.17: AS tasa de descuento y tasa de inflación

VAN (MUSD)			TASA DE DESCUENTO			
			0%	25%	50%	100%
			6%	7.5%	9%	12%
TASA DE INFLACIÓN	+50%	3.86%	522	456	408	345
	+25%	3.21%	352	319	295	263
	0%	2.57%	<b>230</b>	218	210	201
	-25%	1.93%	137	142	146	153
	-50%	1.29%	71	86	98	116

A partir de la Tabla 6.17 se concluye que el VAN presenta una mayor sensibilidad frente a variaciones en la tasa de inflación que frente a cambios en la tasa de descuento. Esto se debe a que, si bien ambas tasas afectan la totalidad de los flujos de ingresos y egresos, la inflación opera mediante un efecto compuesto a lo largo del horizonte del proyecto. Este efecto acumulativo amplifica su incidencia sobre los flujos futuros, generando un impacto proporcionalmente mayor en el valor presente neto en comparación con la tasa de descuento.

Tabla 6.18: AS residuos procesados y venta de energía eléctrica

VAN (MUSD)			RESIDUOS PROCESADOS (ton/día)				
			-50%	-25%	0%	+25%	+50%
			1150	1725	2300	2875	3450
VENTA ENERGÍA ELÉCTRICA (MUSD)	+50%	4,151	-109	318	788	1,285	1,801
	+25%	3,459	-249	109	508	935	1,382
	0%	2,767	-389	-101	<b>230</b>	585	962
	-25%	3,113	-529	-311	-51	236	542
	-50%	2,075	-669	-521	-331	-114	123

Los valores de la Tabla 6.18 confirman que para asegurar la rentabilidad del proyecto, es imprescindible asegurar un flujo mínimo de residuos. Por otro lado, se observa que una caída de 25% en los ingresos por la venta de energía eléctrica generan un escenario de VAN negativo. Este escenario podría darse en caso de disminuir la demanda o el precio de venta de energía, así como en caso de reducirse la eficiencia energética del proceso o el poder calorífico de los residuos procesados (por ejemplo, con mayor valorización del plástico o menor valorización de los residuos orgánicos).

Tabla 6.19: AS créditos de carbono

INGRESOS CRÉDITOS DE CARBONO	-100%	-75%	-50%	-25%	0%
VAN (MUSD)	18	71	123	176	230

La Tabla 6.19 evidencia que la reducción total o parcial de los ingresos asociados a la venta de créditos de carbono, no afecta críticamente la rentabilidad del proyecto, aunque reduce el margen de ganancia.

Incluso de no haber demanda de créditos de carbono, el proyecto sigue siendo rentable. La reducción de emisiones de dióxido de carbono no tiene un gran peso económico pero sí ambiental.

En resumen, el análisis de sensibilidad permitió evaluar la robustez del proyecto frente a variaciones en los supuestos considerados y entender mejor cómo estos influyen en los resultados. Esto aporta una visión más clara sobre la consistencia del modelo y sobre el efecto que podrían tener cambios en los parámetros clave.

## 6.12. Externalidades

Más allá de los resultados estrictamente económicos, la instalación de la planta implica un conjunto de externalidades, entendidas como los efectos que un proyecto genera sobre terceros, tanto positivos como negativos, que no se reflejan en el sistema de precios de mercado (Sistema Nacional de Inversión Pública, 2020, 11). Por más de que no se ven reflejadas en el flujo de fondos del proyecto, son un componente clave para evaluar un proyecto de inversión de forma integral.

### 6.12.1. Externalidades positivas

La instalación y operación de la planta genera diversos beneficios sociales y ambientales que exceden los resultados financieros, los mismos se listan a continuación:

1. Reducción del impacto ambiental global, al disminuir significativamente la generación de metano y lixiviados asociados a los rellenos sanitarios.
2. Mejora sanitaria, debido a la reducción de olores y focos de contaminación vinculados al cierre de los rellenos existentes.
3. Mejora estética y paisajística del entorno, al eliminar las superficies destinadas a disposición final. Además, si la planta es diseñada adecuadamente, puede convertirse en un punto de atracción turística como ocurre en plantas a nivel internacional (ejemplo Amager Bakke en Dinamarca).
4. Aporte al cumplimiento de metas climáticas, al dar la posibilidad de acceder a créditos de carbono por las emisiones evitadas.
5. Fortalecimiento del sistema nacional de gestión de residuos al avanzar a un modelo homogéneo y centralizado entre todas las intendencias.

6. Mejor posicionamiento del país a nivel regional al adoptar una solución avanzada y pionera en gestión de residuos, promoviendo ir un paso más en la jerarquía de residuos establecida en la ley de Gestión Integral de Residuos.

### 6.12.2. Externalidades negativas

El proyecto también presenta impactos potenciales que deben ser gestionados adecuadamente:

1. Desconfianza social y percepción de riesgo ambiental respecto de la incineración, aunque se trate de tecnologías con controles ambientales estrictos.
2. Emisiones atmosféricas residuales como NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>.
3. Incremento en el transporte de residuos al centralizar el tratamiento en Montevideo, lo que implica emisiones adicionales y eventual congestión en determinadas zonas del área metropolitana.
4. Resistencias sindicales por parte de los trabajadores vinculados al sistema actual de disposición y recuperación de residuos, incluyendo recolectores informales, clasificadores y personal asociado a los rellenos existentes.
5. Molestias a la comunidad local, ya que durante la etapa de construcción y operación de la planta pueden generarse ruidos, emisión de gases y tránsito de camiones, así como aumentar la percepción de riesgo de los vecinos.

Por último, el proyecto también presenta externalidades políticas, dado que la instalación de una planta de incineración de residuos es una decisión de alto impacto público que requiere la necesidad de coordinación entre el gobierno nacional, las intendencias, los organismos ambientales y otros actores relevantes.

## 7. Conclusiones

La incineración se presenta como una alternativa frente a la problemática actual asociada al enterramiento de residuos en Uruguay. El principal objetivo del presente proyecto fue evaluar su viabilidad tecnológica y financiera. A partir de la investigación realizada, se desprenden las siguientes conclusiones.

De la revisión del marco teórico se concluye que la tecnología de incineración más adecuada es la incineración en masa con parrilla móvil, debido a la naturaleza heterogénea de los RSD. Asimismo, se determinó que no resulta factible la adaptación de capacidades existentes, dada la complejidad de los equipos requeridos.

El análisis de la literatura evidencia que los principales *drivers* de los casos de éxito a nivel internacional son la elevada demanda energética, principalmente los sistemas de calefacción distrital en Europa, o la escasez de espacio disponible para rellenos sanitarios, como ocurre en varios países de Asia. Ninguno de estos dos son puntos de semejanza con Uruguay. En contraste, el atractivo de la incineración en el contexto nacional radica en su rol como estrategia de gestión de residuos, como alternativa al relleno sanitario, el cual presenta actualmente importantes limitaciones. En particular, las principales ineficiencias del sistema uruguayo se concentran en los residuos sólidos domiciliarios, donde se identifican las mayores oportunidades de mejora.

La realidad nacional fue modelada mediante un análisis multicriterio que consideró factores sociales, ambientales, industriales y económicos. Bajo este enfoque, los resultados obtenidos mediante el modelo matemático reafirman que el departamento óptimo para una planta de incineración de RSD es Montevideo. En el caso de considerarse la apertura de una segunda planta, los departamentos que presentan mejores condiciones son Tacuarembó y Paysandú.

El análisis de sensibilidad realizado, a partir de variaciones en los parámetros considerados, continúa indicando a Montevideo como la localización óptima. Además, se refuerza que incorporar el aprovechamiento de la energía térmica podría constituir un factor clave para garantizar la rentabilidad del proyecto y maximizar el aprovechamiento energético de los residuos. Sin embargo, la falta de interés de parte de los principales consumidores de energía térmica y las complejidades técnicas asociadas impiden, en la actualidad, considerarlo como un caso de estudio pertinente.

Desde el punto de vista financiero, se concluye que el proyecto no resulta rentable sin el financiamiento de una institución que promueva el desarrollo social en proyectos de esta índole, como el Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Para garantizar el financiamiento del proyecto, resulta necesario que UTE u otra entidad se comprometa a la compra de la energía eléctrica generada mediante un contrato. Por otro lado, se identificó como condición indispensable para la rentabilidad del proyecto la implementación de una tarifa por tonelada de residuo incinerado, análoga a la tarifa de disposición existente en Felipe Cardoso.

A raíz del análisis de sensibilidad se deduce que los resultados obtenidos son consistentes frente a variaciones en los supuestos y condiciones de contexto. Además, se concluye que el éxito del proyecto depende fundamentalmente de asegurar un flujo mínimo y constante de residuos.

Al contrastar con la alternativa del relleno sanitario, pese a que la incineración presenta un VAN más negativo, bajo los supuestos conservadores considerados, sus costos a largo plazo son comparables. Además, bajo las condiciones estudiadas, la incineración de residuos presenta una reducción aproximada del 50% de las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con el relleno sanitario. Dicho esto, actualmente los residuos son dispuestos sin aprovechamiento alguno de su potencial energético, lo que no solo implica una pérdida de valor, sino también mayores costos económicos y ambientales. En este sentido, se concluye que la incineración constituye una herramienta de transición interesante hacia una gestión de los RSD alineada con la jerarquía de valorización a nivel internacional. No debería entenderse como un sustituto del reciclaje o la reutilización, sino como un catalizador hacia una gestión más sostenible.

Para que este enfoque sea viable, resulta prácticamente indispensable la participación de un organismo gubernamental que garantice el cumplimiento de los acuerdos necesarios. Además, se requiere la incorporación de incentivos que fomenten la valorización energética de los residuos y limiten el uso del relleno sanitario.

A partir del presente trabajo, se abren diversas líneas de investigación futura que permitan profundizar y ampliar el alcance del estudio. En primer lugar, se sugiere evaluar alternativas para la optimización de la red de transporte, tales como la implementación de estaciones de transferencia en puntos estratégicos. Asimismo, sería interesante analizar el uso de la energía generada para nuevas aplicaciones, como el almacenamiento mediante hidrógeno o el autosostenimiento energético de los vehículos de recolección de RSD. De igual manera, resulta pertinente realizar un análisis de capacidades del sistema, considerando flujos de ingreso de residuos, tiempos de descarga, almacenamiento intermedio y régimen de alimentación, con el objetivo de optimizar el desempeño global de la planta. En esta línea, la determinación de maquinaria y tecnología debería abordarse mediante una evaluación comparativa basada en requerimientos técnicos. A su vez, se propone avanzar en el diseño estructural de las instalaciones y en el desarrollo de la ingeniería civil asociada, así como otros proyectos de ingeniería de detalle profundizando en cuestiones operativas, mecánicas y eléctricas.

Por otro lado, se recomienda profundizar en el análisis y diseño de políticas públicas que promuevan la coordinación efectiva entre el Ministerio de Ambiente, las intendencias y demás actores relevantes, con el objetivo de construir un sistema integral de gestión de residuos a nivel nacional. En este sentido, resulta interesante incorporar estudios de percepción pública y aceptación social, utilizando metodologías cualitativas y cuantitativas, como entrevistas y encuestas, que permitan relevar de forma sistemática las preocupaciones y expectativas de la población respecto a la implementación de este tipo de infraestructura.

Adicionalmente, se identifican posibles mejoras en el modelado, como la incorporación de una mayor granularidad, a nivel predial o municipal. Realizar un estudio respecto a la implementación de posibles expansiones de capacidad, mediante un diseño modular, para poder adaptar mejor la instalación a la demanda. Desde un punto de vista logístico, se propone incluir un análisis enfocado en la operación del sistema de transporte, incorporando la asignación de vehículos, ventanas horarias de descarga y definición de rutas óptimas. Del mismo modo, se plantea incorporar las emisiones asociadas al transporte de los residuos. A su vez, resulta interesante ampliar el modelo de optimización para incluir otras alternativas WtE, como la incorporación de CDR, biogás o pirólisis, permitiendo asignar las distintas fracciones de RSD a la estrategia más conveniente en cada caso.

Por último, avanzar hacia una estrategia más sostenible requiere del compromiso de la sociedad. En este sentido, el fortalecimiento de políticas de educación ambiental que fomenten la separación en origen resulta un complemento indispensable para acompañar la transición hacia un sistema de gestión de RSD más sostenible y alineado con los principios de la jerarquía de valorización.

# Bibliografía

ADME. (2025). *Administración del Mercado Eléctrico*. ADME.  
[http://adme.com.uy/mme\\_admin/sancionado.php](http://adme.com.uy/mme_admin/sancionado.php)

Administración del mercado eléctrico. (2025). *Precio Spot sancionado*.  
<https://www.adme.com.uy/controlpanel.php>

Ajorloo, M., Ghodrat, M., Scott, J. et al. Heavy metals removal/stabilization from municipal solid waste incineration fly ash: a review and recent trends. *J Mater Cycles Waste Manag* 24, 1693–1717 (2022).  
<https://doi.org/10.1007/s10163-022-01459-w>. (s.f.).

Alpino, R. (1986). Economías de escala y la “regla del 0,6”. *Costos de ingeniería y economía de producción*.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167188X86800258>

ANCAP. (s.f.). *Planta Pórtland*. <https://www.ancap.com.uy/2203/1/planta-portland.html>

Arteaga, R. (2024). *China Turns Food Waste Into Green Methanol Innovation*. INSPENET.  
<https://inspenet.com/en/noticias/creara-metanol-green-with-waste-food/>

Avfall Sverige. (2023). *Swedish Waste Management 2023*. 30-33.

*Baghouse Filter – Efficient, Reliable Baghouse Dust Collectors*. (s.f.). Moldow. Retrieved December 7, 2025,  
<https://moldow.com/dust-extraction-system/products/baghouse-filter/>

Banco Interamericano de Desarrollo. (2022). *Uruguay consolidará transición energética baja en carbono con apoyo del BID*.  
<https://www.iadb.org/es/noticias/uruguay-consolidara-transicion-energetica-baja-en-carbono-con-apoyo-del-bid>

Bartl, A. (2014). *Moving from recycling to waste prevention: A review of barriers and enablers*.  
<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X14541986>

Betzabeth, S. (2022). Análisis comparativo de la normatividad y gestión sobre residuos sólidos urbanos en México y Japón. <https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/4429>

Cámara de Industrias del Uruguay. (2021). *Contrato para la disposición final de residuos*.  
<https://www.ciu.com.uy/wp-content/uploads/2022/10/contrato-para-disposicion-final-de-rsi-2021.pdf>

The Carbon Sink. (s.f.). *Eventos Carbono Neutro*. The Carbon Sink.  
<https://thecarbonsink.com/ar/servicios/>

CEMPRE. (1998). *Manual de Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos, Capítulo 4*.  
[https://cempre.org.uy/docs/manual\\_girsu/parte\\_4\\_incineracion.pdf](https://cempre.org.uy/docs/manual_girsu/parte_4_incineracion.pdf)

- Charquero, G. (2022). *Basura por metanol: el proyecto con que Uruguay busca vender combustible a Maersk*. Bloomberg Línea.  
<https://www.bloomberglinea.com/2022/03/03/basura-por-metanol-como-es-el-proyecto-con-que-uruguay-busca-ser-proveedor-de-maersk/>
- Chartier, Y. (2014). In *Safe Management of Wastes from Health-care Activities*. World Health Organization.
- Chen, B., Perumal, P., Illikainen, M., & Ye, G. (2023). A review on the utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash as a mineral resource for construction materials. *Journal of Building Engineering*, 71.
- Chiesa, V. (2024, Diciembre). *RELEVAMIENTO DE COBROS POR LA GESTIÓN DE RESIDUOS A NIVEL DEPARTAMENTAL EN URUGUAY 2024*. Ministerio de Ambiente. Retrieved April 24, 2026, from [https://www.ambiente.gub.uy/oan/documentos/Informe-cobros-residuos-FINAL\\_20-12-2024.pdf](https://www.ambiente.gub.uy/oan/documentos/Informe-cobros-residuos-FINAL_20-12-2024.pdf).
- Cielo Azul. (s.f.). *Quiénes somos*. <https://www.cieloazul.com.uy/quienes-somos/>
- Coll, A. (2018). Plantas de Incineración de Basura o de Valorización Energética: ¿Solución sustentable?
- Consumer Price Index for All Urban Consumers: All Items in U.S. City Average*. (s.f.). FRED. Retrieved December 10, 2025, <https://fred.stlouisfed.org/series/CPIAUCSL>
- Cory Group. (s.f.). *No waste from waste*. Cory Group - recyclable and non-recyclable waste management services across London. <https://www.corygroup.co.uk/>
- Cowan Architects. (s.f.). *Insurance Costs in Construction and Operations – The Role of Smart Design*. <https://cowan-architects.co.uk/insurance-costs-in-construction-and-operations/>
- CSI Ingenieros & Estudio Pittamiglio. (2011). *Información de Base para el Diseño de un Plan Estratégico de Residuos Sólidos*. <https://cempre.org.uy/wp-content/uploads/2016/06/tomo1.pdf>
- Cyranka, M., & Jurczyk, M. (2016, Junio 17). Energy Recovery from Municipal Waste based on Moving Grate Technology. *Agricultural Engineering*, 20, 23-33.
- David D. Randall, Karen S. Schaffner, Carrie Richardson Fry. (2019). *Selective Catalytic Reduction, Health and Environmental Impacts Division Office of Air Quality Planning and Standards U.S. Environmental Protection Agency*.  
[https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-12/documents/scrcostmanualchapter7thedition\\_2016revisions2017.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-12/documents/scrcostmanualchapter7thedition_2016revisions2017.pdf)
- Demag cranes. (s.f.). *Eliminación de residuos*. <https://www.demagcranes.com/es/industrias/eliminacion-de-residuos>
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). (2010). *Guidelines on Pre- and Co-processing of Waste in Cement Production*.  
[https://www.giz.de/en/downloads/giz-2020\\_en\\_guidelines-pre-coprocessing.pdf](https://www.giz.de/en/downloads/giz-2020_en_guidelines-pre-coprocessing.pdf)

EIA. (2023, March 21). *Waste-to-energy plants are a small but stable source of electricity in the United States - U.S. Energy Information Administration*. EIA. Retrieved November 29, 2025, <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=55900>

El País. (2023). Cementos Artigas pone en marcha su nueva planta de molienda y despacho de última generación. <https://www.elpais.com.uy/negocios/empresas/cementos-artigas-pone-en-marcha-su-nueva-planta-de-molienda-y-despacho-de-ultima-generacion>

Elsayed, A. (2024). Socio-Economic Impact of Waste-to-Energy Projects on Local Communities: Case Studies from Developing Regions. <https://www.walshmedicalmedia.com/open-access/socioeconomic-impact-of-wastetoenergy-projects-on-local-communities-case-studies-from-developing-regions.pdf>

Energy Sustainability Directory. (2025). *Waste-to-Energy Integration*. Energy Sustainability Directory. <https://energy.sustainability-directory.com/term/waste-to-energy-integration/>

EPC Intel. (2024). *Waste-to-energy plants: What do they cost*. <https://epcintel.com/insight/draft-waste-to-energy-plants-what-do-they-cost-7>

Espasandín, F., Ruibal, M. C., & Zecchi, G. (2025). Determinación de la ubicación, distribución y diseño de plantas de trituración de envases para la obtención de arena de vidrio.

European Union. (2011). *Directive 2000/76/EC*. Waste Incineration. <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/waste-incineration.html>

Eurostat. (2025). *Municipal waste statistics - Statistics Explained - Eurostat*. European Commission. Retrieved November 29, 2025, [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal\\_waste\\_statistics&oldid=627217](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics&oldid=627217)

Evans, R. (2022). Air Scrubbers. *Safe Rack*. <https://saferack.com/glossary/air-scrubber/>

Frank, A. (s.f.). *Baghouse Cost Overview: Key Factors for Bag Filter Prices and Installation*. Torch-Air. <https://torch-air.com/blog/baghouse-cost>

Fundación ambiente y recursos naturales. (2019). *La incineración de basura en la Ciudad de Buenos Aires es INCONSTITUCIONAL*. <https://farn.org.ar/la-incineracion-de-basura-en-la-ciudad-de-buenos-aires-es-inconstitucional/>

Gardner, E. (2023). *The benefits of co-processing*. World cement. <https://www.worldcement.com/europe-cis/27112023/the-benefits-of-co-processing/>

Gazzano, G., & Alvez Becerra, A. (2021). *Evaluación económica y financiera de proyectos de inversión* (4th ed.).

Gobierno de Canadá. (2021, April 13). *Reducing municipal solid waste*. Canada.ca. Retrieved November 29, 2025,

<https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/managing-reducing-waste/municipal-solid/reducing.html>

Greenpeace. (s.f.). *Con incineración no hay Basura Cero*.

<https://www.greenpeace.org/argentina/participa/involucrate/con-incineracion-no-hay-basura-cero/>

Hirvonen, J. (2020, October 15). *Waste Incineration Heat and Seasonal Thermal Energy Storage for Promoting Economically Optimal Net-Zero Energy Districts in Finland*.

Huan, C.-M., Yang, W.-F., Ma, H.-W., & Song, Y.-R. (2006). The potential of recycling and reusing municipal solid waste incinerator ash in Taiwan. *Waste Management*, 26(9), 979-987.

<https://www-sciencedirect-com.proxy.timbo.org.uy/science/article/pii/S0956053X05002473?via%3Dihub>

IEA Bioenergy. (s.f.). Bioenergy | International Collaboration in Bioenergy. <https://www.ieabioenergy.com/>

IEA Bioenergy. (2016). *The big picture: the general routes (Chapter 4: established technologies for integrating energy recovery into solid waste management systems.)*.

[https://task36.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/4/2016/06/Chapter\\_4\\_Final.pdf](https://task36.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/4/2016/06/Chapter_4_Final.pdf)

IEA Bioenergy. (2021, March). *Waste-to-Energy and Social Acceptance: Copenhill WtE plant in Copenhagen*.

[https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/03/T36\\_WtE-and-Social-Acceptance\\_Copenhhill-WtE-plant-in-Copenhagen.pdf](https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/03/T36_WtE-and-Social-Acceptance_Copenhhill-WtE-plant-in-Copenhagen.pdf)

IMPO. (2004). *LEY DE RECICLAJE DE ENVASES*. Normativa y avisos legales del Uruguay.

<https://www.impo.com.uy/bases/leyes/17849-2004>

Instituto Nacional de Estadística. (2023). Anuario Estadístico Nacional 2024. Volumen N° 101.

<https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fwww5.ine.gub.uy%2Fdocuments%2FANUARIOS%2FAnuario%25202024%2F4%2520-%2520SECTORES%2520ECON%25C3%2593MICOS%2F4.7%2520Transporte%2520y%2520Comunicaciones%2F4.7.2ok.xls&wdOrigin=BROWSELINK>.

<https://www.gub.uy/instituto-nacional-estadistica/comunicacion/publicaciones/anuario-estadistico-nacional-2024-volumen-n-101/anuario-estadistico>

Instituto Nacional de Estadística. (2023). *Indicadores de energía, por año*. Anuario Estadístico Nacional 2023. Volumen N° 100.

<https://www.gub.uy/instituto-nacional-estadistica/comunicacion/publicaciones/anuario-estadistico-nacional-2023-volumen-n-100/45-energia/4511>

Instituto Nacional de Estadística. (2023). *Potencia instalada, por año, según fuente en MW (megavatio)*. Anuario Estadístico Nacional 2023. Volumen N° 100.

<https://www.gub.uy/instituto-nacional-estadistica/comunicacion/publicaciones/anuario-estadistico-nacional-2023-volumen-n-100/45-energia/454-potencia>

Instituto Nacional de Estadística. (2025). *Índice Medio de Salarios*.

<https://www5.ine.gub.uy/documents/Estad%3ADsticasecon%3%B3micas/HTML/IMS/2025/IMS%20Agosto%202025.html>

- Intendencia Montevideo. (2025). *Tarifa de disposición final de residuos* | Portal trámites. Portal trámites. <https://tramites.montevideo.gub.uy/tramite/tarifa-de-disposicion-final-de-residuos>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). Desechos. *Directrices del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre 5.1 en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/5\\_Waste\\_ES.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/5_Waste_ES.pdf)
- International Energy Agency, Voswinkel, F., Delmastro, C., & Reidenbach, B. (2025, December 8). *Opportunities for district heating in the changing energy landscape – Analysis*. IEA. <https://www.iea.org/commentaries/opportunities-for-district-heating-in-the-changing-energy-landscape>
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Working Group III: Mitigation of Climate Change*. [https://archive.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg3/en/ch10-ens10-3-4.html](https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/ch10-ens10-3-4.html)
- Kasaecian, A., Shamaeizadeh, A., & Jamjoo, B. (2022, Julio). Combinations of Rankine with ejector refrigeration cycles: Recent progresses and outlook. *Applied Thermal Engineering*, 211.
- Kunming. (2025). <https://www.kunming.cn/news/c/2025-06-24/13955503.shtml>
- LKSur. (2013). Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos Urbanos con Fines Energéticos. [https://cempre.org.uy/wp-content/uploads/2016/06/informe\\_1-.pdf](https://cempre.org.uy/wp-content/uploads/2016/06/informe_1-.pdf)
- Lombardi, L., Carnevale, E., & Corti, A. (2015). A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. *Waste Management*, 37, 26-44.
- Lombardi, L., & Castaldi, M. (2024, Enero 12). Energy Recovery from Residual Municipal Solid Waste: State of the Art and Perspectives within the Challenge to Climate Change. *Energies*, 395.
- López Gómez, A. M. (2025). *San Andrés: La planta de incineración de basuras inaugurada tras 15 años de retraso*. Acción Comunal. <https://www.accioncomunaldecolombia.org/2025/04/13/san-andres-la-planta-de-incineracion-de-basuras-inaugurada-tras-15-anos-de-retraso/>
- Malinauskaite, J., Jouhara, H., Czajczynska, D., Stanchev, P., & Katsou, E. (2017). Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe. *Energy*.
- The Maritime Executive. (2022). *WasteFuel Technology Converts Municipal Solid Waste to Green Methanol*. <https://maritime-executive.com/index.php/article/wastefuel-technology-converts-municipal-solid-waste-to-e-methanol-fuel>
- Ministerio de Ambiente. (2021). *Plan Nacional de Gestión de Residuos*. [https://www.ambiente.gub.uy/oan/documentos/PNGR\\_Libro\\_Completo.pdf](https://www.ambiente.gub.uy/oan/documentos/PNGR_Libro_Completo.pdf)
- Ministerio de Ambiente. (2023). *Del Plan de Gestión de Envases al Plan Vale*. Uruguay más circular. <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/comunicacion/noticias/del-plan-gestion-envases-plan-vale>

Ministerio de Ambiente. (2025). *Resoluciones del Ministerio de Ambiente asociadas a la recuperación de envases y reducción de plásticos de un solo uso*. Uruguay + Circular.  
<https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/resoluciones-del-ministerio-ambiente-asociadas-recuperacion-envases-reduccion#:~:text=A%20diciembre%20de%202025%20se,contener%2040%20%25%20de%20material%20reciclado>

Ministerio de Industria, Energía y Minería. (2022). *Balance Energético Nacional*.  
<https://ben.miem.gub.uy/oferta5.php>

Ministerio de Industria, Energía y Minería. (2024). Plan de Expansión de la Generación 2024-2043.

Ministerio de Industria, Energía y Minería. (2025). Agenda de Energía, Uruguay 2050 aporte para un acuerdo país. *Dirección Nacional de Energía*.  
<https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/sites/ministerio-industria-energia-mineria/files/documentos/publicaciones/Agenda%20de%20Energia%CC%81a%2C%20Uruguay%202050.pdf>

Ministerio de Transporte y Obras Públicas Institucional. (2025). *Precios de referencia. Servicios de transporte*.  
<https://www.gub.uy/ministerio-transporte-obras-publicas/comunicacion/publicaciones/precios-referencia-servicios-transporte/precios-referencia-servicios-1>

Morrison Hershfield. (2023). *Study of waste to energy approaches for processing residual municipal solid waste in Canada*.

Neuwahl, F., Cusano, G., Gomez Benavides, J., Holbrook, S., & Roudier, S. (2019). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration.

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. (2025). *Environment at a Glance Indicators*.  
[https://www.oecd.org/en/publications/environment-at-a-glance-indicators\\_ac4b8b89-en/full-report/component-4.html](https://www.oecd.org/en/publications/environment-at-a-glance-indicators_ac4b8b89-en/full-report/component-4.html)

Ouedraogo, A. S., & Kumar, A. (2024, Setiembre). *Comparative Life Cycle Assessment of Landfilling with Sustainable Waste Management Methods for Municipal Solid Wastes*.

Peters, M. S., & Timmerhaus, K. D. (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*.  
<https://davuniversity.org/images/files/study-material/PLANT%20DESIGN%20AND%20ECONOMICS%20FOR%20CHEMICAL%20ENGINEERS.pdf>

PlanEnergi. (2023, November 6). *Storing heat for a cold day in Denmark's Capital Region*.

Processo Industrial. (s.f.). *Filtro de Mangas*. Tecnología en Filtración Industrial.  
<https://processoindustrial.com.br/filtro-manga-o-que-e/>

*¿Qué es el Ciclo Rankine?* | Blog Pepeenergy. (s.f.). Pepeenergy. Retrieved November 30, 2025,  
<https://www.pepeenergy.com/blog/glosario/definicion-ciclo-rankine/>

Ramboll. (s.f.). Ramboll: Architecture, engineering and consultancy. <https://www.ramboll.com/>

- Report Linker. (2023). *Global Municipal Waste Recycled or Composted by Country*.  
<https://www.reportlinker.com/dataset/5845c60870143c87608e68b2c015904ca7b22271>
- Reworld. (s.f.). *Reworld™ Locations – Sustainable Waste Facilities - Where We Are*. Reworld.  
<https://www.reworldwaste.com/where-we-are>
- Ríos, Yelpo, Velázquez, & MacKinnon. (2024). Incineración y generación eléctrica con residuos municipales.
- Robano, M., & Gonzáles, M. J. (2021). De residuos a recursos: articulando lo ambiental, lo social y lo económico.  
<https://publications.iadb.org/es/de-residuos-recursos-articulando-lo-ambiental-lo-social-y-lo-economico>
- Roda, C., & Pigola, P. (2021, Septiembre). Regionalización de rellenos sanitarios: el caso de Uruguay.
- Rodríguez, V. (2023). *Un material reutilizable, pero solo se recicla un 4%: ¿qué planes hay con el plástico?* Negocios y Tendencias.  
<https://www.montevideo.com.uy/Negocios-y-Tendencias/Un-material-reutilizable-pero-solo-se-recicla-un-4-que-planes-hay-con-el-plastico--uc853544#:~:text=Hoy%20en%20Uruguay%20se%20recicla,28%20de%20a bril%20de%202021.>
- Rodríguez Miranda, A., & Beder, F. (2017). Caracterización industrial regional del Uruguay. *Instituto de Economía*. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/18987/1/dt-06-17.pdf>
- Romero Salvador, A. (2010). LA INCINERADORA DE RESIDUOS: ¿ESTÁ JUSTIFICADO EL RECHAZO SOCIAL? *Rev.R.Acad.Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp), Programa de Promoción de la Cultura Científica y Tecnológica*.
- Scherz Brener, T. (2024). Empresas compran créditos de carbono para compensar sus emisiones: cómo funciona este mecanismo. *El País*.  
[https://www.elpais.com.uy/sostenible/empresas-compran-creditos-de-carbono-para-compensar-sus-emisiones-contaminantes-como-funciona-este-mecanismo#google\\_vignette](https://www.elpais.com.uy/sostenible/empresas-compran-creditos-de-carbono-para-compensar-sus-emisiones-contaminantes-como-funciona-este-mecanismo#google_vignette)
- Scrubbers for Air Pollution Control: What Are They?* (2019, May 31). Tecam Group. Retrieved December 7, 2025, <https://tecamgroup.com/scrubbers-for-air-pollution-control-what-are-they/>
- Sistema Nacional de Inversión Pública. (2020). Formulación y evaluación de Proyectos de Inversión. *Guía SNIP*. [https://observatorioplanificacion.cepal.org/sites/default/files/methodology/guia\\_snip\\_12.08.20.pdf](https://observatorioplanificacion.cepal.org/sites/default/files/methodology/guia_snip_12.08.20.pdf)
- Solid Waste Authority of Palm Beach County. (2022). Full Cost Analysis and Operating Results for FY 2020: Waste-to-Energy, Landfill, Recycling, and Transfer Station Costs and Statistics. *Component Cost Summary*.  
<https://www.swa.org/DocumentCenter/View/4799/2021-Component-Cost-Summary---FY-2020-Issued-January-2022>
- Sparks, T. (2016). Filters and Filtration Handbook. *Air and Gas Filtration, Section 3*.  
<https://pdf.sciencedirectassets.com/312843/3-s2.0-C20120032309/3-s2.0-B9780080993966000034/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEMz%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2FwEaCXVzL>

WVhc3QtMSJHMEUCIQCa4G6LWzsuNy2pOo62yfsNk6u2qwWOuIRHW%2BXf8akauwIgXqBFjeFRJbcjH

Stantec. (2011). A Technical Review of Municipal Solid Waste Thermal Treatment Practices. [https://minamataconvention.org/sites/default/files/documents/submission\\_from\\_government/waste\\_to\\_energy\\_part\\_1.pdf?](https://minamataconvention.org/sites/default/files/documents/submission_from_government/waste_to_energy_part_1.pdf?)

Steinert Sorting Solutions. (s.f.). *CENIZAS PROCEDENTES DE INCINERADORAS*. <https://steinertglobal.com/es/aplicaciones/reciclaje-de-metales/cenizas-procedentes-de-incineradoras/>

SWA of Palm Beach Country. (s.f.). *Renewable Energy Facility 2*. <https://www.swa.org/Facilities/Facility/Details/Renewable-Energy-Facility-2-11>

Telenoche. (2022). *Intendencia de Montevideo amplía la usina Felipe Cardoso*. Telenoche. <https://www.telenoche.com.uy/nacionales/intendencia-montevideo-amplia-la-usina-felipe-cardoso-n5331737>

Themelis, N., & Sunk, W. (2006). Increasing the Quantity and Quality of Metals Recovered at Waste-to-Energy Facilities. <https://ccnyec.org/wp-content/uploads/2025/06/nawtec14-3197.pdf>

Themelis, N.J., & Diaz Barriga, M. E. (2012). Estudio de Pre-factibilidad Técnica y Económica para la Instalación de Capacidad de Generación de Energía a Partir de Residuos (WTE) en Uruguay. *Themelis Associates Technologies for Sustainable Waste Management*. [https://www.ambiente.gub.uy/oan//documentos//WTE\\_-\\_Generacion\\_de\\_Energia\\_a\\_partir\\_de\\_Residuos\\_1.pdf](https://www.ambiente.gub.uy/oan//documentos//WTE_-_Generacion_de_Energia_a_partir_de_Residuos_1.pdf)

Tokio, la ciudad más limpia gracias a su avanzado sistema de tratamiento de basuras. (s.f.). [https://www.japan.go.jp/\\_src/200052/winter15es\\_16-17.pdf](https://www.japan.go.jp/_src/200052/winter15es_16-17.pdf)

TOMRA. (2023). *Deposit return scheme in Germany: the world's highest-performing drink container recycling system*. DEPOSIT RETURN SCHEMES: SYSTEM SPOTLIGHT. <https://www.tomra.com/reverse-vending/media-center/feature-articles/germany-deposit-return-scheme>

Traven, L. (2023, June). *Busting the myth: waste-to-energy plants and public health*. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10291493/>

Trentinella, T. (2021). Burn Them All? An Introduction to Waste Incineration Law in Brazil and Japan.

Triveni Turbines. (s.f.). Retrieved 11 30, 2025, <https://www.triveniturbines.com/industries/waste-to-energy/>

United States Environmental Protection Agency. (2020, Diciembre). Advancing Sustainable Materials Management: 2018 Fact Sheet.

UPM. (2024). UPM Fray Bentos Responsabilidad ambiental y social 2024.

UTE. (2020, Julio 20). Características de la matriz de generación de energía eléctrica de Uruguay. <https://www.ute.com.uy/sites/default/files/docs/CARACTER%C3%8DSTICAS%20DE%20LA%20MATR>

IZ%20DE%20GENERACI%C3%93N%20DE%20ENERG%C3%8DA%20ELECTRICA%20DE%20URUG  
UAY.pdf

Viridor. (s.f.). *Energy from Waste*. <https://www.viridor.co.uk/energy-from-waste/>

Wang, L., Jin, Y., & Nie, Y. (2010). Recycling of municipal solid waste incineration fly ash for ordinary Portland cement production: A real-scale test. *Resources, Conservation and Recycling*.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344910001436>

Ware, G. (Ed.). (2010). *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology 190*. Springer New York.

WRAP. (2024). *UK Gate Fees report 2023-24*. WRAP.  
<https://www.wrap.ngo/resources/report/uk-gate-fees-report-2023-24>

YARA. (s.f.). *Sistemas SCR, SNCR o SNCR*.  
<https://www.yara.es/productos-quimicos-nitrogenados-y-soluciones-medioambientales/reduccion-nox-para-plantas-industriales/sistemas-scr-sncr-o-sncrscr-hibridos/>

Zhang, D. L. (2015, Diciembre). Waste-to-Energy in China: Key Challenges and Opportunities. *Energies*.

Zhu, Z., & Wei, T. (2025, October 17). *Why China's waste incinerators are running out of trash*.  
ThinkChina.sg. Retrieved November 29, 2025,  
<https://www.thinkchina.sg/economy/why-chinas-waste-incinerators-are-running-out-trash>

## Anexos

### Anexo I: Estándares de emisión para incineración de residuos.

La Tabla I.1 presenta los límites de emisiones para la incineración de residuos en Uruguay, según el reglamento de calidad del aire del Ministerio de Ambiente para la Incineración de Residuos (Decreto 135/021, Artículo 27), expresados en mg/Nm<sup>3</sup> al 7% de oxígeno.

Tabla I.1 Estándares de emisión para incineración de residuos.

Parámetro	Estándar (mg/Nm <sup>3</sup> )
Material particulado (polvo, cenizas, etc)	20
COT (Carbono Orgánico Total)	14
HCl	14
HF	1.4
SO <sub>2</sub>	70
NO <sub>x</sub> como NO <sub>2</sub>	560
CO	70
Cadmio (Cd), Talio (Tl) y sus compuestos	0.07
Mercurio (Hg) y sus compuestos	0.07
Antimonio (Sb), Arsénico (As), Plomo (Pb), Cromo (Cr), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Manganeseo (Mn), Níquel (Ni) y Vanadio (V) y sus compuestos	0.7
Dioxinas y furanos en ng EQT/Nm <sup>3</sup> (nanogramos equivalentes tóxicos por m <sup>3</sup> )	0.14

## Anexo II: Construcción del factor industrial y social

El factor industrial se construye a partir de tres dimensiones clave que permiten caracterizar el nivel de desarrollo industrial de cada departamento. Cada dimensión se normaliza para garantizar comparabilidad y posteriormente se integra en un índice compuesto por las tres partes.

- Cantidad de industrias cada 10.000 habitantes

Para cada departamento se calcula la densidad industrial relativa dividiendo el número total de industrias entre la población correspondiente, escalado por cada 10.000 habitantes. Luego, este valor se normaliza respecto al máximo observado a nivel país, obteniéndose un indicador adimensional entre 0 y 1:

$$ind\ PMG_i = \frac{\# ind\ PMG_i}{\max(\# ind\ PMG_i)}$$

- Cantidad de industrias grandes cada 10.000 habitantes

El procedimiento es análogo al anterior, pero restringido únicamente a industrias clasificadas como grandes, con al menos 100 empleados (Rodríguez Miranda & Beder, 2017). La ecuación es la siguiente:

$$ind\ G_i = \frac{\# ind\ G_i}{\max(\# ind\ G_i)}$$

Esta decisión se toma con el objetivo de que el indicador refleje con mayor peso la presencia de industrias de gran escala, dado que son más comparables con los de la planta que se pretende instalar.

- Calidad de la infraestructura vial

El indicador de calidad vial se construye utilizando el relevamiento de la longitud de la red vial del Uruguay, por tipo de pavimento y departamento (en kilómetros) realizada por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP) publicado en el Anuario Estadístico Nacional (Instituto Nacional de Estadística, 2023). Para cada departamento se obtiene la proporción de rutas consideradas de buena calidad (asfaltadas o de hormigón) respecto del total de kilómetros relevados:

$$Calidad\ vial = \frac{km\ de\ rutas\ de\ buena\ calidad_i}{km\ de\ rutas\ total_i}$$

Una vez estimados los tres indicadores, se calcula el promedio simple entre ellos, otorgando a cada dimensión el mismo peso en la construcción del índice final.

$$Factor\ industrial_i = \frac{ind\ PMG_i + ind\ G_i + Calidad\ de\ Rutas_i}{3}$$

El resultado es un valor continuo entre 0 y 1, donde valores más altos indican un departamento con mayor desarrollo industrial y, por tanto, con mayor atractivo relativo para la instalación de la planta de incineración.

Por otro lado, el factor social tiene en cuenta otros tres aspectos, el índice de dispersión poblacional, la población económicamente activa y la cantidad de iniciativas de gestión de residuos en el departamento.

- IDP (Índice de Dispersión Poblacional)

Para construir este término, se tuvo en cuenta la cantidad de municipios y el área total dentro del departamento. Luego una vez obtenido este cociente para cada departamento, se lo normaliza respecto al departamento de mayor dispersión:

$$ind. IDP = \frac{IDP_i}{\max(IDP_j)}$$

- Población económicamente activa (PEA)

Este valor se tomó directamente del estudio realizado por Rodríguez Miranda y Beder en 2017, y se considera como un porcentaje sobre la población total.

- Cantidad de iniciativas de gestión de residuos en el departamento

Según el PNGR cada departamento tiene distintas iniciativas para mejorar en la gestión de sus residuos (Ministerio de Ambiente, 2021). Nuevamente se normalizan estos valores con el fin de poder compararlos.

$$ind. Iniciativas_i = \frac{Iniciativas_i}{\max(Iniciativas_j)}$$

Para construir el factor social se realizó una ponderación según la siguiente ecuación:

$$Factor\ social_i = 0.4 * ind\ IDP_i + 0.3 * PEA_i + 0.3 * ind\ Iniciativas_i$$

Se le otorga un peso mayor al IDP dado que es el que representa de mejor manera el impacto real que tendría la instalación de una planta sobre la comunidad, teniendo en cuenta la posibilidad de que se ubique en un sitio lejano a centros poblados.

Los valores resultantes se detallan en la Tabla II.1 a continuación:

Tabla II.1: Resultados obtenidos para ambos factores en cada departamento (Elaboración propia)

Departamento	Factor industrial	Factor social
Montevideo	0.87	0.56
San José	0.85	0.36
Canelones	0.55	0.53
Flores	0.60	0.65
Colonia	0.59	0.45
Paysandú	0.58	0.57
Lavalleja	0.54	0.48
Treinta y Tres	0.53	0.40
Río Negro	0.49	0.61
Maldonado	0.42	0.49
Soriano	0.38	0.47
Florida	0.36	0.57
Tacuarembó	0.34	0.65
Cerro Largo	0.33	0.35
Salto	0.30	0.50
Artigas	0.31	0.54
Rocha	0.30	0.52
Durazno	0.30	0.66
Rivera	0.26	0.57

## Anexo III: Estudio de partes interesadas

Las partes interesadas consultadas para la ponderación de los criterios económico, industrial y social presentada en la [Tabla 4.1](#) surgen a partir de la matriz de interesados presentada en la [Tabla III.1](#) y en las [Gráficas III.1](#) y [III.2](#). Las partes interesadas entrevistadas corresponden a los interesados con expertise en sus áreas con las que se mantuvo contacto más frecuente.

Tabla III.1: Matriz de interés- poder del proyecto de grado.

Interesados	Ref	Lo que esperamos de ellos	Necesidades y expectativas		Cómo incide en nosotros	Situación actual		Situación deseada		Pertinente	Lo que hacemos	Mantener comunicación?
			Lo que nos requieren	Lo que esperan de nosotros		Interés A	Poder A	Interés D	Poder D			
Grupo de trabajo	G1	Compromiso y trabajo constante	Coordinación interna	Trabajo constante y buen relacionamiento	Ejecutores directos	Alto	Bajo	Alto	Alto	Si	Ejecución del proyecto	Si
Adrian Ferrari	AF	Guía académica	Preparación reuniones	Progreso sostenido	Orientación	Alto	Alto	Alto	Alto	Si	Presentación de avances mensuales	Si
Ministerio de Ambiente	MA	Información, validación ambiental, visión institucional	Estudio técnico ambiental	Análisis de impactos ambientales	Su devolución podría frenar o impulsar el proyecto	Medio	Alto	Alto	Alto	Si	Entrevistas, consulta de normativas	Si
Geronimo Etchechury	GE	Información gestión de residuos nacional, validación de datos	Claridad sobre consultas	Uso adecuado de su información para investigación	Aporta información	Alto	Medio	Alto	Medio	Si	Consultas semanales	Si
Ministerio de Industria, Energía y Minería	MIEM	Información matriz energética	Estimaciones razonables, respaldo técnico	Uso adecuado de su información para investigación	Su devolución podría frenar o impulsar el proyecto	Medio	Alto	Alto	Alto	Si	Consultas y reuniones	Si
UTE	UTE	Información red eléctrica	Estimaciones razonables, respaldo técnico	Uso adecuado de su información para investigación	Posible comprador, define viabilidad económica	Bajo	Alto	Medio	Alto	Si	Estimaciones preliminares	No
ANCAP / consumidores de energía térmica	CT	Interés en vapor producido	Ofertas competitivas	Comprensión del proceso y buenas estimaciones	Posible comprador, define viabilidad económica	Bajo	Alto	Alto	Alto	Si	Consultas	No
Cementeras (cenizas)	CC	Interés en cenizas producidas	Ofertas competitivas, calidad mínima garantizada	Comprensión del proceso y buenas estimaciones	Potencial comprador para viabilidad económica	Bajo	Medio	Alto	Medio	No	Consultas	Si
Ing. Pablo Fitermann	FC	Información condiciones y operaciones vertedero	Claridad sobre consultas y compartir resultados	Uso adecuado de su información para investigación	Aporta información	Alto	Medio	Alto	Medio	Si	Consultas	Si
Intendencias departamentales	IMM	Apoyo político, coordinación	Consideración de su rol	Proyecto políticamente viable	Clave en la implementación real	Bajo	Alto	Medio	Medio	Si	Mapeo institucional	Si
Comunidad y vecinos de la zona	COM	Validación social	Estudiar e informar impacto social y ambiental, transparencia	Que se escuche su opinión	Define aceptación del proyecto	Bajo	Medio	Bajo	Medio	Si	Tener en cuenta intereses	Si

Tabla III.1: Matriz de interés- poder del proyecto de grado (cont.)

Interesados	Ref	Lo que esperamos de ellos	Necesidades y expectativas		Cómo incide en nosotros	Situación actual		Situación deseada		Pertinente	Lo que hacemos	Mantener comunicación?
			Lo que nos requieren	Lo que esperan de nosotros		Interés A	Poder A	Interés D	Poder D			
Clasificadores informales	CL	Comprensión del impacto	Alternativas laborales	Que se contemple su rol y transición	Impacto social crítico del proyecto	Bajo	Bajo	Medio	Bajo	No	Tener en cuenta intereses	No
Organizaciones ambientalistas	ORG	Visión objetiva e investigación de beneficios reales de incineración	Informar con datos, transparencia	Evaluación ambiental clara	Pueden influir en percepción pública	Bajo	Alto	Medio	Medio	No	Tener en cuenta intereses	No
Compradores de metales recuperados	CM	Interés en comprar residuos ferrosos	Datos sobre cantidad y calidad de metales	Oferta estable y competitiva	Valorización económica de subproductos	Bajo	Medio	Medio	Medio	No	Tener en cuenta intereses	No
Facultad de Ingeniería	FING	Apoyo metodológico y validación académica	Respetar procedimientos	Validación metodológica	Institución académica	Bajo	Alto	Medio	Alto	Si	Respetar procedimientos	No
Mariana Robano	MR	Aporta expertise técnico especializado en gestión de residuos	Claridad sobre consultas y compartir resultados	Uso adecuado de su información para investigación	Aporta información	Medio	Medio	Alto	Medio	Si	Consultas RSD y reuniones	Si
Federico Rodriguez	FR	Apoyo metodológico y validación académica	Claridad sobre consultas y compartir resultados	Uso adecuado de su información para investigación	Aporta información	Bajo	Bajo	Alto	Medio	Si	Consultas	Si
Gonzalo Gutierrez	GG	Aporta expertise técnico	Claridad sobre consultas y compartir resultados	Uso adecuado de su información para investigación	Aporta información	Bajo	Bajo	Alto	Medio	Si	Consultas	Si
Gerardo Gazzano	GER	Guía con el flujo de fondos	Claridad sobre consultas y compartir resultados	Uso adecuado de su información para investigación	Aporta información	Medio	Medio	Alto	Medio	Si	Consultas financieras y reuniones	Si
Ramiro Roselli	RR	Colaboraciones y recomendaciones en la ejecución del proyecto	Claridad sobre consultas y compartir resultados	Uso adecuado de su información para investigación	Aporta información	Alto	Medio	Alto	Medio	Si	Consultas	Si
Carlos Roda	CR	Aporta expertise técnico especializado en gestión de residuos	Claridad sobre consultas y compartir resultados	Uso adecuado de su información para investigación	Aporta información	Medio	Medio	Alto	Medio	Si	Consultas RSD y reuniones	Si

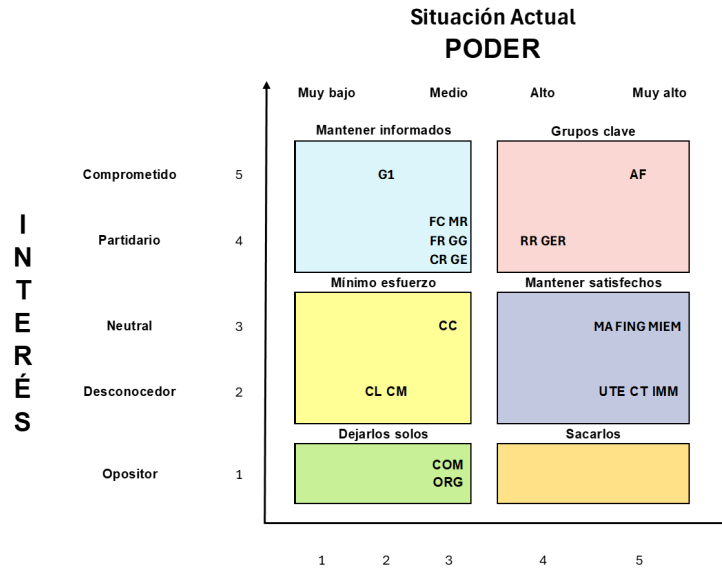


Figura III.1: Matriz interés-poder, situación actual (Elaboración propia).

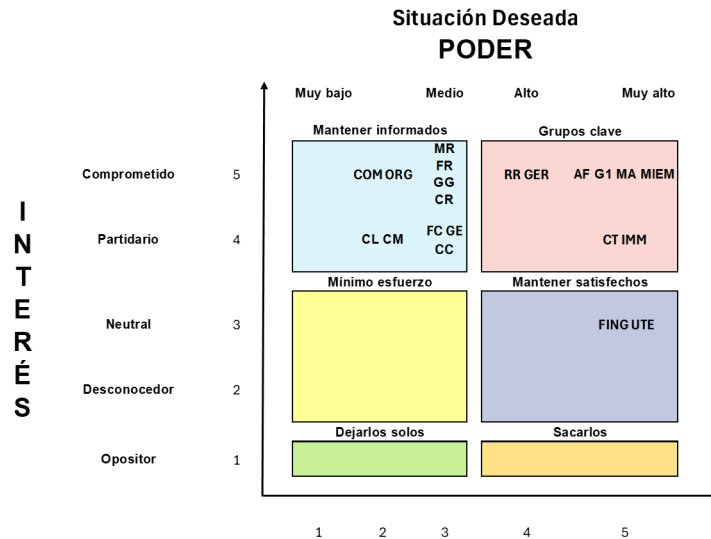


Figura III.2: Matriz interés-poder, situación deseada (Elaboración propia).

## Anexo IV: Cálculo de la tasa de inflación

Se tomó el índice Consumer Price Index for All Urban Consumers (CPI-U), publicado por la Federal Reserve Bank of St. Louis. Este índice refleja la variación promedio de precios al consumidor en áreas urbanas de Estados Unidos (*Consumer Price Index for All Urban Consumers: All Items in U.S. City Average*, FRED).

A partir de los datos de los últimos 25 años, se calculó la tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR, Compound Annual Growth Rate), que permite representar el crecimiento promedio anual de la inflación en el período:

$$CAGR = \left(\frac{Vf}{Vi}\right)^{\frac{1}{n}} - 1 = \left(\frac{310.086}{169.300}\right)^{\frac{1}{25}} - 1 = 2.57\%$$

De este modo, se aplicó una tasa de inflación promedio del 2,6% anual para actualizar todos los costos estimados a precios del año 2050, así como para proyectar la evolución de los gastos a lo largo de los 30 años de vida útil considerados para la planta.

## Anexo V: Linealización de función de costos de inversión

La aproximación se realizó mediante una regresión lineal por mínimos cuadrados, ajustando la curva de costos obtenida a partir de la regla del exponente 0,6 dentro del rango de capacidades de interés. Ambas funciones se pueden ver en la Figura V.1.

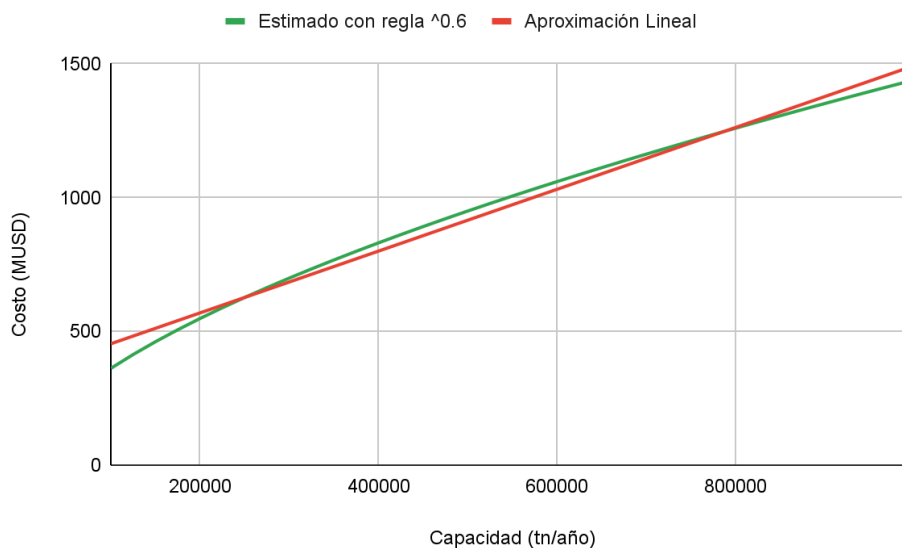


Figura V.1: Ajuste lineal para el costo de instalación en función de la capacidad (Elaboración propia).

De este ajuste se obtuvieron los siguientes parámetros:

$a = 1,155$  USD/tn: coeficiente variable, dependiente de la capacidad.

$b = 338,056,696.8$  USD: término independiente, interpretado como costo fijo.

Con esta aproximación lineal, el costo de inversión para una planta de 640.000 tn/año resulta en 1,077 MUSD. Calculando el error relativo entre el valor obtenido con la linealización y el obtenido con la regla del 0,6 (1102 MUSD) obtenemos:

$$Error (\%) = \frac{|Valor\ estimado - Valor\ Real|}{Valor\ Real} \cdot 100 = 2,3\%$$

Este nivel de error se considera aceptable para los fines del modelo, por lo que la ecuación lineal puede emplearse para estimar el costo de inversión de diferentes tamaños de plantas.

## Anexo VI: Costos operativos reportados de plantas de incineración.

Con el objetivo de verificar la coherencia de este valor, se consultaron diversas fuentes internacionales que reportan costos operativos para plantas de incineración de características similares. Los resultados se resumen en la Tabla VI.I:

Tabla VI.I: Comparación de costos operativos para varias plantas, incluyendo la gestión de las cenizas

Fuente / Planta	Año referencia	Costo operativo (€/tn)	Costo actualizado a 2050 (USD/tn)	Observaciones
UBA (2001) – Promedio Europa	2002	29	122	Incluye gestión de cenizas
Francia – Estudio de 42 plantas RSD	2002	18 – 42	76 – 177	Rango en el cual varía según tamaño y eficiencia
Alemania – Eunomia (2001)	2002	38.5	162	Planta 200.000 t/año
Irlanda – Eunomia (2001)	2002	16	67	Planta 200.000 t/año
Dinamarca – Amager Bakke (CopenHill)	2018	80	220	Incluye disposición de cenizas
<b>Promedio general</b>	–	–	<b>137</b>	Incluye disposición de cenizas

Dado que, la gestión de cenizas puede representar entre 20% y 30% del costo operativo total (Themelis y Diaz Barriga, 2012) y como en la función objetivo dichos costos se contabilizan de forma separada, se ajustó el promedio obtenido restando un 30%, obteniéndose así un OPEX neto de 96 USD/tn lo cual es coherente con el valor estimado de 90,8 USD/tn.

## Anexo VII: Precios de Transporte reportados por el MTOP.

Los precios por tonelada·km presentados por el MTOP para el caso de camiones de Transporte de Carga General (28 toneladas) se presentan en la Tabla VII.1. Los valores están comprendidos entre 4,65 \$U/tn·km (para 80.000 km/año) y 3,39 \$U/tn·km (para 180.000 km/año).

Tabla VII.1: Precios para Transporte de Carga General (28 tn)

Distancia anual recorrida por el vehículo (km)	Precio de referencia por km en \$U	Precio de referencia por tonelada·km en \$U
80.000 km	130	4,65
90.000 km	123	4,40
100.000 km	117	4,20
110.000 km	113	4,03
120.000 km	109	3,89
130.000 km	106	3,77
140.000 km	103	3,67
150.000 km	100	3,59
160.000 km	98	3,51
170.000 km	96	3,44
180.000 km	95	3,39

## Anexo VIII: Energía obtenida de los RSD.

En la Tabla VIII.1 se presentan los valores de energía obtenida por fracción de RSD en el estudio de Caracterización de Residuos Sólidos Urbanos con Fines Energéticos realizado por LKSur en 2013.

Tabla VIII.1: Energía obtenida por fracción de RSD a 2050.

Porción	Incineración (tn/año)	Incineración (%)	PCI (MJ/kg)	Energía Disponible (MJ/año)	Energía (MW)	Energía/Masa (MWh/tn)	Energía Eléctrica (MW)	Energía Eléctrica (MWh/tn)
Papel y cartón	44,032	6.5%	16.1	708,700,518	22.5	4.5	4.5	0.9
Plásticos Film	35,098	5.1%	32.8	1,151,222,348	36.5	9.1	7.3	1.8
Plásticos botellas	7,658	1.1%	43.5	332,884,493	10.6	12.1	2.1	2.4
Otros plásticos	33,184	4.9%	43.5	1,442,499,470	45.7	12.1	9.1	2.4
Tetrabrick	14,890	2.2%	10.7	159,324,748	5.1	3.0	1.0	0.6
Vidrio	10,849	1.6%	-0.6	-6,834,585	-0.2	-0.2	0.0	0.0
Metales	30,631	4.5%	-0.5	-16,540,844	-0.5	-0.2	-0.1	0.0
Materia orgánica	171,024	25.1%	4.2	714,880,999	22.7	1.2	4.5	0.2
Madera, ramas, podas	21,697	3.2%	15.4	335,003,151	10.6	4.3	2.1	0.9
Pañales, toallas, papel	121,248	17.8%	9.8	1,189,447,524	37.7	2.7	7.5	0.5
Textiles	68,069	10.0%	18.5	1,259,963,084	40.0	5.1	8.0	1.0
RSD especiales/ peligrosos	0	0.0%	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
Otros (polvo, tierra, escombros)	123,376	18.1%	10.7	1,320,119,344	41.9	3.0	8.4	0.6
<b>Total</b>	<b>681,757</b>		<b>12.6</b>	<b>8,590,670,250</b>	<b>272.4</b>	<b>56.7</b>	<b>54.5</b>	<b>0.7</b>

## Anexo IX: Estimación de emisiones de GEI

En la Sección 4 se presentaron los dos métodos mediante los cuales la instalación de una planta de incineración de residuos permite reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a la gestión RSD. La estimación se realizó siguiendo las Directrices del IPCC 2006 para los inventarios nacionales de GEI, Capítulo 5: Desechos (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006).

### IX.1 Sustitución del Relleno Sanitario.

El análisis compara las emisiones asociadas a la incineración y al RS, manteniendo en ambos casos la composición de los RSD constante, definida a partir de los datos del Plan Nacional de Gestión de Residuos (Figura 3.4).

#### IX.1.1 Emisiones de CH<sub>4</sub> asociadas a RS

En primer lugar, se estimaron las emisiones asociadas a la alternativa de RS considerando la generación y liberación anual de metano producto de la degradación anaerobia del carbono orgánico degradable presente en los residuos. Se aplicó el enfoque simplificado del IPCC, que estima las emisiones anuales de CH<sub>4</sub> a partir de la masa de residuos dispuesta, su composición y factores de corrección.

Dado que las emisiones reales dependen fuertemente del nivel de gestión del sitio, se evaluaron dos escenarios.

- Escenario 1: RS bien gestionado, con 50% de recuperación de CH<sub>4</sub>, considerado un relleno sanitario ideal.

El IPCC indica que, aun en rellenos con sistemas activos de captación, una fracción del CH<sub>4</sub> se libera inevitablemente a la atmósfera debido a fugas, emisiones no captadas y pérdidas operativas. Por eso, se recomienda tomar valores conservadores para la fracción de recuperación de metano en el cálculo.

- Escenario 2 : RS bien gestionado con 10% de recuperación de CH<sub>4</sub>, considerado más representativo de situaciones regionales con captación parcial de metano.

Para ambos escenarios, se utilizó la ecuación 5.3 del IPCC:

$$CH_4 = (W \cdot DOC \cdot DOC_f \cdot MCF \cdot F \cdot \frac{16}{12}) - R \cdot (1 - Ox)$$

Siendo:

- *W*: masa de RSD depositados en el año (tn).

- *DOC*: fracción de carbono orgánico degradable en cada fracción de RSD (tn C degradable /tn RSD). Depende de la composición.
- *DOC<sub>f</sub>*: fracción del *DOC* que efectivamente se descompone bajo condiciones anaeróbicas en el relleno. El IPCC recomienda un valor por defecto de 0,5.
- *MCF* (Methane Correction Factor): factor de corrección del metano que refleja el grado de anaerobiosis y el tipo de sitio. Como se muestra en la Figura IX.1, para rellenos gestionados anaeróbicos el valor por defecto es *MCF* = 1,0.
- *F*: fracción de *CH<sub>4</sub>* en el biogás del relleno. El IPCC recomienda el valor *F* = 0,5 (50 % *CH<sub>4</sub>* y 50 % *CO<sub>2</sub>*).
- $\frac{16}{12}$ : relación de pesos moleculares entre *CH<sub>4</sub>* (16 g/mol) y *C* (12 g/mol). Se utiliza para convertir la cantidad de carbono degradable en masa de metano.
- *R*: cantidad de metano recuperado en el año (tn *CH<sub>4</sub>*/año).
- *Ox*: factor de oxidación que representa la fracción del metano que se oxida a *CO<sub>2</sub>* al atravesar la capa de cobertura del relleno. El IPCC recomienda *Ox* = 0; *Ox* = 0.1 sólo para rellenos bien gestionados con cobertura de suelo/compost.

CUADRO 5.1 CLASIFICACIÓN DE LOS VRS Y FACTORES DE CORRECCIÓN PARA EL METANO	
Tipo de vertedero	Valores por defecto del factor de corrección para el metano (FCM)
Controlados <sup>a</sup>	1,0
No controlados – profundos ( ≥5 m de desechos)	0,8
No controlados – poco profundos (<5 m de desechos)	0,4
VRS no incluidos en ninguna categoría <sup>b</sup>	0,6

<sup>a</sup> En los VRS controlados debe haber un sistema de disposición controlada de los desechos (es decir, zonas específicas para depositar los desechos, cierto grado de control de la recolección de basuras y algunas medidas de control de los incendios) y debe utilizarse alguno de los siguientes elementos: material de cobertura, compactado mecánico o nivelación de los desechos.

<sup>b</sup> El valor por defecto de 0,6 para los VRS no incluidos en ninguna categoría puede resultar inapropiado para los países en desarrollo que tengan un alto porcentaje de vertederos no controlados de poca profundidad, ya que probablemente ello conducirá a sobreestimar las emisiones. Por lo tanto, se exhorta a los organismos encargados de los inventarios en los países en desarrollo a que utilicen como FCM el valor de 0,4, a menos que cuenten con datos documentados que indiquen la existencia en sus respectivos países de prácticas de control de los vertederos.

Fuente: Manual de Referencia de las *Directrices del IPCC*.

Figura IX.1: Valores de MCF a utilizar según tipo de vertedero (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006)

Tabla IX.1: Parámetros utilizados en el cálculo para ambos casos. (Elaboración propia)

	Caso R=10%	Caso R=50%
<b>DOC</b>	0.165	0.165
<b>DOCf:</b>	0.5	0.5
<b>MCF</b>	1	1
<b>F</b>	0.5	0.5
<b>R</b>	0.1	0.5
<b>Ox</b>	0.1	0.1

Los parámetros utilizados para el cálculo se presentan en la Tabla IX.1. En ambos casos, se utilizaron los valores recomendados por el IPCC para representar un RS bien gestionado, de manera de ser conservadores a la hora de estimar las emisiones evitadas por la incineración de los RSD. El valor de DOC obtenido surge de ponderar la composición de RSD del caso de estudio (Figura 3.4) por su correspondiente contenido de carbono, que se muestra en la Tabla IX.2.

Tabla IX.2: DOC según fracción de RSD. (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006)

Tipo de RSD	DOC
<b>Alimentos</b>	0,15
<b>Papel y cartón</b>	0,40
<b>Madera</b>	0,43
<b>Jardín / poda</b>	0,20
<b>Textiles</b>	0,24
<b>Plásticos, metales y vidrios</b>	0,00

Las emisiones de CH<sub>4</sub> se transformaron a CO<sub>2</sub> equivalente usando el Potencial de Calentamiento Global a 100 años (GWP=28), obteniendo así los resultados en CO<sub>2</sub> equivalente de la Tabla IX.3.

$$CO_{2-eq} = CH_4 \cdot 28$$

Tabla IX.3 Resultados obtenidos para ambos casos, en CO<sub>2</sub> equivalente

	tn CO <sub>2</sub> eq/tn RSD
Caso R=10%	1.25
Caso R=50%	0.69

### IX.1.2 Emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la incineración.

Las emisiones derivadas de la incineración de RSD se estimaron calculando el aporte del contenido de carbono fósil en cada fracción del residuo. Se mantuvo la misma composición de residuos utilizada en el cálculo para RS, para asegurar que sean comparables.

Para el cálculo, se utilizó la ecuación 5.11 del IPCC:

$$CO_2 = \sum (SW_i \cdot dm_i \cdot CF_i \cdot FCF_i \cdot OF_i) \cdot \frac{44}{12}$$

Siendo:

- $SW_i$ : cantidad de residuos del tipo  $i$  incinerados, en tn/año. (tn base húmeda)
- $dm_i$ : contenido de materia seca de los residuos del tipo  $i$ . (tn materia seca)
- $CF_i$ : fracción de carbono total en la materia seca del tipo de residuo  $i$  (tn C / tn materia seca).
- $FCF_i$ : fracción de carbono que es de origen fósil en el carbono total del tipo  $i$ .
- $OF_i$ : factor de oxidación, que representa la fracción carbono fósil que efectivamente se oxida a CO<sub>2</sub> durante la combustión. El IPCC recomienda el uso del factor  $OF_i = 1$ .
- $\frac{44}{12}$ : factor de conversión de C a CO<sub>2</sub> (relación de pesos moleculares).

Los valores utilizados se detallan en la Tabla IX.4 y corresponden a los valores por defecto recomendados por el IPCC para cada fracción. En la última columna, se presenta la estimación de las tn de CO<sub>2</sub> de origen fósil generadas anualmente por cada fracción de RSD. Asimismo, se obtiene el valor promedio de 0.46 tn CO<sub>2</sub>/tn RSD por la incineración de las composición correspondiente al caso de estudio.

Tabla IX.4: Parámetros para el cálculo, utilizando valores de defecto recomendados por el IPCC para cada fracción de RSD (Elaboración propia). Se desprecian las emisiones generadas por el carbono orgánico.

	SWi	dmi	Ci	FCFi	OFi	44/12	CO <sub>2</sub> generado (tn/año)
Papel y cartón	45671	0.9	0.44	0	1	3.67	0
Plásticos Film	36404	1	0.75	1	1	3.67	100112
Plásticos botellas	7943	1	0.75	1	1	3.67	21843
Otros plásticos	34419	1	0.75	1	1	3.67	94652
Tetrabrick	15444	1	0.75	0.5	1	3.67	21236
Vidrio	11252	1	0	0	1	3.67	0
Metales	31771	1	0	0	1	3.67	0
Materia orgánica	177389	0.4	0.38	0	1	3.67	0
Madera, ramas, podas	22505	0.4	0.49	0	1	3.67	0
Pañales, toallas, papel	125761	0.4	0.7	0.3	1	3.67	38734
Textiles	70603	0.8	0.5	0.5	1	3.67	51775
Otros	127967	0.9	0	0	1	3.67	0
<b>Total</b>	<b>707129</b>						<b>328352</b>

Finalmente se obtienen los valores de la Tabla IX.5, resultando en un promedio de 0.51 ton CO<sub>2</sub> evitadas por incinerar los residuos como alternativa a su disposición en un RS bien gestionado. El valor de 0.51 tn CO<sub>2</sub>/tn RSD se obtiene como promedio de las toneladas evitadas entre los casos R=10% y R=50%.

Tabla IX.5: Resultados del cálculo de tn CO<sub>2</sub> evitadas por incinerar y no disponer cada tn RSD.

	RS	INCINERACIÓN	EVITADAS
	tn CO <sub>2</sub> eq/tn RSD	tn CO <sub>2</sub> /tn RSD	tnCO <sub>2</sub> /tn RSD
Caso R=10%	1.25	0.46	0.51
Caso R=50%	0.69		

## IX.2 Sustitución de uso de combustibles fósiles

Para la estimación del CO<sub>2</sub> evitado por la sustitución del uso de combustibles fósiles se divide el cálculo en dos escenarios: incineración con aprovechamiento de energía eléctrica o incineración con aprovechamiento de energía eléctrica y térmica.

Los cálculos realizados se presentan en la Tabla IX.6. En ambos casos, se calcula el equivalente a la cantidad de energía eléctrica inyectada en ktep de petróleo equivalente consumido. Se asume que todo lo inyectado sustituye el uso de combustibles basados en el fuel oil, utilizando el factor de  $77 \text{ tn CO}_2/\text{TJ}$  correspondiente a las emisiones asociadas al mismo.

Para el caso de estudio se propone analizar el caso de inyección de energía únicamente eléctrica. Sin embargo, el caso de sumar la generación de energía térmica se estudia como análisis de sensibilidad. (Sección 5).

Tabla IX.6: Resultados obtenidos para las combinaciones de sustitución de energía eléctrica y térmica.

eTérmica + eEléctrica		eEléctrica	
ktep evitados	96	ktep evitados	43
conversor ktep a TJ	42	conversor ktep a TJ	42
TJ	4,007	TJ	1,782
tn CO <sub>2</sub> /TJ	77	tn CO <sub>2</sub> /TJ	77
tn CO <sub>2</sub> emitidas	308,521	tn CO <sub>2</sub> emitidas	137,206
tn RSD	707,129	tn RSD	707,129
tn CO <sub>2</sub> / tn RSD	0.44	tn CO <sub>2</sub> / tn RSD	0.19

## Anexo X: RSD incinerados por departamento en el caso de estudio.

En la Tabla X.1 se detalla el aporte por departamento a la incineración de la [Figura 4.4](#), con valores proyectados a 2050.

Tabla X.1: RSD generados y enviados a incineración por departamento (2050).

Departamento	Generación de residuos (tn/año)	Residuos enviados a incineración (tn/año)	Aporte por departamento
Montevideo	853,844	273,230	40.15%
Canelones	336,618	107,718	15.83%
Maldonado	106,164	33,973	4.99%
Colonia	79,623	25,479	3.74%
Salto	80,918	25,894	3.81%
San José	69,913	22,372	3.29%
Paysandú	73,150	23,408	3.44%
Rivera	66,676	21,336	3.14%
Artigas	47,256	15,122	2.22%
Cerro Largo	55,024	17,608	2.59%
Soriano	53,729	17,193	2.53%
Rocha	44,019	14,086	2.07%
Tacuarembó	58,261	18,643	2.74%
Florida	43,372	13,879	2.04%
Lavalleja	38,193	12,222	1.80%
Río Negro	35,604	11,393	1.67%
Durazno	36,899	11,808	1.74%
Treinta y Tres	31,072	9,943	1.46%
Flores	16,184	5,179	0.76%
<b>Total</b>	<b>2,126,519</b>	<b>680,486</b>	<b>100.00%</b>

## Anexo XI: Distancias entre departamentos.

En las Tablas XI.1 y XI.2 se resumen los valores obtenidos de Google Maps, utilizados como parámetros de entrada en el modelo matemático.

Tabla XI.1: Distancias en km entre los departamentos.

	Artigas	Canelones	Cerro Largo	Colonia	Durazno	Flores	Florida	Lavalleja	Maldonado
Artigas	0	585	397	613	412	454	499	624	679
Canelones	585	0	393	160	154	145	67	121	148
Cerro Largo	397	393	0	494	291	331	321	278	323
Colonia	613	160	494	0	203	163	181	274	304
Durazno	412	154	291	203	0	41	88	213	268
Flores	454	145	331	163	41	0	127	252	292
Florida	499	67	321	181	88	127	0	126	180
Lavalleja	624	121	278	274	213	252	126	0	73
Maldonado	679	148	323	304	268	292	180	73	0
Montevideo	645	51	400	179	223	193	117	122	130
Paysandú	331	327	437	297	223	182	310	441	475
Río Negro	441	271	495	209	204	163	291	384	418
Rivera	178	492	243	523	319	361	406	520	562
Rocha	651	217	282	373	330	363	243	116	83
Salto	206	443	422	412	338	298	425	550	590
San José	551	50	405	110	138	99	73	163	198
Soriano	436	239	464	178	173	132	259	353	387
Tacuarembó	206	380	202	411	207	249	294	419	473
Treinta y Tres	483	278	113	428	264	304	246	165	211

Tabla XI.1: Distancias en km entre los departamentos (cont).

	Montevideo	Paysandú	Río Negro	Rivera	Rocha	Salto	San José	Soriano	Tacuarembó	Treinta y Tres
Artigas	645	331	441	178	651	206	551	436	206	483
Canelones	51	327	271	492	217	443	50	239	380	278
Cerro Largo	400	437	495	243	282	422	405	464	202	113
Colonia	179	297	209	523	373	412	110	178	411	428
Durazno	223	223	204	319	330	338	138	173	207	264
Flores	193	182	163	361	363	298	99	132	249	304
Florida	117	310	291	406	243	425	73	259	294	246
Lavalleja	122	441	384	520	116	550	163	353	419	165
Maldonado	130	475	418	562	83	590	198	387	473	211
Montevideo	0	375	307	540	198	491	95	276	428	287
Paysandú	375	0	124	348	544	121	281	120	236	486
Río Negro	307	124	0	428	487	240	221	32	316	468
Rivera	540	348	428	0	524	333	458	421	113	355
Rocha	198	544	487	524	0	659	266	455	456	169
Salto	491	121	240	333	659	0	396	235	222	508
San José	95	281	221	458	266	396	0	190	346	329
Soriano	276	120	32	421	455	235	190	0	309	437
Tacuarembó	428	236	316	113	456	222	346	309	0	288
Treinta y Tres	287	486	468	355	169	508	329	437	288	0

## Anexo XII: Asignaciones óptimas departamento – planta

A continuación se presentan las asignaciones obtenidas del modelo en las alternativas con más de una planta, correspondientes a la variable de decisión  $z_{ij}$ . La Tabla XII.1 y XII.2 presentan la resolución obtenida para el tratamiento de los RSD generados en la alternativa II.

Tabla XII.1: Flujos de RSD tratados en la planta de Montevideo para la alternativa II.

Planta Montevideo, Alt II	
Departamento	Flujo de RSD (tn/año)
Montevideo	310,517
Canelones	122,417
Maldonado	38,609
Colonia	28,956
San José	25,425
Soriano	19,540
Rocha	16,008
Florida	15,773
Lavalleja	13,890
Río Negro	12,948
Durazno	13,419
Treinta y Tres	11,300
Flores	5,885

Tabla XII.2: Flujos de RSD tratados en la planta de Tacuarembó para la alternativa II.

Planta Tacuarembó, Alt II	
Departamento	Flujo de RSD (tn/año)
Salto	29,427
Paysandú	26,602
Rivera	24,248
Artigas	17,186
Cerro Largo	20,011
Tacuarembó	21,188

## Anexo XIII: Estimación de la capacidad de una línea

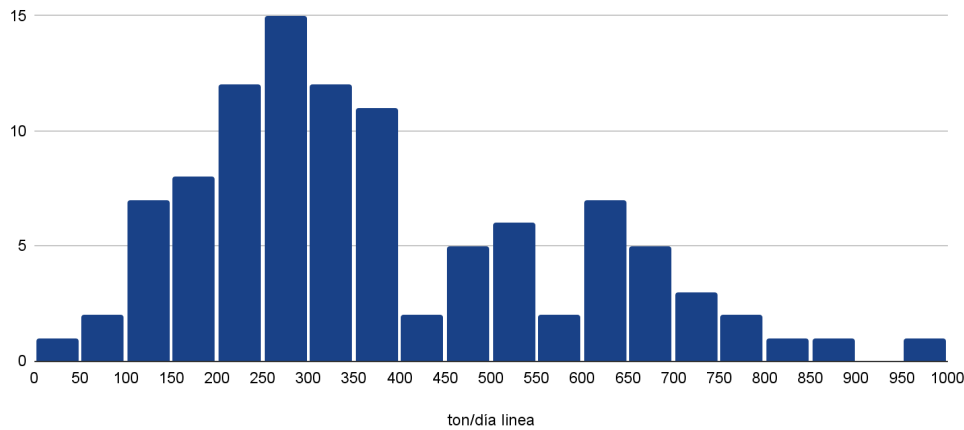


Figura XIII.1: Histograma de tn/día por línea en plantas de incineración de RSD (Elaboración propia)

Para realizar el histograma de la Figura XIII.1 se tomó una muestra de 103 plantas en distintos países, con su cantidad de líneas y capacidad de procesamiento por línea (tn/día). En él se observa que la media se encuentra en el procesamiento de alrededor de 300-400 tn/día por línea, y que la amplitud se encuentra entre 45 y 990 tn/día. La elección de número de líneas por alternativa de la [Tabla 4.3](#) se realiza con el número de líneas que permita obtener los valores más cercanos a la media para la alternativa I, II y III.

## Anexo XIV: Estudio de escenario con venta de energía térmica

### XIV.1. Posibles consumidores de energía térmica

- Refinerías: Uruguay cuenta con una única refinería, propiedad de ANCAP, ubicada en La Teja (Montevideo). Su capacidad es de 50.000 barriles/día (8.000 m<sup>3</sup>/día) y produce gasoil, gasolinas, fueloil, GLP y turbocombustible (BEN 2023).
- Cementeras: La demanda térmica es elevada y continua. Las principales plantas del país son: Cementos Artigas (Montevideo y Minas), Cielo Azul (Treinta y Tres) y ANCAP (Paysandú y Minas).
- Industrias lácteas: Las plantas de Conaprole –siete en total– consumen grandes volúmenes de vapor (proveniente de fuel oil o biomasa) y electricidad para operaciones como pasteurización, secado y refrigeración. Las plantas se sitúan en Montevideo, Soriano, San José, Canelones y Florida.
- Parques industriales: Otra alternativa de comercialización es el suministro de vapor a parques industriales, cuya concentración de empresas facilita la distribución y uso del calor. Algunos de los

más relevantes son Parque Tecnológico Industrial del Cerro (Montevideo), Parque Industrial Juan Lacaze

- Montevideo: Parque Tecnológico Industrial del Cerro (PTI).
- Canelones: Plaza Industrial Zona Este (Ruta 101), Parque Productivo Uruguay (Ruta 74 km 27), Parque Industrial Las Piedras (Ruta 5), Parque Industrial de Pando y Parque Científico-Tecnológico de Pando.
- Colonia: Parque Industrial Juan Lacaze.
- Paysandú: Parque Industrial Paysandú (Camino Casablanca).

## XIV.2. Modelo matemático con la variable de venta de energía térmica

Se suman los siguientes parámetros al modelo:

- $Perd_{term}$  : pérdidas en el proceso de generación de energía térmica (%).
- $CO_{2_{ev-termicafosil}}$  : emisiones de dióxido de carbono evitadas por sustitución de energía fósil en consumidores de energía térmica (ton CO<sub>2</sub>/ton RSD).
- $Térmica_i$  : posibilidad de abastecer consumidores termicos desde la planta en el departamento i. Es un parámetro por departamento, siendo 1 si hay consumidores de energía térmica en ese departamento y 0 si no.
- $P_{term}$  : precio de venta de energía térmica (USD/MWh).

Función objetivo:

Si en el departamento i hay un posible consumidor de energía térmica, entonces  $Térmica_i = 1$  :

- Se suma al término correspondiente a los ingresos por créditos de carbono las emisiones evitadas por la sustitución de fuentes fósiles por tonelada de RSD procesada.
- Se suma el término de ingresos por venta de energía térmica, teniendo en cuenta las pérdidas.

De lo contrario, al ser el término  $Térmica_i = 0$ , la función objetivo permanece inalterada.

$$\begin{aligned}
\min f = & \sum_{i \in P} (a \cdot \sum_{j \in G} z_{ji2080} + b \cdot y_i \cdot w_i) + \sum_{t \in T} [(\sum_{j \in Gi \in P} CT \cdot d_{ji} \cdot z_{jit} + \sum_{k \in Ci \in P} CT \cdot l_{ik} \cdot ba_{ikt} \\
& + \sum_{i \in P} CT \cdot l_{iMontevideo} \cdot Fa \cdot \sum_{j \in G} z_{jit} + \sum_{j \in Gi \in P} COp \cdot z_{jit}) \cdot w_i - \sum_{j \in Gi \in P} Pe \cdot E_{disp} \cdot \eta \cdot (1 - C_{int}) \cdot z_{jit} \\
& - \sum_{j \in Gi \in P} P_{CredCO_2} \cdot (CO_{2_{ev-relleno}} + CO_{2_{ev-eléctrica fósil}} + CO_{2_{ev-termica fósil}} \cdot Térmica_i) \cdot z_{jit} \\
& - \sum_{j \in Gi \in P} P_{term} \cdot E_{disp} \cdot (1 - Perd_{term}) \cdot Térmica_i \cdot z_{jit}] \cdot (1 + tinf)^t
\end{aligned}$$

Tanto las restricciones como las variables de decisión permanecen inalteradas.

## Anexo XV: Desarrollo de inversión

La estimación de la inversión inicial por concepto se realiza en función a las referencias de EPC Intel, en función de la energía eléctrica suministrada por la planta (EPC Intel, 2024). Según la bibliografía, este costo puede variar ampliamente según diversos factores como la capacidad instalada, la fracción de residuos a tratar, la tecnología empleada y la localización del proyecto. La inversión se estima por MW de capacidad instalada según la Tabla XV.1 a continuación.

Tabla XV.1: Componentes de inversión y rangos de costos asociados

Concepto	Rango inferior (USD/MW)	Rango superior (USD/MW)
Recepción de residuos	1	2.5
Construcción edificio	0.5	1.5
Caldera, horno y parrilla	2	5
Turbina y generador	0.5	2
Sistema de tratamiento de gases	1	3
Ingeniería, diseño y permisos	0.5	1

Asimismo, la estimación se realiza utilizando el rango superior en cada apartado, de modo de adaptar un enfoque conservador o pesimista, con la excepción del caso de la recepción y tratamiento de RSD. En este caso, se toma siempre el rango inferior dado que la planta de mass burn no emplea infraestructura de separación o pretratamiento de residuos, sino solo de recepción y compactación.

Considerando que la planta a instalar cuenta con una capacidad de 56,5 MW de energía eléctrica y ajustando los costos a 2050, el resultado de rangos inferiores y superiores para la potencia instalada del caso de estudio se presentan en la Tabla XV.2.

Por otro lado, para el costo de adquisición del terreno se tuvo en cuenta un informe realizado por InfoNegocios en Abril de 2025, en el cual se determinó que el costo promedio de adquirir terrenos en parques industriales es de 66 USD/m<sup>2</sup>. Si bien la planta probablemente se ubicaría en terrenos alejados y más económicos, se toma este valor de manera de cubrirse y tomar un margen.

Tabla XV.2: Estimaciones de costos de inversión

Concepto	Rango inferior (MUSD)	Rango superior (MUSD)
Recepción de residuos	107	-
Construcción edificio	53	160
Caldera, horno y parrilla	213	533
Turbina y generador	53	213
Sistema de tratamiento de gases	107	320
Ingeniería, diseño y permisos	53	107
<b>Total</b>	586	1438

Para estimar la superficie necesaria para la instalación de una planta de las dimensiones consideradas, se analizaron varios ejemplos de instalaciones similares y se calculó el promedio de hectáreas requeridas como valor de referencia. El resultado obtenido fue de aproximadamente 8 hectáreas. Teniendo en cuenta el valor del suelo, el monto total a destinar a la compra del terreno en 2050 sería de 19 MUSD.

Tabla XV.3: Relevamiento costos de inversión a nivel internacional

Planta WtE	País	Año de puesta en operación	Capacidad procesamiento (ktn/año)	Potencia neta (MW)	Inversión total (MUSD)	Inversión a 2050 (MUSD)
Palm Beach REF2 (SWA of Palm Beach Country, s.f.)	EE. UU.	2015	1095	95	672	1633
Runcorn EfW (Viridor, s.f.)	Reino Unido	2014	850	70	580	1446
Dublín / Poolbeg (Reworld, s.f.)	Irlanda	2017	600	60	660	1525
Riverside 2 (en construcción) (Cory Group, s.f.)	Reino Unido	2026	650	55	640	1177
Amager Bakke (Copenhill) (IEA Bioenergy, s.f.)	Dinamarca	2017	560	58	620	1432
Aalborg WtE (Ramboll, s.f.)	Dinamarca	2011	800	63	510	1372
<b>Promedio</b>			759	67	614	1431

De este estudio, se obtiene que en promedio, el costo de inversión llevado a 2050 es de 1431 MUSD, nuevamente alineado con las estimaciones realizadas.

## Anexo XVI: Egresos

Tabla XVI.1: Egresos operativos de la planta, valor anual cada 5 años (2050-2080)

Concepto		2051	2055	2060	2065	2070	2075	2080
Mano de obra	Costo total (USD)	2,039,486	2,673,350	3,749,511	5,258,884	7,375,856	10,345,020	14,509,426
Mantenimiento y reparaciones	Costo total (USD)	5,000,000	5,534,156	6,282,800	7,132,717	8,097,608	9,193,027	10,436,631
Transporte de residuos	Distancia recorrida (km)	3,395,421	3,482,341	3,576,067	3,659,098	3,732,217	3,795,740	3,849,400
	Costo unitario (USD/km)	5.12	5.70	6.40	7.30	8.30	9.40	10.70
	Costo total (USD)	17,398,137	19,749,761	23,024,911	26,746,573	30,971,537	35,759,720	41,171,100
Transporte cenizas de fondo (interior)	Cenizas procesadas en el interior (tn)	21,000	21,000	21,000	21,000	21,000	21,000	21,000
	Distancia recorrida (km)	160,251	160,251	160,251	160,251	160,251	160,251	160,251
	Costo unitario (USD/km)	5.10	5.70	6.40	7.30	8.30	9.40	10.70
	Costo total (USD)	821,126	908,848	1,031,794	1,171,372	1,329,832	1,509,727	1,713,958
Transporte cenizas de fondo y volantes (Montevideo)	Cenizas procesadas en Montevideo (tn)	149,173	153,492	158,224	162,356	166,053	169,251	171,926
	Distancia recorrida (km)	266,381	274,092	282,542	289,921	296,523	302,234	307,011
	Costo unitario (USD/km)	5.10	5.70	6.40	7.30	8.30	9.40	10.70
	Costo total (USD)	1,364,935	1,554,489	1,819,178	2,119,206	2,460,673	2,847,354	3,283,621
Disposición cenizas volantes (CIU)	Cenizas volantes (tn)	34,035	34,898	35,845	36,671	37,411	38,050	38,585
	Costo disposición unitario (USD/tn)	358	397	450	511	580	659	748
	Costo total (USD)	12,195,055	13,840,405	16,138,778	18,744,394	21,709,176	25,067,356	28,858,487
Disposición cenizas de fondo (relleno en planta)	Cenizas de fondo en Montevideo (tn)	115,139	118,593	122,379	125,684	128,642	131,201	133,341
	Costo disposición unitario (USD/tn)	94	104	118	135	153	173	197
	Costo total (USD)	10,856,750	12,377,155	14,500,009	16,906,171	19,644,868	22,745,976	26,244,135
Seguros	Costo total (USD)	3,988,200	4,414,264	5,011,412	5,689,340	6,458,976	7,332,726	8,324,674
Reposición de tangibles	Costo total (USD)				624,954,324			242,254
Insumos y reactivos	Costo unitario (USD/tn)	6.40	7.08	8.04	9.13	10.36	11.77	13.36
	Costo total (USD)	4,356,435	4,944,203	5,765,250	6,696,053	7,755,161	8,954,803	10,309,107
Total (USD)		58,020,125	65,996,631	77,323,644	715,419,032	105,803,687	123,755,709	145,093,392

## Anexo XVII: Mano de obra

Para el cálculo del salario nominal que conforma un egreso para la planta, se clasificó el personal en dos: operarios y cargos administrativos.

Tomando un salario líquido en 2025 de \$U40,000 para operarios y \$U100,000 para cargos administrativos, se les sumó los conceptos de la Tabla XVII.1, tomando los valores recomendados en el curso de Evaluación Económica y Financiera de Proyectos de Inversión (Gazzano & Alvez Becerra, 2021). Cabe destacar, que el IRPF corresponde a la franja en la que cae cada categoría de salario en 2025.

Tabla XVII.1: Conceptos considerados para el pasaje de salario líquido a nominal.

Concepto	% Op	%Adm
Aguinaldo	8.33%	8.33%
Licencia	5.48%	5.48%
Fonasa	4.50%	4.50%
BPS	15.00%	15.00%
IRPF (variable)	0%	24%
Seguros	0.50%	0.25%
Beneficios	20.00%	20.00%
Horas extras	5.00%	5.00%
<b>Suma total</b>	<b>58.81%</b>	<b>82.56%</b>

Finalmente, se calcula el salario final por cargo para obtener un egreso total anual de \$U 81,579,431.

Tabla XVII.2: Salario por cargo

Cargo	Personas	Salario líquido mensual a 2050 (\$U)	Salario nominal mensual (\$U)	Salario nominal anual (\$U)	Egreso por persona anual (\$U)	Egreso total anual (\$U)
Operarios	38	75,434.00	90,144.00	1,231,145.00	1,538,931.00	58,479,371.00
Administrativo	5	188,586.00	270,621.00	3,696,010.00	4,620,012.00	23,100,060.00

Se aclara que la diferencia entre el salario nominal y el egreso total por persona se debe a que el segundo considera gastos extra por beneficios y/o viáticos de los empleados, además de un porcentaje estimado para las horas extras necesarias por ausentismo, licencia u otro motivo.

## Anexo XVIII: Ingresos

Tabla XVIII. Ingresos de la planta, valor anual cada 5 años (2050-2080)

Concepto	2051	2055	2060	2065	2070	2075	2080	
Energía eléctrica	Producción (MWh/año)	476,485	488,577	501,826	513,395	523,748	532,704	540,193
	Precio (USD/MWh)	121	134	152	172	195	222	252
	<b>Ingreso (USD)</b>	<b>57,509,314</b>	<b>65,268,437</b>	<b>76,107,078</b>	<b>88,394,616</b>	<b>102,375,903</b>	<b>118,212,375</b>	<b>136,090,548</b>
Metales recuperados	Producción (tn/año)	15,316	15,704	16,130	16,502	16,835	17,123	17,363
	Precio (USD/ton)	1.57	1.74	1.97	2.24	2.54	2.89	3.28
	<b>Ingreso (USD)</b>	<b>24,045</b>	<b>27,290</b>	<b>31,821</b>	<b>36,959</b>	<b>42,805</b>	<b>49,426</b>	<b>56,901</b>
Créditos de carbono	CO2 evitado (tn CO2/año)	469,678	481,597	494,657	506,061	516,266	525,093	532,476
	Precio (USD/ton CO2)	23	25	29	33	37	42	48
	<b>Ingreso (USD)</b>	<b>10,802,598</b>	<b>12,260,078</b>	<b>14,296,018</b>	<b>16,604,119</b>	<b>19,230,376</b>	<b>22,205,112</b>	<b>25,563,363</b>
Gate Fec	Tarifa (USD/tn)	87	96	109	124	140	159	181
	<b>Ingreso (USD)</b>	<b>59,049,742</b>	<b>67,016,699</b>	<b>78,145,660</b>	<b>90,762,329</b>	<b>105,118,115</b>	<b>121,378,778</b>	<b>139,735,831</b>
<b>Total (USD)</b>	<b>127,385,699</b>	<b>144,572,504</b>	<b>168,580,577</b>	<b>195,798,022</b>	<b>226,767,198</b>	<b>261,845,692</b>	<b>301,446,643</b>	

## Anexo XIX: Financiamiento

Tabla XIX: Cálculo del capital cancelado

Año	Monto adeudado (USD)	Cuota (USD)	Interés (USD)	Capital cancelado (USD)	Saldo final (USD)
2051	1,676,000,000	96,923,246	67,040,000	29,883,246	1,646,116,754
2052	1,646,116,754	96,923,246	65,844,670	31,078,576	1,615,038,178
2053	1,615,038,178	96,923,246	64,601,527	32,321,719	1,582,716,459
2054	1,582,716,459	96,923,246	63,308,658	33,614,588	1,549,101,871
2055	1,549,101,871	96,923,246	61,964,075	34,959,171	1,514,142,700
2056	1,514,142,700	96,923,246	60,565,708	36,357,538	1,477,785,162
2057	1,477,785,162	96,923,246	59,111,406	37,811,840	1,439,973,322
2058	1,439,973,322	96,923,246	57,598,933	39,324,313	1,400,649,009
2059	1,400,649,009	96,923,246	56,025,960	40,897,286	1,359,751,723
2060	1,359,751,723	96,923,246	54,390,069	42,533,177	1,317,218,546
2061	1,317,218,546	96,923,246	52,688,742	44,234,504	1,272,984,041
2062	1,272,984,041	96,923,246	50,919,362	46,003,884	1,226,980,157
2063	1,226,980,157	96,923,246	49,079,206	47,844,040	1,179,136,117
2064	1,179,136,117	96,923,246	47,165,445	49,757,801	1,129,378,315
2065	1,129,378,315	96,923,246	45,175,133	51,748,114	1,077,630,202
2066	1,077,630,202	96,923,246	43,105,208	53,818,038	1,023,812,164
2067	1,023,812,164	96,923,246	40,952,487	55,970,760	967,841,404
2068	967,841,404	96,923,246	38,713,656	58,209,590	909,631,814
2069	909,631,814	96,923,246	36,385,273	60,537,974	849,093,841
2070	849,093,841	96,923,246	33,963,754	62,959,493	786,134,348
2071	786,134,348	96,923,246	31,445,374	65,477,872	720,656,476
2072	720,656,476	96,923,246	28,826,259	68,096,987	652,559,489
2073	652,559,489	96,923,246	26,102,380	70,820,867	581,738,622
2074	581,738,622	96,923,246	23,269,545	73,653,701	508,084,921
2075	508,084,921	96,923,246	20,323,397	76,599,849	431,485,072
2076	431,485,072	96,923,246	17,259,403	79,663,843	351,821,228
2077	351,821,228	96,923,246	14,072,849	82,850,397	268,970,831
2078	268,970,831	96,923,246	10,758,833	86,164,413	182,806,418
2079	182,806,418	96,923,246	7,312,257	89,610,989	93,195,429
2080	93,195,429	96,923,246	3,727,817	93,195,429	-

## Anexo XX: Flujo de fondos

A continuación, en las Tablas XX.1 y XX.2 se presentan los resultados del flujo de fondos para cada alternativa individualmente, sin financiamiento. A su vez, en las gráficas de las Figuras XX.1 y XX.2 se grafica el flujo acumulado en el tiempo. Estas curvas permiten visualizar la evolución financiera de cada alternativa a lo largo del horizonte temporal.

### XX.1: Flujo de fondos para planta de incineración

Tabla XX.1 Flujo de fondos planta incineración en USD, valor anual cada 5 años (2050-2080).

Concepto	2050	2055	2060	2065	2070	2075	2080
Beneficios no gravados por impuestos (USD)	-	77,555,869	90,434,992	105,035,781	121,649,185	140,467,031	161,710,947
Gate Fee (USD)	-	68,739,028	80,154,004	93,094,921	107,819,650	124,498,213	143,327,041
Egresos no gravados por impuestos (USD)	-	-65,996,631	-77,323,644	-715,419,032	-105,803,687	-123,755,709	-145,093,392
Depreciación de activos (USD)	-	-58,686,667	-58,686,667	-58,686,667	-58,686,667	-58,686,667	-58,686,667
Inversión (USD)	-1,676,000,000	-	-	-	-	-	-
<b>Flujo neto (USD)</b>	<b>-1,676,000,000</b>	<b>21,611,599</b>	<b>34,578,685</b>	<b>-575,974,997</b>	<b>64,978,481</b>	<b>82,522,868</b>	<b>101,257,930</b>
<b>Flujo neto acumulado (USD)</b>	<b>-1,676,000,000</b>	<b>-1,591,862,636</b>	<b>-1,445,724,349</b>	<b>-1,855,344,892</b>	<b>-1,563,272,569</b>	<b>-1,186,762,931</b>	<b>-718,241,606</b>

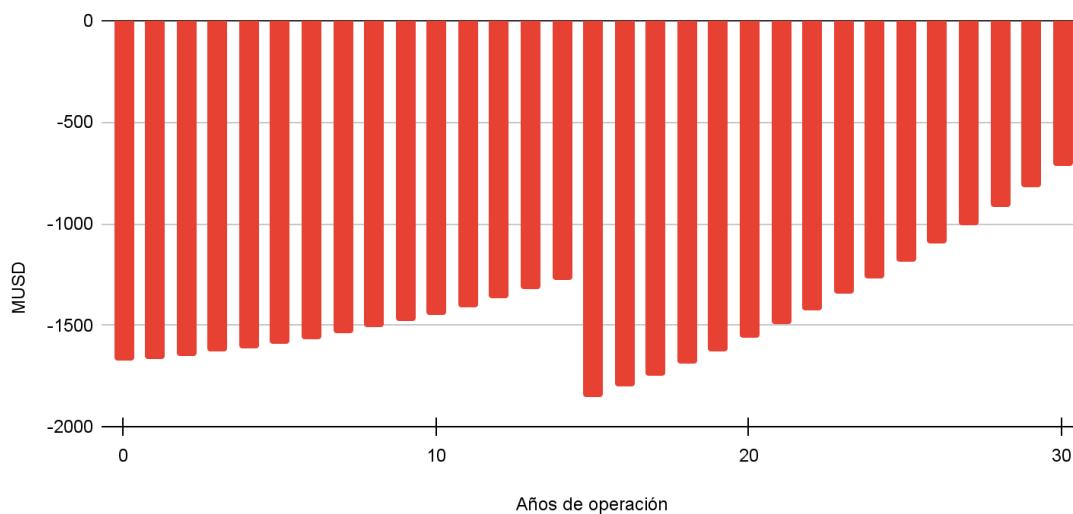


Figura XX.1 Flujo neto acumulado en el tiempo para la planta de incineración, en MUSD (Elaboración propia)

## XX.2: Flujo de fondos para rellenos sanitarios

Tabla XX.2 Flujo de fondos rellenos sanitarios en USD, valor anual cada 5 años (2050-2080).

Concepto		2050	2055	2060	2065	2070	2075	2080
Inversiones (USD)		-193,142,178	-225,663,072	-262,478,357	-304,327,264	-351,831,057	-405,525,192	0
Costo operación (USD)		-	-51,685,452	-58,677,296	-66,614,975	-75,626,438	-85,856,944	-97,471,400
Transporte de residuos	Distancia recorrida en promedio(km)	-	776,292	776,292	776,292	776,292	776,292	776,292
	Costo unitario (USD/km)	-	5.70	6.40	7.30	8.30	9.40	10.70
	Costo total (USD)	-	-4,402,667	-4,998,246	-5,674,393	-6,442,007	-7,313,461	-8,302,803
Tarifa de ingreso (USD)		-	68,739,028	80,154,004	93,094,921	107,819,650	124,498,213	143,327,041
Flujo neto (USD)		-193,142,178	-213,012,163	-245,999,895	-283,521,711	-326,079,851	-374,197,384	37,552,839
Flujo neto acumulado (USD)		-193,142,178	-362,529,885	-550,447,352	-759,628,320	-992,851,512	-1,253,148,141	-1,078,094,680

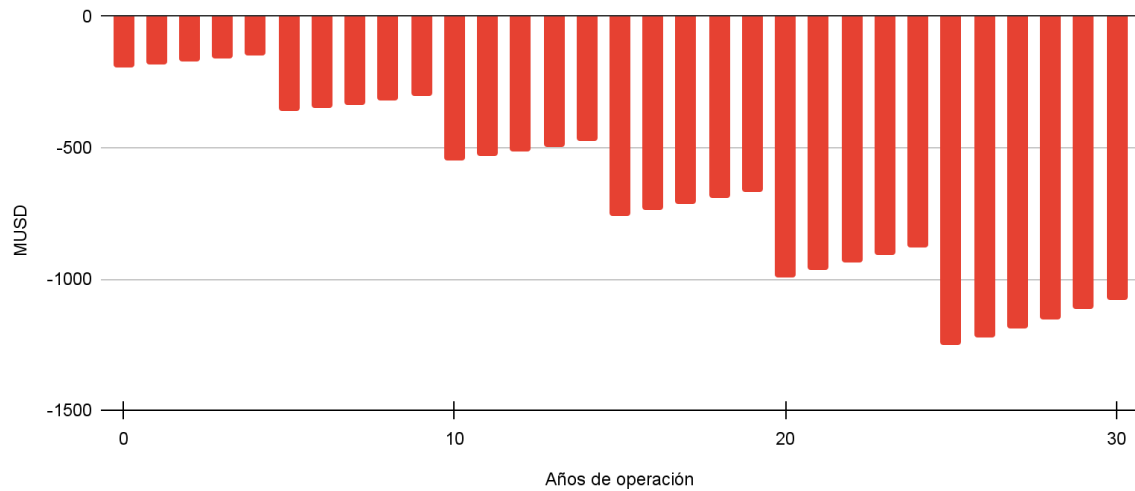


Figura XX.2 Flujo neto acumulado en el tiempo para rellenos sanitarios, en MUSD (Elaboración propia).