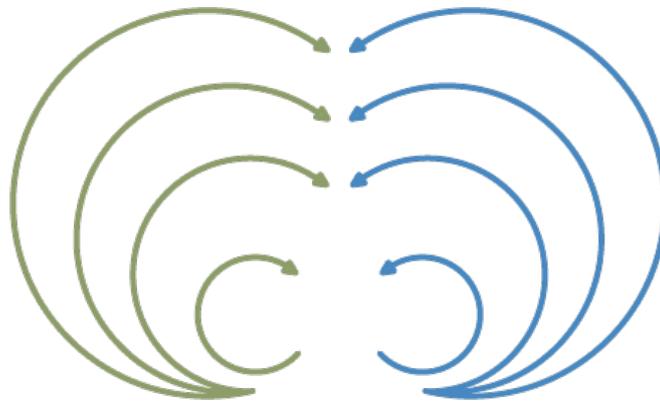




UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Tesis de Magister en Ingeniería Ambiental

Análisis de prefactibilidad técnico-económica de una planta de valorización de residuos orgánicos para la ciudad de Montevideo, con tecnologías alineadas con los principios de una economía circular



Autora

María José González

Director de Tesis

Mauricio Passeggi

Montevideo, Uruguay

2021

Tabla de contenido

PAGINA DE APROBACIÓN.....	vii
AGRADECIMIENTOS.....	viii
RESUMEN.....	ix
SIGLAS y ACRÓNIMOS.....	xii
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes breves del problema y motivación para la elección del tema ..	1
1.2 Formulación del problema	3
1.3 Objetivo.....	4
1.4 Relevancia de la investigación.....	5
1.5 Metodología	7
1.5.1 Limitaciones de la tesis.....	12
1.6 Orientación del texto	12
2 ECONOMÍA CIRCULAR y RESIDUOS ORGANICOS.....	14
2.1 Estado del arte.....	14
2.2 Contexto mundial	20
2.3 Economía de los nutrientes.....	22
3 SITUACIÓN DE MONTEVIDEO.....	23
3.1 Residuos	23
3.1.1 Marco normativo nacional en materia de residuos	28
3.2 Energía	33
3.3 Nutrientes y suelos	38
3.3.1 Calidad y cantidad de compost	40
4 SISTEMA DE GESTIÓN PROPUESTO.....	46
5 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS.....	53

5.1	Digestión Anaerobia	53
5.1.1	Tecnología de purificación del biogás	59
5.2	Estabilización aeróbica.....	63
6	<i>DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA</i>	72
6.1	Cantidad de residuos a procesar en la planta	72
6.2	Planta de digestión anaerobia.....	74
6.2.1	Dimensionamiento de la unidad DA.....	80
6.3	Planta de compostaje	80
6.3.1	Composición del material de ingreso a proceso compostaje.....	80
6.3.2	Remoción de ST en compostaje	91
6.3.3	Etapa de refinado	94
6.3.4	Balance de masa de etapa de compostaje	95
6.3.5	Dimensionamiento de unidad compostaje	96
6.4	Resultados globales y discusión	97
7	<i>LOCALIZACIÓN</i>	100
8	<i>REDUCCIÓN DE EMISIONES</i>	109
8.1	Emisiones CO ₂ equivalente digestión anaerobia	110
8.2	Emisiones CO ₂ equivalente por compostaje	112
8.3	Emisiones CO ₂ equivalente en relleno sanitario.....	115
8.4	Emisiones CO ₂ equivalente en escenario BAU	116
8.5	Resumen emisiones	117
9	<i>ASPECTOS ECONÓMICOS</i>	119
9.1	Inversiones	120
9.2	Costos operativos	121
9.2.1	Digestión Anaerobia	122
9.2.2	Planta de compostaje.....	124
9.3	Ingresos	125

9.4	Flujo de fondos	127
9.5	Análisis de sensibilidad	132
10	CONCLUSIONES	135
	BIBLIOGRAFÍA.....	139
	ANEXO.....	145
	Cálculos de mezcla de digestado y estructurante para ingreso a la planta de compostaje	145

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Compromiso país respecto a Cambio Climático (NDC), vinculados a residuos	6
Tabla 2: Composición de los residuos domiciliarios de la ciudad de Montevideo.....	26
Tabla 3:Valores de referencia para inyección de biometano a la red según normativa alemana - DWA M361 2011.....	38
Tabla 4: Comparación de normativa nacional y Argentina con calidad de digestado+compost obtenido a nivel internacional	42
Tabla 5: Calidad de compost y comparación con normativa nacional con calidad de enmiendas orgánicas en base a residuos mezclados o residuos clasificados en origen...	43
Tabla 6: Parámetros vinculados a la digestión anaerobia seca.....	58
Tabla 7:Composición del biogás según sustrato	59
Tabla 8: Principales parámetros vinculados al inicio del proceso de compostaje	65
Tabla 9: Comparación de tecnologías de compostaje	70
Tabla 10: Composición de residuos según sistemas de recolección y % de recolección propuestos.....	73
Tabla 11: Parámetros operacionales – planta Bekon residuos orgánicos	74
Tabla 14: Parámetros para obtener peso molecular del biogas	75
Tabla 13: Composición en volumen y masa del biogás.....	78
Tabla 14: Parámetros fisicoquímicos de la mezcla de material de entrada a compostaje	82
Tabla 15: Parámetros fisicoquímicas de residuos verdes y reciclado considerados para el análisis realizado	83
Tabla 16: Parámetros fisicoquímicas de chip de madera de pellets y reciclado considerados para el análisis realizado.....	83
Tabla 17: Reducción de la relación C/N en la etapa de digestión anaerobia.....	84
Tabla 18: Caracterización de material de entrada a compostaje, según composición fisicoquímica	86
Tabla 19: Posibles composiciones de material de entrada a compostaje y características fisicoquímica	89
Tabla 20: Parámetros y resultados del proceso de iteración para el cálculo de la remoción de ST en la etapa de compostaje	93

Tabla 21: Indicadores globales del proceso	98
Tabla 22: Criterio a considerar para ubicación de instalaciones de biogás	101
Tabla 23: Criterio a considerar para ubicación de instalaciones de compostaje y biogás	102
Tabla 24: Evaluación de criterios para ubicación de la planta en 3 alternativas	105
Tabla 25: Factores conversión potencial de calentamiento global.....	110
Tabla 26: Cálculo de la densidad del biometano	111
Tabla 27: Emisiones CO ₂ equivalente por digestión anaerobia	112
Tabla 28: Balance de masa de sólidos fijos en la etapa de compostaje.....	114
Tabla 29: Emisiones CO ₂ equivalente por compostaje	115
Tabla 30: Emisiones por pérdidas de biogás en relleno sanitario.....	116
Tabla 31: Emisiones relleno sanitario con captura biogás	117
Tabla 32: Emisiones de GEI con y sin planta	117
Tabla 33: Costos e inversión de referencia para las tecnologías propuestas	119
Tabla 34: Resumen de inversiones	121
Tabla 35: Supuestos base para el cálculo de costos de operación y mantenimiento.....	122
Tabla 36: Personal considerado para la planta de digestión anaerobia	123
Tabla 37: Costos de operación y mantenimiento de Planta Digestión Anaerobia.....	124
Tabla 38: Personal considerado para planta de compostaje	124
Tabla 39: Costos de operación y manteminiento de Planta Compostaje	125
Tabla 40: Datos de partida para Ingresos del sistema propuesto (gas, compost y servicio)	127
Tabla 41: Resumen de ingresos del sistema propuesto.....	127
Tabla 42: Valores generales para cálculo de flujo de fondos.....	127
Tabla 43: Flujo de fondos sin impuestos.....	130
Tabla 44: Flujo de fondos con impuestos y aplicación de Ley de Promoción de Inversiones	131
Tabla 45: Sensibilidad de la TIR al varia la tasa de servicio y precio del compost	132
Tabla 46: Sensibilidad de la TIR al varia la tasa de servicio y precio del gas	133
Tabla 47: Sensibilidad de la TIR al varia la tasa de servicio y la inversión.....	133
Tabla 48: Caracterización de material de entrada a compostaje, según composición fisicoquímica.....	145

Tabla 49: Cálculos de posibles combinaciones de material de entrada a compostaje, según composición fisicoquímica	146
---	-----

PAGINA DE APROBACIÓN

AGRADECIMIENTOS

“La crisis ecológica cuestiona no solo nuestros estilos de vida, sino también y sobre todo el sentido que le damos a la vida. La ecología refiere a la forma que organizamos nuestra vida individual y colectiva, pero también y sobre todo a su dimensión existencial.

*Hoy, la ecología nos hace redescubrir el valor de las relaciones como principal fuente de vida. Nos revela que lo que da vida es **interdependencia** más que individualidad, **gratitud** más que eficiencia, **creatividad** más que seguridad.”*

*Elena Lasida, traducido del prólogo de la revista Esencial “Ecología y espiritualidad”,
2021*

Gracias a Diego, Juan Pedro, Pilar y Rocío por darle sentido a todo. A mi familia grande, por estar siempre. A mis amigas por apuntalar cuando se hizo cuesta arriba. A Mauricio por saber guiar el proceso, por su compromiso y su análisis crítico constructivo. Y a muchos más por aportar con generosidad.

RESUMEN

El objetivo general del presente trabajo consiste en la prefactibilidad técnica y económica de un sistema de valorización de residuos orgánicos generados en los domicilios de Montevideo, en el marco de una economía circular.

Bajo el paradigma de una economía circular, se propone diseñar un sistema que vincule los ciclos urbanos y rurales mediante la recuperación o regeneración de los ecosistemas desde los cuales se extraen los recursos consumidos.

Por lo tanto, se propone un sistema biológico, basado en la combinación de las tecnologías de digestión anaerobia y compostaje ya que las mismas permiten recuperar materia orgánica, nutrientes y energía. La enmienda orgánica obtenida será comercializada para sistemas productivos locales. El biogás obtenido por el proceso de digestión anaerobia, teniendo en cuenta matriz energética nacional (alto % de energía eléctrica renovable), se recomienda sumar una etapa de purificación para producir biometano a ser utilizado en la red de gas natural (o eventualmente para uso vehicular en la flota de recolección de residuos).

La metodología propuesta para el dimensionamiento se basa en tomar una ciudad como referencia por su sistema de gestión de residuos y sus resultados en base a los altos niveles de recuperación de materiales alcanzados y aplicarlos a la generación y composición de residuos de la ciudad de Montevideo. Luego de seleccionar las tecnologías más adecuadas se realiza un balance de masa basado en los sólidos totales del sistema, utilizando distintos parámetros fisicoquímicos específicos con datos bibliográficos y a un análisis de sensibilidad para aquellos parámetros críticos. Este análisis es teórico y dado su nivel de complejidad es recomendable verificar los resultados y supuestos en ensayos a escala piloto.

Se propone una localización para la planta propuesta en base a estudios existentes y aplicando criterios de exclusión y aptitud vinculados a las tecnologías elegidas, teniendo en cuenta las limitaciones actuales en el territorio montevideano.

Luego se analiza la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero del sistema propuesto en base a la metodología del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) a los efectos de evaluar el aporte a los objetivos nacionales en la materia.

Finalmente se realiza un flujo de fondos para poder estimar los costos que podría tener el sistema y concluir respecto a su factibilidad económica.

Entre las conclusiones alcanzadas, se destaca la importancia de contar con un sistema de recolección selectiva en origen donde los residuos orgánicos sean separados en los domicilios. Este es un elemento clave para poder asegurar la calidad de las enmiendas orgánicas obtenidas al final del proceso y que puedan ser utilizadas en procesos productivos rurales cumpliendo normativa nacional.

Dado que el porcentaje de humedad de los residuos puede variar tanto al inicio del proceso como durante el tiempo y que las distintas tecnologías se encuentran condicionadas por los sólidos totales del proceso, se destaca la relevancia de este parámetro para el diseño y operación de la planta.

Por otra parte, se identificó la importancia del rol del material estructurante utilizado en la etapa de compostaje. Para asegurar una buena calidad de material es relevante definir el tipo de material estructurante, las cantidades a utilizar y en que porcentajes se combinan con el digestado obtenido de la etapa de digestión anaerobia. El diseño de la planta deberá ser lo suficientemente flexible para poder procesar distintas cantidades de material estructurante en base a las características fisicoquímica del material de ingreso a la planta (sólidos totales o humedad, relación C/N y densidad) ya que variarán a lo largo del tiempo dependiendo de su composición.

Del análisis realizado se obtienen unas 72,7 kt/a de una enmienda orgánica comercializable a bajo precio y a donarse (50% de cada destino) con aproximadamente 0,9 kt/a de nitrógeno junto a micronutrientes y materia orgánica. Por otra parte, se tienen 5.099×10^3 m³/a de metano a inyectar a la red. Esto representaría un 10% de la media de consumo nacional de gas natural.

Dado la falta de alternativas, la logística actual de recolección de residuos de la ciudad y los aspectos vinculados a la posible resistencia social a este tipo de emprendimientos, se recomienda una ubicación en los alrededores del sitio de disposición final actual de Montevideo (Felipe Cardoso). Asimismo, su distancia a los puntos de aprovechamiento de los productos obtenidos (enmiendas orgánicas y biometano) fueron tenidos en cuenta, afirmando los aspectos positivos de la ubicación propuesta.

La solución diseñada reduce significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero pudiendo priorizarse dentro de las estrategias nacionales para alcanzar las metas vinculadas a cambio climático y facilitar el acceso a financiamiento.

Finalmente, el costo de operación del proyecto es mayor a los sistemas actuales de disposición final de residuos, pero dentro de los rangos de referencia internacionales. Será decisión de las autoridades asumir un aumento de presupuesto en pos de una solución circular que permita asimismo reducir el volumen de residuos a disponer en terreno, en un departamento con escasez de espacio.

Solo un alto nivel de compromiso ciudadano, con un cambio cultural profundo nos llevará a un buen resultado para un proceso de recuperación de materia orgánica, nutrientes y energía como el planteado, que permita reconectar los ciclos urbanos y rurales.

SIGLAS y ACRÓNIMOS

AAO	Autorización Ambiental de Operación
AAP	Autorización Ambiental Previa
BEN	Balance Energético Nacional
BioCDR	Biocombustible derivado de residuos
C/N	Relación Carbono Nitrógeno
CAPEX	Inversión en capital (<i>capital expenditure</i>)
CDR	Combustible derivado de residuos
CEMPRE	Compromiso Empresarial para el Reciclaje
CHP	<i>Combined heat and power</i>
CIU	Cámara de Industrias del Uruguay
COMAP	Comisión de Aplicación de la Ley de Inversiones
DA	Digestión Anaerobia
DGSA	Dirección General de Servicios Agrícolas
DIEA	Oficina de Estadísticas Agropecuarias
DINAMA	Dirección Nacional de Medio Ambiente
DNE	Dirección Nacional de Energía
FAS	Factor de Aire Libre
FORSU	Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GNC	Gas Natural Comprimido
GNL	Gas Natural Líquido
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
IDM	Intendencia de Montevideo
IMESI	Impuestos Específico Interno
INIA	Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria
IRAE	Impuesto a la Renta de las Actividades Económicas

IRP	<i>International Resource Panel</i>
IRR	Iniciativa Regional para el Reciclaje Inclusivo
ISWA	<i>International Solid Waste Association</i>
MGAP	Ministerio Ganadería, Agricultura y Pesca
MIDES	Ministerio de Desarrollo Social
MIEM	Ministerio de Industria, Energía y Minería
MVOTMA	Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente
NDC	Contribución Determinada a Nivel Nacional
ODS	Objetivo de Desarrollo Sostenible
ONU	Organización de las Naciones Unidas
OPEX	Costos de funcionamiento (<i>operational expenditure</i>)
OSE	Oficinas Sanitarias del Estado
PRM	Planta de recuperación de materiales
PSA	Pressure swing adsorption
REP	Responsabilidad extendida del productor
RSI	Residuos sólidos industriales
RSU	Residuos sólidos urbanos
ST	Sólidos Totales
SV	Sólidos Volátiles
TIR	Tasa interna de retorno
TMB	Tratamiento mecánico biológico
TRESOR	Tratamiento de Residuos Orgánicos
UdelaR	Universidad de la República
UTE	Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas
VAL	Viabilidad Ambiental de Localización
VAN	Valor actual neto
WEF	<i>World Economic Forum</i>
WTE	<i>Waste -to -energy</i> (residuos a energía)

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes del problema y motivación para la elección del tema

En los ecosistemas naturales existe una importante red que interconecta los sistemas vivos y los no-vivos. Los intercambios de materia y energía son permanentes. Cuanto mayor es la complejidad del ecosistema (biodiversidad), mayor es su capacidad de capturar y usar la energía que lo atraviesa. Los seres vivos reciben el flujo de energía y materia de su alrededor, parte de esta energía es retenida en estructuras bioquímicas y parte se dispersa como calor o por expulsión de materia fuera del sistema. El crecimiento de los ecosistemas puede darse de tres formas distintas: 1) por el aumento físico de la biomasa, 2) por el crecimiento de la red mediante la circulación de energía y materia y 3) por el crecimiento de información (complejidad genética) (Masullo, 2017). De esta forma la biodiversidad aumenta, el número de especies y los nichos ecológicos específicos también. La complejidad genética y bioquímica también se potencia por los flujos de información. (Jorgensen and Fath, 2002; Jorgensen 1998 at (Masullo, 2017))

Es por esto que la economía de la naturaleza es circular. Los procesos se conectan, liberando materia y energía en similares condiciones. Esto genera condiciones ilimitadas para la creación de complejidad y eficiencia. En este modelo circular de la naturaleza, el objetivo del traslado de materia es crear más y mejor organización del sistema, no simplemente moverla de un punto a otro.

El modelo de producción y consumo de la economía actual ha quebrado el vínculo entre los ciclos de la materia orgánica y de nutrientes, al considerar las áreas de cultivos y las áreas urbanas como dos sistemas separados, unidos por un flujo unidireccional de materia. Esto implica a futuro un menor crecimiento de la organización (la sociedad) y de su capacidad de adaptarse.

En el año 2012, un tercio de la producción mundial de alimentos fue pérdida o desperdicio, representando aproximadamente 1.300 millones de toneladas al año lo que equivale a 750.000 millones de dólares en base a estimaciones del Banco Mundial con costos del año 2009 (Lema et al., 2017).

Los alimentos y recursos que provienen de áreas rurales para ser consumidos en las áreas urbanas no regresan al punto de partida para cerrar los ciclos. La materia orgánica y los nutrientes que no fueron utilizados para alimentación, se dispone en terreno generando lixiviados que afectan cursos de agua superficial y subterránea así como emisiones de metano, relevante gas de efecto invernadero. Los alimentos utilizados por la población que superan lo necesario para su crecimiento (como producto del metabolismo humano), son derivados a los sistemas de saneamiento, alcanzando mares y ríos. Esto no permite cerrar los ciclos de nitrógeno, carbono, fósforo y potasio.

Esta forma desconectada de disponer los desperdicios de alimentos y recursos, genera las siguientes consecuencias (Masullo, 2017):

1. Aumento en el uso de fertilizantes químicos, para compensar las pérdidas de los suelos, generando emisiones de dióxido de carbono vinculadas a su producción.
2. Falta de materia orgánica en el suelo que conlleva a una baja retención del agua y mayores necesidades de riego y consumo energético asociado. El riego puede llevar a la remoción del fertilizante aplicado por arrastre y su traslado a cursos de agua.
3. Disminución de materia orgánica de los suelos, aumentando su vulnerabilidad, creando condiciones favorables para su erosión y en casos extremos desertificación.
4. En el caso de la incineración de materia orgánica, se emite a la atmósfera el carbono fijado por las plantas, que si hubiera sido aplicado al suelo renovarían el sumidero de carbono que caracteriza a los mismos.
5. Cuando los residuos orgánicos son dispuestos a terreno sin adecuados controles, se emite metano (potente gas de efecto invernadero) y en caso de ser recuperado sin aprovechamiento energético, nuevamente se libera a la atmósfera el carbono fijado por las plantas. Se genera además lixiviación de elementos en altas concentraciones a cursos de agua y se facilita la dispersión de patógenos.

La mayor parte de los problemas ambientales actuales, se vinculan por esta forma lineal de producir, donde se han desconectado los ciclos naturales. En la economía de la naturaleza, la energía solar y los materiales circulan permaneciendo la mayor parte del tiempo en condiciones útiles y disponibles para nuevos usos. Aprender de estos ciclos naturales e imitarlos es lo que se plantea en el marco de una economía circular.

A través de esta tesis, se propone diseñar un sistema que vinculen los ciclos urbanos y rurales, proponiendo tecnologías en base a microorganismos aerobios y anaerobios para la gestión de los restos de alimentos y materia orgánica que se generan en las ciudades, en particular en Montevideo.

1.2 Formulación del problema

Desde el año 2007, luego de la elaboración del Plan Director de Residuos de Montevideo y su Área Metropolitana, se han tenido diversos intentos para mejorar la gestión de residuos, apuntando a una solución regional que no se ha logrado concretar. Dentro del departamento de Montevideo ya no se cuenta con terrenos que cumplan con las condiciones ambientales y sociales adecuadas para instalar un nuevo relleno sanitario (Plan Director de Residuos y Área Metropolitana, 2003). Por lo tanto, es prioritario disminuir la cantidad de residuos que llegan a disposición final, de modo de prolongar su uso tendiendo a largo plazo a un vertido mínimo.

Teniendo en cuenta que la responsabilidad de gestionar los residuos domiciliarios corresponde a las Intendencias por Ley Orgánica Municipal (Nº 9515/35) y la Ley de Gestión de Residuos recientemente aprobada (Nº 19.829/19) , se propone abordar una propuesta para los residuos domésticos, que representan aproximadamente 1.300 ton/d, dejando de lado los residuos comerciales e industriales (LKSUR, 2013).

Actualmente la casi totalidad de los residuos se dispone en el relleno sanitario de Montevideo, llamado Felipe Cardoso, contando cada vez con menos espacio. El 41% de estos residuos domésticos corresponden a la fracción orgánica, principalmente a desperdicios de alimentos (LKSUR, 2013). Actualmente existen iniciativas de gestión para la fracción de envases y papeles/cartones, que representan el 25% del total, obteniéndose porcentajes muy bajos de recuperación según el análisis de los datos del Plan de Gestión de Envases – www.ciu.com.uy. A los efectos de disminuir lo que realmente llega a Felipe Cardoso, se propone abordar la gestión de los residuos orgánicos, donde la mayor parte corresponde a desperdicios de alimentos.

En este contexto, se propone realizar una tesis que permita responder las siguientes preguntas:

¿Cuál sería el dimensionamiento de un sistema de gestión de residuos domésticos orgánicos para la ciudad de Montevideo que permita el mayor aprovechamiento de materia orgánica, nutrientes, micronutrientes y energía según lo propuesto en el marco de una economía circular?

¿Cuál sería la localización adecuada? (considerando las dimensiones social, económica y ambiental)

¿Cuales serían las reducciones de Gases de Efecto Invernadero? ¿Es posible proponer esta acción como una Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC por sus siglas en inglés) en el marco del Convenio de Cambio Climático y acceder a fondos existentes para su financiamiento? ¹

¿Qué implicaría en materia de inversiones y costos en el contexto local?

1.3 Objetivo

El objetivo general de la tesis es el dimensionamiento y análisis de pre-factibilidad técnico-económica de una planta de valorización de residuos orgánicos para la ciudad de Montevideo, con tecnologías alineadas con los principios de una economía circular.

Como objetivos particulares se analizan distintas alternativas tecnológicas y se define una alternativa adecuada a las condiciones locales. Asimismo, se establecen los requisitos y parámetros necesarios para obtener los productos al final del proceso en condiciones adecuadas para su uso comercial.

A su vez, se propone una localización para su implementación teniendo en cuenta aspectos logísticos, sociales, ambientales y de distancia a los mercados de los productos obtenidos, así como una evaluación de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero que podrían generarse comparando con seguir con el sistema actual.

¹ Las NDC son los aportes de los países donde determinan de forma independiente cuál sería su contribución al esfuerzo global de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Surgen con fuerza a nivel global en el Acuerdo Paris del año 2016 – Cumbre de países vinculada al cambio climático.

Finalmente, se busca determinar el costo por tonelada que tendría la propuesta teniendo en cuenta las inversiones y los costos operativos.

1.4 Relevancia de la investigación

A pesar de haber impulsado distintas estrategias, en la ciudad de Montevideo no se ha logrado aún una valorización significativa de sus residuos, teniendo importantes desafíos vinculados al espacio para la disposición final de los residuos urbanos. Se ha mejorado el manejo del sitio de disposición final, hacia un modelo de relleno sanitario con captura de biogás, impermeabilización y planta de tratamiento de lixiviado. Hoy llegan 2.600 ton/d de residuos domiciliarios, comerciales, industriales y de obra civil, en un espacio cada vez más acotado. Esta solución puede extenderse por 10 años más llevando al extremo el uso del espacio (Robano & González, 2021), lo cual plantea la necesidad de reducir al máximo los residuos que se disponen allí de forma de extender su vida útil.

Existen diversas tecnologías para la gestión de residuos alternativas a la disposición final, aunque en general son más costosas que esta (hasta el actual estado del arte de las variadas tecnologías) (Clarke, 2018). Sin embargo, algunas de ellas pueden presentar diversas ventajas desde el punto de vista de la sostenibilidad y los compromisos asumidos por el país.

Por un lado, algunas tecnologías aportan al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)² a los cuales se ha adherido el Uruguay. En particular la meta 12.5.1 de los ODS, refiere a la “Tasa nacional de reciclado, toneladas de material reciclado”, donde en el caso de Uruguay, según el informe voluntario, para los residuos domiciliarios se cuenta con poca información y tasas muy bajas de recuperación solo de envases (Presidencia de la República, 2021).

Por otra parte, en el marco del compromiso país respecto a las medidas de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (Contribuciones Nacionales Determinadas - NDC),

² En el año 2015, los líderes mundiales adoptaron un conjunto de objetivos globales para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible. Cada objetivo tiene metas específicas que deben alcanzarse en los próximos 15 años. Uruguay reporta periódicamente avance de sus metas mediante los Informes Nacionales Voluntarios - <https://ods.gub.uy/>.

el Uruguay ha asumido un conjunto de compromisos incondicionales y condicionales³ para el logro de los objetivos globales de reducción de emisiones. A continuación se presentan las medidas vinculadas al problema a estudiar y sus posibles soluciones (República Oriental del Uruguay, 2017):

Tabla 1: Compromiso país respecto a Cambio Climático (NDC), vinculados a residuos

VINCULADOS A RESIDUOS y SU APROVECHAMIENTO	Principales medidas de mitigación INCONDICIONALES	Principales medidas de mitigación CONDICIONALES
ENERGIA	Generación eléctrica con fuente biomasa: 160 MW de potencia instalada para entrega a la red eléctrica a 2025 (4% de la potencia instalada del SIN).	
RESIDUOS	Introducción de captura y quema de CH ₄ en sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos (con y sin generación de energía eléctrica): 60% de los residuos sólidos urbanos generados dispuestos en sitios de disposición final con dicha tecnología	Desarrollo de los sistemas de gestión de residuos sólidos urbanos, incluyendo mejoras en los sistemas de tratamiento y disposición final. Este desarrollo incluye la extensión de los sistemas de captura y quema de CH ₄ y/o la introducción de tecnologías de reducción de generación de CH ₄ a nuevos sitios de disposición final, de forma de que el 90% de los residuos sólidos urbanos sean dispuestos en sitios con estas tecnologías

En el área “Residuos”, se focaliza en los residuos urbanos, proponiendo la captura de biogás de los rellenos sanitarios.

Con este contexto, teniendo en cuenta que la fracción orgánica de los RSU representan más del 40% de los residuos generados en los domicilios (LKSUR, 2013) y que la materia orgánica es la fuente de las emisiones de gas metano, se profundizará en esta componente para el diseño de un sistema de valorización.

³ Los compromisos son “condicionales” e “incondicionales” a los apoyos que se reciban de la cooperación internacional. Es decir que los compromisos “condicionales” son más ambiciosos que los “incondicionales” pero su cumplimiento está sujeto a los apoyos recibidos a nivel internacional.

La economía circular es un nuevo paradigma que propone un modelo de producción y consumo donde el diseño de productos y servicios impulsen la circularidad de materiales, materia orgánica y nutrientes. Los principios y acciones de la economía circular se alinean con los ODS y aportan a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (EMF & Foundation, 2019)

Por lo tanto, de las distintas alternativas tecnológicas existentes para la gestión de residuos, se propone considerar aquellas que mejor se alinean con la economía circular y sus principios.

1.5 Metodología

Los emprendimientos económicos utilizan recursos y tecnologías que no son neutras en su impacto social y ambiental. Las economías dominantes (economías de mercado o economías planificadas) en la práctica, han ignorado dichos impactos, apareciendo a veces, a través del concepto de externalidad (impactos “externos” de los emprendimientos) con un abordaje desde el pensamiento económico dominante del siglo pasado.

La creciente toma de conciencia de la destrucción del medio ambiente en curso, ha llevado a revisar las teorías y las prácticas dominantes de la economía, rompiendo el paradigma⁴ de la existencia de recursos prácticamente infinitos, indicando que la actividad económica debe integrar en sus modelos teóricos y en sus prácticas productivas el costo de la destrucción medio-ambiental, así como proponer formas productivas capaces de preservar el medio-ambiente y reducir las amenazas a la sociedad que dicha destrucción acarrea.

La asunción del costo de la destrucción medio-ambiental en la teoría y actividad económica, ha dado origen a diferentes modelos conceptuales alternativos como la *Doughnut Economy*, Economía Simbiótica, Economía Verde, Economía Circular entre otros.

A los efectos de el estudio del problema abordado se ha elegido el marco teórico de la Economía Circular en particular por su capacidad de ofrecer un marco conceptual amplio y estrategias concretas que permite modelar emprendimientos liberados de los viejos

⁴ El tema de los paradigmas científicos y sus rupturas fue iniciado por T.S. KUHN: La estructura de las revoluciones científicas, 1986, México, Fondo de Cultura Económica.

paradigmas, revisando las bases tecnológicas e incluyendo la evaluación del impacto ambiental.

La inclusión del impacto y los costos ambientales puede reducir la rentabilidad clásica de los emprendimientos, generando resistencias en sectores de la sociedad, lo que indica que el paradigma de la Economía Circular se apoya también en un cambio de las relaciones sociales hacia caminos de mayor responsabilidad y solidaridad.

Por lo tanto, en los estudios de proyectos o emprendimientos económicos, no sólo son relevantes los costos y la rentabilidad de los mismos, sino su impacto social y medioambiental.

Con este marco, para lograr el objetivo de esta tesis, se desarrollan las siguientes etapas:

1. Modelo conceptual para el análisis del problema abordado.

Se inicia con un desarrollo del concepto de economía circular y su aplicación en ciudades. Para ello se realiza una revisión bibliográfica teniendo en cuenta los principios que han inspirado a la economía circular, así como publicaciones más actuales. El concepto como tal toma fuerza en la última década, pero se basa en ideas y estrategias que se venían desarrollando ya desde varios años antes. Dentro de las distintas líneas planteadas por la economía circular, se hace foco en el concepto de “economía de los nutrientes” por su vínculo directo con el objetivo de esta tesis, observando los análisis que ha realizado Finlandia, uno de los países que lidera los avances en la implementación de medidas para la transición hacia una economía circular.

2. Análisis de la situación en Montevideo

A los efectos de dimensionar una solución para la ciudad de Montevideo, se realiza una descripción del manejo de los residuos, del contexto energético y de la situación de los nutrientes a nivel nacional.

Para presentar el contexto del manejo de residuos en el departamento se parte de informes técnicos disponibles públicamente y en base a entrevistas realizadas a referentes técnicos de del Departamento de Desarrollo Ambiental de la Intendencia de Montevideo (sector responsable por los residuos en general, pero poniendo foco en la gestión actual y su planificación a futuro). Las entrevistas fueron realizadas a Sebastián Bajsa, Jorge Alsina y

Gabriela Camps en el marco de la consultoría realizada por parte de la autora de la tesis y un equipo interdisciplinario durante el año 2019. Finalmente se presenta un análisis del marco normativo nacional para comprender las condicionantes para la solución propuesta.

La principal fuente de información del marco energético nacional es el Balance Energético Nacional publicado año a año por el Ministerio de Industria, Energía y Minería a través de la Dirección Nacional de Energía (DNE). La información presentada es para los distintos usos y fuentes de la energía. Esta información fue complementada con una entrevista a Arianna Spinelli responsable del Área Hidrocarburos de la DNE a los efectos de conocer datos particulares de la situación del gas natural y los informes de las series estadísticas de energía de la página del Observatorio Industrial del MIEM.

Para describir la situación de las necesidades de nutrientes y materia orgánica se analizan temas vinculados a la calidad de los suelos y los tipos de cultivos en el área metropolitana. Para ello se toman como referencia trabajos de investigación de la Facultad de Agronomía, del INIA y datos del MGAP a través de la Dirección de Recursos Naturales y de la Oficina de Estadística Agropecuarias (DIEA). Se complementa la información con estudios realizados en el marco del proyecto Biovalor - iniciativa del gobierno uruguayo que apunta a la valorización de residuos agroindustriales - donde se ha analizado la potencial oferta y demanda de nitrógeno, fósforo y potasio, en base a residuos y en base a los cultivos nacionales respectivamente. Se incluye un análisis de normativa nacional e internacional respecto a la calidad de los productos obtenidos con las tecnologías propuestas por esta tesis tomando en cuenta artículos científicos publicados y normativas regionales, así como europeas.

3. Propuesta de gestión integral de residuos

Para mejorar la gestión de residuos existen distintas alternativas tecnológicas que van desde la disposición en rellenos sanitarios con un fuerte control de los aspectos ambientales hasta la incineración de los residuos con aprovechamiento energético. Sin embargo, al seleccionar el marco propuesto por la economía circular, las opciones tecnológicas se basan en el aprovechamiento de materia orgánica y nutrientes por lo que se priorizan las tecnologías de digestión anaerobia y compostaje.

Para la propuesta de valorización, se analizaron estadísticas internacionales europeas (Eurostat 2018)⁵ con el objetivo de identificar los modelos más eficientes. Por otra parte, se tuvo en cuenta la necesidad de acceder a datos confiables e integrados en todas las etapas de la gestión de residuos orgánicos de modo que las eficiencias y valores aplicados sean coherentes.

Se toma como modelo la ciudad de Liubliana en Eslovenia. Esta ciudad ha sido reconocida en la comunidad europea por los altos niveles de recuperación de materiales obtenidos con un modelo con alta participación ciudadana. Fue posible acceder a información de la eficiencia de la recolección selectiva de dicha ciudad, así como datos de primera mano de la planta diseñada para la recuperación de materiales.

4. Factibilidad técnica

Para las soluciones basadas en digestión anaerobia y compostaje existen diversas alternativas tecnológicas desarrolladas a nivel global. Por lo tanto, para la factibilidad técnica del sistema de gestión propuesto se tomaron como base diversas referencias bibliográficas tanto a nivel de publicaciones científicas como libros y reportes de organismos referentes en la materia. La metodología principal fue la utilización de un balance de masa en base a los sólidos totales de los distintos flujos de entrada y salida, tomando parámetros fisicoquímicos identificados en bibliografía internacional y los especificados por los paquetes tecnológicos elegidos. Ya que las características de los residuos y del material estructurante puede ser muy variable, se realiza un análisis de sensibilidad y se definen rangos para asegurar una operación apropiada.

Se consideran los residuos domiciliarios generados en todo el territorio de Montevideo y la cantidad y composición de estos residuos se basa en estudios técnicos públicos realizados para dicha ciudad.

Como parte de la factibilidad técnica del proyecto es necesario definir una ubicación apropiada considerando la disponibilidad de terrenos, así como criterios de restricción y

⁵ https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics#Waste_treatment

aptitud. Para esto se toman estudios previos realizados para el área metropolitana de Montevideo, bibliografía internacional y recomendaciones de instituciones especializadas.

Tanto para las tecnologías disponibles como para las alternativas de ubicación, se comparan las alternativas existentes en base a distintos criterios, definiendo así la solución más adecuada para el contexto local y actual.

Desde el punto de vista del compromiso país en materia de Cambio Climático, así como para el acceso a posibles financiamientos de mayor conveniencia, se considera importante estimar la reducción de emisiones que se lograría con el proyecto propuesto. Para ello se toman como referencia las metodologías propuestas por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).

5. Estudio de prefactibilidad económica

La prefactibilidad económica se definirá en base a la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Valor Actual Neto (VAN) del proyecto de inversión. Para ello se utiliza la herramienta llamada Flujo de Fondos donde se toman en cuenta las inversiones previstas, así como los ingresos y egresos que tendrá durante la operación del proyecto. Se calcula primero la utilidad antes de intereses e impuestos – EBIT, Earnings Before Interests and Taxes – independientemente de la forma que será financiado el proyecto. Luego se realiza el flujo sumando los impuestos, pero no se incluyen los pagos de interés ni amortizaciones de deudas originadas en el financiamiento de bienes de capital ni pagos de dividendos.

El marco normativo nacional promueve inversiones de estas características estableciendo una devolución de impuestos según distintos criterios (Ley de Promoción de Inversiones). Se aplica al estudio este beneficio fiscal obteniendo así los valores finales de TIR y VAN.

Finalmente se realiza un análisis de sensibilidad del modelo planteado, modificando algunos aspectos relevantes como el precio de los reciclables, compost, combustible derivado de residuos y el precio por tonelada a pagar al operador por la gestión de la planta analizando la variación de la TIR.

1.5.1 Limitaciones de la tesis

Como el objetivo de la tesis se centra en el diseño de las tecnologías de valorización, no se incluye el diseño y dimensionamiento de la recolección de residuos, elemento clave para una solución viable.

En el marco de una economía circular, son fundamentales las acciones de minimización, reparación y reuso de recursos y materiales. Las mismas no serán abordadas ya que requieren un estudio en profundidad con una propuesta a largo plazo con involucramiento del sector público, privado, así como de la sociedad en su conjunto. En particular, dado el foco de la tesis en la fracción orgánica, las mismas debieran estar dirigidas a la reducción de desperdicios de alimentos en los hogares, así como a soluciones domésticas como el vermicompostaje.

No se realizan ensayos de laboratorio ni pruebas a escala piloto para ajustar algunos parámetros claves de diseño. Se toman referencias bibliográficas lo que podría ser ajustado en estudios futuros.

Finalmente cabe señalar que se trata de un estudio de prefactibilidad, a nivel de propuesta preliminar.

1.6 Orientación del texto

Se inicia con una descripción del estado del arte de la economía circular vinculada a la gestión de la fracción orgánica de los residuos. Luego se analiza la situación de la ciudad desde varios aspectos como la gestión de residuos, energía, calidad de suelos e importaciones de nutrientes.

Por otra parte se realiza una propuesta de gestión integral de residuos para la ciudad, de forma de poder tomar un escenario base para el dimensionamiento del sistema propuesto y su análisis de sustentabilidad

Se estudian alternativas para la valorización de la fracción orgánica de los residuos sólidos domésticos tomando una combinación de digestión anaerobia y aerobia. Algunas tecnologías particulares combinadas ya se encuentran consolidadas a nivel comercial, pero las tecnologías particulares elegidas no se han encontrado aplicadas de manera combinada. Para los productos obtenidos a través de la digestión anaerobia, se propondrán dos soluciones

tecnológicas (transformación a biometano y recuperación de nutrientes) que permitan generar ingresos económicos.

Finalmente se realiza un dimensionamiento de la planta junto con una estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero del sistema y se evalúa su pertinencia en el marco de los compromisos internacionales asumidos por el país en materia de cambio climático.

Luego de definida una ubicación apropiada, se realiza un análisis de costos de inversión y operación, realizando un análisis de sensibilidad. Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo.

2 ECONOMÍA CIRCULAR y RESIDUOS ORGANICOS

2.1 Estado del arte

Algunos autores y experiencias concretas muestran la búsqueda de un nuevo paradigma para el siglo 21, replanteando el entendimiento de “calidad de vida” vinculado con acumulación material, autosuficiencia y la sobrevaloración del ser individual. Durante el siglo 20, los negocios y la solidaridad eran vistos como aspectos inconexos, comprendiendo que la solidaridad no forma parte del dominio de la economía. Las discusiones sobre nuevos modelos económicos muchas veces incluyen principios centrados en el compartir, la interdependencia y el agregado de valor en lo colectivo.

El concepto de reciprocidad toma fuerza, (ya planteado en el siglo 18 a través de la idea de fraternidad, junto con libertad e igualdad, de los pensadores de La Ilustración) entendiendo que los miembros de una comunidad se sienten parte de un destino común con un vínculo que es capaz de generar sentimientos de empatía recíproca que puede inclusive expresarse en transacciones comerciales. (Bruno & Zamagni, 2013)

Compartir los bienes libera del vínculo que tenemos con lo material. Los bienes utilizados de forma interdependiente relacionan a las personas y comprometen en el cuidado. El respeto y valoración de la creatividad permite la apertura y el nacimiento de nuevas ideas. El reconocimiento de los espacios grupales permite construir ciudadanía y sentido de pertenencia.

Desde hace varias décadas las problemáticas ambientales son abordadas impulsando distintas estrategias como penalizaciones, limitaciones, subsidios e impuestos entre otros, logrando de forma marginal un cierto nivel de conciencia pero sin una solución de fondo de la problemática.

La Economía Circular propone un cambio sistémico que busca pasar de un enfoque “de la cuna a la tumba” a un enfoque “de la cuna a la cuna”. Los diseños basados en el concepto de la cuna a la tumba dominan los procesos actuales de manufactura. Este esquema donde se producen altos niveles de contaminación de la biósfera y donde los materiales tecnológicos (p.e. metales) se agotan, es claramente limitado, transformando a la Tierra en una “tumba”. Un futuro prometedor para los seres humanos deberá imitar los procesos que se dan en la

naturaleza, con sistemas de la “cuna a la cuna” muy eficientes en cuanto al flujo de nutrientes y metabolismos sin generación de residuos. Eliminar el concepto de residuos, significa que el diseño de productos, embalajes y servicios desde el inicio no concibe la generación de un desecho. Es decir que los nutrientes o elementos presentes en los materiales, condicionan y determinan su diseño. (Braungart, Michael; McDonough, 2009).

La transición hacia una economía circular busca desacoplar el crecimiento del consumo ilimitado de recursos a través de las siguientes líneas estratégicas (Ellen MacArthur Foundation, 2015) :

- **Diseñar** apuntando a eliminar ineficiencias en el uso de los recursos y minimizar la generación de residuos: diseños que consideren las externalidades negativas y positivas de la actividad económica a lo largo de toda la vida útil de un producto o servicio. Los diseños de productos, proyectos y servicios deben considerar desde un inicio la eliminación de sustancias peligrosas, reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, disminución de las cargas a las distintas fuentes de agua, protección de los suelos, entre otros;
- Mantener los productos, componentes y materiales **en su mayor valor y en uso**: esto significa diseñar para su reutilización, remanufactura y reciclaje manteniendo los componentes y materiales circulando y contribuyendo a la economía. Los sistemas circulares favorecen los bucles internos para preservar más valor. Los sistemas circulares maximizan el uso de materiales de base biológica, extrayendo materias primas bioquímicas y colocándolas en cascada en diferentes aplicaciones;
- **Regenerar** los sistemas naturales: una economía circular mejora el capital natural fomentando los flujos de nutrientes dentro del sistema y creando las condiciones para la regeneración de, por ejemplo, el suelo.

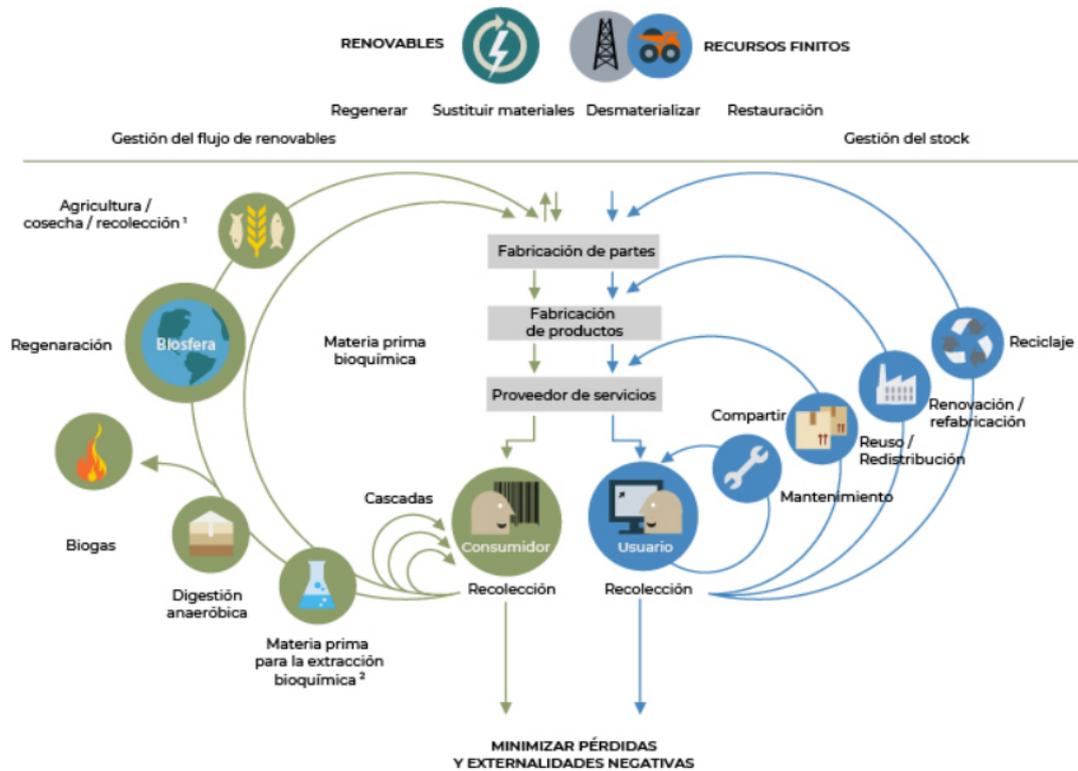
Como estrategia para lograr esto, se analiza el funcionamiento del mundo actual como “*dos metabolismos discretos que operan en el planeta. El primero es el metabolismo biológico o la biósfera (los ciclos de la naturaleza). El segundo es el metabolismo técnico o tecnósfera (los ciclos de la industria, incluida la extracción de materiales de la naturaleza). Con un diseño adecuado, todos los productos y materiales producidos por la industria alimentarán estos dos metabolismos, nutriendo nuevos productos.*” (Braungart, Michael; McDonough, 2009).

En el ciclo biológico, los materiales o productos están diseñados para mantenerse en el ciclo biológico a través de las redes tróficas.

En el ciclo técnico, los materiales o productos están diseñados para regresar al ciclo técnico, al metabolismo industrial de donde vino.

Para el caso del ciclo técnico, buscando que estos procesos sean más eficientes, se introduce el concepto de “Producto como Servicio”. En vez de asumir que todos los productos deben ser comprados, utilizados y descartados por parte de los consumidores, los mismos pueden ser adquiridos como un servicio. Los consumidores reciben el servicio que necesitan durante el tiempo que desean y pueden mejorar la calidad del servicio en el momento que lo desean; las empresas podrán continuar creciendo al tener un ingreso asociado a la prestación del servicio, manteniendo la propiedad del producto. Esto tiene dos ventajas: i) como el fabricante mantiene la propiedad del producto a lo largo de toda su vida útil y recupera los materiales, el producto será diseñado para tener mayor vida útil, simple de reparar y desmontar y ii) al regresar el equipo al fabricante, será mucho más sencillo su reparación, con un conocimiento técnico específico para realizarlo.

Imagen 1: Ciclos biológicos y técnicos – Diagrama de la mariposa



Fuente: Ellen Macarthur Foundation en base a “Cradle to cradle design protocol” de Braungrt&McDonough

Para poder interpretar adecuadamente la imagen 1 presentada en la publicación “Towards the circular economy” (Butterworth, 2013), se describen algunos conceptos:

- En el eje se distinguen los productos consumibles (consumidor) y los productos pensados para ser de un uso duradero (usuario). Los consumibles responden al ciclo biológico y pueden ser aprovechados en cascadas o directamente para retornar nutrientes. Los bienes de consumo duradero (plásticos, metales) que no pueden ser reintroducidos a la biosfera deben diseñarse para reuso y refabricación.
- Las fuentes de energía deben ser renovables.
- En los círculos más pequeños (mantenimiento, compartir, reuso/redistribución y refabricación) mayor es el ahorro potencial de material, trabajo, energía y capital ya que aún son inherentes al producto y menores las externalidades asociadas (como gases de efecto invernadero o contaminación de agua y suelos).

- Lograr que los materiales se mantengan en circulación por más tiempo se refiere a maximizar el número consecutivos de ciclos (ya sea reparación, reutilización o refabricación). Cada vez que un ciclo se prolonga se evita el consumo de material, la energía y el trabajo para la fabricación de un nuevo producto o componente.
- El esquema de cascada se refiere a diversificar la reutilización en la cadena de valor. Un ejemplo sencillo es el caso de la ropa de algodón que se reutiliza primero como ropa de segunda mano, luego es usado en la industria del mueble como relleno de tapicería y el relleno de fibra luego se reutiliza en lana de roca como aislamiento para la construcción. En cada caso, se sustituyen materiales vírgenes antes de que las fibras de algodón regresen con seguridad a la biosfera.
- Sustituir el uso de materias primas con presencia de materiales peligrosos, por materiales que no afecten la eficiencia y calidad de sus posibles procesos de recuperación posterior.

Es relevante resaltar que los distintos eslabones de la economía circular ya existen y con mayor presencia en países de ingresos bajos a medios. El concepto de **simbiosis**, donde un residuo es un recurso para otro ya funciona en diversos países, sin embargo la formalización y escalamiento se ha visto limitado por diversos factores como bajos precios asignados a las externalidades ambientales, la dificultad de acceso al financiamiento, la falta de información así como problemas de coordinación entre otros.

Las tecnologías de la información y la robótica han posibilitado oportunidades que eran inviables previo a la accesibilidad a estas herramientas. Es por ello que muchos conceptos resurgen (por ejemplo el reuso y remanufactura) bajo un nuevo abordaje, habilitando modelos de negocio innovadores como pasar de ser consumidores de productos a usuarios de servicios.

Asimismo, por temas de escala de los sistemas productivos y por las necesidades de los distintos sectores industriales, existe un potencial vinculado a la creación de empresas prestadoras de servicios así como emprendimientos que utilicen los residuos como un recurso para productos de mayor valor agregado, generándose un potencial de nuevas fuentes de empleo. (Ellen MacArthur Foundation, 2015)

Es frecuente encontrar que la Economía Circular se interpreta como otra forma de referirse a la gestión de residuos y en particular al reciclaje. Sin embargo, esta concepción no es completa, limitando el potencial y las posibilidades de escalamiento. Un desarrollo preventivo y regenerativo no es un enfoque "más de lo mismo" que exige continuar implementando tecnologías verdes de fin de tubería, requiere de una mirada mucho más completa. Es necesario proponer soluciones alternativas, teniendo en cuenta todo el ciclo de vida de cualquier proceso siendo parte integral de la economía en la que está inmerso (Ghisellini, Cialani, & Ulgiati, 2016). La EC apunta a buscar las estrategias para permitir que los residuos ya no sean un residuo y pasen a ser un recurso. Es decir que se buscan tecnologías y modelos de negocio para las cuales el residuo es un recurso.

2.2 Contexto mundial

La transición hacia una economía circular (EC) parece seguir patrones muy diferentes en los diferentes países. La EC en China es un resultado directo de la estrategia política nacional (enfoque de arriba hacia abajo). La política gubernamental china se enfoca en la industria y en la organización socioeconómica del país. Los instrumentos utilizados, son principalmente de "comando y control" más que de mercado. Por el contrario, la transición hacia EC en Europa parece estar ocurriendo principalmente como un enfoque ascendente, por iniciativas de organizaciones ambientales, sociedad civil, etc. Todos estos actores económicos piden productos más ecológicos y una legislación adecuada para involucrar tanto a las empresas privadas como a las autoridades públicas en un ciclo virtuoso. En Japón, la colaboración global y estrecha entre la sociedad civil, el sector público y los fabricantes caracterizan la transición EC. (Ghisellini, Cialani, & Ulgiati, 2016)

La Comunidad Europea ha lanzado en el 2015 un paquete de medidas hacia la Economía Circular y varios países lo han aterrizado priorizando investigaciones y estudios con fondos de varios millones (p.e: Programa Horizon 2020)

Las ciudades juegan un rol clave en la transición hacia una economía circular, son el espacio de convivencia mayoritario y causantes de diversos problemas ambientales. Varias ciudades ya han iniciado este camino, ciudades como Ljubljana (Eslovenia) con una población menor o ciudades con otro nivel de desarrollo como Vancouver y Montreal (Canadá) entre otras. En los últimos años varias ciudades han desarrollado sus Hojas de Ruta hacia la Economía Circular.

En base a los estudios de caso analizados y planteados en el Libro Blanco de la Economía Circular del WEF (World Economic Forum, 2018), las oportunidades ya iniciadas en diversas ciudades se pueden sintetizar en las siguientes áreas:

- 1 *Canalizar materiales de construcción usados a nuevos sitios de construcción:* pasaporte de materiales donde se listan la cantidad y calidad de los materiales utilizados, construcciones modulares, impresiones 3D, depósitos de materiales para ser usados como nuevas materias primas e incorporación de residuos de otros sectores productivos en la construcción

- 2 *Recolección y reutilización de agua:* aprovechamiento de aguas de lluvia, disminución de pérdidas en red de abastecimiento de agua potable, generación de energía en plantas de tratamiento (biogás, hidrólisis, gasificación, etc)

- 3 *Circularidad a través de la energía:* redes inteligentes de energía, generación de renovables descentralizadas y los vehículos eléctricos podrían jugar un papel crítico ya que cargar y descargar electricidad hacia y desde la red, mejorando la elasticidad y confiabilidad del sistema de potencia proporcionando amortiguación a la intermitencia del suministro de energía de fuentes renovables

- 4 *Residuos electrónicos en la ciudad:* recuperación de componentes vía desmontaje, diseño de equipos de forma modular para reemplazar partes y extender su vida útil, centros de reparación y reuso

- 5 *Soluciones circulares para los sistemas de salud de la ciudad:* Compartir plataformas para optimizar el uso de equipo médico excedente, incluyendo MRI (resonancia magnética) y CT (tomografía computada) escáneres. El modelo de negocio producto como un servicio donde hospitales pagan por el uso de equipos médicos en vez de comprarlo, incentivando a los fabricantes a optimizar diseño para su reuso. Sistemas de logística reversa para remedios vencidos y embalajes.

- 6 *Residuos orgánicos, incluidos los alimentos:* compostaje comunitario o domiciliario, plantas de mayor porte de digestión anaerobia, aprovechamiento de residuos de supermercados en buenas condiciones, registro y recuperación de residuos en restaurantes y bares

- 7 *Residuos plásticos:* embalaje reutilizable, sustitución por material compostable, reciclaje de plásticos para construcción

- 8 *Compras circulares:* a través de los sistemas de compras de las organizaciones, a nivel de proveedores o a nivel de productos. Promover simbiosis industrial, donde los residuos de unos son materias primas para nuevos procesos y se comparten recursos

Como puede observarse las actividades vinculadas a la valorización de residuos orgánicos o restos de alimentos se encuentran especialmente resaltadas. Siguiendo esta línea, a continuación se profundiza en el concepto de “economía de los nutrientes” que se vincula directamente con las soluciones a desarrollar en el presente trabajo.

2.3 Economía de los nutrientes

El concepto de “economía de los nutrientes”, considera que los suelos son un “banco” de nutrientes que habilitan la producción de recursos renovables. Con este concepto, los nutrientes son el “capital” de una economía de nutrientes. Por ejemplo en los sectores alimentario y forestal, este capital de nutrientes en el suelo se utiliza para generar valor económico. Este capital puede ser prestado para el crecimiento de masa vegetal, para luego ser procesado en la generación de bienes (alimentos, raciones, químicos, textiles, etc) (Aho et al., 2015). Sin embargo, este capital disminuye cada vez que se cosecha o erosionan los suelos.

Mejorar el ciclo de nutrientes y prevenir la escorrentía de nutrientes podría llevar a la creación de nuevas operaciones comerciales, lograr ahorros y mejorar significativamente el estado de los cuerpos de agua.

A modo de ejemplo, Finlandia ha determinado un valor económico a las oportunidades vinculadas al aprovechamiento de los nutrientes. En base a cuatro ejemplos: i) leasing de fertilizantes, ii) uso de poroto como fuente de proteína en reemplazo de la soja importada, iii) uso de pescado de bajo valor comercial como fuente de alimentación animal y iv) biogasificación/digestión anaerobia como motor del ciclo de nutrientes. Con este tipo de actividades estiman se obtendría un potencial retorno equivalente a 310 millones de Euros al año para el 2030 (150 millones corresponden a biogasificación de diferentes tipos de residuos). Este valor podría aumentar si se incluyeran aspectos económicos vinculados a la gestión de riesgos y el impacto del ciclo de nutrientes en los servicios ecosistémicos. (Aho et al., 2015)

Bajo este nuevo paradigma, los residuos son ahora materia prima y las plantas de gestión de residuos son plantas productoras de nutrientes.

3 SITUACIÓN DE MONTEVIDEO

3.1 Residuos

Según el reciente informe “Perspectiva de la Gestión de Residuos de América Latina y el Caribe” de ONU Ambiente (octubre 2018), la generación de RSU de América Latina y el Caribe es de 524.000 ton/d y el 90% no es aprovechado. Para el 2050 la generación aumentará un 25%. El 50% de estos residuos son orgánicos *“por lo tanto, se debe promover la separación en origen y la recolección diferenciada de los residuos secos y orgánicos y su eficaz tratamiento. Al mismo tiempo, se debe considerar la prohibición gradual de la disposición de los residuos biodegradables en los rellenos sanitarios e incentivar su aprovechamiento, por ejemplo el compostaje”*. (ONU Medio Ambiente, 2018)

Uruguay y la ciudad de Montevideo no escapan a esta realidad de la región. Como se señaló previamente, la generación de residuos urbanos es de 521.220 ton/año.

La mayor parte de estos residuos se disponen en el relleno sanitario de Felipe Cardoso, junto con residuos comerciales, los residuos industriales categoría II (no peligrosos) y residuos de obras civiles. “Felipe Cardoso” está ubicado en la zona Nordeste del departamento de Montevideo, sobre el camino Felipe Cardoso, en el límite entre la zona urbana y la rural. Las celdas ya construidas se encuentran al final de su vida útil y mediante del uso del espacio entre celdas (Camino Cepeda) se espera poder prolongar entre 9 y 12 años este sitio⁶.

⁶ Entrevista realizada al Director de Desarrollo Ambiental y al equipo de la División Limpieza en 2019 en el marco de la consultoría realizada por la autora en dicho año.

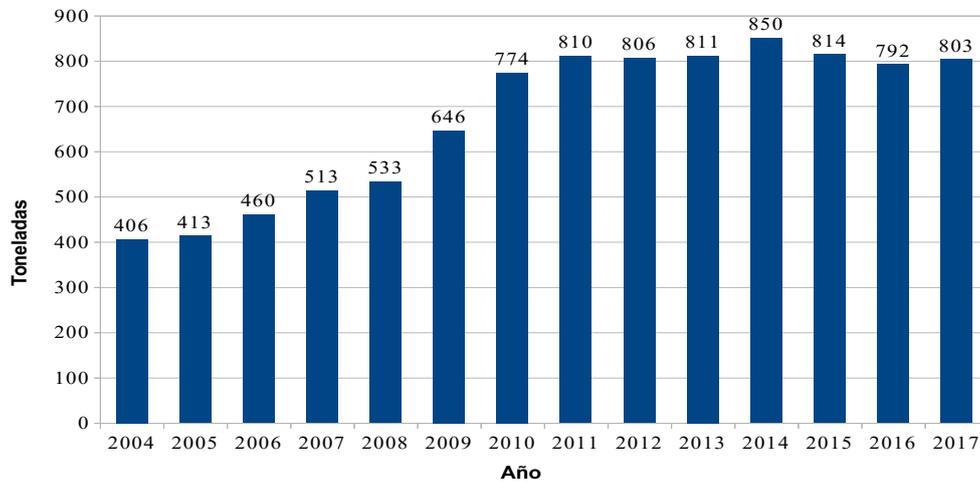
Imagen 2: Ubicación del SDFR Felipe Cardoso y situación de los padrones cercanos



Fuente: Consultoría para la Intendencia de Montevideo y el BID del 2019: "Diseño del plan estratégico de valorización y disposición de residuos sólidos para Montevideo" en co-autoría, elaboración propia.

Como puede observarse de los datos de ingreso de residuos al sitio de disposición final de Montevideo, la generación de residuos de la ciudad ha ido en aumento en los últimos años entre los años 2005 y el 2010 para luego estabilizarse alrededor de las 800 kt/año:

Imagen 3: Evolución de ingreso de residuos en miles de toneladas anuales al SDFR Felipe Cardoso 2004 – 2017



Fuente: Información proporcionada por técnicos de la Intendencia de Montevideo, diciembre 2018

De los últimos estudios realizados, la generación de residuos per cápita en la ciudad de Montevideo es de aproximadamente 1 kg/hab/día según lo ingresado a Felipe Cardoso en los años 2011 y 2012 (LKSUR, 2013). Cabe señalar que este valor se estima en base a los residuos que se disponen en el sitio de disposición final, pudiendo existir desvíos previos al ingreso al sitio por interferencia del sector informal de recolección o disposición en basurales clandestinos. De estos residuos, un 41% representa la fracción orgánica:

Tabla 2: Composición de los residuos domiciliarios de la ciudad de Montevideo

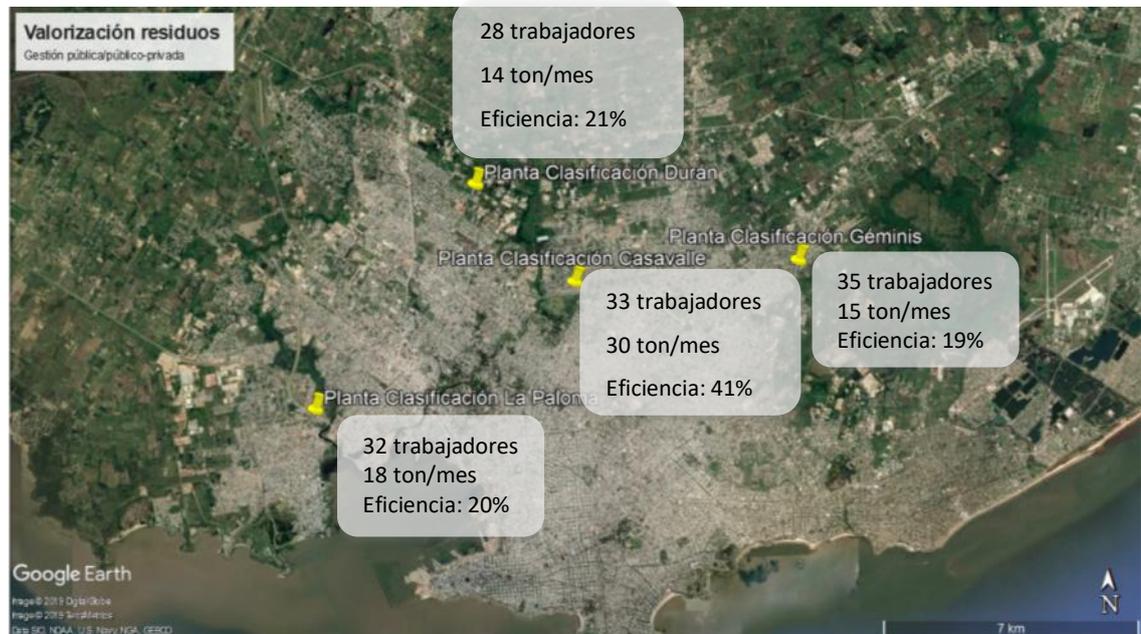
MATERIAL	MONTEVIDEO
Papel y cartón	19,1%
Pañales y apósitos	3,6%
Multilaminados	0,8%
Metales	2,0%
Plásticos y film	10,9%
Plásticos Botellas	1,8%
Plásticos Otros	3,1%
Vidrio	5,7%
Textiles	2,6%
Materia Orgánica	40,9%
Goma, cuero y corcho	0,4%
Madera y jardinería	2,4%
Escombros	2,6%
Materiales compuestos	0,6%
Residuos Peligrosos	0,5%
Inertes pétreos	3,2%

Fuente: (LKSUR, 2013)

En el marco de la Ley de Envases N° 17.849 presentado previamente, se crea un fideicomiso para la administración de los fondos aportados por las empresas según la cantidad de envases vertidos al mercado. Con estos fondos, se financian distintos planes de gestión de envases de forma co-responsable con las Intendencias. Hoy se han implementado 5 planes de gestión: Canelones, Maldonado, Flores, Rivera y Montevideo. En el año 2012 se inició en Montevideo la separación en origen domiciliar de residuos de envases (voluntaria) trasladándolos a 4 centros de clasificación operados por ex clasificadores (durante el 2018 ingresaron a las plantas 3.120 toneladas de residuos y se recuperaron 932 toneladas según informes del Plan de Gestión de Envases – www.ciu.com.uy). Los resultados obtenidos hasta ahora son muy limitados con indicadores que indican que solo se recupera un 2% de los

reciclables generados (cálculos propios en base a información del plan de gestión de envases: www.ciu.com.uy).

Imagen 4: Ubicación y datos plantas de clasificación PGE



*Se presenta las cantidades clasificadas (recuperadas) promedio del 2018 y la eficiencia refiere a cantidades recuperadas sobre cantidades ingresadas a las plantas. Datos de diciembre 2018.

Fuente: elaboración propia en base a datos de PGE. www.ciu.org.uy – datos también utilizados para consultoría realizada durante el 2019, "Diseño del plan estratégico de valorización y disposición de residuos sólidos para Montevideo"

No se identifican antecedentes cercanos en cuanto a promover la valorización de los residuos orgánicos de origen domiciliario, más que experiencias puntuales en algunos municipios y por parte de la sociedad civil (Centro Uruguay Independiente, Compost Ciudadano y Lombriz Urbana entre otros). Cabe señalar la existencia de la planta de compostaje de la Intendencia (TRESOR) que en sus inicios recibió residuos provenientes de ferias de frutas y verduras pero actualmente solo recibe residuos de origen industrial.

En el año 2017, por iniciativa de CEMPRE Uruguay (Compromiso Empresarial para el Reciclaje) se desarrolla la norma técnica Unit 1239:2017 en la cual se definen las distintas denominaciones y colores para la clasificación de residuos en origen, apuntando a homogeneizar y simplificar la comunicación. Asimismo propone distintas formas de segregación en origen, pudiendo utilizarse estos esquemas: i) dos fracciones: reciclables y

mezclados, ii) tres fracciones: reciclables, compostables y mezclados o iii) más de tres fracciones clasificando por distintos materiales como plásticos, papeles, etc

Imagen 5: Colores y nombres para clasificación de residuos en origen según norma UNIT 1239:2017



Fuente: elaboración propia

3.1.1 Marco normativo nacional en materia de residuos

En la Constitución, la temática ambiental se explicita en el año 1997, mediante el artículo 47, donde se declara de interés general la protección del ambiente.

En el año 2000, mediante la Ley General de Protección del Ambiente (Ley Nº 17.283/000), se abre un “paraguas” frente a cualquier agravio a las distintas componentes ambientales, permitiendo al MVOTMA regular y controlar los distintos actores involucrados.

En particular, el artículo 21, es el único referente explícito al tema de los residuos, dándole al MVOTMA la potestad de regular “la generación, recolección, transporte, almacenamiento, comercialización, tratamiento y disposición final de los residuos”, dejando establecida la necesidad de realizarlo en acuerdo con los Gobiernos Departamentales, pudiendo delegar en

ellos el “cumplimiento de lo cometido de gestión ambiental, previo acuerdo con el jerarca respectivo y en las condiciones que en cada caso se determinen.” (Art. 8)

De hecho, desde el año 35, la Ley Orgánica Municipal (Nº 9515/35) le otorga a los Gobiernos Departamentales la gestión de los residuos de origen domiciliario y urbano.

Por lo tanto, los residuos de origen urbanos (RSU) se gestionan por los Gobiernos Departamentales y los residuos de origen industrial (RSI) son regulados por el MVOTMA, a través de la Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA)

En el año 1999, Uruguay se adhiere al Convenio de Basilea referente al movimiento transfronterizo de residuos peligrosos, promulgando las leyes Nº 16.221 y 17.220. En el mismo año, se aprueba el decreto referente a residuos hospitalarios Nº 135/999, actualizado a fines del 2009 por el decreto 586/009, donde se establece la forma en que debe realizarse la gestión adecuada de los residuos que se generan en los centros de atención a la salud.

En el año 2003 se aprueba el decreto Nº 373/003, referente a los residuos de baterías Plomo/Ácido, responsabilizando al fabricante/importador de las mismas a recuperarlas para brindarles una gestión adecuada.

A fines del año 2004, se promulga la ley de Envases y Residuos de Envases (Nº 17.849/004), aplicando el mismo principio de “responsabilidad extendida” que en el decreto de baterías. Es decir que mediante esta ley se le exige al fabricante/importador, la necesidad de contar con un plan de gestión para los residuos de envases post-consumo puestos en el mercado nacional.

Esta ley introduce en el escenario de la gestión de los residuos domiciliarios, a las industrias que producen productos de consumo masivo envasados con cualquier tipo de material (plásticos, vidrio, cartón, metales).

Al regular dicha ley, se realizó un largo proceso consultivo liderado por el MVOTMA e involucrando al MIDES, a las industrias a través de la CIU, así como a distintos grupos de interés en el sector. La participación del MIDES se debía a la alta presencia de clasificadores involucrado directamente con la gestión de residuos. A pesar de que la ley de envases no hace referencia a los clasificadores, en el decreto reglamentario aprobado (Nº260/007) se deja explícita la necesidad de integrar al sector informal en los sistemas de gestión

planteados. Asimismo, el decreto prioriza la aprobación de planes de gestión de residuos de envases que sean colectivos y no individuales. En el año 2010 se incorpora el decreto 315/010 que regula las compras estatales, exigiendo que los proveedores contratados se encuentren habilitados por Dinama y contar con un plan de gestión de envases o estar adherido a alguno existente.

La ley de Evaluación de Impacto Ambiental (Nº 16.466/94) y su decreto de reglamentación (Nº 349/005), establece aquellos emprendimientos que requieren de Viabilidad Ambiental de Localización, Autorización Ambiental Previa (autorización por parte del MVOTMA previo a la construcción del emprendimiento) y Autorización Ambiental de Operación. Dentro del artículo 2 literal 9 y 10, del decreto reglamentario, se incluyen las construcciones de plantas de tratamiento y disposición final de residuos tóxicos y peligrosos, implementación de tratamientos y sitios de disposición final de residuos en general cuando su capacidad sea igual o mayor a 10 ton/d.

En lo referente a residuos de origen industrial y asimilables, se aprobó en el año 2013 el decreto 182/13 donde se establece la necesidad de presentar un Plan de Gestión Ambiental con las pautas de una adecuada gestión interna y externa de los residuos generados en los establecimientos industriales y agroindustriales. Allí se establecen las pautas de clasificación, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final de los residuos generados dentro de las industrias, así como la necesidad de estas de contar con un plan de gestión aprobado por la autoridad competente.

Respecto a envases de agroquímicos (fitosanitarios y zooterápicos) se aprobó el decreto 152/13 estableciendo las pautas de gestión y la necesidad de planes de gestión aplicando el concepto de responsabilidad extendida al fabricante importador.

El decreto 358/15, reglamenta la gestión de neumáticos fuera de uso, aplicando nuevamente el principio de responsabilidad extendida y el inicio de dos planes de gestión de neumáticos (CECONEU y GENEU) con posterior valorización (como subproductos o energética en cementeras).

Dando cumplimiento a todas estas normas, los residuos generados en los domicilios deberán tener una gestión diferenciada respecto a los provenientes de actividades industriales y agropecuarias, así como de los residuos especiales (p.e: neumáticos).

En el año 2018 se aprueba la ley de bolsas plásticas N° 19.665, en la cual se establece la obligatoriedad de que las bolsas plásticas entregadas en comercios sean fabricadas con materiales biodegradables y compostables así como el cobro de una tasa por cada bolsa entregada. Dicha ley se reglamentó mediante decreto N° 3/019, estableciendo normas de referencias y plazos para la adecuación de los comercios y empresas proveedoras de bolsas plásticas. Este tipo de bolsas son ampliamente utilizadas en los hogares para disposición de residuos por lo que su compostabilidad es una variable relevante al diseñar un sistema de tratamiento biológico para los residuos orgánicos.

La ley para la gestión integral de residuos N° 19.829 aprobada en setiembre de 2019, se crea posteriormente a la reglamentación de distintas corrientes de residuos presentadas previamente. Se destaca la creación de instrumentos económicos asociados a los envases, así como la presentación de planes de gestión de residuos a nivel nacional y a nivel departamental, priorizando la valorización de los distintos materiales. Asimismo, tiene relevancia la inclusión laboral de clasificadores de residuos que actualmente trabajan en base a los residuos descartados por comercios, oficinas y hogares. Por otra parte, esta ley adiciona al IMESI (Impuesto Específico Interno ya existente), los envases de la mayor parte de los productos, habilitando la devolución de dicho impuesto vía crédito fiscal si se implementa un sistema de valorización. En el marco de la economía circular, que dentro de sus principios establece que los residuos dejen de ser considerados desechos para ser considerados insumos para otros procesos, se considera relevante señalar que esta ley incorpora la definición de subproductos. El artículo 3, define “A)...El Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA) podrá establecer para los residuos derivados de la actividad productiva, el fin de la condición de residuo en forma temporal, en la medida en que de los análisis sectoriales correspondientes surja que el residuo ha ingresado a la categoría de subproducto. Dichos análisis deben realizarse en forma periódica y coordinada con el Ministerio de referencia. B) Subproducto: las sustancias, materiales u objetos resultantes de un proceso productivo cuya finalidad primaria no sea la producción de la misma, en las condiciones que establezca la reglamentación, la que debe considerar la utilidad del subproducto en la misma actividad o en otras, así como sus usos para investigación y desarrollo.”

Asimismo, cabe citar el artículo 26 por su vínculo con los residuos orgánicos en las ciudades ya que se refiere a los alimentos para consumo humano, en particular en la *“fabricación y comercialización de alimentos se priorizará la reducción en la fuente... En aquellos casos que se generen excedentes de alimentos destinados al consumo humano se promoverá su aprovechamiento como alimento humano....”* Y en caso de no poder utilizarse para consumo humano, se priorizará su uso como alimentación animal. Este artículo de la nueva ley también toma principios de la economía circular.

Se observa una evolución respecto al marco normativo nacional, con avances periódicos desde el año 2000, creándose un marco normativo propicio para el impulso de estrategias de valorización de residuos. Se espera que en el marco de la nueva ley se fijen metas a alcanzar por las distintas Intendencias y el sector privado, pero será necesario reforzar algunas acciones de control, así como una estrategia para impulsar un cambio cultural a largo plazo que genere mayor compromiso de la población.

A nivel departamental, la gestión de residuos no domiciliarios (comercios, oficinas e industrias) queda definida como responsabilidad del generador de estos mediante la resolución 5383/12, debiendo presentar una declaración jurada ante la Intendencia respecto a las cantidades de residuos generadas y sus características (reciclables, compostables y mezclados) y contratar a transportistas habilitados para su recolección y envío a los destinos habilitados. Bajo este marco, los residuos no domiciliarios se deben gestionar de forma diferenciada de los residuos domiciliarios.

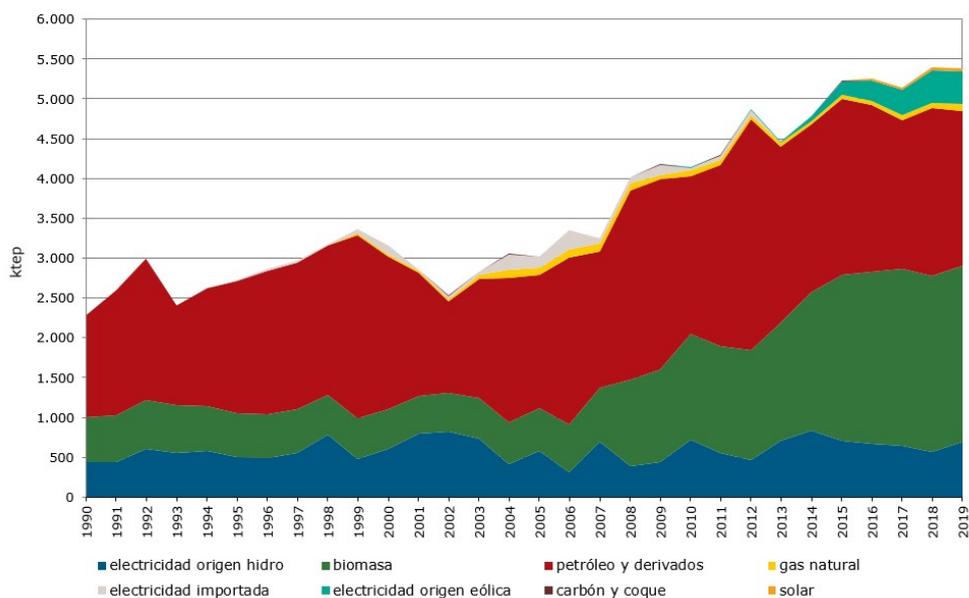
3.2 Energía

El Uruguay se caracteriza por no contar con fuentes de energía provenientes de petróleo, carbón o gas natural, energías no renovables que representan la principal fuente energética a nivel global. Esto ha llevado a una histórica variación de los precios de los combustibles a nivel local, por la dependencia del comportamiento del petróleo a nivel global, dificultades para garantizar la oferta al depender de unos pocos proveedores regionales e inversiones subutilizadas (p.e: gas natural) entre otros factores.

Luego de un proceso de intercambio y discusión iniciado en el año 2005, el Consejo de Ministros aprobó en el año 2008 la Política Energética Nacional 2005 – 2030. Dicha política se basa en 4 ejes estratégicos: i) la definición del **rol directriz del Estado** con participación regulada de actores privados ii) la **diversificación de la matriz energética** con especial énfasis en las **energías renovables**, iii) el impulso de la **eficiencia energética** y el iv) **acceso universal y seguro a la energía** como un derecho humano para todos los sectores sociales.

El impulso de esta política con una coyuntura muy favorable en cuanto a los costos de inversión de las energías renovables (eólica y solar) ha logrado una importante transformación de la matriz energética nacional. Este proceso de transformación se observa con claridad en la siguiente imagen:

Imagen 6: Evolución del abastecimiento de energía por fuente acumulado en el Uruguay 1990 – 2019

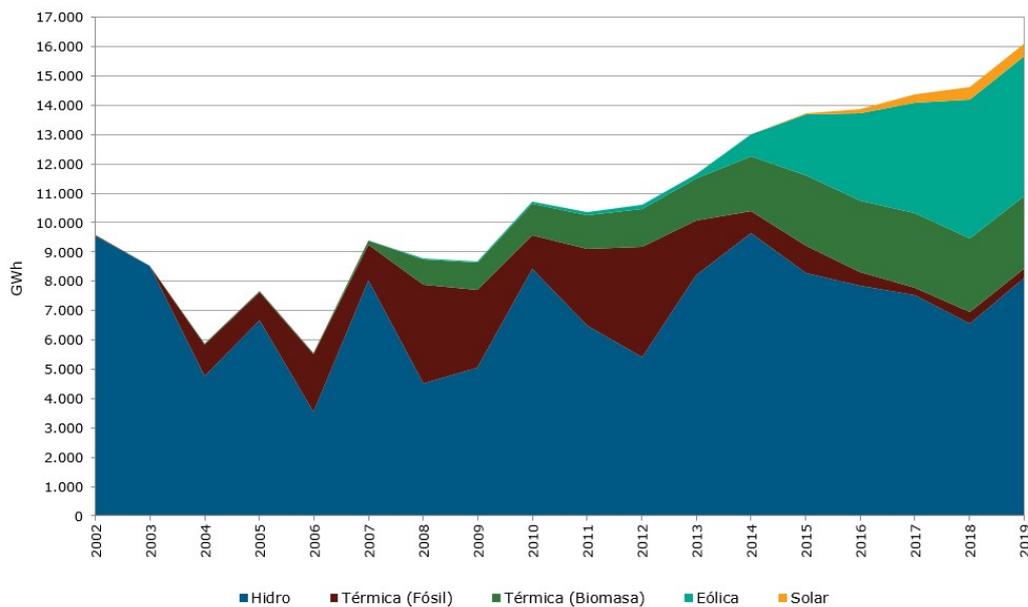


Fuente: Balance Energético Nacional 2019 – www.ben.miem.gub.uy

Puede observarse un aumento de la oferta energética, aumentando el abastecimiento en base a biomasa y electricidad de origen eólico. De hecho si se toma el periodo 2016-2019, la matriz primaria de energía fue un 63% renovable, superando la energía proveniente del petróleo.

En el caso de la oferta de energía eléctrica, la penetración de las energías renovables es muy marcada y referente a nivel global, ya que en promedio, los años 2016-2019 el 97 % de la matriz de generación eléctrica fue de origen renovable.

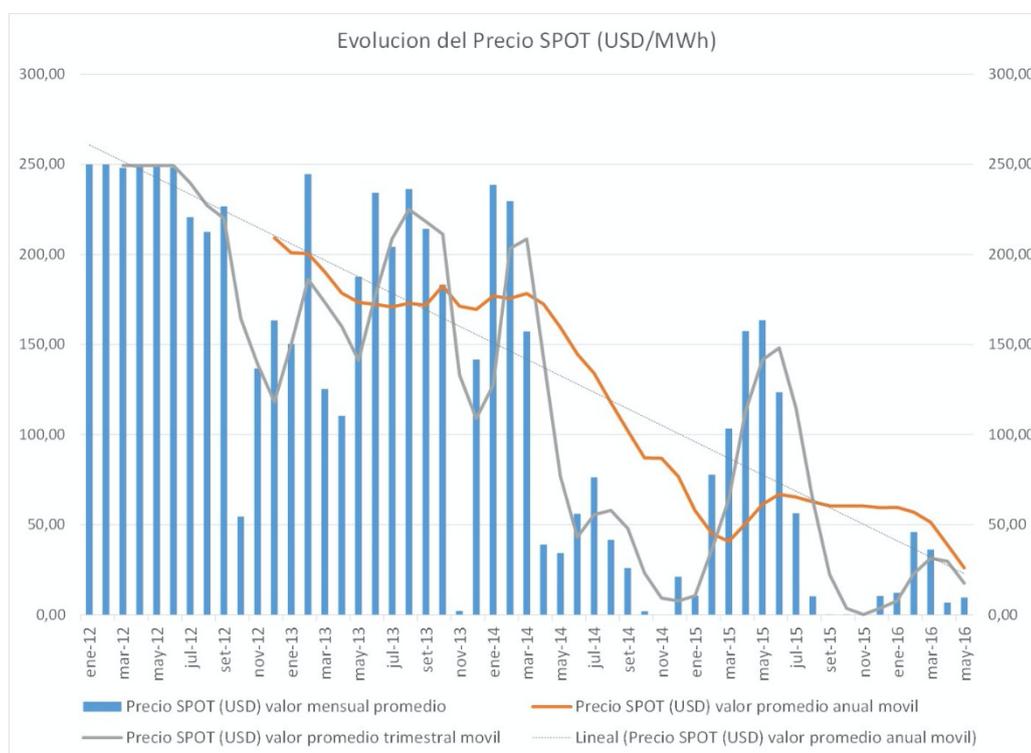
Imagen 7: Evolución de la generación de electricidad por fuente acumulado en el Uruguay 2002 – 2019



Fuente: Balance Energético Nacional 2019 – www.ben.miem.gub.uy

Como puede observarse en la siguiente figura, el precio de la energía proveniente de fuente solar y eólica ha descendido fuertemente en los últimos años a nivel nacional y global. Según datos de ADME, para el último semestre 2021, el Costo Marginal del Sistema en promedio no supera los 50,8 USD/MWh y el valor esperado es de 30,5 USD/MWh (https://adme.com.uy/db-docs/Docs_secciones/nid_1320/PES_Mayo21.pdf)

Imagen 8: Evolución mensual del precio SPOT⁷ en el Uruguay 2012 – 2016

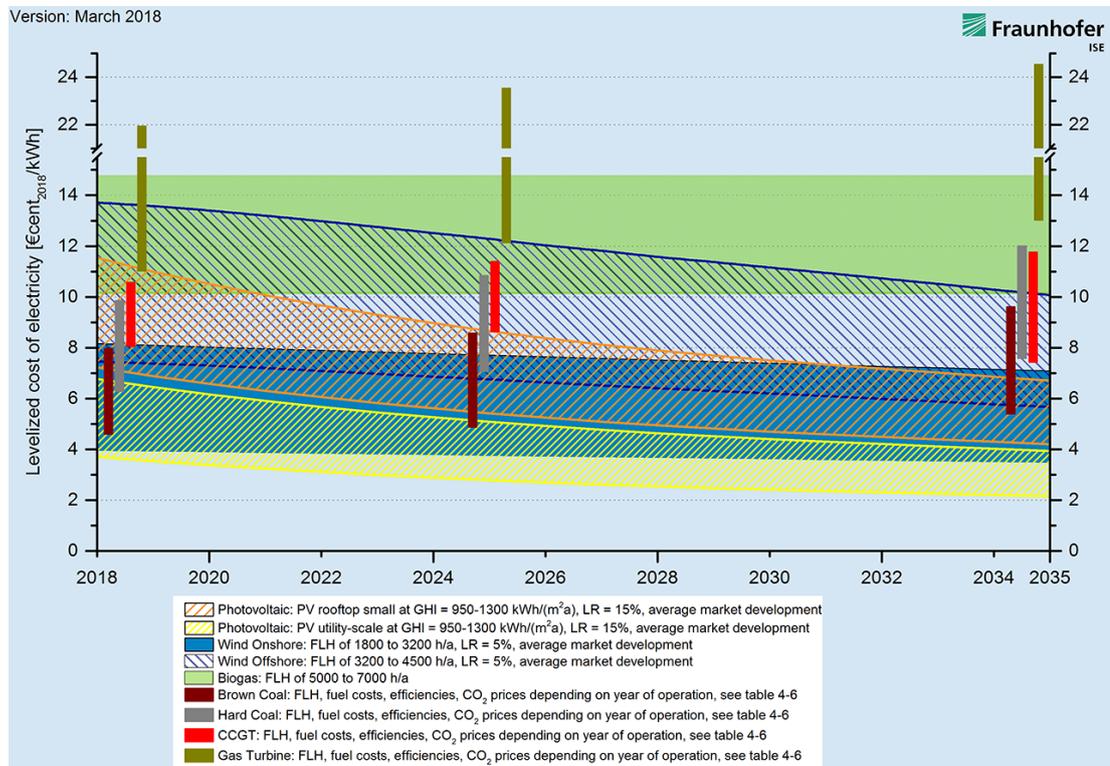


Fuente: Administración del Mercado Eléctrico ADME – tomado de Solutio Energía <https://www.solutioenergia.com.uy> - 20 octubre 2018

En la figura 9, se observa la proyección de costos de producción de la energía en base a biogás, en comparación con otras fuentes renovables, se observan valores más elevados y no se visualiza una disminución de los costos a futuro, asumiendo un tope en el desarrollo de la eficiencia de estas tecnologías.

⁷ El Mercado Spot es aquel donde todos los activos que se compran o venden se entregan de forma inmediata al precio de mercado del momento de la compra/venta. El precio SPOT de la energía en Uruguay es el costo marginal horario de la generación eléctrica calculado diariamente por la Administración del Mercado Eléctrico (ADME) y a partir del cual se hace el cálculo del despacho económico de las Centrales de Generación de Energía Eléctrica.

Imagen 9: Proyección del Costo Nivelado de la Energía 2018 a nivel global -2035⁸



Fuente: <https://www.ise.fraunhofer.de>

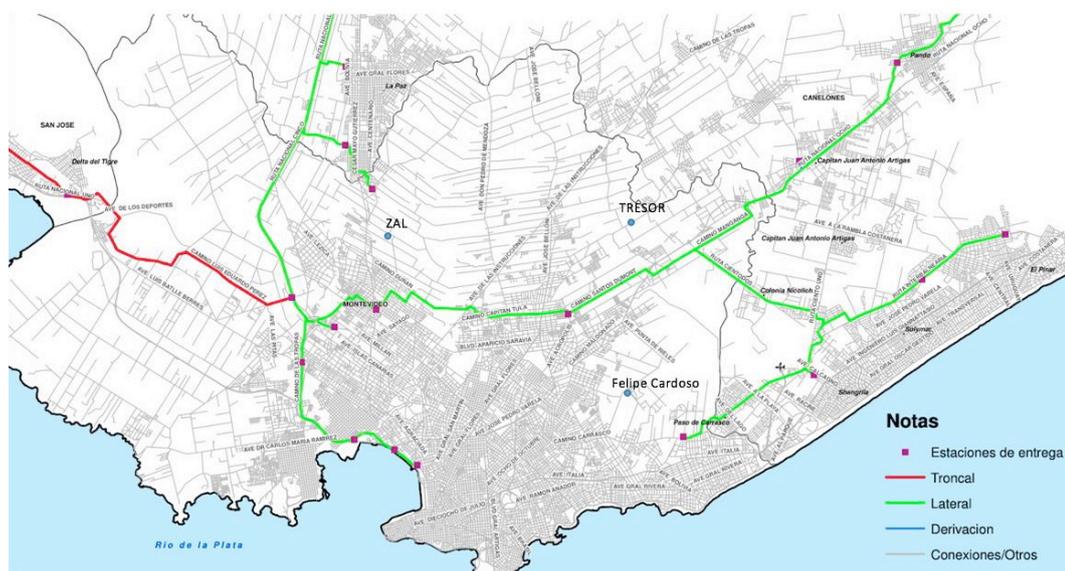
En el marco de este contexto nacional e internacional, la generación de energía eléctrica proveniente de residuos no parecería ser el uso de mayor interés para el país. Sin embargo, existe un margen interesante en cuanto a la energía utilizada para movilidad y uso térmico donde aún se tiene una dependencia del petróleo y el gas natural.

El biogás generado mediante digestión anaerobia, puede ser purificado a biometano, alcanzado propiedades muy similares al gas natural. En el país, el gas natural proviene de Argentina, ingresando a través del Gasoducto del Litoral en Paysandú y a través del

⁸ El costo nivelado de la energía (LCOE, por sus siglas en inglés) es una herramienta que permite comparar de forma consistente los costos de diferentes tipos de tecnologías (solar, eólica, gas natural, etc.). En su forma simple, consiste en calcular el costo promedio total de construir y operar una central eléctrica y dividirlo entre la energía total a ser generada durante su vida útil. (Fuente: BID)

Gasoducto Cruz del Sur en la localidad de Santa Ana, Dpto. de Colonia. ANCAP es importador, transportista y comercializador de gas natural en Uruguay. En el departamento de Montevideo la empresa distribuidora es Montevideo Gas. El consumo medio de los últimos 5 años de gas natural en el Uruguay fue de 50 millones de m³/año (fuente: Balance Energética Nacional 2018, promedio 2014-2018) y según información proporcionada por referentes de la Dirección Nacional de Energía⁹, en Montevideo se consume una media de 140.000 m³/d con un pico de 280.000 m³/d. A continuación puede observarse la red de distribución del departamento.

Imagen 10: Mapa de redes de gas natural de la ciudad de Montevideo



Fuente: Gasoducto Cruz del Sur - <http://gasoductocruzdelsur.com.uy/> consultado en julio 2019

El precio de importación más económico que se han obtenido en los últimos años fue de 7,5 USD por millón de BTU habiendo llegado a valores cercanos a las 20 USD por millón de BTU¹⁰

A nivel internacional, la inyección de biometano a las redes de gas natural ha tomado mayor relevancia en los últimos años. En los países donde el atractivo económico de los proyectos de biometano es asegurado a través de incentivos financieros suficientes, ha venido aumentando la producción de biometano. En Europa, hay más de 460 plantas de producción

⁹ Entrevista MIEM/DNE – Arianna Spinelli, Federico Reheman, Federico Cánepa – 21/8/2019

¹⁰ Ibid

de biogás a biometano, que en su mayoría alimentan biometano con calidad de tubería a la red de gas natural existente. (Verbeeck et al., 2018)

No existe normativa nacional para biometano ni de las características que debe cumplir para su uso en la red de gas natural, como referencia es posible considerar la normativa alemana (DWA M361 2011), donde la composición requerida para biometano en red es la siguiente:

Tabla 3: Valores de referencia para inyección de biometano a la red según normativa alemana - DWA M361 2011

Parámetro	Valor para inyección a la red
Metano (CH ₄)	85 – 100 Vol%
Dioxido de carbono (CO ₂)	2,5 – 6 Vol%
Oxígeno (O ₂)	< 3 Vol%
Sulfuro de Hidrógeno (H ₂ S)	< 5 mg/m ³
Nitrógeno (N ₂)	No exigencia
Hidrogeno (H ₂)	< 5 Vol%
Amonio/Amoniaco (NH ₃)	< 100 mg/m ³
Siloxanos	No exigencia

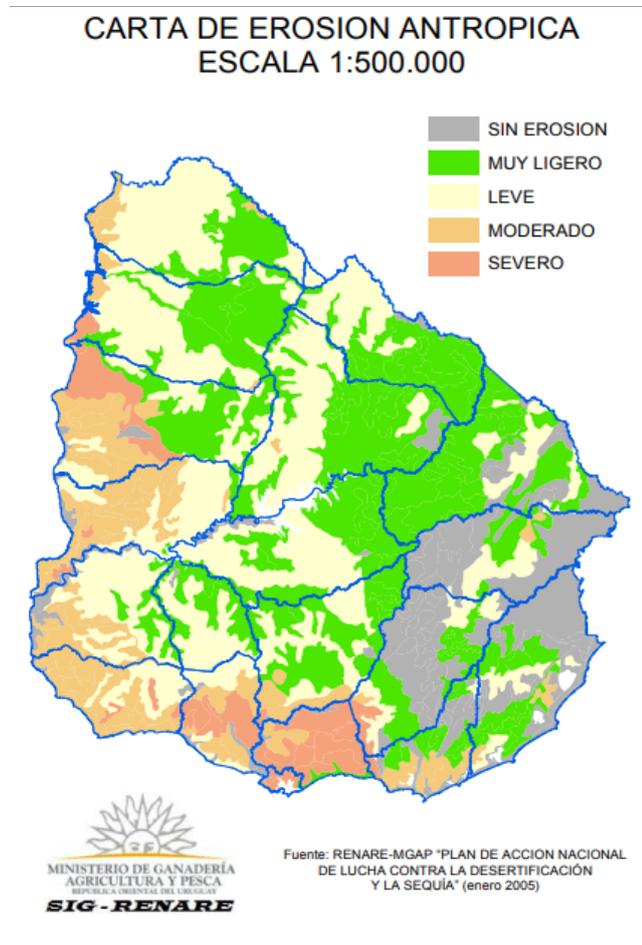
Para el caso de Uruguay, estos valores deberíann ser acordados con las autoridades nacionales para las condiciones del Uruguay y del operador de la red de gas natural.

3.3 Nutrientes y suelos

Los suelos son un ecosistema extremadamente diverso y complejo. Se combinan fases sólidas, líquidas y gaseosas. Por su estructura física y química así como por la fuente de componentes orgánicos, son habitat de diversidad de flora y fauna. Estos organismos interactúan de diversas formas y son parte fundamental del reciclaje de los nutrientes.

Como puede observarse en la imagen a continuación, los suelos de Montevideo y Canelones son de los más degradados del país. Estos niveles de erosión afectan fuertemente la productividad y hasta pueden implicar un nuevo uso de la tierra.

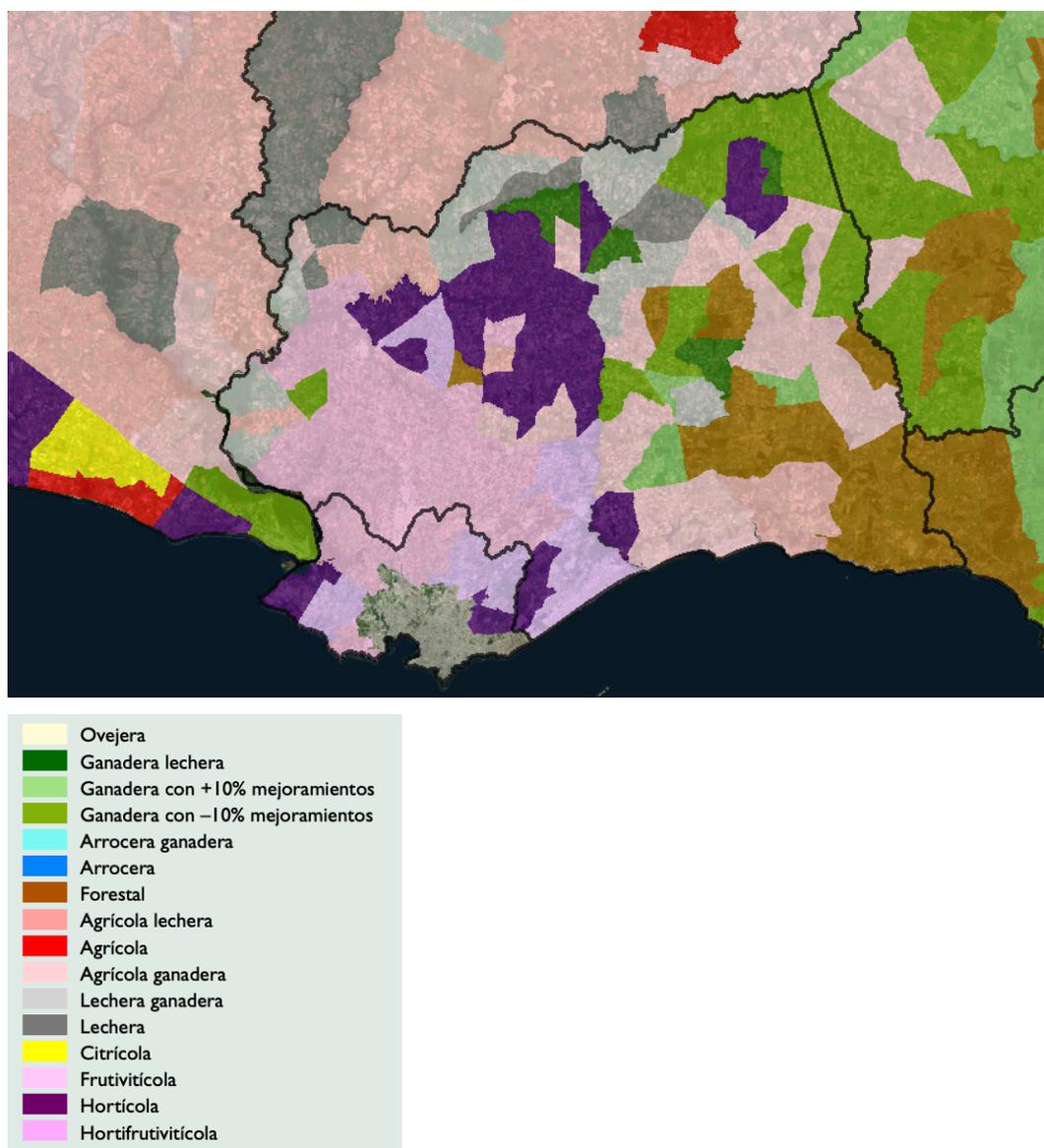
Imagen 11: Carta erosión antrópica Uruguay, 2005



En el Uruguay, la amplia mayoría de los suelos es deficiente en fósforo y los intensos laboreos con escasa incorporación de materia orgánica son parte de los motivos de la degradación de suelos del sur del país, afectando la productividad hortícola de la zona (Alliaume et al, 2014).

La producción de Montevideo y su área metropolitana es principalmente de agricultura intensiva, compuesta por actividad vitivinícola y hortifrutícola según el censo agropecuario 2011 de la Oficina de Estadísticas Agropecuarias del MGAP (DIEA). Asimismo se identifica una importante concentración de actividades vinculadas a animales de granja (avícola y suinos).

Imagen 12: Mapa de regiones agropecuarias, Montevideo y Canelones año 2011



Fuente: Elaborado por MGAP-DIEA con base Censo General Agropecuario 2011

3.3.1 Calidad y cantidad de compost

Según el estudio *“Desarrollo y validación de tecnología anaerobia para obtener mejoradores de suelo a partir de residuos agroindustriales de Canelones”* realizado en conjunto por Facultad de Ingeniería y Facultad de Agronomía de la UdelaR (del Pino et al., 2012), la aplicación de digestado proveniente de la digestión anaerobia de residuos industriales sería beneficiosa para la productividad de suelos y cultivos. Estudios realizados en diversas plantas de digestión anaerobia + maduración de residuos urbanos (Cafalonieri et al, 2016, at

(Masullo, 2017)) muestran un resultado de enmienda o abono orgánico de buena calidad si proviene de clasificación en origen de los residuos orgánicos.

A nivel nacional. las resoluciones de la Dirección General de Servicios Agrícolas (DGSA) del MGAP Nº 97/2018 y Nº 141/2018 habilitan el registro y control de insumos orgánicos para la producción agropecuaria a los efectos de viabilizar su comercialización en el territorio nacional. Define 4 grupos de insumos orgánicos y los requisitos para su registro ante la DGSA/MGAP.

A continuación se presentan las calidades exigidas en los anexos de la resolución citada en comparación con las referencias bibliográficas de plantas de DA + Compostaje con residuos urbanos elaboradas por la Italian Composting Association en diversas plantas (al no existir datos de la región se utilizan datos internacionales) (Cafolonieri et al, 2016, at (Masullo, 2017)) y con las exigencias de la normativa Argentina.

Tabla 4: Comparación de normativa nacional y Argentina con calidad de digestado+compost obtenido a nivel internacional

Parámetros	Enmiendas orgánicas Uy ¹	Resolución 19 - Argentina Digestado ¹¹	Plantas DA + Compost ICI (2015)
pH	5,5 - 8,5	6,5-8,5	8,1 +0,6
Conductividad dS/m		declarar	3,6 +-1,0
Contenido de humedad	Entre 20% y 45% en base húmeda	no está en los parámetros	27,8 +-8,5
Carbono orgánico (% b.s)	Materia orgánica >= 20 %	Materia orgánica > 40%	24,0 +-3,8
Ácidos húmicos y fúlvicos (% b.s)		no está en los parámetros	8,9 +-1,0
N orgánico (% total de N)			89,2 +-3,3
Nitrógeno total (% b.s)	> 0,5 % en b.s	declarar	2,4 +-0,7
Cd (mg/Kg b.s)	<= 2	1,5	0,6 +-0,3
Cr VI (mg/Kg b.s)	Cromo total <= 100	Cromo total 100	Menor límite de detección
Hg (mg/Kg b.s)	<= 1	0,7	0,3 +-0,2
Ni (mg/Kg b.s)	<= 20	30	16,6 +-12,1
Pb (mg/Kg b.s)	<= 100	100	44,3 +-24,7
Cu (mg/Kg b.s)	<= 100	150	101,3 +-29,0
Zn (mg/Kg b.s)	<= 200	300	258,9 +-75,9
Índice de germinación (dil 30%) (%)			78,3 +-13,2
P (% b.s)		declarar	1,7 +-0,5
K (% b.s)		declarar	1,6 +-0,3
Salinidad (meq/100gr)			63,3+- 18,7
Coliformes fecales (NMP/g MF)	Menos de 1000NMP/g en base seca	< 1000	
Escherichia coli		Ausencia	
Helminetos	Menos de 1 huevo viable/4g en base seca	1 huevo viable/litro digerido	
Salmonella NMP/4 g MF	Ausencia en 25 gramos base seca	< 3	

1 - MGAP Resoluciones Nº 97/2018 y Nº 141/2018

La normativa nacional considera una relación C/N = Carbono orgánico/Nitrógeno total <= 30 como parte de los parámetros que aseguran un buen índice de maduración del compost.

¹¹ Norma Técnica para la Aplicación Agrícola de Digerido Proveniente de Plantas de Digestión Anaeróbica Resolución 19/19 - Secretaría de Gobierno de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Argentina

De la Tabla 4, puede observarse que las enmiendas orgánicas provenientes de residuos domiciliarios cumplen con la mayor parte de los parámetros establecido en normativa. Para ciertos metales se superan los límites establecidos (Cobre y Zinc) en la normativa nacional, sin embargo, cumplen con los límites establecidos por la normativa argentina.

Como se señaló previamente es de especial relevancia que los residuos provengan de una clasificación en origen siendo uno de los principales motivos evitar la presencia de metales pesados que no serán removidos durante el compostaje o digestión anaerobia (Lorang, Soliva I Torrentó, & Huerta, 2005). Dada la importancia de este punto, se presenta a continuación el resultado promedio de calidad del producto proveniente de ensayos con residuos mezclados y residuos separados en origen durante periodos de tiempo de 6 años según (Lorang et al., 2005) referente a plantas de compostaje en Cataluña:

Tabla 5: Calidad de compost y comparación con normativa nacional con calidad de enmiendas orgánicas en base a residuos mezclados o residuos clasificados en origen.

	Unidades	Compost con RSU mezclado	Compost con fracción orgánica clasificada en origen	Normativa nacional enmiendas orgánicas
pH		7,23	8,06	5,5 - 8,5
CE	dS/m	7,96	6,85	declarar
Humedad	% bh	29,11	26,80	Entre 20% y 45% en base húmeda
MO total	% bs	51,61	52,8	>=20%
N orgánico	% bs	1,6	2,15	> 0,5 %
P	% bs	0,57	0,79	s/d
K	% bs	0,69	1,36	s/d
Ca	% bs	8,15	7,79	s/d
Mg	% bs	1,06	0,74	s/d
Na	% bs	0,77	0,74	s/d
Fe*	% bs	0,79	1,08	s/d
Zn*	ppm	639	233	=<200
Mn*	ppm	168	195	s/d
Cu	ppm	258	90	=<100
Ni	ppm	106	64	=<20
Cr	ppm	111	43	Menor límite de detección
Pb	ppm	193	58	=<100
Cd	ppm	1,35	0,35	=<2

Fuente: elaboración propia en base a datos de (Gimenez et al, 2005)

*Estos elementos en cantidades controladas son considerados micronutrientes beneficiosos

Esta información refuerza la importancia de la clasificación en origen para lograr buena calidad del material y se confirma que el zinc presenta dificultades en el cumplimiento de la normativa nacional, inclusive con la clasificación en origen.

En este punto se considera tener en cuenta que la normativa recientemente aprobada en la Comunidad Europea donde los valores límites de metales pesados difieren a versiones anteriores, presentando límites más flexibles. Se recomienda analizar los valores considerados con las autoridades del MGAP y del MVOTMA en caso de seguir con esta línea.

Respecto al mercado para este tipo de productos, se toma como referencia el estudio *“Estimación de N, P₂O₅ y K₂O: demanda de los cultivos y oferta en los residuos”* (Benzano, 2016). Este evalúa la potencial demanda de enmiendas orgánicas según los cultivos del país y la oferta potencial si fueran valorizados la mayor fracción de residuos orgánicos generados en sectores de actividad agroindustrial uruguaya. La demanda estimada considerando fertilización con N, P₂O₅ y K₂O asociadas al conjunto de cultivos considerados por el estudio¹², a nivel nacional es aproximadamente de 234.000, 135.000 y 293.000 toneladas al año respectivamente. Si se considera solo Montevideo y Canelones, estos valores son de 7.700, 4.900 y 13.700, significativamente menor que en el resto del país, lo cual se vincula directamente a la distribución de los cultivos en el territorio nacional y el tipo de cultivo.

Por otra parte, en el marco del proyecto Biovalor, el documento *“Relevamiento del mercado uruguayo del compost y otros insumos orgánicos”* (Benzano & Zaha, 2020), presenta los resultados del estudio del mercado de la oferta y demanda de compost nacional en base a entrevista a actores calificados, tasas de aplicación del producto y relevamientos de productos de plaza. Allí se concluye que la demanda potencial de enmiendas orgánicas podría ser cercana a 90.000 m³/a si se comercializara un precio competitivo con otros insumos (por ejemplo, estiércol de origen animal como cama de pollo). Por lo tanto, la demanda potencial es significativamente menor a la demanda teórica estimada en el primer estudio que consideraba solo las demandas teóricas de nutrientes de distintos cultivos. Y si se consideran

¹² Arroz, caña de azúcar, cereales, cultivos de huertas, cultivos forrajeros, pradera artificial, frutas cítricas, otros frutales y viñedos

los costos de producción, el valor final del compost es elevado frente a otros insumos en competencia, siendo la demanda real estimada del orden de los 20.000 m³/a por su limitación a competir por precio.

Cabe señalar que si se considera la calidad de los suelos en el área metropolitana (Imagen 12) con importantes niveles de erosión podría ser utilizado este material para recuperación de suelos, por lo que podría considerarse su comercialización a muy bajo precio o donarse como sucede en diversos países con el compostaje de este tipo de productos.

Por lo tanto, las barreras que deberán superar estos tipos de enmiendas orgánicas son: calidad y homogeneidad del producto obtenido, precio de venta, costos de transporte y formas de aplicación.

4 SISTEMA DE GESTIÓN PROPUESTO

Bajo el nuevo paradigma propuesto de una economía circular, con especial énfasis en la circularidad de los nutrientes, la gestión de residuos debe priorizar el reciclaje de los nutrientes y materia orgánica de la forma más eficaz y eficiente.

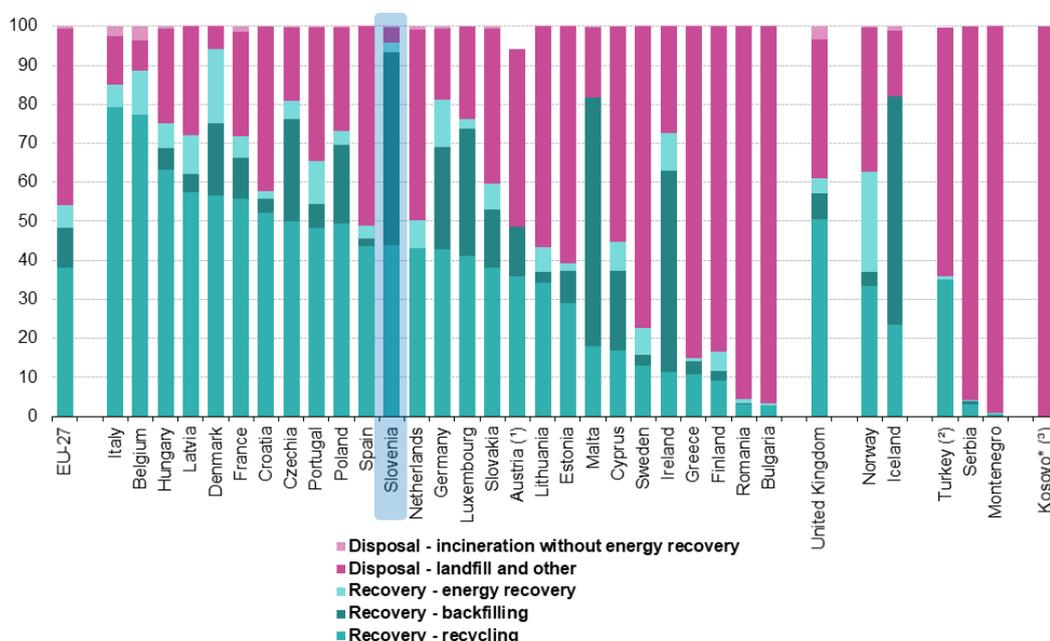
Para esto existen dos procesos biológicos posibles y en operación a escala comercial para residuos de origen urbanos: digestión anaerobia (plantas de biogás) y estabilización aerobia (compostaje). Respecto a las plantas de biogás, a diferencia del enfoque tradicional, las mismas son propuestas como biorefinerías que promueven la circularidad de nutrientes y materia orgánica, más que plantas de producción de energía. El biogás producido es considerado como un elemento complementario que genera un valor agregado por la producción de energía y por la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. El concepto de biorrefinería se potencia al incorporar acciones de “simbiosis” industrial incorporando sustratos de distintos actores como por ejemplo de saneamiento, gestión de residuos de distintos orígenes y alianzas con distintos actores como generadores de energía, productores primarios, industria de alimentos, forestal o industrias químicas. (Aho et al., 2015).

Como alternativa, la fracción orgánica puede ser simplemente secada en procesos de estabilización biológica cortos, de 7 días, obteniendo un producto orgánico con menor humedad que puede ser utilizado también como un combustible derivado de residuos con menor poder calorífico. El poder calorífico obtenido se encuentra en el entorno de los 15 MJ/kg y los sistemas que la utilizan presentan buenos resultados en materia de balances energéticos (Cimpan & Wenzel, 2013). El aprovechamiento energético de la fracción orgánica se considera por lo tanto una buena oportunidad en el marco de una economía circular, pero de segundo nivel frente a la recuperación de nutrientes y materia orgánica.

A los efectos de diseñar un modelo posible y realista, se analizan distintas ciudades europeas donde la valorización de residuos orgánicos se encuentra más avanzada y se decide seleccionar Eslovenia por las altas tasas alcanzadas como puede observarse en la imagen 13.

Imagen 13: Tratamiento de residuos en ciudades Europeas según tipo de recuperación, 2018¹³

Waste treatment by type of recovery and disposal, 2018
(% of total treatment)



(*) No data available for energy recovery and incineration without energy recovery.

(*) No data available for incineration without energy recovery.

(*) 2016.

* This designation is without prejudice to positions on status, and is in line with UNSCR 1244/1999 and the ICJ Opinion on the Kosovo declaration of independence.

Source: Eurostat (online data code: env_wastrt)

Se propone tomar el modelo de la capital, Liubliana, teniendo en cuenta que en el año 2016 fue reconocida con el premio Ciudad Verde Europea, con la particularidad de ser la única ciudad entre las 5 finalistas sin planta de incineración.¹⁴

Se analizó otra alternativa de modelo a considerar en Estados Unidos, en la ciudad de Portland, Oregon, pero no se pudo acceder a datos confiables y detallados de la gestión de residuos. Para el caso de Liubliana se obtuvo información disponible pública online y se

¹³ El concepto “Recovery Backfilling” hace referencia al uso del producto obtenido en lugar de otros materiales vírgenes, con condiciones adecuadas para la aplicación (cumpliendo con las propiedades necesarias para el particular rendimiento), y aplicado en un proceso de ingeniería paisajística. <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/342366/4953052/Guidance-on-Backfilling.pdf/c18d330c-97f2-4f8c-badd-ba446491b47e>

¹⁴ https://europa.eu/youth/get-involved/sustainable%20development/european-green-capital-and-european-green-leaf-award_es#:~:text=Esta%20distinci%C3%B3n%20se%20otorga%20cada,la%20mayor%20localidad%20del%20pa%C3%ADs.

realizaron gestiones para obtener datos técnicos y actualizados de la planta de valorización de residuos (contacto con Gerhard Pilz, Environmental Technologies, Waste Treatment and Biogas Head of Branch Office Linz of Strabag, empresa responsable del diseño de la planta).

Eslovenia tiene una población de 2 millones de habitantes con las siguientes características vinculadas a los residuos:

- Los municipios son los responsables de la recolección
- Cuenta con diferentes sistemas de recolección puerta a puerta según los distintos materiales recolectados
- Desde el 2001 cuenta con un impuesto a la disposición final con lo que se han financiado infraestructuras de reciclaje
- Aplica el principio de Responsabilidad Extendida al Productor a las distintas corrientes de residuos reciclables.
- Existen 7 plantas de Tratamiento Mecánico Biológico
- Cuenta con más de 15 centros de “reuso”

La gestión de residuos de la ciudad de Liubliana cuenta con los siguientes elementos (European Commission, 2014; Strabag, 2018):

- Separación en origen en 4 fracciones: i) envases de plástico y metales, ii) vidrio, iii) papeles y iv) fracción orgánica
- Sistema de recolección combinando sistema puerta a puerta más infraestructuras específicas como puntos de entrega voluntarios y contenedores subterráneos.
- Las fuentes de financiamiento se basan en el pago según vertido (pay as you trough) para la fracción no reciclable y la fracción orgánica. El pago depende del volumen de los contenedores utilizados y recolectados.
- Cuenta con la planta industrial MBT (Tratamiento Mecánico Biológico) llamada “RCero” - centro regional de gestión residuos orgánicos y residuales. Esta planta atiende a 37 municipios que representan un tercio de la población del país. En dicha planta se cuenta con una línea específica para los residuos orgánicos separados en origen que luego reciben un tratamiento biológico y producen un compost de calidad.

- La fracción “residual”, ingresa a esta planta MBT donde se recuperan 3 tipos de productos: i) materiales reciclables, ii) dos tipos de combustibles derivados de residuos y iii) un producto orgánico estabilizado utilizado para relleno de terrenos o sitios de disposición final. En la planta se procesan también residuos comerciales y de jardinería.

Como se indicó previamente, mediante intercambios con técnicos de la empresa que diseñaron la planta RCero, Strabag (https://www.strabag-umwelttechnik.com/databases/internet/_public/content.nsf/web/EN-STRABAGUMWELTTECHNIK.COMN-welcome.html), se obtuvieron los diagramas de flujo de la planta con el balance de masa asociado y actualizado luego de entrada en operación. Se analizaron estos documentos revisando los distintos flujos de residuos y se concluye que de la fracción residual (residuos mezclados en origen) se obtienen bajas cantidades de materiales reciclables (se recuerda que se tienen muy altas tasas de recolección en origen), cerca de un 5%, aproximadamente un 22% de un material orgánico estabilizado que no puede comercializarse como compost por su calidad y cerca de un 30% de combustible derivado de residuos (Strabag, 2018). En planilla excel anexa pueden observarse los ingresos y egresos de los procesos biológicos de la planta.

El combustible derivado de residuos (SRF Solid Recovered Fuel por sus siglas en inglés) puede utilizarse como combustible alternativo en cementera, en distintos procesos industriales, sustituyendo combustible de plantas de energía térmica o podría utilizarse en una planta de transformación energética tanto Waste to Energy (incineración) como Waste to Fuel (gasificación/pirólisis) (Cimpan & Wenzel, 2013).

En general, las plantas MBT tiene como objetivo principal mejorar las características respecto al contenido de energía de los residuos para destinarlos a recuperación energética y en segundo nivel una fracción orgánica estabilizada utilizada para cobertura de relleno sanitario o restauración de sitios (Flamme & Geiping, 2012). Los principales factores que afectan la calidad de un SRF son el poder calorífico y la presencia de cloro y mercurio (Cimpan & Wenzel, 2013). Por lo tanto, la calidad del material de ingreso a estas plantas es relevante, de hecho, altos niveles de recolección selectiva en origen (clasificando en particular residuos orgánicos, metales y vidrios) permiten una mejoría significativa del poder calorífico neto del SRF obtenido. En particular la recolección puerta a puerta permite mejores calidades de producto

ya que permite una eliminación eficiente en las etapas iniciales de la gestión de residuos de los productos no deseados por disminuir el poder calorífico o por ser elementos peligrosos (Rada & Ragazzi, 2014).

En este contexto, se concluye que la recolección selectiva eficiente es el elemento clave para cualquier de las alternativas de valorización que se definan, logrando mejores calidades y potencial de valorización. Por lo tanto, se considera relevante realizar los mayores esfuerzos en esta etapa de los sistemas de gestión de residuos y analizar la relación costo-beneficio de invertir en plantas de alto nivel de desarrollo tecnológico para la recuperación de los reciclables o de pretratamiento de los combustibles derivados de residuos. Para el Uruguay podría ser de interés desarrollar una alternativa para el aprovechamiento energético de la fracción mezcla, pero para uso térmico en procesos industriales o para producir combustibles líquidos sustituyendo los fósiles (no para energía eléctrica teniendo en cuenta la matriz energética actual del país); en estos casos un proceso de tratamiento mecánico para homogenización es igual necesario para su acondicionamiento y remoción de elementos contaminantes (Bessi, Lombardi, Meoni, Canovai, & Corti, 2016). Un elemento limitante para este tipo de solución podrá ser la escala apropiada para que sea una solución económicamente factible por lo que podrá ser relevante incluir residuos de comercios e industrias como en el caso de Liubliana.

En el marco de esta tesis y con este marco se realizará una propuesta para la fracción orgánica clasificada en origen, asumiendo que se han adoptado sistemas similares a la ciudad de Liubliana, en el marco de una estrategia hacia la economía circular y en base a datos reales. Se toma la tasa de recolección de la fracción orgánica y se aplica a los datos de generación y composición de la ciudad de Montevideo.

La fracción orgánica - o compostable según normativa nacional - irá a una planta de tratamiento orgánico, con tecnología de digestión anaerobia como etapa inicial, complementada con una estabilización aerobia. Esta combinación permite recuperar energía además de materia orgánica y nutrientes; es el mismo esquema propuesto en la ciudad modelo tomada como referencia. Previo a iniciar el proceso de tratamiento orgánico se retiran elementos contaminantes e impurezas que puedan provenir de errores de segregación en domicilio y al final se realiza un nuevo cribado.

Este documento no aborda las soluciones para los reciclables ni la fracción mezclado.

Imagen 14: Sistema de gestión propuesto en el marco de una gestión integral de residuos domiciliarios



Fuente: elaboración propia

El sistema propuesto en la Imagen 14, deberá ser complementado con acciones tendientes a disminuir la generación de residuos (elementos claves en una Economía Circular) por lo que se deberán promover iniciativas de rediseño, reducción, reuso, reparación, vermicompostaje o compostaje domiciliario a través de distintos instrumentos económico, normativa específica, educación y comunicación. Considerando el alcance del presente estudio, estas líneas de trabajo no serán desarrolladas.

Considerando que la aplicación de un sistema de recolección selectiva será gradual en el tiempo, deberá seleccionarse tecnologías que permitan un esquema modular que habilite la incorporación de nuevas unidades a medida que aumenten los volúmenes a gestionar. Es posible diseñar una estrategia que permita alternar digestión anaerobia con compostaje de

modo que, si no se alcanzan los volúmenes para alimentar un primer módulo de digestión anaerobia, es posible iniciar con compostaje hasta cubrir el salto de volumen necesario.

5 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS

En base a lo presentado en el capítulo anterior, las soluciones tecnológicas consideradas y los productos obtenidos son los siguientes:

1. Digestión Anaerobia: proceso biológico donde se obtiene biogás que será luego purificado a biometano para sustitución de gas natural o transporte y digestado.
2. Maduración Aerobia, compostaje: el digestado proveniente de la etapa anterior se estabiliza generando un abono orgánico que podrá ser usado por productores como alternativa y complemento al uso de fertilizantes sintéticos y para aportar materia orgánica al suelo

A continuación, se presenta una descripción de las alternativas tecnológicas y finalmente se recomienda una para el dimensionamiento de la planta.

5.1 Digestión Anaerobia

La digestión anaerobia (DA) es un proceso biológico mediante el cual la materia orgánica se descompone en ausencia de oxígeno. Los productos de este proceso son biogás y digestado.

El proceso biológico de la digestión anaerobia consiste en 4 etapas:

HIDRÓLISIS: los compuestos orgánicos complejos (lípidos, proteínas y carbohidratos) son despolimerizados en moléculas solubles.

ACIDOGÉNESIS: las bacterias acidogénicas actúan sobre los compuestos provenientes de la hidrólisis transformándolos en ácidos orgánicos como ácido acético, propiónico, butírico y valérico

ACETOGÉNESIS: los compuestos intermedios generados en la acidogénesis, son transformados en ácido acético, H_2 y CO_2 por acción de las bacterias acetogénicas.

METANOGENESIS: las arqueas metanogénicas forman metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) a partir de los compuestos anteriores (ácido acético, H_2 y CO_2).

Imagen 15: Esquema del proceso bioquímico de digestión anaerobia

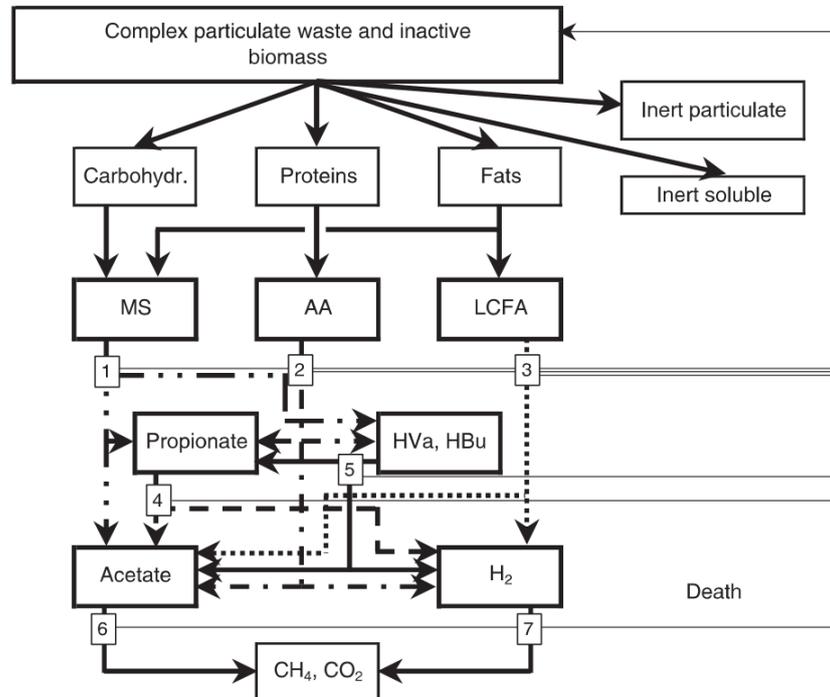


Figure 1 The anaerobic model as implemented including biochemical processes: (1) acidogenesis from sugars, (2) acidogenesis from amino acids, (3) acetogenesis from LCFA, (4) acetogenesis from propionate, (5) acetogenesis from butyrate and valerate, (6) acetoclastic methanogenesis, and (7) hydrogenotrophic methanogenesis

Fuente: (Batstone et al., 2002)

El biogás generado se compone de diferentes gases como el metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), sulfuro de hidrógeno (H₂S), oxígeno, amoníaco y siloxanos.

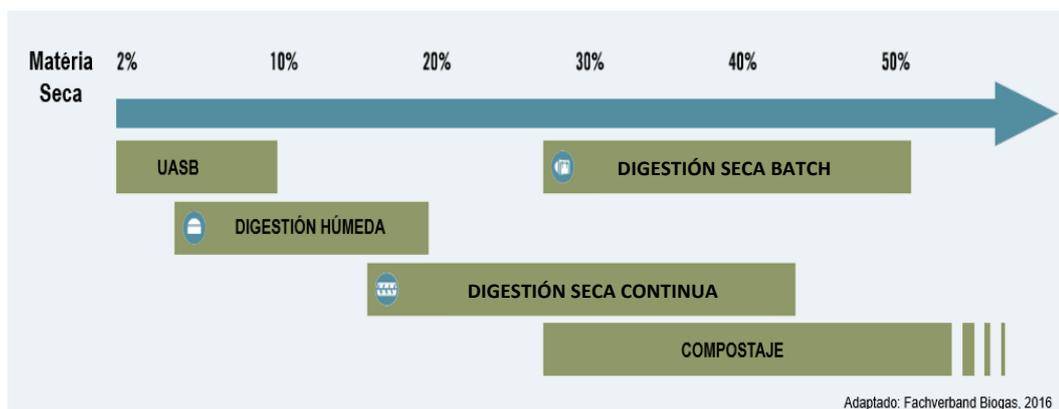
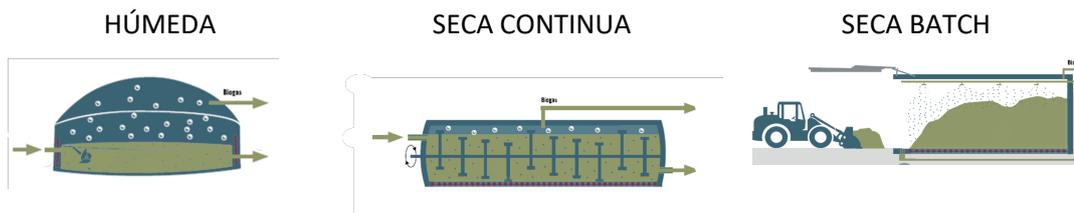
Los sistemas de digestión anaerobia pueden clasificarse según los siguientes criterios:

- Según tipo de proceso: tipo batch o continuos
- Según % de sólidos: húmedos (<15% ST) o secos (15% a 50% ST).
- Según temperatura: mesofílicos (entre 35°C y 40 °C) o termofílicos (entre 50°C y 57°C)
- Según nº de etapas: simple o dos etapas

A continuación se presenta una discusión respecto a las características de los tres grandes tipos de tecnologías de DA (según % de sólidos totales) y se recomienda la selección de una de ellas para el sistema de valorización propuesto:

- Digestión húmeda: sólidos totales 3 al 15%
- Digestión seca continua: sólidos totales 15 al 35%
- Digestión seca batch: sólidos totales 25 al 50%

Imagen 16: Distintas tecnologías de digestión anaerobia REVISAR NUMERACIÓN



Fuente: (Wilken et al., 2019)

La tecnología *húmeda* para digerir residuos orgánicos de origen doméstico requiere de un importante acondicionamiento de los residuos y la posterior incorporación de agua de forma de lograr el % de sólidos totales adecuado. Con este tipo de solución es necesario una etapa de separación de fases del digestato a la salida del reactor y un tratamiento de los efluentes para llegar a niveles de calidad de vertido.

Tanto en la tecnología seca continua como la húmeda, se han identificado diversos problemas operativos al utilizar residuos urbanos como sustrato, como atascamiento de bolsas plásticas en las paletas de los sistemas de agitación del reactor o la generación de zonas muertas que quitan volumen efectivo al reactor.

En la tecnología *seca batch* también llamada tecnología “de garage” la materia prima se procesa en lotes que permanecen en el digestor durante un tiempo de retención definido, típicamente durante aproximadamente un mes. Posteriormente, el digestor se vacía y se rellena con el siguiente lote. El digestato puede ser post-compostado sin un paso de separación. La nueva materia prima entrante se inocula con el digestado sólido del proceso anterior y luego se ingresa en el “garage”. El lixiviado del sistema de drenaje se recircula como líquido de percolación y se rocía sobre la materia prima para inocularla con microorganismos y mejorar el contacto con la biomasa degradante. No hay componentes móviles en el reactor, lo que significa que el reactor es robusto, las operaciones son relativamente confiables y los costos de mantenimiento son bajos. El sistema de distribución del líquido de percolación garantiza un contenido adecuado de agua. (Wilken et al., 2019).

Como contrapartida este tipo de solución puede implicar una menor generación de biogás dado que no se genera una mezcla homogénea del material y por lo tanto se pueden generar zonas de baja actividad microbiana (incluso zonas muertas).

La alimentación de la materia prima se realiza mediante maquinaria pesada y la inoculación con digestado requiere de una mezcla previa por lo que se requiere más trabajo del personal en comparación con los sistemas automatizados.

Otra de las desventajas de la tecnología *seca batch* es referida a la compactación del lecho junto a la colmatación de los poros por la sucesiva recirculación del percolado lo que reduce la homogeneidad del lecho y aumenta la retención de líquidos. Y esto finalmente conlleva a problemas operacionales. Para solucionar este tipo de problemas las plantas han mezclado el digestado con material estructurante para reducir la compactación (Rocamora, 2020).

Todas las tecnologías de digestión anaerobia presentan problemas por acumulación de inhibidores, siendo la tecnología *seca batch* más propensa a dicha acumulación. Sin embargo, esta última presenta mayor tolerancia operando adecuadamente con mayores concentraciones de ácidos grasos volátiles (VFA) y amoníaco ya que se tiene menor difusión, afectando solo parte del reactor (Rocamora 2020).

Teniendo en cuenta los aspectos planteados para cada una de las alternativas tecnológicas, se considera relevante simplificar los aspectos de operativos, minimizar inversiones y disminuir la generación de un efluente líquido a gestionar. En el marco de una economía

circular, es razonable plantear soluciones que minimicen el uso de recursos, por lo que tecnologías que requieran de mezcla con agua para obtener una concentración de sólidos adecuada y su posterior tratamiento, no se presentarían como la solución más eficiente en lo referente al uso de los recursos. Por lo tanto, a pesar de obtener menor cantidad de biogás y por ende de biometano, se propone un sistema de digestión anaerobia seca en batch.

Los parámetros que afectan los procesos de digestión anaerobia se pueden agrupar de la siguiente forma: i) según las características del sustrato, ii) gestión del proceso y iii) condiciones operativas. En el siguiente esquema se presentan los parámetros para cada uno de estos aspectos para la digestión anaerobia seca:

Tabla 6: Parámetros vinculados a la digestión anaerobia seca

SUSTRATO	Relación Carbono Nitrógeno		Relación C:N recomendada: entre 20 y 30
	Tamaño de partícula		Menor tamaño de partícula aumenta la superficie disponible para la acción enzimática y mejora los procesos cinéticos
	% de sólidos totales		Mayor % de ST puede disminuir la generación de metano por unidad de sólidos y aumentar la acumulación de inhibidores
GESTIÓN DE PROCESO	Utilización de inóculo	BATCH	Carga con un inóculo al inicio del proceso batch acelera el arranque del proceso y es una forma eficiente de tener la población microbiana necesaria
	Recirculación de percolado		Es utilizado como un proceso que permite disminuir la inoculación con digestado y liberando espacio para sustrato nuevo
	Estructura del lecho		La micro y macro porosidad, el grado de compactación y la permeabilidad del material a digerir afectan la eficiencia del proceso
	Tasa de carga referida a Sólidos Volátiles por volumen de reactor (kg SV/m ³ /d)	CONTINUO	Principal parámetro para los procesos continuos (entre 4 y 15kgSV/m ³ /d para residuos orgánicos)
	Mezcla		La mezcla mantiene los microorganismos y sustratos en contacto, favorece condiciones homogéneas en todo el reactor y acelera los procesos cinéticos, así como la generación de metano
	CONDICIONES OPERATIVAS	Temperatura	
pH		Los valores óptimos se encuentran entre 6,8 y 7,2 según la bibliografía (mayores valores para proceso húmedos)	
Presencia de inhibidores		Los principales inhibidores son los ácidos grasos y el amoniaco	

Fuente: Elaboración propia en base a (Rocamora et al., 2020)

Según (Clarke, 2018) y (Rocamora et al., 2020) las empresas principales proveedoras de la tecnología seca en batch son BEKON – EGGERSMAN (ALEMANIA – 1992 - <https://www.bekon.eu/>) y BIOFERM Energy System (EEUU - <https://www.biofermenergy.com/>). Existen otras iniciativas como el caso de la planta Biocel en Holanda que opera desde el año 1997 y una planta de pequeña escala en Brasil (<http://methanum.com/energia-do-lixo/>). Dentro de las tecnologías secas continua, entre las plantas más utilizadas a nivel internacional se destacan DRANCO (Bélgica), VALORGA (Francia), KOMPOGAS (Suiza, 1991) – pero no son consideradas para el presente estudio ya que se ha definido tecnologías seca tipo batch por su simplicidad y robustez.

Para el dimensionamiento y factibilidad económica del presente estudio se selecciona la tecnología BEKON por ser una empresa referente a nivel internacional en materia de gestión de residuos, con diversas soluciones tecnológicas.

5.1.1 Tecnología de purificación del biogás

Según el tipo de sustrato utilizado, la composición del biogás varía en los siguientes rangos:

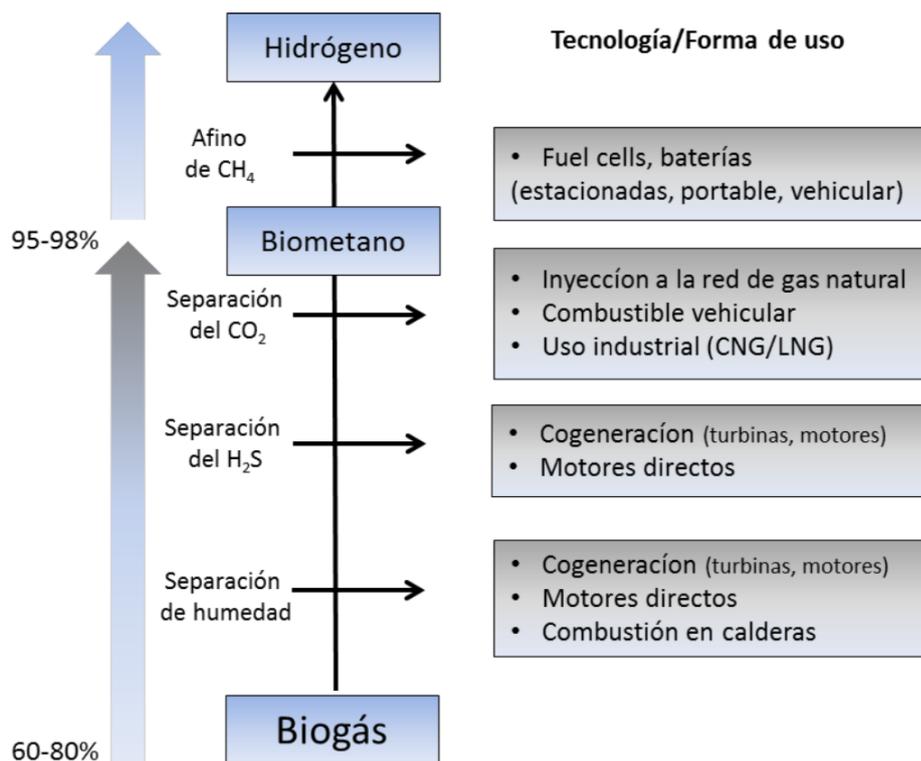
Tabla 7: Composición del biogás según sustrato

	Residuo agrícola	Residuos domésticos	Residuo industrial
Metano (CH ₄)	50-80	50-80	50-70
Dioxido de carbono (CO ₂)	30-50	20-50	30-50
Oxígeno (O ₂)	0-1	0-1	0-1
Sulfuro de Hidrógeno (H ₂ S)	0,7	0,1	0,8
Nitrógeno (N ₂)	0-1	0-3	0-1
Hidrogeno (H ₂)	0-2	0-5	0-2
Monoxido de carbono (CO)	0-1	0-1	0-1
Amoníaco (NH ₃)	trazas	trazas	trazas
Siloxanos	trazas	trazas	trazas
Agua (H ₂ O)	Saturación	Saturación	Saturación

Fuente: (Chen, Vinh-Thang, Ramirez, Rodrigue, & Kaliaguine, 2015)

Según la presencia de los distintos gases puede tener distintos usos como generación de energía eléctrica a través de motores de cogeneración, para inyección a la red, como combustible vehicular e incluso para baterías y celdas de combustible.

Imagen 17: Purificación de biogás y usos



. Fuente: www.nachhaltigwirtschaften.at 2014, tomado de (Mitschke, Linnenberg, Nau, Pinasco, & Ramoska, 2016)

La composición del gas a obtener luego del proceso de purificación, depende del tipo de uso que se busca. En el caso del presente estudio, considerando las condiciones de la matriz energética nacional, se ha seleccionado la producción de biometano para inyección a la red de gas natural o eventualmente como combustible vehicular.

Durante el proceso de purificación el biogás crudo se divide básicamente en dos corrientes de gas: corriente de biometano con alto contenido de metano y la corriente de gas de escape rico en dióxido de carbono y otros gases. Todas las tecnologías de separación presentan limitaciones por lo que la corriente de gas residual todavía contiene una cierta cantidad de metano que deberá ser controlado por condiciones de seguridad.

Como se observa en la figura 16, en el proceso de purificación del biogas se distinguen las siguientes etapas, cada una de ellas con distintas alternativas tecnológicas:

- Separación de humedad
- Desulfurización
- Eliminación de siloxanos
- Separación de amoníaco
- Remoción de CO₂

A continuación se presentan las principales tecnologías según el gas a eliminar o elemento a eliminar del biogás.(Technische Universität Wien, 2012)

- Separación de humedad

El biogás, al salir del biodigestor está saturado de vapor de agua y la cantidad de agua depende de la temperatura. El agua tiende a condensarse en equipos y tuberías y junto con óxidos de azufre pueden causar corrosión.

Los métodos están basados en la separación física del agua condensada y en el secado químico. En los procesos físicos, al aumentar la presión y disminuir la temperatura del biogás, el vapor se condensa y es removido. En los procesos químicos el vapor de agua se elimina con glicol o por adsorción sobre silicatos, carbón activado o tamices moleculares (zeolitas) y se incluye en los tratamientos de separación de CO₂ (ver título “Separación de CO₂”).

- Desulfurización

Aunque el dióxido de carbono es el principal contaminante en el biogás crudo durante la producción de biometano, la eliminación del sulfuro de hidrógeno es de crucial importancia para la viabilidad tecnológica y económica del proceso de mejora del biogas.

El comportamiento depende en gran medida del contenido de azufre del sustrato utilizado siendo el sulfuro de hidrógeno un gas peligroso y corrosivo que debe eliminarse ya sea para quema en motores CHP (Combined Heat and Power) o para la producción de combustible GNC (Gas Natural Comprimido).

Suele aplicarse la combinación de dos o incluso más tecnologías para la desulfuración de biogás para realizar una solución técnicamente estable y económicamente competitiva. Las 4 principales técnicas son A) la *Desulfurización insitu por precipitación de sulfuros*, B) la

Desulfurización biológica, C) la Biodepuración con lavado alcalino y D) Carbón activado. (Technische Universität Wien, 2012)

- Eliminación de siloxanos

Los siloxanos, presentes en productos como desodorantes y champús se pueden encontrar en biogás de plantas de tratamiento de residuos domiciliarios o lodos de plantas de tratamiento de efluentes. Estas sustancias pueden crear problemas cuando se quema en motores de gas o instalaciones de combustión, depositándose partículas cristalinas de sílice en las partes metálicas deteriorando los equipos y acortando su vida útil (Ribas, 2015). Los siloxanos pueden eliminarse mediante enfriamiento por gas, por adsorción en carbón activado, aluminio activado o gel de sílice o por absorción en mezclas líquidas de hidrocarburos.

- Separación de CO₂

Esta etapa comprende la eliminación de dióxido de carbono, aumentando el poder calorífico del gas producido. Como se señaló previamente, es una etapa que suele incluir el secado del biogás crudo. Existen varias tecnologías ya consolidadas a nivel comercial: A) *Absorción física con agua, lavado a presión*, B) *Absorción física, lavado con disolvente orgánico*, C) *Absorción química, lavado amino*, D) *Adsorción con presión alternada (Pressure swing adsorption PSA* y E) *Tecnología de membranas*

- Separación de amoníaco

El amoníaco generalmente se separa cuando el biogás se seca por enfriamiento, ya que su solubilidad en agua líquida es alta. Además, la mayoría de las tecnologías para la eliminación de dióxido de carbono también son adecuadas para la eliminación de amoníaco por lo que no es necesario un paso de limpieza por separado.

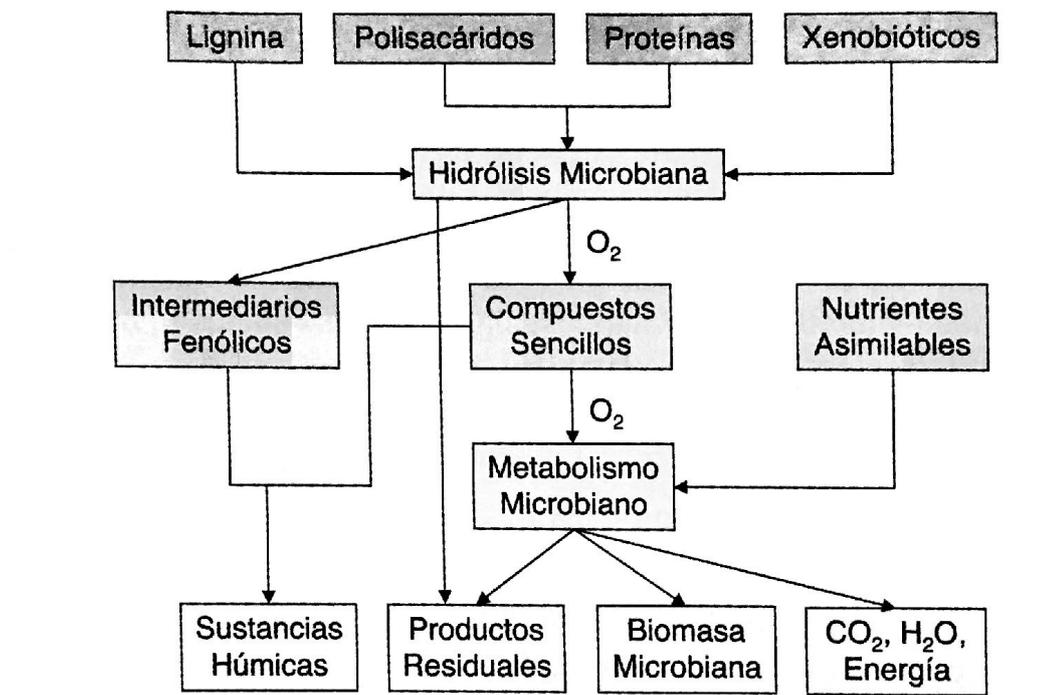
En el documento *Biogas to Biomethane Technology Review* (Technische Universität Wien, 2012) se presentan para las distintas tecnologías. Los costos de inversión para plantas de más de 500 m³/h varían entre 3.500 – 3.700 €/m³/h biometano) y los costos de operación se encuentran 6,5 – 11,2 ct€/m³ biometano).

Dado el alcance del presente estudio, no se desarrollan los aspectos descriptivos y técnicos de cada una de estas tecnologías ya que no se realizará el dimensionamiento técnico de esta etapa pero los costos son considerados para la factibilidad económica.

5.2 Estabilización aeróbica

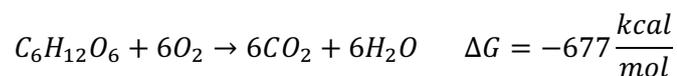
La estabilización aeróbica o compostaje, se trata de un proceso de degradación biológica mediante la acción de diversos microorganismos aerobios que actúan de manera sucesiva, sobre la materia orgánica produciendo calor, agua, CO₂ y materia orgánica humificada. Esto permite una reducción de peso y volumen de los residuos orgánicos procesados. Los microorganismos utilizan la materia orgánica como nutriente para su desarrollo, generando procesos de: i) Degradación hasta moléculas orgánicas e inorgánicas más sencillas y ii) humificación creando macromoléculas (compuestos húmicos) que tienen la característica de ser más resistentes a procesos posteriores de descomposición (Moreno Casco & Moral Herrero, 2008).

Imagen 18: Esquema del proceso bioquímico durante el compostaje



Fuente: (Moreno Casco & Moral Herrero, 2008)

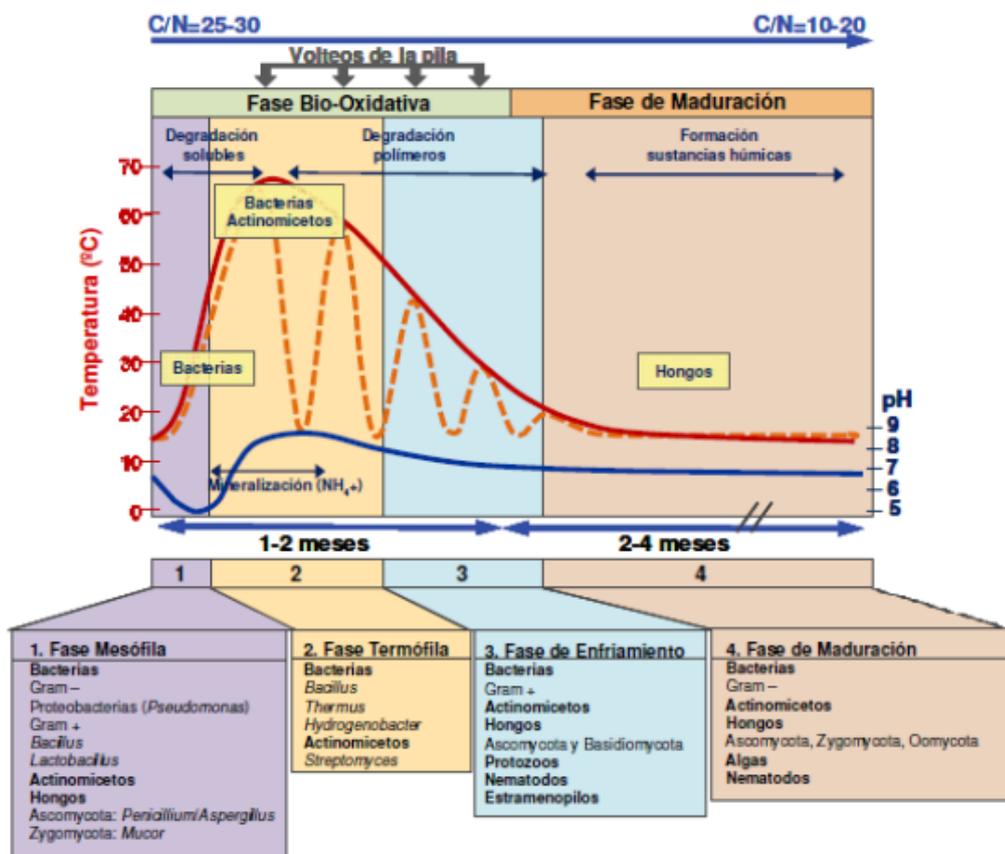
La ecuación de oxidación de la materia orgánica mediante proceso de compostaje se ejemplifica aquí para el caso de la glucosa:



En el proceso la energía generada se disipa en forma de calor.

En el proceso de compostaje se reconocen 4 fases según la temperatura que se presentan en la imagen 19: i) fase Mesófila entre 10 – 45°C, ii) fase Termófila entre 45-70°C, iii) fase Enfriamiento y iv) fase Maduración. Las primeras dos fases tienen una duración de aproximadamente 1 a 2 meses y la fase de maduración entre 2 a 4 meses.

Imagen 19: Sucesión microbiana y ambiental durante el compostaje



Fuente: Compostaje (Moreno Casco & Moral Herrero, 2008)

Para que los procesos de compostaje se den adecuadamente, es necesario monitorear algunos parámetros durante todo el proceso y en particular asegurar una buena mezcla del material al inicio de este. Los principales parámetros a obtener en el material de inicio del compostaje son los siguientes:

Tabla 8: Principales parámetros vinculados al inicio del proceso de compostaje

Parámetro	Referencia al inicio del proceso	Observaciones
Humedad	50-60%	Si la humedad es baja (40 – 45%), desciende la actividad microbiana (en particular de bacterias) y si es aún más baja se detiene del todo el proceso. Si la humedad es mayor se saturan los espacios afectando la disponibilidad de oxígeno, dejando de ser un proceso aerobio y favoreciendo la lixiviación de nutrientes. La falta de agua es simple de compensar agregando agua, pero el exceso suele controlarse agregando agentes estructurantes secos que además facilitan la aireación.
C/N - Relación carbono orgánico total y/nitrógeno total (C_{OT}/N_T)	25-35	<i>Se considera que los microorganismos consumen unas 30 partes de carbono por cada parte de nitrógeno</i> (Moreno Casco & Moral Herrero, 2008). Si es mayor se enlentece el proceso por déficit de nitrógeno que obliga a reciclar este nutriente entre sucesivas generaciones de microorganismos y si es menor se pierde nitrógeno como amoníaco sin ser usado por los microorganismos. El exceso de nitrógeno no afecta el compostaje en sí mismo, pero si afecta en materia de emisiones de gases de efecto invernadero y malos olores. Por lo tanto, la combinación de producto a compostar y material estructurante u otro tipo de residuos debe estar en estos rangos, idealmente en 30.
FAS (espacio de aire libre o free air space por sus siglas en inglés)	30-60%	Como el proceso de compostaje se produce por microorganismos de metabolismo aerobio, es fundamental permitir el pasaje de aire libre. Esto se garantiza con un elevado FAS, el cual se define como la relación entre el volumen del espacio de la pila que contiene aire libre e interconectado y su volumen total. Este parámetro generalmente se reduce con el proceso, debido a la compactación de la pila y debe intentar mantenerse mediante volteos del material y el uso de material estructurante. Insuficiente oxígeno puede generar procesos fermentativos, prolongando demasiado el proceso y generando productos secundarios no deseados como malos olores y no logrando las temperaturas necesarias. El exceso de aire puede llevar a pérdidas demasiado elevadas de calor afectando la calidad final del producto. (Albuquerque, McCartney, Yu, Brown, & Leonard, 2008)
Tamaño de partícula	3.2 - 50.4 mm	Es recomendable triturar los materiales para alcanzar un tamaño susceptible al ataque microbiano ya que acelera sensiblemente los tiempos de compostaje. Menor tamaño de partículas, mayor

		superficie para contacto con microorganismos, pero un tamaño excesivamente pequeño puede favorecer la compactación y perder la condición aerobia. (Raichura & McCartney, 2006)
pH	6 – 7,5	Si pH es menor que 6, los procesos vinculados a las acciones de las bacterias prácticamente se detienen (los hongos toleran mayores rangos) y valores superiores o cercanos a 9 favorecen la conversión de nitrógeno a amonio afectando la actividad microbiana.

Fuente: Adaptado de (Moreno Casco & Moral Herrero, 2008) y otros recursos citados

Por otra parte, cabe señalar la relevancia de monitorear durante todo el proceso la temperatura, debiendo asegurar alcanzar valores entre 45 y 59°C durante determinado tiempo para alcanzar la sanitización del material. Temperaturas menores a 20°C enlentece el crecimiento microbiano y por lo tanto el proceso de descomposición. Los microorganismos suelen ser más eficientes en los rangos más altos de temperatura, sin embargo, en temperaturas mayores a los 70°C pueden detenerse los procesos biológicos.

En el caso de esta tesis, el proceso de compostaje se realiza con los siguientes objetivos:

1. Higienizar el producto, eliminando patógenos
2. Completar la estabilización de la materia orgánica para ser utilizada como enmienda orgánica.
3. Reducir el contenido de humedad.

Referente al primer objetivo, durante el compostaje, actúan los microorganismos quimioheterótrofos utilizando la materia orgánica como fuente de carbono y energía, en presencia de oxígeno. Parte de la energía generada durante el proceso se disipa en forma de calor, aumentando la temperatura del material en proceso. Por la propia actividad de los microorganismos y al disponer los sustratos de forma que permitan acumulación de calor, se alcanzan temperaturas superiores a los 60°C. A estas temperaturas se reduce temporalmente la diversidad microbiana y se eliminan los microorganismos patógenos. (Moreno Casco & Moral Herrero, 2008). La mezcla para compostar debe tener suficiente materia orgánica fácilmente biodegradable, de modo que la elevada actividad microbiana permita alcanzar y mantener la fase termofílica un tiempo suficiente. Esto se puede lograr mediante el uso de estructurante con una fracción fácilmente biodegradable (residuos verdes) y/o evitando que la estabilización anaeróbica sea elevada (bajo tiempo de residencia).

En el caso del compostaje de residuos de origen domiciliario, uno de los aspectos relevantes es su capacidad de eliminar patógenos presentes en los sustratos como virus, bacterias y hongos. Este proceso de eliminación se debe a distintas interacciones microbianas como las altas temperaturas, la producción de compuestos antimicrobianos, la colonización con microorganismos que compiten con los patógenos por los nutrientes y la pérdida natural de la viabilidad del patógeno con el transcurso del tiempo. La causa principal es el aumento de temperaturas ya que los patógenos humanos presentan baja viabilidad frente a altas temperaturas. (Moreno Casco & Moral Herrero, 2008)

Durante el proceso de digestión anaerobia (mesofílica) no se alcanzan temperaturas tan elevadas (hasta 37°C) por lo que no puede asegurarse que el digestado obtenido se considere sanitizado. Por lo tanto, es necesaria una etapa de estabilización aerobia, que además permitirá una maduración de la materia orgánica logrando un material de mayor calidad para ser usado como enmienda orgánica para cultivos y suelos. Según el estudio de (Zeng, 2016) referente al compostaje como etapa de post-tratamiento del digestado de procesos anaerobios, se demuestra que es posible superar los 50°C durante el compostaje de digestado mezclado con chips de madera como material estructurante y que la temperatura máxima depende de la naturaleza de los materiales y de la relación de la mezcla. Las mayores temperaturas se obtienen a partir del ratio de 2:1 en volumen estructurante/digestado.

Para cumplir el segundo objetivo se requieren buenas características del material de ingreso y un tiempo de maduración adecuado luego de la fase termofílica, por lo que el tiempo de estadía debe ser suficiente. Las características del material de entrada se pueden ajustar incorporando material estructurante que permita una mayor aireación y una adecuada relación de C/N.

El aporte de material estructurante permite también cumplir el tercer objetivo al tener baja humedad y mediante la evaporación durante el compostaje. Por lo tanto, el sistema propuesto debe permitir la salida del agua evaporada y la relación estructurante/digestado debe ser adecuada.

Teniendo en cuenta todos estos elementos, el diseño se verá condicionado por la cantidad de material estructurante necesario y el tiempo de proceso. Un elevado volumen de estructurante o un mayor tiempo puede resultar un desafío por los altos costos asociados a

la necesidad de mayor área e infraestructuras. Asimismo, un volumen inadecuado de estructurante o tiempos más cortos pueden afectar la calidad final de la enmienda orgánica obtenida limitando sus posibilidades de comercialización.

Por lo tanto, la calidad de la mezcla que ingresa al proceso de compostaje es relevante para asegurar la calidad final del compost obtenido, la remoción de patógenos y la reducción de tiempos de todo el proceso.

Las plantas de compostaje requieren de los siguientes espacios en su diseño:

1. Área de recepción de residuos
2. Área de compostaje
3. Área de maduración
4. Área de separación o afino
5. Área de almacenamiento o post procesado (mezclas, pellets, envasado)

Pueden encontrarse diversas tecnologías diferenciándose principalmente por las formas de volteo y aireación, implicando mayores o menores áreas de procesamiento. Las tecnologías más habituales son:

- Hileras con volteo
- Pilas estáticas aireadas
- Trincheras o canales semicerrados con aireación forzada y volteo
- Contenedores aireados discontinuos bajo techo o cerrados
- Compostaje en reactores rotatorios (tambores)

Las *hileras con volteo* es una tecnología muy simple y económica, donde el material a compostar se coloca en pilas de sección triangular o trapezoidal (camellones). Las alturas son variables según el operador de la planta y las características de los residuos. El método de volteo para lograr la aireación puede ser con volteadoras diseñadas especialmente o palas mecánicas. Es un sistema lento, con un tiempo de aproximadamente 100 a 120 días.

En las *pilas estáticas aireadas*, se coloca el material sobre tubos perforados conectados a un sistema que permite la circulación de aire en la pila de material. La masa de residuos queda estática y cubierta con material aislante, hasta que terminada la etapa de compostaje. Este

sistema presenta como ventaja un mayor control de oxígeno y temperaturas, menos espacio y demanda de personal que las hileras con volteo, pero su efectividad depende de la homogeneidad del material de ingreso y es susceptible a problemas en el circuito de aireación.

En las *trincheras o canales semicerrados*, se desarrolla el proceso de compostaje en una serie de canales con muros de 2 a 3 metros de altura para separar cada trinchera. Los canales están abiertos arriba y con un dispositivo volteador que se traslada por rieles para lograr la aireación a medida que se avanza sobre el material. Suelen instalarse en naves, que permiten una aireación natural o forzada para evitar la acumulación de gases y poder realizar tratamiento de olores. Es una tecnología utilizada en diversas plantas de residuos orgánicos domiciliarios y los tiempos de proceso varían entre 30 a 50 días, sin incluir la fase de maduración.

Los *contenedores aireados discontinuos bajo techo o cerrados* consisten en espacios totalmente cerrados con aireación forzada a través de ranuras en el suelo, sondas de temperatura, humedad y nivel de oxígeno. El tiempo de proceso suele ser de 15 a 45 días, necesitando luego un proceso de maduración de un par de meses.

En los últimos años se han desarrollado instalaciones con tecnologías de membranas impermeables que permiten realizar instalaciones más simples en cuanto a obra civil, utilizando simplemente trincheras cubiertas con la membrana y la aireación forzada. Estas tecnologías combinan el concepto de trinchera cerrada, junto con aireación forzada y volteo del material.

Los *reactores rotatorios*, consisten en cilindros que giran lentamente alrededor de su eje, estando ubicados de forma horizontal con una leve inclinación. La rotación permite que el material esté en contacto con oxígeno y liberar calor y gases. Puede funcionar en continuo o discontinuo. Se tiene un buen control de todas las variables del proceso. El tiempo de proceso es entre 15 y 30 días necesitando un proceso de maduración posterior.

A continuación se presenta una comparación de cada una de las tecnologías:

Tabla 9: Comparación de tecnologías de compostaje

	Hileras con volteo	Pilas estáticas aireadas	Trincheras semicerradas aireadas	Contenedores cerrados aireados	Reactores rotatorios
Nivel tecnológico	--	-	o	+	++
Costo de las instalaciones	++	+	--	-	--
Respuesta a desafíos ambientales	--	-	o	+	++
Tiempo de procesado	--	-	o	+	++

Fuente: Adaptado de (Moreno Casco & Moral Herrero, 2008)

- aspecto muy negativo
- aspecto negativo
- o aspecto neutro
- + aspecto positivo
- ++ aspecto muy positivo

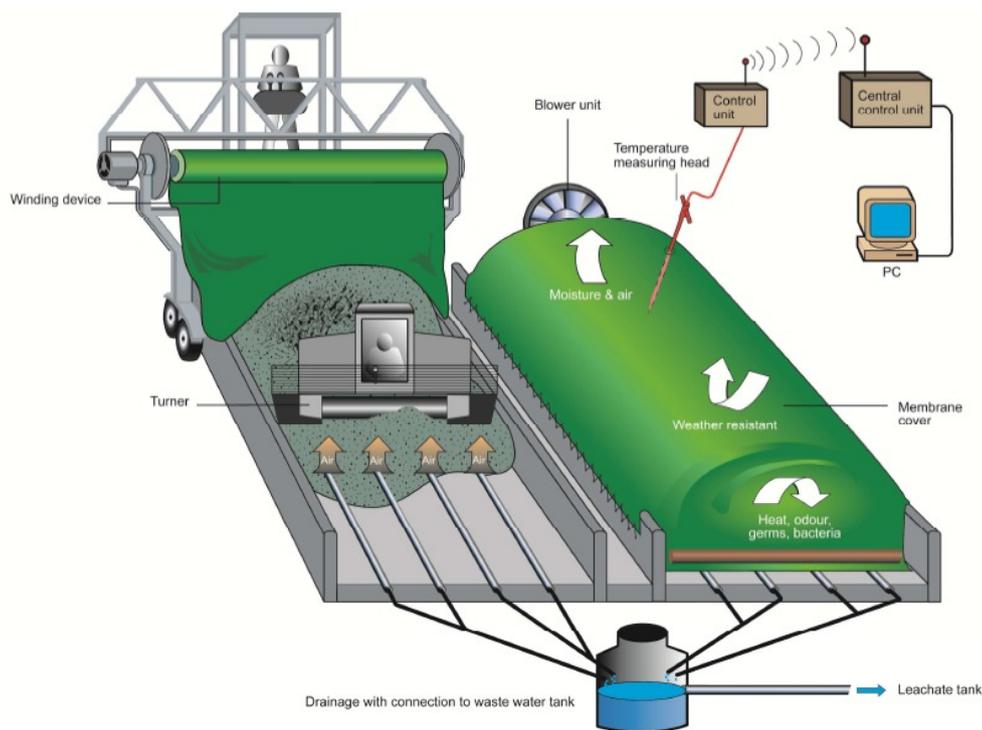
Teniendo en cuenta las características del material de ingreso al compostaje, que ya ha sido procesado en parte en el sistema de digestión anaerobia batch pueden preverse tiempos de procesamiento menores que los habituales para residuos orgánicos sin tratamiento previo.

Para la selección de la tecnología, se priorizan los siguientes aspectos: minimización de olores, asegurar alcanzar la temperatura de sanitización y alcanzar la calidad adecuada de la enmienda orgánica final. Para ello se considera que un sistema cubierto permitirá tener un mayor control tanto de los olores como de la temperatura por evitar la disminución de la temperatura que generan las lluvias (Raichura & McCartney, 2006). Para asegurar la homogeneidad del proceso y por lo tanto la calidad final del material se considera relevante asegurar la mezcla adecuada en toda la masa, así como la distribución adecuada de aire. Por lo tanto, se propone un sistema con una combinación entre trincheras semicerradas aireadas y contenedores cerrados aireados. El sistema rotativo se descarta por los costos de inversión y operación que implica.

Dentro de los distintos proveedores de tecnologías de compostaje se destaca a nivel global la empresa Eggersmann (F. (Methanum) Colturato, 2019) de origen Alemán - <https://www.eggersmann-recyclingtechnology.com>. En particular, dicha empresa ha desarrollado un sistema de trincheras cerradas con membranas semipermeables (tipo

GoreTex®). En la imagen siguiente puede observarse el funcionamiento del sistema, donde se combinan la aireación forzada, con un sistema de mezcla en trincheras. Asimismo, este sistema tiene la ventaja de permitir la evaporación del agua. Esta es la tecnología seleccionada para el dimensionamiento de la planta.

Imagen 20: Tecnología a utilizar para proceso de compostaje, trincheras cerradas y aireadas con volteo, con membrana



Fuente: Gentileza (F. (Methanum) Colturato, 2019)

6 DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA

Para el dimensionamiento de la planta se toma como dato de partida la generación de residuos de Montevideo presentada en el estudio de (LKSUR, 2013) tomando un valor de 521.220 t/año de residuos urbanos con la composición presentada en la tabla 1. Este es el último documento público que presenta la situación de la ciudad de Montevideo.

Como se presentó previamente las instalaciones principales de la planta son las siguientes:

1. Planta de digestión anaerobia
2. Planta de compostaje

Para el dimensionamiento se realiza un balance de masa en base a los sólidos totales en cada una de las etapas, aplicando los parámetros definidos por las tecnologías seleccionadas y realizando un análisis en base a rangos de operación que aseguren la obtención de productos de calidad adecuada para su comercialización.

Actualmente, las plantas combinadas de digestión anaerobia seca batch junto a un proceso de compostaje de maduración posterior están diseñadas en base a la casuística desarrollada por las empresas y es escasa la literatura de modelos desarrollados que permitan a partir de ellos dimensionar para otros casos particulares. Esto lleva a seleccionar datos de referencia de algunas plantas para los parámetros principales y realizar un análisis de sensibilidad. La modelación realizada requerirá de ajustes en una segunda etapa que permita realizar ensayos piloto.

6.1 Cantidad de residuos a procesar en la planta

A los efectos del dimensionamiento de la planta, se parte de un escenario optimista asumiendo que se ha iniciado la transición hacia una economía circular (hipótesis del estudio), obteniendo una adecuada calidad de material para su comercialización y buena tasa de recolección de la fracción compostables.

Para establecer los valores de recolección de la fracción compostable, se analiza el estudio *“Assessment of separate collection schemes in the 28 capitals of the EU”* (Seyring, Dollhofer, Weißenbacher, Herczeg, & David, 2015) que presenta datos comparativos de 28 capitales europeas donde se han implementado diferentes esquemas de recolección selectiva. Se presentan distintas modalidades de recolección selectiva y sus indicadores operacionales.

Asimismo, se estudian las tasas de recolección según materiales y según tipo de sistema. A los efectos del dimensionamiento de la planta para Montevideo, se toma el caso que presenta mejores resultados, la ciudad de Liubiana (capital de Eslovenia). En esta ciudad se obtienen tasas de 72,5% de recolección de compostables y 66,7% de recolección de reciclables (Cabe señalar que esta capital cuenta con el sistema *Pay As You Throw*, así como puntos de entrega voluntaria).

Según la composición de residuos presentada, la cantidad de residuos domiciliarios y las tasas de recuperación consideradas se obtiene la siguiente Tabla 10:

Tabla 10: Composición de residuos según sistemas de recolección y % de recolección propuestos

	Composición	Generación (kt/año)	% recolección*
Papel	19,1%	99,3	84,2%
Vidrio	5,7%	29,9	87,5%
Plásticos y metales	18,8%	97,8	51,7%
Residuos orgánicos	40,9%	213,2	72,5%
Madera y jardinería	2,4%	12,2	
Resto	16,3%	68,5	

*Datos obtenidos de la ciudad de Liubiana ((European Commission, 2014))

Al aplicar la tasa de recolección de la ciudad de Liubiana, se obtiene un ingreso de residuos orgánicos a la planta de **154,5 kt/a** de residuos orgánicos o compostables.

Al ingreso a la planta de la fracción orgánica, se realizan una breve preclasificación removiendo los elementos metálicos mediante un separador magnético y un triturado del material que permitirá una mejor degradación del material. Considerando aplicables los datos de la planta Rcero (Strabag, 2018) luego de estos dos procesos, se recupera un 98% de materia orgánica a procesar en el sistema de biodigestores (se separa 1,8% de materiales de tamaño mayor a 60 mm que se utiliza luego como material estructurante y 0,1% de metales).

Por lo tanto, los residuos que ingresarán a la planta incluyen un 0,10% de metales lo que implica un ingreso de la planta de **154,7 kt/a**. Y los residuos que ingresan a la etapa de digestión anaerobia son **151,8 kt/a**.

6.2 Planta de digestión anaerobia

Como se definió previamente, se selecciona la tecnología seca batch o discontinua para el proceso de digestión anaerobia, eligiendo la tecnología de Bekon.

El primer aspecto a considerar es la caracterización fisicoquímica del sustrato que ingresa a DA. Al seleccionar como modelo la ciudad de Liubliana y su eficiencia, se toman los datos de esta planta: 35% de sólidos totales y una densidad de 0,55 t/m³ (Strabag, 2018).

Es necesario definir los parámetros operacionales de la tecnología Bekon para residuos orgánicos de origen domiciliario. Para ello se tomará como referencia información directa de la empresa, en base a una propuesta técnico económica realizada para residuos domiciliarios. Cabe señalar que los datos conseguidos corresponden a una planta que procesa residuos de recolección mezclada y separados en planta, por lo que este aspecto se considera una limitación del estudio a mejorar en futuras etapas. Los indicadores principales son los siguientes:

Tabla 11: Parámetros operacionales – planta Bekon residuos orgánicos

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD / COMENTARIOS
Producción biogás	120	m ³ biogás/t residuos
Densidad del biogás*	1,28	Kg/m ³
% ST (sólidos totales)	50%	Para residuos domiciliarios sin separación en origen.
Remoción ST	25%	En base a balance de masa

Fuente: balance de masa de propuesta técnico-económica de la empresa Bekon con 28 días de residencia.

*Se asumen los datos a 0°C

La densidad del biogás presentada nos permite estimar una composición de biogás. Al aplicar la Ley de los Gases Ideales con una densidad de 1,28 kg/m³ es posible determinar el peso molecular o masa molar del gas y así estimar su composición en base a los pesos moleculares de cada componente.

La ley de los gases ideales propone:

$$P.V = n.R.T$$

Siendo

P = la presión en Pascal (1 Pa = J/m³)

V = el volumen del gas en m³/kg

T = temperatura del gas medida en Kelvin (K)

R = la constante de los gases ideales en J/K.mol

n = número de moles

Esta ley puede también puede expresarse de forma de independizarse de la cantidad de gas generado (del número de moles) de la siguiente forma:

$$P = \rho \cdot \frac{R \cdot T}{M}$$

Siendo M la masa molar del gas y ρ la densidad del gas.

De esta forma se obtiene el peso molecular con los siguientes valores:

Tabla 12: Parámetros para obtener peso molecular del biogas

POR LEY DE GASES IDEALES	VALOR	UNIDADES
Densidad biogas (ρ)	1,28	kg/m ³
Presión (P)	101.325	Pascal
Constante de gases ideales	8,314	J/K.mol
Temperatura (T)	273	°K
M - peso molecular	29	g/mol

En base a los pesos moleculares de cada gas (CH₄ = 16 g/mol; CO₂ = 44 g/mol y H₂O = 18 g/mol) y asumiendo el 5% de agua (valor de saturación a 37°C), **se obtiene una composición de 50% de CH₄**, 45% de otros gases (principalmente CO₂) para un peso molecular de biogás de 29 g/mol (resolución de un sistema lineal de ecuaciones 3x3).

$$x_1 \cdot 16 + x_2 \cdot 44 + x_3 \cdot 18 = 29$$

$$x_1 + x_2 + x_3 = 100\%$$

$$x_3 = 5\%$$

La composición del CH₄ en el biogás puede variar dependiendo del tipo de sustrato. En el estudio de laboratorio realizado con residuos de alimentos en un proceso de digestión

anaerobia seca tipo batch (Rico, 2020), se obtuvieron valores entre 58 y 69 % de CH₄ en metano, a los 25-30 días dependiendo de la recirculación de inóculo realizada. El valor de 50% parece ser adecuado tomando una postura conservadora.

Dado que la característica del residuo que ingresa según el diseño propuesto a digestión anaerobia (35% ST) difiere en el valor de sólidos totales de la planta de Bekon utilizada de referencia (50% de ST), se realizan los cálculos en base a los indicadores referidos a los sólidos totales del proceso. Por lo tanto, se considera la producción de biogás en base a los sólidos totales, tomando como fuente los datos de la planta de BEKON: para 120 Nm³ de biogás por tonelada de residuos con 50% de ST, se obtiene una tasa de 240 Nm³ biogás/tST. Al tomar la composición de biogás de 50% de CH₄, se obtiene una producción de CH₄ por toneladas de sólidos totales de 120 Nm³CH₄/tST y si se considera un 70% de SV se obtienen 171 m³CH₄/tSV. Tomando el dato del balance de la empresa Bekon realizado a los sólidos totales, se tiene una reducción de un 25% de los mismos (BEKON, 2019a) y del porcentaje de SV se obtiene un 36% de SV removidos lo que corresponde a 480 m³CH₄/tSV removidos.

Considerando que por estequiometría se producen 350 L CH₄/kg DQO removida¹⁵, corresponde a una relación de 1,37 kgDQO/kgSV, que es un valor razonable para estos residuos (carbohidratos ~ 1.1 gDQO/gSV, proteínas ~ 1.4 gDQO/gSV, aceites y grasas ~ 2.9 gDQO/gSV valores correspondientes al estado de oxidación del carbono).

Teniendo en cuenta las 151,8 kt/a, con un 35% de ST (53,1 ktST/a), se obtiene una generación de 6.374x10³ Nm³CH₄/a y con una composición de 50% de CH₄, correspondientes a 12.7x10⁶ Nm³ biogas por año. Se estima un 20% de consumo para acondicionar térmicamente el sistema, manteniendo la temperatura adecuada que permita mejorar la eficiencia del sistema (BASRAWI, YAMADA, & NAKANISHI, 2010).

Las pérdidas de metano durante el proceso de purificación son cercanas al 4% (Technische Universität Wien, 2012). Este biogás es luego purificado para llevarlo a una concentración de metano de 96% que lo constituye en biometano (Wilken et al., 2019), pudiendo inyectarse

¹⁵ Por estequiometría 1 mol de CH₄ se oxida a CO₂ con 2 moles de O₂ (igual a 64 g de O₂). 1 mol de CH₄ ocupan 22,4 L a PTN (0°C y 1atm) por Ley de Gases Ideales. Por regla de 3 con 1000 g de O₂ puedo oxidar 15.625 moles de CH₄ que entonces ocupan 350 L. Por lo tanto, si removemos 1 kg de DQO a través del pasaje a metano, producimos 350 L de este gas.

en la red de gas natural. De esta forma, se obtiene una generación de biometano para inyección a la red de **$5,10 \times 10^6 \text{ Nm}^3$ biometano/a**.

Del balance de la empresa Bekon realizado a los sólidos totales, se tiene una reducción de un 25% de los mismos (BEKON, 2019a), lo que en este caso equivale a 13,3 ktST/a removidos y 39,8 ktST/a de digerido a la salida del biodigestor

Como se presentó previamente la tecnología seca tipo batch requiere de una inoculación de producto para asegurar que se desarrolle el proceso biológico de digestión anaerobia. Según el balance de masa utilizado por la tecnología Bekon (BEKON, 2019a) tomado como referencia, se observa un valor de 59% de tasa de recirculación de sólidos totales de digerido al iniciar un nuevo proceso. Por lo tanto, si ingresan al proceso 53,1 ktST/a ($151,8 \text{ kt/año} \times 35\% \text{ST}$), la recirculación será de 31,2 ktST/a y por lo tanto un ingreso a digestión anaerobia 84,3 ktST/a (residuo+inóculo). De esta forma se completa el balance de masa de ST.

Para poder estimar la masa de residuos húmedos, se realiza un balance de masa del agua del proceso. El agua que ingresa es 98,7 kt/año (aplicando la diferencia con % de sólidos totales a los residuos a digerir). El agua pérdida corresponde a la fracción presente en el biogás, correspondiente a un 5% del biogás en volumen, que considerando el peso molecular corresponde a un 3% de la composición en masa. Por lo tanto, considerando la densidad del biogás ($1,28 \text{ kg/m}^3$), la cantidad de biogás generado y este porcentaje en peso, se obtiene un valor de 0,5 kt/a de agua perdida y una salida de 98,1 kt/año de agua.

Tabla 13: Composición en volumen y masa del biogás

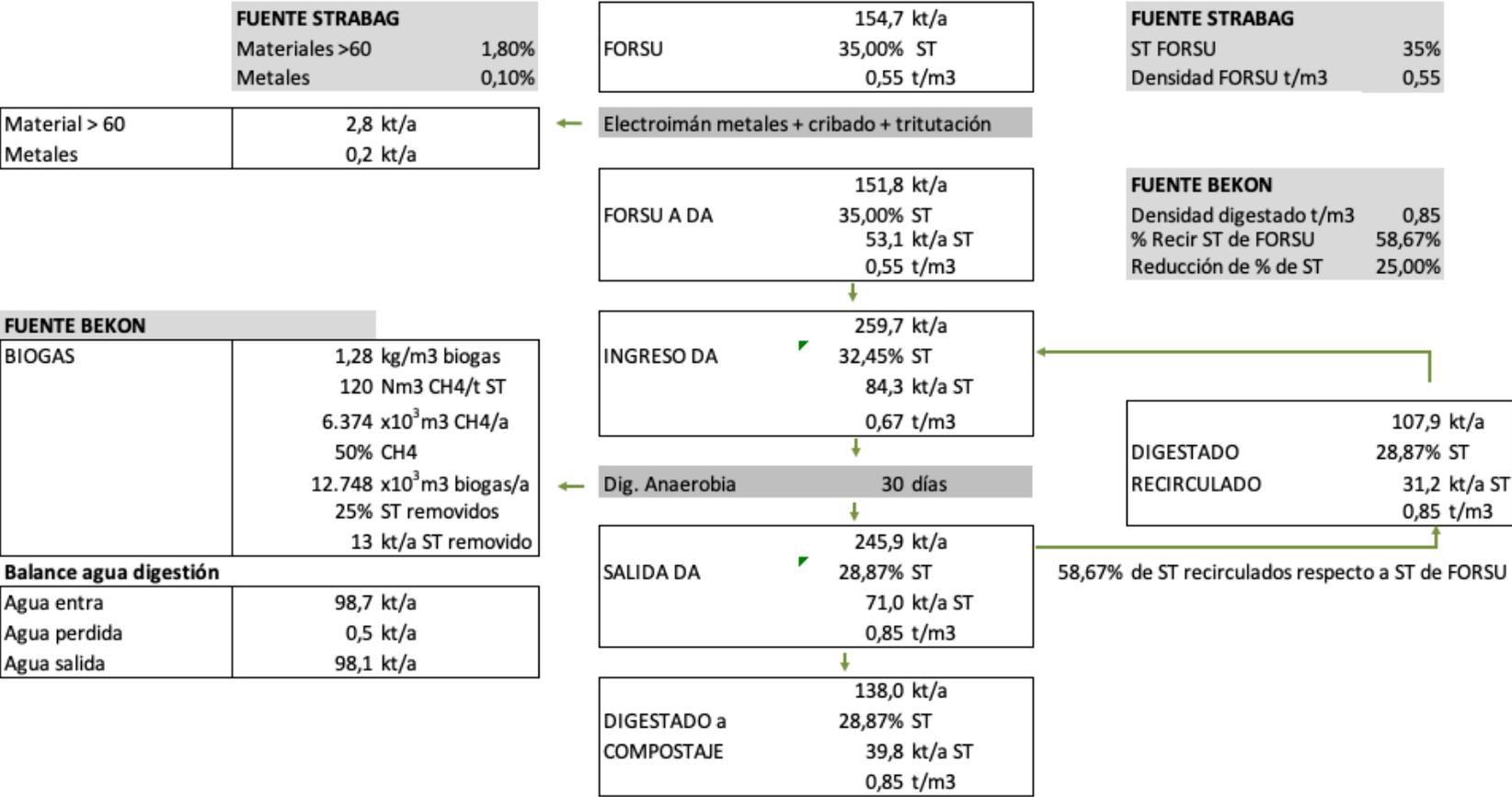
BIOGAS	Composición volumen	Peso Molecular (g/mol)	Composición masa
CH ₄	50%	16	27%
CO ₂	45%	44	71%
H ₂ O	5%	18	3%
		29	Peso molecular promedio

Fuente: en base a la composición del biogás obtenido con tecnología Bekon con residuos orgánicos domiciliarios, ver cálculos presentados previamente.

Como último dato, la densidad del digestado final es tomada de datos de la planta de residuos urbanos BEKON (BEKON, 2019a), con un valor correspondiente a 0,85 t/m³. La densidad depende de la humedad por lo cual esta estimación deberá ajustarse en escala piloto.

En base al balance de sólidos totales y de agua, es posible cerrar el balance de residuos húmedos en la etapa de digestión anaerobia:

Imagen 21: Balance de sólidos totales, agua y residuos húmedos de la etapa de preclasificación y digestión anaerobia



6.2.1 Dimensionamiento de la unidad DA

Para la estimación de la cantidad de digestado generado y las unidades de biodigestión necesarias, se toma en cuenta la necesidad de recirculación de digestado de salida de los biodigestores como inóculo para el batch entrante. Como se presentó previamente, una tasa de recirculación del 59% de ST, resultan en una cantidad de 260 kt/año a procesar. Por otra parte, se estima la densidad de los residuos que ingresarán a digestión como un promedio ponderado de la densidad de los FORSU, 0,55 t/m³ (Strabag, 2018) y la densidad de digestado a la salida de la planta, 0,85 t/m³ (BEKON, 2019b), obteniendo una densidad de 0,67 t/m³. Por lo tanto el volumen a procesar es de 385x10³ m³/año.

Para un tiempo de retención de 28 días (BEKON, 2019)&(Clarke, 2018) para la tecnología propuesta y sumando un 1 día de llenado y 1 día de vaciado de cada reactor, se obtiene la capacidad de 12 ciclos por año (365 días entre 30). Según la oferta obtenida de la empresa Bekon, los reactores tienen las siguientes dimensiones: 35 metros de largo por 6,5 metros de ancho. La altura efectiva es 3,5 metros por lo que resulta en un volumen de 796 m³ lo que lleva a una cantidad de 40 reactores (volumen a procesar sobre número de ciclos y volumen de cada reactor).

Por otra parte, se estima el área necesaria para la digestión anaerobia, asumiendo el área de los reactores (35 m x 6,5 m) más un 50% de espacio para circulación, obteniendo un área de 1,3 hectáreas.

6.3 Planta de compostaje

Como se señaló previamente, es escasa la literatura de modelos desarrollados para el caso de las plantas de compostaje de digestado, y particularmente de digestión anaerobia seca en batch, pudiendo variar significativamente según los residuos que ingresan al proceso. Por lo tanto, para el dimensionamiento de la planta, se realiza un modelo simplificado en base a los principales parámetros del proceso.

6.3.1 Composición del material de ingreso a proceso compostaje

Los parámetros claves para asegurar buenas condiciones de compostaje al inicio del proceso, son la relación C/N, el factor de espacio de aire libre y la humedad. El ajuste adecuado de estos parámetros se puede obtener combinando el digestado con material estructurante. El material estructurante puede ser de distintos tipos, desde residuos verdes compuestos por

podas, hojas y restos de jardinería hasta chip de madera. Cada uno de ellos tiene características físico-químicas diferentes y la posibilidad de ser reutilizados luego de cada batch de compostaje en distintas proporciones.

Para el caso de la tesis se tomarán “residuos verdes” combinado con “chip de madera” como material estructurante. La cantidad de residuos verdes a utilizar estará condicionada por los volúmenes necesarios para lograr los parámetros adecuados de inicio, así como por la disponibilidad de este tipo de residuos en la ciudad de Montevideo. Tomando los datos de composición de RSU (LKSUR, 2013) junto a los residuos verdes que ingresan directo a Felipe Cardoso (F. Colturato, González, Robano, & Troncoso, 2019), se estima una cantidad de 35.000 t/a. En el caso del chip, la mayor condicionante vendrá dada por el precio del material, ya que se comercializa en plaza como un combustible alternativo en sistemas de combustión. Podría obtenerse también con el triturado de pallets no tratados, buscando aprovechar un material descartado de diferentes procesos industriales.

Durante el proceso, el material estructurante se degrada parcialmente, recuperando una fracción para volver a ser utilizada con el mismo fin. La degradación es diferente entre los residuos verdes y el chip de madera. Se realizó una amplia búsqueda bibliográfica de valores de recirculación de estructurante, pero las pocas fuentes encontradas justifican que no es posible presentar datos por la incertidumbre asociada a su determinación.

Por lo tanto, con el objetivo de determinar la capacidad de la planta propuesta, se realizará un análisis combinando los tres parámetros claves - humedad, espacio de aire libre y relación C/N - según distintas combinaciones de: i) digestado, ii) restos verdes, iii) chip de madera, iv) restos verdes recirculados y v) chip de madera recirculado. Se asume un factor de degradación del material diferente para los restos verdes que para los chip de madera.

Según lo presentado en el capítulo 5, ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS, al inicio del proceso de compostaje, los valores recomendados para la humedad son entre 50 y 60% y para el caso de la relación C/N, estos valores se encuentran entre 25 y 35.

Para el Espacio de Aire Libre (FAS por sus siglas en inglés) se propone utilizar la densidad del material como parámetro correlativo. Albuquerque y colaboradores (Alburquerque et al., 2008) proponen una relación entre el FAS y la densidad según la siguiente fórmula:

$$\text{Aire Libre} = 100 - 0,09 \cdot \text{Densidad}$$

Esta fórmula aplica para residuos municipales y restos verdes entre otros, con rangos de humedad entre 10 y 80% y densidades entre 0 y 1 t/m³.

Considerando los valores de FAS entre 30 y 60 recomendados en el capítulo 8, se tiene valores de densidad entre 0,44 y 0,77 t/m³ para la mezcla de entrada a compostaje.

Por lo tanto, los valores a alcanzar en la mezcla de digestado, estructurante y estructurante recirculado deben estar en los siguientes rangos:

Tabla 14: Parámetros fisicoquímicos de la mezcla de material de entrada a compostaje

	C/N	Densidad (t/m ³)	Humedad
RANGOS de la mezcla	25-35	0,44-0,77	50-60%

A continuación se discuten los parámetros iniciales de cada uno de los elementos de la mezcla para poder realizar una propuesta de combinación que permita alcanzar estos valores meta.

6.3.1.1 Material estructurante

Para los parámetros iniciales de estructurante, la bibliografía presenta valores muy variables, presentando a continuación algunas fuentes estudiadas.

La primera fuente es “*Compostaje de residuos municipales*” (Soliva & Zalo, 2008) que caracteriza los residuos, estructurantes y compost de distintas plantas operando en España. El estudio realiza un estudio detallado de diversas plantas de compostaje de residuos urbanos operando a escala comercial así como un análisis particular de plantas de digestión anaerobia. En particular se destaca el estudio realizado para la caracterización del material estructurante utilizado, diferenciando residuos verdes frescos y residuos verdes recirculados.

Por otra parte, el estudio “*A systematic review on the composting of green waste: feedstock quality and optimization strategies*” de (Reyes-Torres, Oviedo-Ocaña, Dominguez, Komilis, & Sánchez, 2018) analiza amplia bibliografía en el tema y mediante una selección propone

valores promedio y rangos por tipo de material. Se considera que los rangos presentados por este estudio son tan amplios que no permiten un nivel de confianza aceptable.

Por lo tanto, se decide tomar los valores medios presentados en “*Compostaje de residuos municipales*” (Soliva & Zalo, 2008), para poder realizar el análisis.

Tabla 15: Parámetros fisicoquímicas de residuos verdes y reciclado considerados para el análisis realizado

	C/N	Densidad (t/m³)	Humedad
Restos verdes	44	0,28	30%
Reciclado verde	24	0,36	29%

Respecto al chip de madera, se toma la fuente del estudio “*Composting of municipal biosolids: effect of bulking agent particle size on operating performance*” (Raichura & McCartney, 2006) donde se indican los siguiente parámetros para chip de pallet triturado y no tratado y se asumen los valores de chip reciclado:

Tabla 16: Parámetros fisicoquímicas de chip de madera de pellets y reciclado considerados para el análisis realizado

	C/N	Densidad (t/m³)	Humedad
Chip de madera de pallet	1028	0,23	23%
Chip de madera de pallet reciclado	900	0,23	23%

Estos valores son tomados como condiciones para la definición la mezcla de entrada con la finalidad de realizar un dimensionamiento preliminar, que luego deberá ajustarse mediante experiencias piloto en un módulo de prueba.

6.3.1.2 Digestado

Como se indicó al analizar la etapa de digestión anaerobia, la reducción de ST se estima en 25%, la densidad del digestado de 0,85 t/m³ y su humedad en 71%. Considerando una relación SV/ST del 70% para los residuos orgánicos de origen domiciliario (Clarke, 2018), la remoción de SV resulta en 36%. Tomando una relación C/N de los residuos orgánicos domiciliarios de 26 según diversas fuentes bibliográficas (valores varían entre 20 y 30) (Ricci & Confalonieri, 2016; Soliva & Zalo, 2008) y asumiendo que la reducción de SV se debe a pérdida de Carbono (no hay volatilización significativa de N), se tiene una remoción de

carbono próxima al 36% y por lo tanto una relación C/N de 17 al final del proceso de DA. Este valor es acorde al rango de valores obtenidos por una planta de DA seca con tecnología Dranco, entre 16 y 18 (Soliva & Zalo, 2008).

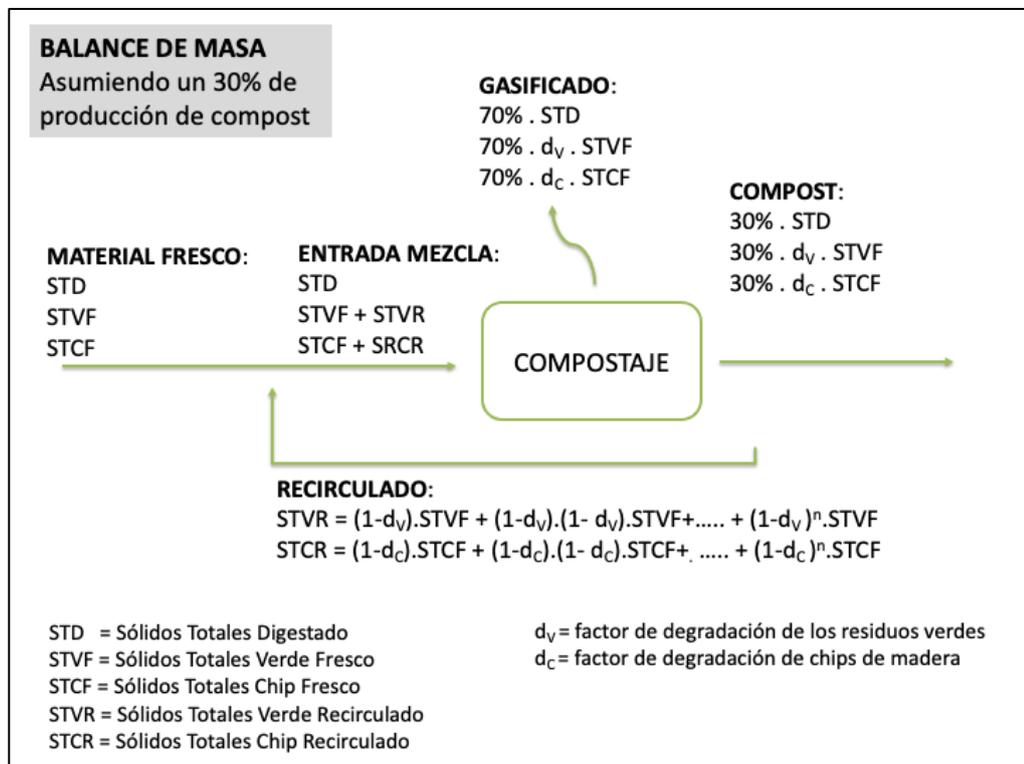
Tabla 17: Reducción de la relación C/N en la etapa de digestión anaerobia

PARÁMETRO	VALOR	FUENTE
C/N Inicio DA	26	Bibliografía residuos domiciliarios
% reducción ST	25%	Dato Bekon
SV/ST	70%	Clarke, 2018
Remoción C	36%	
C/N final DA	17	Asumiendo no se volatiliza N

6.3.1.3 Mezcla digerado – estructurante

Para poder determinar la mezcla de material que ingresa a la planta, se tiene el siguiente balance de masa en base a Sólidos Totales:

Imagen 22: Balance del proceso compostaje



La relación compost – gasificación (tomada en 30%-70%) dependerá de la relación de C/N de entrada al sistema junto a otros factores presentados previamente. Cuanto mayor sea la relación C/N, mayor producción de CO₂ ya que los microorganismos deberán reciclar nitrógeno en procesos aerobios hasta alcanzar la relación C/N deseada en un producto estabilizado. A los efectos de este esquema está tomado un valor ilustrativo para poder comprender de forma más simple el balance.

Los materiales estructurantes presentan una capacidad de degradación diferente del digestado, degradándose en menor cuantía y pudiendo recircularse. La capacidad de degradación en cada batch es lo que se llamará “factor de degradación”, que dependerá nuevamente de los diversos parámetros operacionales del proceso, pero se asume constante para cada tipo de material estructurante. En cada batch se ingresa digestado nuevo y los materiales estructurantes son recirculados degradándose en cada ciclo la fracción correspondiente al factor de degradación.

Por lo tanto, del balance de masa presentado se desprenden las siguientes ecuaciones:

$$STVF + STVR = STVF \sum_{n=0}^{\infty} (1 - dv)^n$$

$$STCF + STCR = STCF \sum_{n=0}^{\infty} (1 - dc)^n$$

Aplicando la fórmula matemática de convergencia siguiente:

$$\sum_{k=0}^{\infty} ar^k = \frac{a}{1-r} \quad \text{para } r \neq 1$$

En este caso siendo $a = 1$, $k = n$ y $r = (1 - dc)$ o $r = (1 - dv)$ se obtiene

$$STVF + STVR = \frac{STFV}{dv}$$

$$STCF + STCR = \frac{STCV}{dc}$$

No se tienen valores de referencia para los factores de degradación dc y dv , pero se asume valores de 60% para los residuos verdes y de 20% para los chip de pallet. Estos valores deberán ser verificados en ensayos posteriores.

Tomando los rangos de parámetros aceptables presentados previamente para el material de entrada a compostaje y los valores iniciales de cada elemento de la mezcla, se realiza una propuesta de mezcla de digestado, material estructurante verde y estructurante reciclado, en base a los valores siguientes y las ecuaciones que se presentan luego.

Tabla 18: Caracterización de material de entrada a compostaje, según composición fisicoquímica

	Factor degradación	Humedad	Densidad (t/m³)	C/N	SV/ST
Digestado	1	71%	0,85	17	0,66
Verde Fresco	0,6	30%	0,28	44	0,90
Chip Fresco	0,2	23%	0,23	1028	0,98
Verde Recirc	0,6	29%	0,36	23	0,90
Chip Recirc	0,2	23%	0,23	900	0,98
RANGO CUMPLIR		50-60%	0,44-0,77	25-35	

Las tres propiedades consideradas que se deben alcanzar son:

- $C/N = \text{masa de carbono} / \text{masa de nitrógeno}$
- $\text{Densidad} = \text{masa de residuo húmedo} / \text{volumen}$
- $\text{Humedad} = \text{masa de agua} / \text{masa de residuo húmedo}$

Al mezclarse los residuos, se asume que no se alteran las propiedades de cada uno, por lo que el nuevo valor corresponde a la suma del numerador de cada uno sobre la suma del denominador. De esta forma, del cociente de ambas sumatorias resulta la propiedad de la mezcla. Por lo tanto, la ponderación es en función del denominador. Para el caso de la densidad y la humedad, son el volumen y la masa de residuo húmedo respectivamente.

Para el caso de la relación C/N, no contamos con la masa de nitrógeno de cada componente pero se propone la siguiente forma de estimarla: la masa de N, es la masa de C dividido por la relación C/N. Los materia orgánica (residuos orgánicos, restos vegetales y chip en este caso) están compuestos principalmente de polisacáridos (celulosa, almidón, etc), lignina y proteínas. Considerando los SV como representación de la materia orgánica y en base a la composición elemental de sus principales componentes, celulosa, lignina, proteínas (donde el carbono representa en masa un 44%, 64% y entre un 50-55% respectivamente), es

razonable asumir que la cantidad de carbono puede estimarse como los sólidos volátiles multiplicados por un factor de 0,5. Por lo tanto, es posible estimar la masa de N como:

$$N = 0,5 \cdot \frac{SV}{C/N}$$

Al ser la humedad, la relación C/N y la densidad de cada elemento parámetros predefinidos, al determinar la cantidad de ST de cada elemento es posible vincular los ST a cada ponderador (volumen, masa húmeda y masa nitrógeno).

Con estas condiciones se obtienen las ecuaciones presentadas a continuación:

$$\frac{C}{N_{mezclaini}} = \sum_i pN_i \cdot \frac{C}{N_i}$$

$$H_{mezclaini} = \sum_i pW_i \cdot H_i$$

$$\rho_{mezclaini} = \sum_i pV_i \cdot \rho_i$$

$$pST_i = \frac{ST_i}{\sum_j ST_j}$$

$$pN_i = \frac{0,5 \cdot \frac{SV}{ST_i} \cdot pST_i / (C/N)_i}{\sum_j 0,5 \cdot \left(\frac{SV}{ST}\right)_j \cdot pST_j / (C/N)_j}$$

$$pW_i = \frac{\frac{pST_i}{1 - H_i}}{\sum_j \frac{pST_j}{1 - H_j}}$$

$$pV_i = \frac{\frac{pW_i}{\rho_i}}{\sum_j \frac{pW_j}{\rho_j}}$$

Siendo

$C/N_{mezclaini}$ = C/N del material de ingreso a la planta de compostaje correspondiente a la media ponderada de C/N de digestado, estructurante verde y estructurante recirculado.

$\rho_{mezclaini}$ = densidad del material de ingreso a la planta de compostaje correspondiente a la media ponderada de densidad de digestado, estructurante verde y estructurante recirculado.

$H_{mezclaini}$ = humedad del material de ingreso a la planta de compostaje correspondiente a la media ponderada de humedad de digestado, estructurante verde y estructurante recirculado

pW_{ioj} = Ponderador de peso húmedo para ioj , siendo ioj digestado, residuos verde fresco, chip fresco, verde recirculado o chip recirculado

pST_{ioj} = Ponderador de sólidos totales para ioj , siendo ioj digestado, residuo verde fresco, chip fresco, verde recirculado o chip recirculado

pN_{ioj} = Ponderador de Nitrógeno para ioj , siendo ioj digestado, residuo verde fresco, chip fresco, verde recirculado o chip recirculado

pV_{ioj} = Ponderador de Volumen para ioj , siendo ioj digestado, residuo verde fresco, chip fresco, verde recirculado o chip recirculado

W_{ioj} = peso húmedo de ioj , siendo ioj digestado, residuo verde fresco, chip fresco, verde recirculado o chip recirculado

ST_{ioj} = peso de sólidos totales de ioj , siendo ioj digestado, residuo verde fresco, chip fresco, verde recirculado o chip recirculado

ρ_{ioj} = densidad del material de ioj , siendo ioj digestado, residuo verde fresco, chip fresco, verde recirculado o chip recirculado

H_{ioj} = Humedad de ioj , siendo ioj digestado, residuo verde fresco, chip fresco, verde recirculado o chip recirculado

$(C/N)_{ioj}$ = relación de carbono sobre nitrógeno de ioj , siendo ioj digestado, residuo verde fresco, chip fresco, verde recirculado o chip recirculado

$\left(\frac{SV}{ST}\right)_{i o j}$ = relación sólidos volátiles sobre sólidos totales de *i o j*, siendo *i o j* digestado, residuo verde fresco, chip fresco, verde recirculado o chip recirculado.

Aplicando este sistema de ecuaciones y buscando lograr el cumplimiento de los valores adecuados de los 3 factores al inicio del proceso, se obtiene el rango 30% a 50% de digestado en términos de ST (Ver Anexo de este documento y planilla excel).

Para definir el dimensionamiento de la planta, se consideran dos condiciones:

- 1) Aquella solución que presente menores costos de inversión y operativos por disminuir el área y por menor cantidad de estructurante. La limitante de estructurante se debe a disponibilidad de residuos verdes y costos de adquisición de chip.
- 2) En segundo nivel, la relación de estructurante/digestado en volumen buscando una relación que mejore las condiciones para asegurar la sanitización del material según se presentó en el capítulo 5, ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS (próximos a 2).

Con estas consideraciones, se tienen las siguientes combinaciones como las más adecuadas.

Tabla 19: Posibles composiciones de material de entrada a compostaje y características fisicoquímica

PONDERADORES EN PESO ST					
Nº combinación	1	2	3	4	5
Digestado	40%	40%	40%	45%	50%
Verde fresco	18%	24%	30%	24%	18%
Verde recirculado	12%	16%	20%	16%	12%
Chip fresco	10%	4%	2%	3%	4%
Chip recirculado	20%	16%	8%	12%	16%
RESULTADO DE LA MEZCLA					
C/N	34,2	30,5	27,4	27,9	28,4
Densidad (t/m ³)	0,47	0,48	0,49	0,51	0,53
Humedad	55%	55%	55%	57%	59%
Estructurante/Digestado en volumen	1,9	1,8	1,8	1,5	1,2

Para el dimensionamiento de la planta se selecciona la opción 1 ya que es una alternativa que permitirá trabajar con distintas mezclas, buscando la más eficiente según las características del material. Se podría tomar la opción 5 reduciendo las unidades de compostaje pero se tendrá menos flexibilidad para ir ajustando las mezclas según el material de ingreso pasando a ser la disponibilidad de unidades el factor limitante. La opción 1 implica un dimensionamiento más conservador aumentando las inversiones y los costos por mayor uso de chip fresco.

Como limitante de este análisis, se destaca que se han fijado los parámetros iniciales de C/N, densidad y humedad así como el factor de degradación. Los valores de C/N pueden presentar rangos de valores muy amplios según el tipo de material utilizado y asimismo, dependen uno de los otros, lo cual presenta un alto nivel de complejidad para su modelación. Cuando se realiza el análisis modificando los valores de C/N significativamente para los estructurantes (primero reducción de un 50% para el verde y el chip y luego hasta un 10% de su valor para el chip) la opción 1 seleccionada permite conservar los parámetros de entrada en los rangos recomendados.

Asimismo, si se modifican los factores de degradación en un 50%, siguen dando resultados válidos para los rangos presentados previamente.

Para seguir ajustando y mejorando este análisis, se requiere la realización de ensayos de verificación que escapan al alcance de la tesis.

Por lo tanto, para la entrada a la planta de compostaje se considera la salida de digestado de la planta de DA, correspondiente a 138 kt/año con 29% de ST según el balance de la etapa anterior (39,8 ktST/año). En base a lo discutido previamente, si el digestado representa el 40% de los ST que ingresan a los módulos de compostaje, se requerirán 59,8 ktST/año de estructurante compuesto por 17,9 ktST/año de estructurante verde fresco, 6,0 ktST/año de chip nuevo, 12,0 ktST/año de verde recirculado y 23,9 ktST/año de chip recirculado.

El estructurante verde fresco en peso húmedo corresponde a 25,6 kt/año, lo cual estaría disponible en la ciudad de Montevideo.

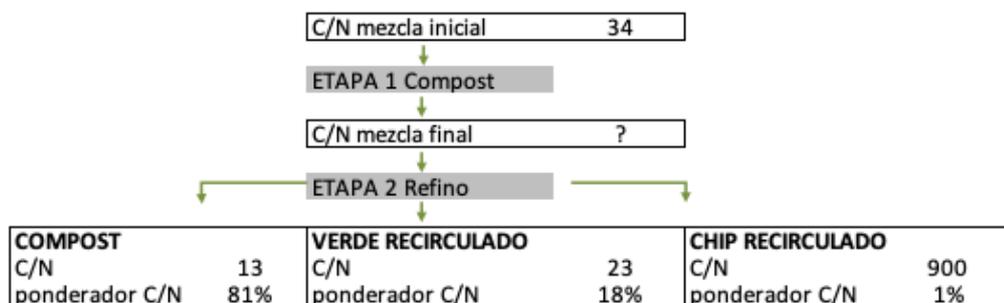
6.3.2 Remoción de ST en compostaje

El proceso de compostaje está compuesto por dos etapas: i) el compostaje en si mismo donde se dan los procesos de degradación de la materia orgánica y ii) la etapa de refino, donde se separan mediante cribado el compost producido y el material estructurante que no se ha degradado y puede ser recirculado.

Al no contar con referencias bibliográficas aplicables a este caso para la remoción de ST, se realiza una estimación a partir de la calidad del compost que se desea obtener y de la caracterización asumida para el digestado y para las corrientes de estructurantes, aunque tal estimación debe ser interpretada con precaución dada la incertidumbre de los supuestos subyacentes. Dentro de los diversos parámetros que debe cumplir un compost considerado maduro, se resalta la relación C/N como un buen indicador.

La relación de C/N en un compost de calidad adecuada luego del proceso de refino debe ser entre 10 y 15 según la bibliografía consultada (Moreno Casco & Moral Herrero, 2008). A los efectos de los cálculos, se toma el valor meta a alcanzar en 12,5, que se debe obtener luego del proceso de refino.

Imagen 23: Esquema de relaciones de C/N en proceso compostaje



El valor a definir es el llamado "C/N mezcla final". Su determinación puede realizarse por dos caminos: i) por el % de remoción de ST de la etapa 1 o ii) por una ponderación de los valores de la etapa 2, de la misma forma que se realizó la determinación de la mezcla de entrada. Esto nos permitirá definir el % de remoción de ST de la etapa 1 de compostaje. Por lo tanto, se procederá a realizar una iteración que permita igualar el valor de C/N mezcla final por un camino o por el otro.

El camino 1, correspondiente a la aplicación directa del % de remoción de ST se rige nuevamente con el concepto de que se remueven principalmente los SV, que se vinculan principalmente a la remoción de C, ya que se considera poco significativa la volatilización del N. Por lo tanto, es posible considerar que la remoción de SV es una buena aproximación a la remoción de C. En base al valor SV/ST, es posible vincular la relación C/N de partida y la relación C/N a obtener al final de la etapa de compostaje.

- $\% \text{ remoción } SV_{compost} (\text{remoción } C) = \frac{\% \text{ remoción } ST_{compost}}{\left(\frac{SV}{ST}\right)_{mezclainicial}}$
- $\frac{C}{N_{mezclafinal}} = (1 - \% \text{ remoción } SV_{compost}). \frac{C}{N_{mezclainicial}}$

siendo

$C/N_{mezclainicial}$ es el resultado de la mezcla inicial de digestado y estructurante

$C/N_{mezclafinal}$ es el valor luego de la etapa 1 de compostaje.

$\% \text{ remoción } ST_{compost}$ son los ST removidos en la etapa 1 de compostaje

$\% \text{ remoción } SV_{compost}$ son los SV removidos en la etapa 1 de compostaje

$\left(\frac{ST}{SV}\right)_{mezclainicial}$ corresponde a la relación de mezcla inicial de digestado y estructurante

Mediante el camino 2, la relación "C/N mezcla final" resulta de la ponderación por la cantidad de N del compost final obtenido y del material estructurante a recircular. El ponderador de N cumple la misma relación hallada para la etapa de mezcla del material de ingreso.

$$\frac{C}{N_{mezclafinal}} = pN_{compost} \cdot \frac{C}{N_{compost}} + pN_{Vrecir} \cdot \frac{C}{N_{VR}} + pN_{Crecir} \cdot \frac{C}{N_{CR}}$$

$$pN_i = \frac{\frac{SV}{ST}_i \cdot pST_i / (C/N)_i}{\left(\frac{SV}{ST}\right)_C \cdot pST_C / (C/N)_C + \left(\frac{SV}{ST}\right)_{VR} \cdot pST_{VR} / (C/N)_{VR} + \left(\frac{SV}{ST}\right)_{CR} \cdot pST_{CR} / (C/N)_{CR}}$$

$$pST_i = \frac{ST_i}{ST_C + ST_{VR} + ST_{CR}}$$

Siendo i , compost o recirculado.

$\frac{C}{N_i}$ es el valor de la relación C/N de i , siendo i compost, verde recirculado y chip recirculado

ST_i son los ST de i , siendo i compost, verde recirculado y chip recirculado

pST_i = Ponderador de sólidos totales para i , siendo i compost, verde recirculado y chip recirculado

pN_i = Ponderador de Nitrógeno para i , siendo i compost, verde recirculado y chip recirculado

Por lo tanto, es necesario realizar un proceso iterativo, iniciado con el % de remoción de ST de la etapa de compostaje como variable de ajuste de la iteración.

Tabla 20: Parámetros y resultados del proceso de iteración para el cálculo de la remoción de ST en la etapa de compostaje

Cálculo de remoción para obtener C/N requerido en la mezcla compostada	
C/N Inicio Digestado+Estructurante	34
% remoción ST compost (Parámetro de ajuste)	25%
SV/ST mezcla inicial (ponderando por ST de opción 1)	83%
Remocion SV (remocion C)	30%
C/N mezclafinal Compost + Estructurante (parámetro de verificación)	23,91
Cálculo de C/N requerido en la mezcla compostada para obtener C/N = 13 en el compost	
pC/N VR	19%
pC/N CR	10%
pC/N Compost	80%
C/N compost	12,5
C/N mezclafinal Compost + Estructurante(parámetro de verificación)	23,7

Como puede observarse de la Tabla 20, se obtiene un 25 % de remoción de sólidos totales para la etapa de compostaje previa al refino.

Utilizando los ST de la mezcla (99,6 ktST/año), se obtienen 74,7 ktST/año previo a la etapa de refino.

Nuevamente se realiza el balance de agua, teniendo en cuenta los ST obtenidos luego de la etapa de compostaje. Se tiene el dato de agua de entrada, de salida y por diferencia el agua perdida durante el proceso.

6.3.3 Etapa de refinó

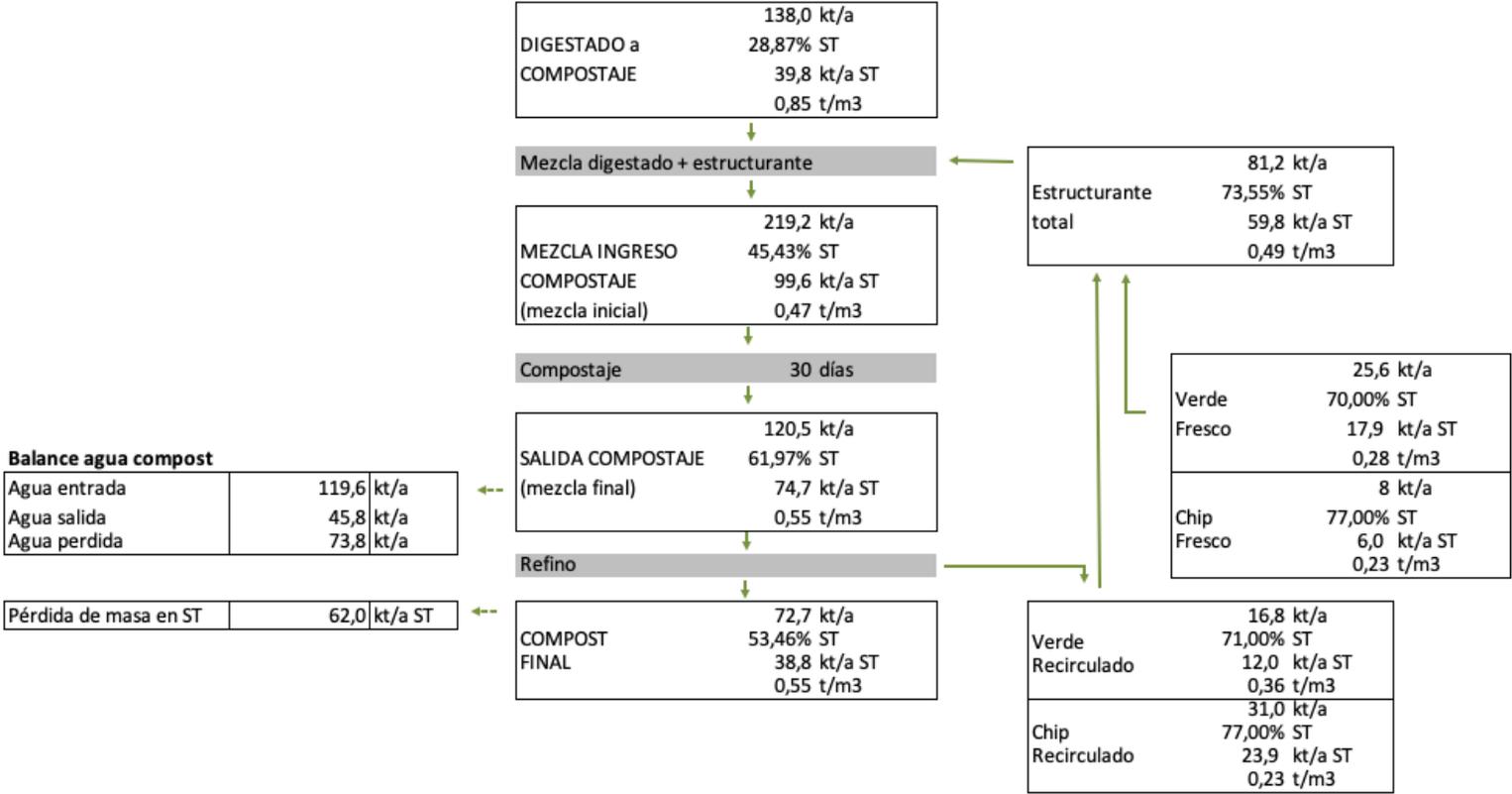
En la etapa final del proceso, se realiza el refinamiento del material donde se recupera el material estructurante en base a la composición de la mezcla inicial que ingresa al proceso de compostaje. Según lo presentado previamente, deberá clasificarse en base al tamaño de cada tipo de estructurante. Según el factor de degradación de material estructurante durante la etapa 1 de compostaje, podrá ser necesario acumular estructurante recirculado o reponer con mayor cantidad de estructurante verde fresco. Siempre buscando obtener mezclas a compostar que permitan un producto de buena calidad y un uso eficiente de los módulos de compostaje.

En esta etapa también se separan las impurezas presentes originalmente en los residuos domiciliarios o material estructurante (plásticos, metales no ferrosos, piedras, etc) siendo muy variable este valor en función de la respuesta de la población y por ende de la calidad del material de entrada.

6.3.4 Balance de masa de etapa de compostaje

A continuación, puede observarse los balances de esta etapa:

Imagen 24: Balance de sólidos totales, agua y residuos húmedos de la etapa de compostaje



6.3.5 Dimensionamiento de unidad compostaje

Para el diseño de la planta de compostaje, se toma el volumen de mezcla a procesar. Para ello se considera la cantidad de mezcla de digestado más estructurante fresco y recirculado en base a la combinación seleccionada, obteniendo un volumen de $469 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{año}$

Teniendo en cuenta que es un material de alta degradabilidad ya pretratado en la etapa de digestión anaerobia, se establece un tiempo de 4 semanas (28 días) de compostaje (Cataluña, 2016), sumando 2 días de llenado y 1 de vaciado, lo que lleva a 31 días de ocupación de cada línea. Considerando 365 días al año, se necesitarán 12 ciclos de compostaje por año. Con el volumen obtenido para compostar y tomando las dimensiones de cada una de las líneas propuesta por el proveedor de tecnologías Eggersmann (10 metros de ancho por 95 metros de largo y 2,5 metros de alto), se requerirán 16 líneas de compostaje. Con estas dimensiones y asumiendo un 50% de espacio para circulación, se obtiene un área de 2.3 hectáreas.

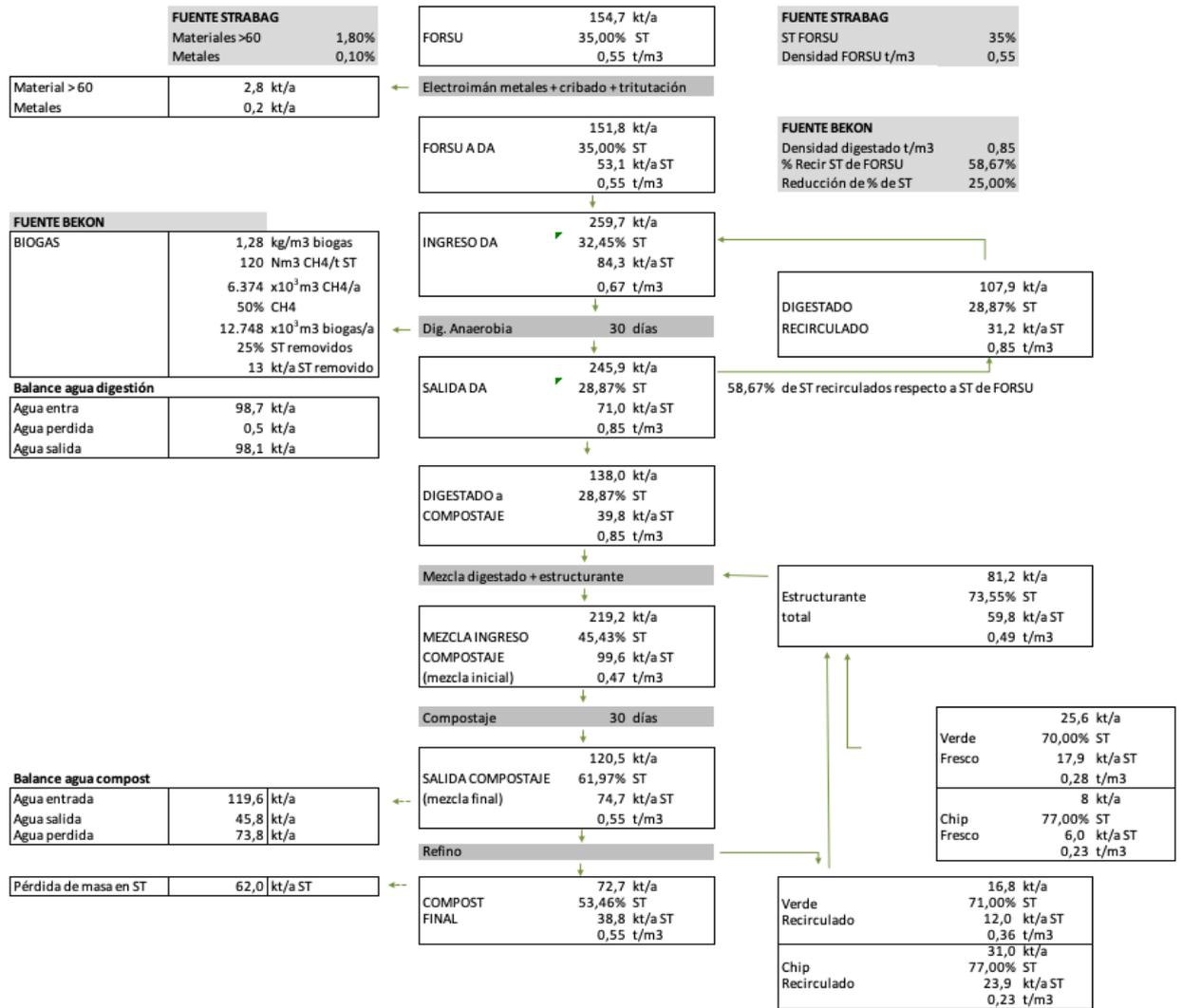
Estos valores deberían ajustarse en ensayos piloto en base a digestado proveniente de digestión anaerobia seca tipo batch. Esto podrá implicar ajustes en los tiempos de compostaje así como la incidencia del material estructurante. En la combinación definida, se recupera un alto % de estructurante, lo cual es razonable con tiempos de compostaje más cortos ya que dicho material no está predegradado como el digestado y además se considera tiene un menor factor de degradabilidad por lo que le llevaría mayor tiempo lograr que se degrade y se incorpore al digestado ya compostado.

Si se modifican la cantidad de estructurante y digestado, se modifican también la cantidad de líneas de compostaje. Se podría incorporar más líneas de forma de tener un respaldo, un mecanismo de redundancia o se podría contar con mayor espacio de acopio de los residuos y estructurante, con la consecuencia de mayores olores y lixiviados.

6.4 Resultados globales y discusión

En base a las modelaciones presentadas previamente se obtiene el siguiente balance de masa del sistema:

Imagen 25: Balance de masa de la planta propuesta



En base al balance global del sistema, se obtienen los siguientes indicadores generales del proceso:

Tabla 21: Indicadores globales del proceso

Peso Compost/Peso FORSU+estructurante	39%
Remocion global ST	50%

Teniendo en cuenta el digestado más el material estructurante ingresado, al final del proceso, el compost representa 39% en peso húmedo. La remoción global de ST de ambos procesos es de 50% lo que se considera un valor razonable.

Los residuos que ingresan a los procesos biológicos suelen presentar un porcentaje de impurezas inorgánicas (plásticos, multilaminados e inertes no removidos al inicio) que puede ser variable según la adhesión de la población y las características de la composición de residuos. En los procesos presentados, aunque son inconvenientes para la calidad del producto final, estos materiales pueden presentar ventajas al sistema al permitir una mayor aireación del material, por lo que se suele remover al final del proceso. A los efectos del balance ingresan y salen en una misma cantidad, no representando una variable que afecte significativamente el proceso por lo que no fueron incluidos en los cálculos.

El ejercicio realizado para el dimensionamiento de las plantas es teórico y considerando la complejidad e interdependencias de las variables, se requeriría realizar ensayos de verificación que escapan al alcance de la tesis.

El rango adecuado para la relación C/N, depende de múltiples factores. En particular de la biodisponibilidad del C y del N y de la capacidad de adsorción y fijación del nitrógeno en el material estructurante. Asimismo, se asume una relación C/N fija en los restos verdes y en el recirculado. Este último valor dependerá del primero y de las condiciones del proceso.

Por otra parte, la remoción de ST en el compostaje se está fijando con la condición de lograr una relación C/N dada en el compost. Pero cada valor de remoción requiere distinto tiempo de compostaje. Si se exige mayor remoción al compostaje se necesitará mayor tiempo de procesamiento, el cual dependerá también del % de recirculación de estructurante. En definitiva, una vez definido el % de remoción requerido en el compostaje y la composición de entrada habrá que ajustar el tiempo de procesamiento. Para el dimensionamiento de la

planta se asumió un tiempo de procesamiento, pero como se indicó deberá verificarse a escala piloto.

7 LOCALIZACIÓN

Para la localización de este tipo de emprendimientos, no existen normativas nacionales o locales que establezcan criterios de restricción ni de aptitud. Sin embargo, deben presentar una Viabilidad Ambiental de Localización (VAL) y obtener una Autorización Ambiental Previa (AAP) ante las autoridades ambientales (Decreto 345/005) según el volumen de residuos que procesará la planta. En este marco, la autoridad ambiental (MVOTMA/DINAMA) podrá establecer ciertas condiciones teniendo en cuenta normativas internacionales o en base a condiciones nacionales particulares. Según el tamaño de los emprendimientos existen distintos tipos de permisos a tramitar:

- **> o igual a 10 ton/día requiere AAP y Autorización Ambiental de Operación (AAO)** siempre. Si ya tiene AAO, entonces deberá presentar ampliación de AAP y luego tramitar la AAO. (Decreto 349/005)
- **< a 10 ton/día** autorización DINAMA literal d), art. 25 Dec. 182/013 como operador de residuos

Además si se procesa > 1 ton/día residuo deben presentar plan de gestión de residuos sólidos ante DINAMA (RM 1708/013) y DJ anuales.

Los criterios referentes a la localización que solicita la DINAMA para operadores de plantas de compostaje son los siguientes¹⁶:

- *La zonas seleccionadas no deben ser susceptibles de inundación y en el caso de instalaciones de > 10 ton/día de procesamiento, se deberá indicar distancias a zonas sensibles (cuerpos de agua, vecinos, tomas de agua, etc.), etc, priorizando por lo menos 150 m de un receptor sensible (por ejemplo, hospitales, iglesias, escuelas, hogares de ancianos), 100 m de padrones residenciales, 150 m de pozos activos, cuerpos de agua, humedales naturales o artificiales. En caso de no cumplimiento proponer una medida de mitigación y se analizará.*

¹⁶ Información suministrada por la Unidad de Gestión de Proyecto de Biovalor – www.biovalor.gub.uy en base a intercambios con la DINAMA

- *Especificar las características del suelo del área de recepción y del área de compostaje a los efectos de garantizar una impermeabilidad del piso del área de recepción y compostaje de por lo menos 60 cm de espesor con una conductividad hidráulica igual o menor a 1×10^{-7} cm/s o sistema equivalente para emprendimientos que procesen más de 10 ton /día o 1×10^{-5} cm/s para menor a 10 ton/día. Incluir el plan de control de calidad del paquete impermeable.*
- *Tener en cuenta que la superficie de las áreas de proceso debe graduarse para llevar la escorrentía superficial a los desagües de recolección. El grado debe estar entre 2 y 4 por ciento para proporcionar una caída suficiente y para evitar la erosión causada por caudales excesivos. Estas áreas deben drenar al sistema de recolección de agua de contacto en las instalaciones.*
- *Evaluar el impacto de la potencial generación de olores y medidas de mitigación previstas considerando la localización del emprendimiento.*

A nivel de bibliografía internacional, las recomendaciones para instalaciones de digestión anaerobia encontradas se resumen en las Tabla 22 y Tabla 23:

Tabla 22: Criterio a considerar para ubicación de instalaciones de biogás

CRITERIO	DESCRIPCIÓN
Uso actual y futuro de la tierra	La planificación del ordenamiento territorial y la coexistencia con proyectos a futuro. El uso actual de la tierra, por ejemplo, si está próximo a instalaciones industriales es mejor que en las cercanías de un área residencial. (Epp et al., 2008; Ma et al., 2005; Sultana & Kumar, 2012)
Área disponible	El sitio propuesto debe contar con espacio adecuado para las instalaciones propuestas. Se deben considerar posibles expansiones. (Sultana & Kumar, 2012).
Existencia de redes de servicio básico	Se debe tener especial cuidado con restricciones vinculadas a instalaciones subterráneas o servidumbres por instalaciones de servicios públicos. (Sener et al., 2011)
Uso del biogás e impacto en los ahorros energéticos	Según el tipo de uso del biogás (energía eléctrica o uso térmico) las condiciones podrían variar. El aprovechamiento del biogás (térmico, eléctrico o biometano) debe ser considerado localmente (Thompson et al., 2013).

CRITERIO	DESCRIPCIÓN
Proximidad a la generación de residuos	Cuanto más cercana al punto de generación de residuos mejor para minimizar costos de transporte. (Amigun & von Blottnitz, 2010; Kumar, 2013)
Derechos de propiedad	Se debe contar con un claro historial de la propiedad de la tierra para evitar conflictos a futuro. (Epp et al., 2008)
Proximidad al punto de aplicación del digestado	El digestado puede ser utilizado como enmienda orgánica para la agricultura o recuperación de áreas degradadas. Sin embargo, debe ser utilizado de forma segura y es recomendable disminuir las distancias para su aplicación. (Amigun & von Blottnitz, 2010; Sivanagaraju et al., 2010)
Condiciones del suelo	Evitar zonas rocosas para disminuir los costos de excavación y construcción. (Sener et al., 2011)
Accesibilidad al sitio	Cercanía a rutas y vías accesibles para camiones. (Sener et al., 2011).
Proximidad al punto de uso del biogás	Para el traslado de combustibles gaseosos es necesario comprimirlos teniendo en cuenta que cuanto mayor distancia se recorra, mayores pérdidas de presión. (Amigun & von Blottnitz, 2010)
Relacionamiento con los vecinos	La instalación debe contar con la menor resistencia de la población y se deberán tomar las medidas necesarias para la sensibilización e involucramiento. (Mwirigi et al., 2014)

Fuente: R. Kigozia , A. O. Aboyade B and E. Muzendac, *Technology selection and siting of a biogas plant for OFMSW via multi-criteria decision analysis.*

Tabla 23: Criterio a considerar para ubicación de instalaciones de compostaje y biogás

CRITERIO	Distancia mayor a
Línea de propiedad	15 a 50 m
Tuberías de saneamiento o conducciones de agua	30 m
Cuerpos de agua y aguas subterráneas	100 m
Pozos de agua de privados o fuentes de agua potable	150 m
Viviendas	300 m
Hoteles, restaurants, establecimiento de procesamientos de alimentos, escuelas, Iglesias, o parques públicos	300 m
Instalaciones industriales o comerciales	300 m
Tanques de agua	300 m
Aeropuertos	8 km

Fuente: Technical Document on Municipal Solid Waste Organics Processing, Environment Canadá, 2013

En el departamento de Montevideo y área metropolitana, en el marco del diseño de un Plan Director de Residuos se realizaron estudios para la localización de sitios de disposición final

(Fitchner & LKSur, 2003). De allí surge en primera instancia la zona del actual sitio de disposición final Felipe Cardoso como primera opción (a pesar de no cumplir todas las restricciones) y en segunda instancia, el sitio ubicado en las proximidades de Camino de los Agrónomos y Camino Belloni. Si estos sitios son adecuados para disposición final de residuos, serían zonas habilitadas para una planta de recuperación de materiales junto con digestión anaerobia o compostaje. Se seleccionan estas dos alternativas considerando un abordaje conservador ya que las restricciones para sitios de disposición final de residuos son mayores que para otro tipo de instalaciones.

Una tercera alternativa podría ser la actual ubicación de la planta de compostaje Tesor, ya que recibe cotidianamente residuos industriales y se encuentra en una zona rural del departamento con espacio para ampliación.

A los efectos de elegir entre estas tres alternativas, se priorizarán los siguientes criterios:

- Proximidad a ramales de gas natural para inyección del biometano a menor costo
- Zona con menor resistencia de la población circundante teniendo en cuenta los problemas de olores
- Minimización del recorrido entre la recolección y el destino de los residuos recolectados para minimizar costos y tiempos
- Proximidad a áreas productivas donde utilizar el compost

Para realizar el análisis según estos criterios se presenta la siguiente imagen con la información necesaria para la evaluación:

Imagen 26: Ubicación de 3 alternativas de localización y ramales de gas natural



Fuente: elaboración propia

Allí puede observarse que los predios en la zona de Camino de los Agrónomos se encuentran muy alejados de los ramales de gas natural para realizar la conexión. Tresor y Felipe Cardoso se encuentran en similar condición.

Respecto a las posibles resistencias de los vecinos, Felipe Cardoso es la zona con mayor cercanía a zona urbana, sin embargo, es el sitio donde actualmente se realiza la disposición de residuos de todo el departamento con población que ya presenta un cierto nivel de tolerancia a esta actividad; por lo tanto a la hora de evaluar, se considera que estos aspectos serían compensados. En la zona de TRESOR ya se encuentra este emprendimiento de compostaje, pero con una frecuencia de camiones acotada. En el caso de desarrollar el emprendimiento en esta zona, aumentaría el tránsito de camiones recolectores lo que podría generar algunos inconvenientes y requerirían una revisión del estado de las vías de acceso al sitio.

Para analizar la proximidad a la mayor generación de residuos, apuntando a ser más eficiente la etapa de traslado de lo recolectado al sitio, se observa en la Imagen 26 que Felipe Cardoso

se encuentra mucho más cercano al centro de gravedad de la zona urbana, por lo que se tienen menores costos de traslado de la materia orgánica.

Para la venta del compost, los predios de Tesor y Camino de los Agrónomos son más adecuados por su proximidad a la zona rural del departamento y en particular a la zona metropolitana de producción hortifrutícola en el departamento de Canelones (ver capítulo 7.3).

Se debe tener en cuenta la relación entre las distancias y los volúmenes a transportar, considerando la reducción significativa de volumen obtenida luego del tratamiento biológico propuesto. El mayor volumen a trasladar se da en la etapa de recolección y con camiones especiales colectores de residuos, por lo que sería razonable priorizar una zona próxima a la zona urbana a efectos de minimizar los costos asociados al transporte.

Estas observaciones se resumen en la Tabla 24:

Tabla 24: Evaluación de criterios para ubicación de la planta en 3 alternativas

	Felipe Cardoso	Tesor	Cno de los Agrónomos
Ramales gas natural	+	+	-
Resistencia vecinos	0	-	-
Minimización recorridos	+	0	-
Proximidad a puntos de entrega de material	-	0	0

Por lo tanto, se selecciona la zona cercana a Felipe Cardoso, donde existen diversos padrones que podrían ser utilizados para este fin:

Imagen 27: Padrones en la zona de Felipe Cardoso



Si se superponen con algunos aspectos ambientales y sociales como saneamiento, troncales de agua potable y centros educativos se obtiene la siguiente imagen:

Imagen 28: Saneamiento, agua potable y educación en la zona de Felipe Cardoso



Fuente: elaboración propia

Puede observarse que se cumplen algunas de las recomendaciones encontradas en bibliografías y referencias de criterios de otros países. Se superan los 300 metros de distancia a centros poblados, centros educativos, hospitales, hoteles y restaurantes. Asimismo, es relevante la existencia de vías de acceso adecuadas para el tipo de tránsito que se generará en la zona. Se recuerda que es una zona que tendrá menor resistencia de los vecinos por la situación existente vinculada a la presencia del relleno sanitario de la ciudad desde hace ya varias décadas.

Los aspectos a tener especialmente en cuenta son la proximidad a cursos de agua y de la troncal de OSE. Asimismo, otro aspecto que no se cumple en la actualidad y seguirá siendo un tema sensible, es la distancia a aeropuertos, siendo de aproximadamente 5 kilómetros, inferior a los 8 km recomendados.

Por lo tanto, a pesar de no ser un sitio de condiciones óptimas, la zona de Felipe Cardoso es la más adecuado desde el punto de vista logístico y donde se tendría menor resistencia de la

población cumpliendo con gran parte de las condiciones restrictivas recomendadas en referencias internacionales.

8 REDUCCIÓN DE EMISIONES

El objetivo de este capítulo es evaluar el potencial del sistema respecto a la reducción de emisiones de calentamiento global, en el marco del contexto global y el compromiso país asumido en las NDC (Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional provenientes del Acuerdo de París).

Los límites del sistema considerado se vinculan a los 2 productos obtenidos y los productos que sustituyen, teniendo en cuenta el foco de sustitución y reuso de recursos que propone la economía circular. Los elementos considerados para la estimación de emisiones:

1. Biometano reemplaza gas natural importado
2. Enmienda orgánica reemplaza nitrógeno importado

Cabe señalar que no son tenidas en cuenta las emisiones vinculadas a la recolección diferenciada que serán mayores a las estimaciones actuales por aumentar el número de camiones. En un escenario optimista y de alta penetración de estrategias de economía circular, sería posible manejar como hipótesis una recolección en base a camiones eléctricos (batería o celdas de combustible); teniendo en cuenta que la matriz eléctrica nacional con un porcentaje mayor al 90% renovable y factor de emisión muy bajo (14 g_CO_{2eq}/kWh según BEN, 2018) las emisiones vinculadas a la recolección en base a camiones eléctricos no serían significativas.

En general se toma la metodología de las Directrices del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change de Naciones Unidas) de 2006, para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Existen tres niveles de precisión para la estimación de emisiones. El Nivel 1 que utiliza factores de emisión por defecto del IPCC, el Nivel 2 utiliza los factores de emisión específicos del país basado en mediciones representativas y el Nivel 3 se basa en mediciones hechas en las instalaciones o específicas del sitio (continuas o periódicas). Por el tipo de información disponible a nivel nacional y por el alcance de este estudio, se utilizará el Nivel 1.

Como fórmula general se utiliza la siguiente:

$$Emisiones\ CO_2, CH_4\ o\ N_2O = \sum_i (M_i * FE_i) * 10^{-3}$$

Donde

- Emisiones de CO₂/ CH₄/ N₂O = total de emisiones de CO₂/ CH₄/ N₂O durante el año en toneladas año
- M_i = Masa de residuos orgánicos sometidos al tratamiento *i* en toneladas año o masa de material producido
- FE_i = factor de emisiones de tratamiento *i* o de producción del material *i* en gramos de CO₂/kg de residuos o material/ en gramos de CH₄/kg de residuos o material/ gramos de N₂O/kg de residuo o material

En el caso del CH₄ y el N₂O estos valores deben ser convertidos a CO₂ equivalente a los efectos de poder contar con un indicador único comparable. El GWP (Global Warming Potential) se define como el efecto de calentamiento integrado a lo largo del tiempo que produce hoy la liberación instantánea de 1 kg de gas de efecto invernadero en comparación con el causado por el CO₂. Puede ser calculado para periodos de 20, 100 o 500 años siendo 100 años el valor más habitual. Los GWP 100 utilizados para el presente estudio son los siguientes tomados del IPCC Fourth Assessment Report (AR5) del año 2017:

Tabla 25: Factores conversión potencial de calentamiento global

	VALOR	UNIDAD
CO ₂	1	kg CO _{2eq} /kg CO ₂
CH ₄	28	kg CO _{2eq} /kg CH ₄
N ₂ O	265	kg CO _{2eq} /kg N ₂ O

8.1 Emisiones CO₂ equivalente digestión anaerobia

Durante el proceso de digestión anaerobia se considera las emisiones generadas durante la operación de la planta y por la sustitución en el consumo del gas natural. Durante el proceso de digestión parte del biogás generado se pierde debido a fugas. Se toma este valor de pérdidas en el entorno del 5% (Woess-Gallasch et al., 2010) y (Pipatti et al., 2006), para la estimación de las emisiones del sistema. Según las directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (Pipatti et al., 2006), las emisiones de N₂O son despreciables. Aplicando este porcentaje, a la cantidad de CH₄ generado y el factor de emisión de CO_{2eq} del metano, se obtiene las emisiones directas de esta etapa.

Por otra parte, al sustituir el gas natural, en su uso se sustituye la quema de carbono de origen fosil liberandolo a la atmósfera como CO₂. Por lo tanto se tiene una reducción de emisiones por sustitución de este combustible. Para calcular esta reducción se toma como referencias el documento del IPCC, 2006, Volumen 2: Energía, Cuadro 1.4: "Factores de emisión de CO₂ por defecto para la combustión" (Gómez et al., 2006) donde se obtiene un factor de emisión de 201 gCO₂ /kWh. Teniendo en cuenta que el poder calorífico del gas natural de 9,6 kWh/m³ y el volumen de biometano generado, es posible estimar la reducción de emisiones anuales.

Para ellos es necesario estimar la densidad del biometano. Se aplica nuevamente la Ley de los Gases Ideales, asumiendo una composición de 96% CH₄ y 4% CO₂, obteniendo una densidad de 0,76 kg/m³

Tabla 26: Cálculo de la densidad del biometano

BIOMETANO	Composición volumen	Peso Molecular (g/mol)
CH4	96%	16
CO2	4%	44
H2O	0%	18
Peso molecular promedio biometano		17
POR LEY DE GASES IDEALES		
Presion	101.325	Pascal
R	8,314	J/K.mol
Temp	273	°K
Densidad	0,76	kg/m ³

La diferencia entre las emisiones por pérdida de la planta y las emisiones evitadas por quema de biometano en vez de gas natural, se obtienen las emisiones netas de la etapa de digestión anaerobia.

Tabla 27: Emisiones CO₂ equivalente por digestión anaerobia

EMISIONES DA	VALOR	UNIDAD	FUENTE/COMENTARIO
Cantidad CH ₄ generado	6.374	x10 ³ Nm ³ CH ₄ /año	Capítulo 6
Cantidad biometano para inyectar a la red	5.099	X10 ³ Nm ³ biometano/año	Capítulo 6
Pérdidas plantas DA	5%		((Woess-Gallasch et al., 2010) y (Pipatti et al., 2006)
Densidad CH ₄	0,76	kg/m ³	Composición biometano
PCI Gas Natural	9,6	kWh/m ³	
Factor emisión Gas Natural	201	gCO ₂ /kWh	IPCC, 2006, Volumen 2: Energía, Cuadro 1.4: "Factores de emisión de CO ₂ por defecto para la combustión" Gas Natural
Emisiones CH ₄ por planta biogás	6,78	ktCO ₂ eq/año	
Emisiones evitadas de gas natural	- 9,84	ktCO ₂ eq/año	
Emisiones netas DA	- 3.06	ktCO₂eq/año	

En plantas que capten las pérdidas y fugas de metano, quemando las mismas en una antorcha, se pueden reducir significativamente las emisiones por pérdidas (Pipatti et al., 2006).

8.2 Emisiones CO₂ equivalente por compostaje

En base al "Capítulo 4: Tratamiento biológico de los desechos sólidos" de las Directrices del IPCC de 2006, (Pipatti et al., 2006) se calculan las emisiones de CO₂ equivalente durante el compostaje.

Las emisiones y reducciones en esta etapa se vinculan a:

- Emisiones por procesos de anaerobiosis que llevan a emisiones de CH₄, así como de óxido nitroso por la propia degradación de la materia orgánica.
- Reducción por el uso de la enmienda orgánica generada por el compostaje sustituyendo el uso de fertilizantes inorgánicos y por lo tanto reduciendo las emisiones generadas durante la fabricación de este producto. Como se presentó previamente, las enmiendas orgánicas proveen NPK en menores cantidades y otros elementos como micronutrientes y materia orgánica. A los efectos del presente estudio, se considerarán las emisiones provenientes por la sustitución de nitrógeno (N).

Respecto a las emisiones por anaerobiosis, en este caso se trata del compostaje de un digestado que ya ha pasado por una etapa de digestión anaerobia, por lo tanto, ya es menor su capacidad de generar metano y óxido nitroso. Por otra parte, el proceso propuesto es muy controlado, con volteo seguido y aireación por lo que es de esperar que se minimice cualquier forma de anaerobiosis.

El Nitrógeno es fundamental para el crecimiento vegetal, pero debe encontrarse en condiciones adecuadas para su aprovechamiento y minimizar las pérdidas por lixiviación y volatilización. Las transformaciones químicas que sufre el N son la amonificación, nitrificación y desnitrificación. En la primera etapa, la amonificación del grupo R-NH₂ presente en la materia orgánica consiste en la mineralización del N formando NH₃ (amoníaco). El amoniaco puede: i) ser disuelto (con H₂O) en NH₄⁺ (amonio) e inmovilizado por los microorganismos o ii) volatilizado cuando el pH y la temperatura son elevados o iii) en la nitrificación, en condiciones aerobias da lugar a la producción de NO₃⁻ (nitrato). En la desnitrificación, se reduce el nitrato a N₂ en baja presencia de oxígeno (Moreno Casco & Moral Herrero, 2008). Junto a estos dos últimos procesos (nitrificación y desnitrificación) se genera N₂O (óxido nitroso) en menor cuantía.

Teniendo en cuenta que se trata de un residuo semidigerido, se toman los valores mínimos dentro los rangos de valores propuestos por (Pipatti et al., 2006): 0,03 g de CH₄/kg de residuo húmedo y 0,06 g de N₂O/kg de residuos húmedo.

Ingresa al proceso de compostaje digestado más estructurante (219,2 kt/año) por lo que aplicando estos valores y el factor de conversión a CO₂eq se obtienen 0,18 ktCO₂eq/a por biometano y 3,49 ktCO₂eq/a por óxido nitroso. Es claro que el valor determinante viene dado por el óxido nitroso pero sobre todo considerando el factor de conversión a CO₂eq (265 kg CO₂eq/kg N₂O)

Respecto a la sustitución de fertilizante sintético, se debe tener en cuenta la cantidad de nitrógeno presente en la enmienda orgánica obtenida. Para ello se utiliza el dato de C/N del compost (12,5) y en base a la cantidad estimada de carbono, se determina la cantidad de N. La cantidad de carbono, se encuentra relacionada a la cantidad de sólidos volátiles, dato que no se tiene determinado en el compost. Para ello, se realizará un balance de masa de los sólidos fijos durante el proceso de compostaje utilizando los valores considerados en el

dimensionamiento de las unidades de compostaje y el mix de materiales a compostar (digestado, residuos verdes y chip). Se utilizan los ST y la relación SF/ST (calculada como $1 - SV/ST$) de digestado, residuos verdes frescos y chip fresco en los productos de entrada. Respecto a la salida, del compost se cuenta con el dato de ST y en base al balance se obtiene el dato de los SF y por lo tanto de los SV del mismo:

Tabla 28: Balance de masa de sólidos fijos en la etapa de compostaje

ENTRADAS	C/N	SV/ST	ST (kt/a)	SF/ST	SF (kt/a)
Digestado	17,0	0,7	39,8	0,34	13,5
Verde Fresco	44,0	0,9	17,9	0,10	1,8
Chip Fresco	1028,0	1,0	6,0	0,02	0,1
TOTAL Entradas					15,5

↓

COMPOST					
----------------	--	--	--	--	--

↓

SALIDAS	C/N	SV/ST	ST (kt/a)	SF/ST	SF (kt/a)
Total salidas: Compost	12,5	?	38,8	?	15,5

Con estos valores, se obtiene un valor de 15,5 kt/a de SF y por lo tanto 0,40 SF/ST y 0,60 SV/ST.

En base a las 38,8 kt/a de ST del compost, se obtiene un cantidad de 23,4 kt/a de SV. Utilizando la relación C/SV utilizada anteriormente (aproximadamente 0,5) se tiene 11,7 ktC/a, con una relación C/N de 12,5 que determina una cantidad de **0,94 ktN/a**.

Este elemento podría sustituir la aplicación de Urea, que según (Skowrońska & Filipek, 2014) tiene un factor de emisión en la producción y aplicación de Urea de 1,59 kg CO_{2eq}/kg de N. Por lo tanto, se tendría una reducción de 1,49 ktCO_{2eq}/a.

Por lo tanto, por diferencia entre las emisiones generadas durante el proceso de compostaje y las reducidas por sustitución de fertilizantes, la emisiones totales del compostaje serían 2,18 ktCO_{2eq}/a.

Tabla 29: Emisiones CO₂ equivalente por compostaje

	VALOR	UNIDAD	FUENTE/COMENTARIO
Cantidad de residuos a compostaje	219,2	kt/a	Digestado + estructurante
Cantidad de Nitrogeno Total	0,94	ktN/a	
Emisión CH ₄ por anaerobiosis en compostaje	0,03	g CH ₄ /kg residuo	IPCC 2016, (Pipatti et al., 2006)
Factor de emisión directa de óxido nitroso por compostaje	0,06	g_N ₂ O/kg residuo	IPCC 2016, (Pipatti et al., 2006)
Factor de emisión asociado al fertilizante sintético sustituido	1,59	g_CO ₂ eq/kg_N	(Skowrońska & Filipek, 2014)
Emisiones CH ₄ por anaerobiosis en compostaje	0,18	ktCO ₂ eq/a	cálculo
Emisiones directas N ₂ O por compostaje	3,49	ktCO ₂ eq/a	cálculo
Emisiones evitadas asociado fertilizante sintético	-1,49	ktCO ₂ eq/año	cálculo
Emisiones netas del compostaje	2,18	ktCO ₂ eq/año	cálculo

8.3 Emisiones CO₂ equivalente en relleno sanitario

En los hipótesis de cálculo realizadas, se asume una clasificación en 3 fracciones con una eficiencia de recolección de 72,5% en orgánicos y valores más altos en reciclables (valores alcanzados en la ciudad de Liubiana como referencia). Por lo tanto, existirá una fracción de residuos que continuará disponiéndose en relleno sanitario. Dentro de esta fracción, si se descuenta lo recuperado en la recolección selectiva de orgánicos y los reciclables que no se logran recolectar con alto potencial de degradabilidad (papel y cartón no reciclado), se tendrán 74,4 kt MO/año.

Se asume que en el relleno sanitario el biogás es captado y convertido en CO₂ por quema (situación actual del relleno sanitario de Montevideo), sin embargo según referencias internacionales (Camargo & Vélez, 2009), entre 40 y 50% del biogás generado por descomposición de materia orgánica en los rellenos sanitarios no es captado y por lo tanto emitido al ambiente. Asimismo, los mismos autores proponen una composición de biogas con un 55% de metano y una tasa de generación de 200 Nm³ biogas/t de materia orgánica en las condiciones de un relleno sanitario. La densidad del metano es de 0,66 kg/m³ en condiciones normales. Las emisiones por quema del biogás en antorcha son consideradas neutras (McDougall & White, 2004).

Tomando en cuenta estas consideraciones y el factor de conversión de metano a CO_{2eq} presentado previamente, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 30: Emisiones por pérdidas de biogás en relleno sanitario

	VALOR	UNIDAD	FUENTE/COMENTARIO
Cantidad de materia orgánica	74,35	kt MO/año	según composición
Indicador de conversión de biogas en relleno sanitario	200	Nm ³ biogas/t MO	Camargo 2009
% de CH ₄ en biogás	55%		Camargo 2009
Cantidad CH ₄ generado	8.179	x10 ³ Nm ³ CH ₄ /a	
% biogás no recuperado en relleno	50%		Camargo 2009
CH ₄ generado	4.089	x10 ³ Nm ³ CH ₄ /a	
Densidad CH ₄	0,66	kg/m ³	
Emisiones relleno sanitario	75,23	kt CO _{2_eq} /a	

8.4 Emisiones CO₂ equivalente en escenario BAU

A los efectos de comparar la solución propuesta con la situación actual, se estiman las emisiones de relleno sanitario con captura de biogás como se gestiona actualmente en el departamento de Montevideo (Business as Usual).

Tomando la totalidad de los residuos domiciliarios de Montevideo (521,2 kt/año) y su composición (40,9% de orgánico) y papel y cartón (19,1%), se obtiene un cantidad de residuos orgánicos de 312,7 ktMO/año.

En base a estas consideraciones y los supuestos tomados en el capítulo anterior, las emisiones de CO₂ equivalente si se continuara disponiendo los residuos en un relleno sanitario con captura del biogás serán las siguientes:

Tabla 31: Emisiones relleno sanitario con captura biogás

	VALOR	UNIDAD	FUENTE/COMENTARIO
Cantidad de materia orgánica	312,7	Kt MO/a	según composición
Indicador de conversión de biogás en relleno sanitario	200	Nm ³ biogás/t MO	Camargo 2009
% de CH ₄ en biogás	55%		Camargo 2009
Cantidad CH ₄ generado	34.401	x10 ³ Nm ³ CH ₄ /a	
% biogás no recuperado en relleno	50%		Camargo 2009
CH ₄ generado	17.200	x10 ³ Nm ³ CH ₄ /a	
Densidad CH ₄	0,66	kg/m ³	
Emisiones relleno sanitario	316,4	kt CO ₂ _eq/a	

8.5 Resumen emisiones

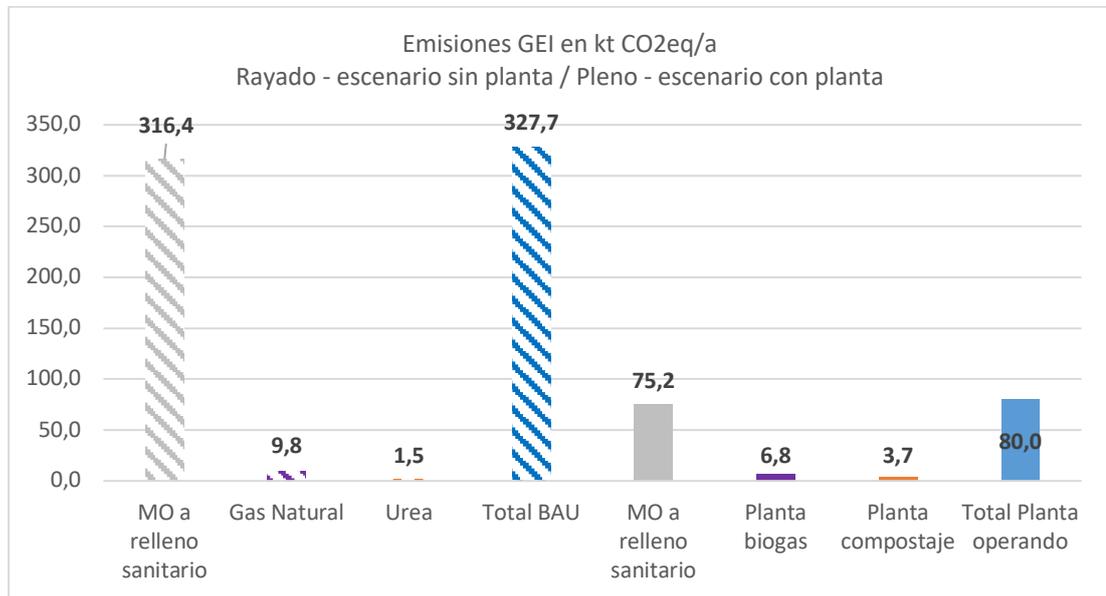
Teniendo en cuenta los distintos sistemas, se es posible comparar dos escenarios en lo referente a las emisiones de CO₂ equivalente.

Tabla 32: Emisiones de GEI con y sin planta

ESCENARIO SIN PLANTA			ESCENARIO PLANTA OPERANDO		
MO a relleno sanitario	316,4	ktCO ₂ eq/a	MO a relleno sanitario	75,2	ktCO ₂ eq/a
Gas Natural	9,8	ktCO ₂ eq/a	Planta biogás	6,8	ktCO ₂ eq/a
Urea	1,5	ktCO ₂ eq/a	Planta compostaje	3,5	ktCO ₂ eq/a
Total BAU	327,7	ktCO ₂ eq/a	Total	85,5	ktCO ₂ eq/a

Al considerar las emisiones evitadas respecto a las emisiones actuales en relleno sanitario y por sustitución de otros consumos, el beneficio en cuanto a reducción de emisiones es significativo, de aproximadamente 247,7 ktCO₂eq/a.

Imagen 29: Gráfico resumen de emisiones de CO₂ eq



Según el inventario nacional de gases de efecto invernadero elaborado por el MVOTMA (MVOTMA, 2017), el sector “Desechos” ha presentado un valor de emisiones entre los años 1990 y 2017 de 719,56 a 1.091,08 kt de CO₂ eq (GWP100, AR2 – ver en Visualizador de Inventario de Gases de Efecto Invernadero - <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/sistema-informacion-monitoreo>). Por lo tanto, la planta propuesta podría ser un aporte significativo a la reducción de emisiones del sector desecho.

Este valor podrá ser significativo en lo referente al compromiso asumido en la NDC (Contribución Nacional Determinada) en el sector “Desechos” (incondicional y condicional) al 2025 respecto al año 1990 pudiendo ser un elemento facilitador para acceder a financiamiento por parte del sector público o privado para este tipo de inversiones.

9 ASPECTOS ECONÓMICOS

Respecto a los aspectos económicos, se realiza una prefactibilidad económica de la planta propuesta. Para ello se utiliza la metodología de flujo de fondos como herramienta para evaluar la conveniencia de realizar ciertas inversiones a nivel privado. A los efectos de esta tesis, se realiza desde el punto de vista de un operador privado responsable de la inversión y operación de la planta.

Se realiza un análisis con y sin impuestos, obteniendo un valor de TIR (Tasa Interna de Retorno) y VAN (Valor Actual Neto) del proyecto para cada situación.

Para poder realizar este análisis, es necesario estimar:

- Inversiones
- Costos
- Ingresos

A efectos de partir de algunos datos de referencia se toman en cuenta los valores presentados en el Global Waste Management Outlook realizado por UNEP e ISWA:

Tabla 33: Costos e inversión de referencia para las tecnologías propuestas

Tecnologías (datos 2012)	Costo neto ⁽¹⁾ (USD/ton)	Inversión ⁽²⁾ (millones de USD)
Compostaje en hileras de fracción orgánica recolectada selectivamente	25 a 70	13 a 20
Compostaje en reactores/Digestión anaeróbica de fracción orgánica recolectada selectivamente	65 a 120	25 a 50

Fuente: (Wilson, United Nations Environment Programme, & International Solid Waste Association, 2017)

Notas: (1) para países de ingresos medios a ingresos altos; (2) La inversión refiere a una planta tipo con una capacidad de 100.000 ton/año.

9.1 Inversiones

Las inversiones corresponden principalmente a obras civiles, equipamiento, terreno y el gasoducto de conexión a la red de gas natural.

En lo que refiere a equipamiento de DA y Compostaje se obtuvieron cotizaciones realizadas para América Latina de 2 empresas privadas de referencia en su rubro:

- Digestión anaerobia: BEKON planta de 42 digestores (BEKON, 2019b)
- Compostaje: EGGERSMANN planta de 18 líneas de compostaje (Eggersmann, 2019)

Las instalaciones dimensionadas en el presente estudio son muy similares a las cotizaciones de referencia por lo que se considera que presentan un buen nivel de aproximación para el presente trabajo (40 biodigestores y 17 líneas de compostaje).

Para la planta de purificación de biogás se utilizaron datos bibliográficos que incluyen todos los valores de inversión (costos por m³/h de biometano por cantidad generada en la planta propuesta).

Por otra parte, es necesario sumar equipos móviles menores (montacargas, camiones, camionetas) y las obras necesarias para la conexión eléctrica a la red de UTE¹⁷, los cuales fueron estimados en base a experiencias similares.

Para las obras civiles se tomaron las áreas estimadas en los capítulos precedentes y se sumaron 2 Há para recepción de material, tránsito camiones, oficinas, vestuarios, acondicionamiento del material totalizando aproximadamente 6 Há. Dentro de las 2 Há se asume 1 Há de galpones ya que la mayor parte de las tecnologías propuestas no requieren de área techada. Los costos unitarios de obras civiles y galpones son tomados de cotizaciones de plaza.

Para la inversión en terreno se consideran 8 Há de forma de poder tener una franja verde como contención visual y de olores y se utilizan cotizaciones en la zona del proyecto.

¹⁷ Para poder conectarse al sistema interconectado nacional (SIN) se debe presentar un anteproyecto de conexión (allí se describen las obras de extensión, ampliación o modificación necesarias para conectarse a la red de UTE así como los puestos de conexión y medida) y firmar un convenio con UTE.

Finalmente es necesario incluir una inversión en el gasoducto para conexión a la red de gas natural existente (distancia aprox 1,5 km). Para ello se obtuvo la cotización para el último proyecto de gasoducto a nivel nacional (Gas Sayago) según datos de ANCAP, del orden de los 70 millones de dólares para 13 kilómetros.

Estos valores se resumen en la Tabla 34:

Tabla 34: Resumen de inversiones

RUBRO	MONTO millones de USD	FUENTE
Equipamiento DA	16,8	BEKON
Equipamiento compostaje	3,8	Eggersmann
Unidad de purificación	2,8	4.165 USD/(m ³ /h de biometano). Technische Universität Wien, 2012
Equipos móviles	1,0	Estimación propia
Obra de conexión red de UTE	0,5	UTE según otros proyectos de referencia
Obra civil	17,6	Relevamiento de plaza 294 USD/m ² para aprox 60.000 m ²
Galpones	5,4	Relevamiento de plaza 537 USD/m ² para aprox 10.000 m ²
Terreno	1,2	Precios de mercado en Carrasco Norte para 8 Há
Gasoducto	8,1	70 millones por 13 km (ANCAP, para Gas Sayago). 1,5 km en este caso
TOTAL	57,2	

9.2 Costos operativos

Para la estimación de los costos operativos, se tienen los siguientes rubros:

- Costos de remuneraciones de personal
- Costo de energía
- Otros gastos

En lo que refiere a salarios, se diferencia entre cargos gerenciales, jefaturas y técnicos y operarios, tomando valores medios que podrán variar según el nivel de responsabilidad. Se toma en cuenta el salario nominal y los aportes patronales, así como otros conceptos como aguinaldo y salario vacacional.

Respecto a la energía eléctrica, se toma en cuenta el pliego tarifario de UTE como Gran Consumidor 3, teniendo en cuenta precio de energía, de potencia contratada y cargo fijo. A efectos de simplificar, para los costos por energía y potencia, se estima un promedio ponderado en base a las horas de la triple tarifa.

Se propone una disponibilidad de planta de 97% equivalente a 354 días de operación al año. Los 11 días de diferencia corresponden a mantenimientos y reparaciones.

En lo que refiere a otros gastos operativos, se toma para cada año del proyecto un porcentaje de las inversiones en equipamiento y obra civil, correspondiente a un 2%.

En el caso de la unidad de purificación de biogás, se toma el dato de (Technische Universität Wien, 2012) correspondiente a 0,108 USD/m³ biometano. Por la cantidad de biometano generado, se obtiene un costo de 552.201 USD/año.

Tabla 35: Supuestos base para el cálculo de costos de operación y mantenimiento

	VALOR	UNIDAD	FUENTE/COMENTARIO
Costo remuneración cargo gerencial	5.400	USD/mes	Nominal + patronales
Costo remuneración cargo/jefatura	3.500	USD/mes	Nominal+patronales
Costo remuneración cargo operario	1.800	USD/mes	Nominal+patronales
Meses al año de salario	13,50	Meses/año	Aguinaldo + vacacional
Precio energía eléctrica	0,08	USD/kWh	Pliego tarifario UTE 2021; CG3, (promedio ponderado por horas punta, valle y llano)
Precio potencia contratada	2,13	USD/kW	Pliego tarifario UTE 2021; CG3, (promedio ponderado por horas punta, valle y llano)
Cargo fijo	324	USD/mes	Pliego tarifario UTE 2021; CG3
Otros gastos operativos	2%		2% de inversión en obra civil y equipamiento

9.2.1 Digestión Anaerobia

El estudio “Centro de digestión anaeróbica” de (EISA, Ingeniería, 2017), realiza un dimensionamiento para una planta del doble de la capacidad de la definida en el marco de esta tesis. Teniendo en cuenta esta diferencia de escala, se toman los valores de referencia en lo que refiere a:

- Personal necesario
- Consumos eléctricos

Para la cantidad de personal necesario se adaptó proponiendo la siguiente composición:

Tabla 36: Personal considerado para la planta de digestión anaerobia

PERSONAL	Total	Categoría
Gerente	1	Gerencial
Jefe de operaciones (1 por turno)	2	Gerencial
Operador de maquinaria	4	Operario
Técnicos (1 por turno)	2	Operario
Técnico de mantenimiento (1 por turno)	2	Jefatura/técnico
Técnico de laboratorio (1 por turno)	2	Jefatura/técnico
Personal administrativo (1 por turno)	2	Jefatura/técnico

Según (EISA, Ingeniería, 2017) la potencia de la planta propuesta (el doble de capacidad que la de este estudio) es del orden 700 kW y un consumo en simultáneo de un 20%. El consumo responde a los bombeos para el sistema de percolación, sistema de biogás, ventilación, inyección de aire y misceláneos como oficinas (14% de la potencia). Si se mantiene los consumos de oficina y se disminuyen proporcionalmente los demás consumos, se puede estimar que la potencia necesaria será del orden de los 450 kW. Manteniendo una demanda simultánea de 20% y con una disponibilidad de planta de 97%, se obtiene la energía consumida en aproximadamente 760.000 de kWh/año.

En la Tabla 37 se resumen los costos de operación y mantenimiento considerados:

Tabla 37: Costos de operación y mantenimiento de Planta Digestión Anaerobia

	VALOR	UNIDAD	FUENTE/COMENTARIO
Cargo gerencial	3	personas	Adaptado de EISA, 2017
Cargo jefatura/técnico	6	personas	Adaptado de EISA, 2017
Cargi operario	6	personas	Adaptado de EISA, 2017
Potencia instalada	450	kW	Adaptado de EISA, 2017
Consumo EE	764.640	kWh/año	20% de la potencia instalada, EISA, 2017
COSTOS OPERATIVOS DA	1.154.930	USD	
Mano de obra	648.000	USD/año	Costos salariales por personal
Energía eléctrica	75.105	USD/año	Cargo por potencia, por energía y cargo fijo Gran Consumidor 3
Otros gastos de operación	431.825	USD/año	2% anual de equipos y obra civil

9.2.2 Planta de compostaje

En base a los resultados del capítulo 6, se dimensiona una planta con un número de líneas de compostaje necesarias es similar a la propuesta tecnico-económica para compostaje marca Bakhaus (Eggersmann, 2019) por lo tanto se tomaron como fuente para los valores de inversión, el área necesaria, la cantidad de personal de necesario y energía consumida presentado en dicha propuesta.

En esta etapa se deben sumar los costos de compra de material estructurante, a un valor de 5 USD/m³ según precios de plaza. Este valor puede variar según el tipo y origen del chip, pudiendo inclusive utilizar un residuo industrial como los pallets sin tratar rotos o en desuso.

Respecto al personal se asume que se compartirán recursos de administración, laboratorio y gerencial general con la planta de digestión anaerobia por lo que no se cuenta nuevamente:

Tabla 38: Personal considerado para planta de compostaje

PERSONAL	Total	Categoría
Jefe de Planta	1	Gerencial
Supervisor	2	Jefatura/técnico
Operador de máquina	2	Operario
Operador de pala cargadora	2	Operario
Operarios	4	Operario

La potencia instalada será de 170 kW con una simultaneidad de 70%. Con una disponibilidad de planta de 97%, se obtiene la energía consumida en aproximadamente 1 millón de kWh/año.

Tabla 39: Costos de operación y mantenimiento de Planta Compostaje

	VALOR	UNIDAD	FUENTE/COMENTARIO
Cargo gerencial	1	personas	Adaptación propuesta Eggersmann
Cargo jefatura/técnico	2	personas	Adaptación propuesta Eggersmann
Cargo operario	8	personas	Adaptación propuesta Eggersmann
Potencia instalada	170	kW	Propuesta Eggersmann
Consumo EE	1.011.024	kWh/año	70% de la potencia instalada, Eggersmann
COSTOS OPERATIVOS COMPOSTAJE	702.023	USD	
Mano de obra	361.800	USD/año	Costos salariales por personal
Costo estructurante	38.805	USD/año	Cantidad de estructurante por precio
Energía eléctrica	87.171	USD/año	Cargo por potencia, por energía y cargo fijo Gran Consumidor 3
Otros gastos de operación	214.247	USD/año	2% equipos y obra civil

9.3 Ingresos

Las fuentes de ingreso del sistema propuesto provienen de distintas fuentes:

1. Venta de metales
2. Venta del biometano
3. Venta de la enmienda orgánica
4. Tasa de gestión

En base al flujo de fondos presentado más adelante y la experiencia internacional, el modelo de negocio requiere del pago de una tasa por la gestión de los residuos procesados en la planta, que se llamará “Tasa de gestión” (en la bibliografía suele llamarse Tipping fee o Gate fee). Por lo tanto, para la modelación del flujo, se toma un valor de referencia a nivel internacional y luego se analiza la sensibilidad del modelo a esta variable y otras.

Para el precio de los metales para reciclaje se toma los precios en plaza según CEMPRE (Compromiso Empresarial para el Reciclaje), teniendo un valor de 130 USD/ton.

Para el costo del gas natural, se toma el valor sugerido por el área de Hidrocarburos de la DNE, teniendo en cuenta el precio histórico de este recurso y su importación desde Argentina.

Como se señaló previamente, según el informe *“Relevamiento del mercado uruguayo del compost y otros insumos orgánicos”* (Benzano & Zaha, 2020), en base a datos de varias empresas nacionales de compostaje de residuos agropecuarios e industriales, el precio de venta del compost común se encuentra en el entorno de los 36-182 USD/ton y el mercado potencial es cercano a los 20.000 m³/a. Si se comercializara a valores menores a los insumos en competencia con el compost (entre 12 y 34 USD/ton), podría competir y apunta a un mercado potencial estimado en 90.000 m³/a.

Según el dimensionamiento realizado, se obtendrían con la planta propuesta unas 132.000 m³/a de compost. Por lo tanto, considerando que la calidad del compost obtenido pueda ser menor y priorizando la venta del material, se toma como valor conservador 10 USD/ton y se asume que será posible vender un 50% del compost y el resto sería donado.

Tabla 40: Datos de partida para Ingresos del sistema propuesto (gas, compost y servicio)

	VALOR	UNIDAD	FUENTE/COMENTARIO
Precio gas natural	0,26	USD/Nm ³	Dato proporcionado por DNE, Área Hidrocarburos. Valor conservador
Precio compost	10	USD/ton	Precio sustancialmente menor que el mercado por supuesto de calidad del material
% de compost vendido	50%		Se estima que no todo el material podrá ser vendido. El restante es donado
Costo del servicio	60	USD/ton	Se toma como valor de referencia en base a valores internacionales y buscando una primera aproximación a un modelo rentable de proyecto

En función de las cantidades producidas en la planta (ver balance de masa), los ingresos serán los siguientes:

Tabla 41: Resumen de ingresos del sistema propuesto

	VALOR	UNIDAD	FUENTE/COMENTARIO
Venta de metales	20.112	USD/año	
Compost/enmienda orgánica	363.328	USD/año	cálculo
Biometano	1.325.792	USD/año	cálculo
Servicio de gestión	9.282.559	USD/año	cálculo

9.4 Flujo de fondos

Con los datos presentados previamente es posible realizar el flujo de fondos para estimar el TIR y el VAN del proyecto.

Para ello se toman los siguientes supuestos financieros, de uso habitual en proyectos de inversión:

Tabla 42: Valores generales para cálculo de flujo de fondos

	VALOR	UNIDAD	FUENTE/COMENTARIO
Duración del proyecto	20	años	
Vida útil obra civil	50	años	Supuesto financiero, tasa de interés de financiamiento para Uruguay
Vida útil equipamiento	20	años	
Vida útil equipos móviles	10	años	
Tasa interés financiamiento	6%	100% financiamiento externo	

Al ser un proyecto de gestión privada, pagará los impuestos y se asume que es un proyecto que aplicaría a la Ley de Promoción de Inversiones (Nº 16.906), promulgada para la promoción y protección de las inversiones realizadas en el territorio nacional. Dicha ley fue reglamentada vía diversos decretos, siendo el aplicable a esta situación el Decreto 143/018 del 22 de mayo de 2018¹⁸. Los beneficiarios de los estímulos a las inversiones específicas son aquellas empresas de cualquier sector de actividad que sean sujetos pasivos de IRAE y que presenten un proyecto de inversión y que el mismo sea promovido por el Poder Ejecutivo. Los proyectos de inversión deben presentarse en la Comisión de Aplicación de la Ley de Inversiones (COMAP) y el beneficio de exoneración del IRAE es por un monto y plazo máximo que resulta de aplicar la matriz de indicadores:

El otorgamiento del beneficio por exoneración del IRAE está supeditado al puntaje obtenido en la matriz de indicadores elaborada por la COMAP en base a información proporcionada por el inversor. Los indicadores que componen la matriz de estos proyectos son:

- Generación de empleo.
- Descentralización.
- Aumento de las exportaciones.
- Utilización de tecnologías limpias.
- Incremento de investigación y desarrollo e innovación.
- Indicador Sectorial.

El presente proyecto generaría puntaje en la matriz por “Generación de empleo”, “Tecnologías Limpias” e “Indicador Sectorial”. En consulta con el estudio M&E Consultores, referentes en proyectos de inversión a presentar a la COMAP, con el presente proyecto se podría recibir un beneficio fiscal de un 60% de IRAE durante 12 años (esto puede variar en base a reglamentaciones que emita la COMAP). En base al flujo de proyecto, esto representaría un beneficio cercano al millón de USD de exoneración de IRAE por año.

¹⁸ En el año 2020 se aprueba un nuevo decreto con indicadores que podrían beneficiar aún más el proyecto.

Con los supuestos y las consideraciones presentadas, a continuación se presentan un flujo de fondos del proyecto (sin impuestos) y desde la mirada del inversionista (con impuestos y aplicación a Ley de Promoción de Inversiones).

Tabla 43: Flujo de fondos sin impuestos

Millones de USD	Año																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
INVERSIÓN INICIAL	-57,2									-1,0										
Terreno	-1,2																			
Inversión obra civil y galpones	-22,9																			
Gasoducto	-8,1																			
Inversión equipamiento	-24,0																			
Inversión equipos móviles	-1,0									-1,0										
INGRESOS		11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0
Venta reciclables		0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Venta compost		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Venta biometano		1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Servicio de gestión		9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3
EGRESOS		-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1
Mano de obra		-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0
Operación&Mantenimiento		-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4
Amortizacion obra civil		-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
Amortización equipamiento		-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2
Amortización equipos móviles		-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
RESULTADO OPERATIVO		6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9
FLUJO de FONDOS del PROYECTO (sin imp.)	-57,2	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	5,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9
TIR del proyecto	10%																			
VAN del proyecto	\$17,8																			

Tabla 44: Flujo de fondos con impuestos y aplicación de Ley de Promoción de Inversiones

Millones de USD	Año																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
INVERSIÓN INICIAL	-57,2									-1,0										
INGRESOS		10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7
EGRESOS		-4,0	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0
IMPUESTOS																				
IRAE (25%)		1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,47	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72
Imp. Patrimonio (1,5% del saldo de lo invertido menos lo amortizado)		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09
Devolución Impuestos (COMAP) - 60% EERR, PmL y empleo		-1,03	-1,03	-1,03	-1,03	-1,03	-1,03	-1,03	-1,03	-0,88	-1,03	-1,03	-1,03							
IRAE luego devolución		0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,59	0,69	0,69	0,69	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72
RESULTADO OPERATIVO luego IRAE y devolución		6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,3	6,2	6,2	6,2	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1
FLUJO de FONDOS del PROYECTO (con imp.)	-57,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,3	6,2	6,2	6,2	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1

TIR del proyecto c/imp	8%
VAN del proyecto c/imp	\$8,5
PAYBACK en años	9,3

Del flujo realizado, se observa que con una tasa de gestión cercana a los 60 USD/ton, se obtiene un retorno razonable cercano al 8%. Este valor dependerá del precio del compost, de la cantidad que es posible comercializar, del precio que pueda obtenerse por biometano y del monto final de las inversiones. En este contexto se realiza un análisis de factibilidad a efectos de ver cuanto podrían impactar estas variables en la rentabilidad del negocio.

9.5 Análisis de sensibilidad

A los efectos de analizar la sensibilidad del estudio de prefactibilidad realizado, se analizan los siguientes casos:

1. el valor del TIR al variar la tasa de servicio y el precio del compost
2. el valor del TIR al variar el precio del gas (biometano)
3. el valor del TIR al variar la inversión

El valor de la TIR debe ser mayor a la tasa de financiamiento (6%) para que el proyecto sea viable. Se marcan en rojo aquellos valores que se consideran no aceptables para un inversionista privado por ser una TIR menor a 8% aunque podría ser aceptable para una inversión del sector público.

Tabla 45: Sensibilidad de la TIR al varia la tasa de servicio y precio del compost

TIR	8%	TASA DEL SERVICIO (USD/ton)				
		45	50	55	60	65
PRECIO COMPOST(USD/ton)	0	1,7%	3,7%	5,5%	7,3%	8,9%
	5	2,2%	4,2%	6,0%	7,6%	9,3%
	10	2,7%	4,6%	6,4%	8,0%	9,6%
	12	2,9%	4,8%	6,5%	8,2%	9,8%
	20	3,6%	5,4%	7,2%	8,8%	10,3%

Tabla 46: Sensibilidad de la TIR al varia la tasa de servicio y precio del gas

TIR	8%	TASA DEL SERVICIO (USD/ton)				
		45	50	55	60	65
PRECIO GAS (USD/m ³)	0,15	1,2%	3,2%	5,1%	6,8%	8,5%
	0,20	1,9%	3,9%	5,7%	7,4%	9,0%
	0,26	2,7%	4,6%	6,4%	8,0%	9,6%
	0,30	3,2%	5,1%	6,8%	8,5%	10,0%
	0,35	3,8%	5,7%	7,4%	9,0%	10,5%

Tabla 47: Sensibilidad de la TIR al varia la tasa de servicio y la inversión

TIR	8%	TASA DEL SERVICIO (USD/ton)				
		45	50	55	60	65
INVERSIÓN (millones USD)	45	5,6%	7,8%	9,8%	11,8%	13,6%
	50	4,3%	6,3%	8,2%	10,0%	11,8%
	55	3,1%	5,1%	6,9%	8,6%	10,2%
	60	2,1%	4,0%	5,7%	7,3%	8,9%
	65	1,2%	3,0%	4,7%	6,2%	7,7%

Como es de esperarse, el modelo es muy sensible a los precios a la tasa del servicio ya que representa el mayor porcentaje de los ingresos. Sin embargo, el precio de los compostables o del gas no presenta una gran variación. En lo que refiere a las inversiones, se observa mayor sensibilidad:

- Si se fija la tasa de servicio y varía el precio del compost o del gas, al TIR varía entre 1 y 3 puntos porcentuales.
- Si se fija algunos de los precios o la inversión y se varía la tasa de servicio, la TIR varía entre 7 y 8 puntos porcentuales.
- Si se fija la tasa de servicio y varía la inversión, la TIR varía entre 4 y 7 puntos porcentuales

Este modelo no incluye el costo de recolección ni de transporte de los productos obtenidos para su venta. Se asume que los mismos serán entregados y retirados en planta respectivamente.

El valor de 60 USD/ton para el costo del servicio, que debiera ser pago por la Intendencia, parece adecuado ya que se encuentra en los valores de las franjas de referencias internacionales y con un periodo de repago adecuado, del entorno de los 9 años. Por lo tanto, este tipo de proyectos son atractivos para un operador privado en el contexto nacional y a ser considerado por la Intendencia teniendo en cuenta los costos de disposición en relleno sanitario suelen superar los 20 USD/ton (ONU Medio Ambiente, 2018)

10 CONCLUSIONES

El trabajo realizado muestra la factibilidad y condiciones necesarias para la implantación de un sistema de valorización de los residuos orgánicos de la ciudad de Montevideo en el marco de una economía circular.

El marco elegido de la economía circular determina la selección de la tecnología de valorización de residuos ya que, al basarse en los principios propuestos por este nuevo paradigma, es necesario priorizar el aprovechamiento de los recursos para ser utilizados en otros procesos productivos. Por lo tanto, al buscar soluciones para los residuos orgánicos generados en los hogares, se seleccionaron tecnologías que permiten recuperar nutrientes, materia orgánica, así como energía.

Las preguntas iniciales fueron respecto al dimensionamiento de una planta que permita un mayor aprovechamiento de materia orgánica, nutrientes y energía, así como su posible localización. Cuales serían los órdenes de inversión y costos y su aporte a la reducción de emisiones en el marco de los compromisos de cambio climático.

Se identifica que uno de los principales desafíos es lograr el cumplimiento de la normativa nacional para enmiendas orgánicas ya que, si la clasificación en origen no es estricta, se podrían tener limitantes por la presencia de metales pesados. Por otra parte, será necesario ir generando un mercado para este tipo de producto a los efectos de poder canalizar su venta.

Por lo tanto, la primera conclusión relevante es respecto al peso e importancia de la recolección selectiva para asegurar la calidad de una enmienda orgánica obtenida que pueda ser utilizada para fines agropecuarios. Es indiscutible priorizar acciones tendientes a mejorar la recolección selectiva en origen en vez de una clasificación posterior de los residuos orgánicos luego de la recolección mezclada. Si esta condición no se cumple no tiene sentido realizar una inversión como la planteada ya que no se podrán utilizar uno de los principales productos obtenidos por no cumplir las exigencias de calidad.

Para estimar la eficiencia de recolección selectiva, se analizaron distintas ciudades a nivel global, identificando una ciudad con alto nivel de adhesión de la población y con una planta de recuperación de materiales que permita tomar estos datos como hipótesis para

el caso de Montevideo. Se tomó el caso de Liubliana en Eslovenia, referente y reconocida dentro de las ciudades europeas.

Los residuos orgánicos recolectados de forma diferenciada, sumados a una planta donde se realiza un proceso de digestión anaerobia seguida de compostaje, permitirán obtener energía y una enmienda orgánica de calidad adecuada para su comercialización. Teniendo en cuenta la situación de la matriz energética nacional, con más de un 97% de energía eléctrica renovable (considerando el periodo 2016-2019), se propone la producción de biometano para su inyección a la red de gas natural, sustituyendo la importación de dicho gas. Alternativamente, sería posible utilizar el gas para uso vehicular, en particular en la flota de camiones recolectores de residuos, cerrando de forma óptima el círculo del sistema (esta última alternativa no fue estudiada).

Una decisión clave es la selección de las tecnologías a aplicar ya que existen distintas posibilidades. Algunas de ellas más eficientes y con mayor penetración en el mercado, pero con diversos desafíos operacionales a resolver. Por otra parte, tecnologías más simples requieren menores valores de inversión y es menos compleja su operación, pero se tienen menores eficiencias. Se seleccionó una combinación de tecnología seca tipo batch para la digestión anaerobia, basada en los diseños de la empresa Bekon; para el compostaje se selecciona la propuesta de la empresa Eggersman, de trincheras cerradas con aireación y volteo.

No se hallaron referencias bibliográficas ni experiencias con esta combinación de tecnologías, por lo tanto, fue necesario modelar distintas condiciones en base a las características fisicoquímicas del material que ingresa a la planta. En una siguiente etapa del estudio, sería recomendable realizar estudios de laboratorio o a nivel piloto para poder ajustar algunos de los parámetros considerados, de modo de poder ajustar el diseño.

Respecto al dimensionamiento realizado, se identifica que, en la etapa de digestión anaerobia, se debe realizar una importante recirculación de digestado para inoculación del proceso. Es una tecnología más robusta, con menores problemas operacionales, aunque con menor producción de biogás y requerirá mayor mano de obra que las tecnologías de digestión continua.

Para la etapa de compostaje, se requiere la mezcla del digestado obtenido de la etapa anterior con material estructurante para asegurar las condiciones apropiadas para el proceso; en este caso se seleccionó residuos verdes (restos de podas y jardinería, maderas, etc) como forma de valorizar otra corriente de residuos urbanos junto a chips de madera. Asimismo, estos materiales estructurantes se reciclan ya que tiene menor degradabilidad que el digestado y es posible recuperar parte de este material en la etapa de refinado al final del proceso (esto permite disminuir la cantidad de estructurante fresco a utilizar). Los parámetros C/N, humedad y densidad de la mezcla inicial pueden variar siendo en particular la relación C/N el parámetro que condiciona principalmente los porcentajes en que se mezclan el digestado, los residuos verdes y chip frescos y los reciclados para llegar a valores óptimos. Se logró determinar un rango de % de mezcla de estos elementos (entre 40 y 50% de digestado y fresco, y en el entorno de un 30% de reciclado), lo que permitirá mayor flexibilidad a la planta operando según las características del material de entrada. Esto lleva también a ir ajustando los tiempos de compostaje según las características de la relación C/N, humedad y densidad de estructurante y la calidad del material final obtenido.

Con el sistema propuesto, se obtienen los siguientes productos:

Enmienda orgánica: 72,7 kt/a con aprox 0,9 kt/año de Nitrógeno (50% comercializado y 50% donado)

Biometano: $5.099 \times 10^3 \text{ Nm}^3/\text{a}$ (media nacional 50 millones Nm^3/a)

La localización del emprendimiento deberá ser en las proximidades de Felipe Cardoso, por razones de aceptación social y logística de abastecimiento de la planta, así como de disposición de los rechazos y conexión a la red de gas natural.

Con este proyecto se reducirían las emisiones de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ de aproximadamente 247 $\text{ktCO}_{2\text{eq}}/\text{a}$ en comparación con seguir con la disposición en relleno sanitario, lo que es significativo para las emisiones GEI del sector “Desechos” considerando la línea de base de 1990. Por lo tanto, una inversión de estas características podría obtener fondos de financiamiento convenientes, así como apoyo de organismos internacionales dada su relevancia en materia de cambio climático.

Las inversiones se estiman en el orden los 57,2 millones de dólares con un costo de servicio (tipping fee) del entorno de los 60 USD/ton obteniendo una tasa interna de retorno de 10% y 8% sin y con impuestos respectivamente. Este valor de costo del servicio parecería adecuado si se consideran precios de referencia internacionales. La mayor sensibilidad del modelo es respecto al costo del servicio, lo que es esperable ya que los principales ingresos provienen de esta fuente. Este aspecto podría profundizarse en estudios económicos a nivel de factibilidad y proyecto ejecutivo. Es sensible también a las inversiones por lo que sería recomendable apuntar a un dimensionamiento que minimice este aspecto.

En el marco de una economía circular, donde los productos y envases son diseñados para ser incorporados a un nuevo ciclo productivo, se podría asumir una variación en la composición de los residuos, en base al aumento de diseño de envases con materiales compostables. Sin embargo, no es posible estimar un composición deseable al no existir referencias aún a nivel global.

El trabajo presenta ciertas limitaciones en su alcance al no dimensionar un sistema de recolección que acompañe la propuesta realizada. Este aspecto es relevante para la toma de decisión respecto al avance en este tipo de soluciones.

Teniendo en cuenta el orden de inversiones y los beneficios del sistema mixto propuesto, se considera pertinente profundizar en una siguiente etapa si no es conveniente solo compostar con la consecuencia de no realizar un aprovechamiento energético y menor reducción de emisiones.

En próximos pasos, también se recomienda realizar una validación de parámetros en ensayos piloto, para poder ajustar los parámetros operacionales y las inversiones.

Finalmente, se concluye que es posible pensar en una solución para la gestión de residuos orgánicos de la ciudad de Montevideo en el marco de una economía circular; siendo necesario en paralelo impulsar la demanda de insumos orgánicos en el sector productivo y generar un cambio cultural en la población tanto en su rol como consumidores como generadores de residuos.

BIBLIOGRAFÍA

- Aho, M., Pursula, T., Saario, M., Miller, T., Kumpulainen, A., Päällysaho, M., ... Hillgren, A. (2015). *The economic value and opportunities of nutrient cycling for Finland Sitra Studies*. Retrieved from www.sitra.fi
- Alburquerque, J. A., McCartney, D., Yu, S., Brown, L., & Leonard, J. J. (2008). Air Space in Composting Research: A Literature Review. *Compost Science and Utilization*, 16(3), 159–170. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2008.10702374>
- BASRAWI, F., YAMADA, T., & NAKANISHI, K. (2010). Effect of Ambient Temperature on the Energy Balance of Anaerobic Digestion Plants. *Journal of Environment and Engineering*, 5(3), 526–538. <https://doi.org/10.1299/jee.5.526>
- Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., ... Vavilin, V. A. (2002). The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, Vol. 45, pp. 65–73. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0292>
- BEKON. *Balance de masa FORSU - propuesta Bekon.*, (2019).
- BEKON. (2019b). *PROPUESTA: Cotización Planta Digestión Anaerobia BEKON*.
- Benzano, F. (2016). *ESTIMACIÓN DE N, P2O5 y K2O: DEMANDA DE LOS CULTIVOS y OFERTA EN LOS RESIDUOS*. Montevideo.
- Benzano, F., & Zaha, E. (2020). *RELEVAMIENTO DEL MERCADO URUGUAYO DEL COMPOST y OTROS INSUMOS ORGÁNICOS*.
- Bessi, C., Lombardi, L., Meoni, R., Canovai, A., & Corti, A. (2016). Solid recovered fuel: An experiment on classification and potential applications. *Waste Management*, 47, 184–194. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.012>
- Braungart, Michael; McDonough, W. (2009). *Cradle to Cradle Re-Making the Way we Make Things*. London.
- Butterworth, J. (Ellen M. F. (2013). *Towards The Circular Economy - Accelerating the scale-up across global supply chain*. Cowes.

- Camargo, Y., & Vélez, A. (2009). Emisiones de biogás producidas en rellenos sanitarios. // *Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*, (September 2009), 1–12. <https://doi.org/10.1128/JCM.39.2.560-563.2001>
- Cataluña, A. de R. de. (2016). *Guía Práctica para el Diseño y Explotación de Plantas de Compostaje* (p. 94). p. 94. Agencia de Residuos de Cataluña.
- Chen, X. Y., Vinh-Thang, H., Ramirez, A. A., Rodrigue, D., & Kaliaguine, S. (2015). Membrane gas separation technologies for biogas upgrading. *RSC Advances*, 5(31), 24399–24448. <https://doi.org/10.1039/c5ra00666j>
- Cimpan, C., & Wenzel, H. (2013). Energy implications of mechanical and mechanical-biological treatment compared to direct waste-to-energy. *Waste Management*, 33(7), 1648–1658. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.03.026>
- Clarke, W. P. (2018). The uptake of anaerobic digestion for the organic fraction of municipal solid waste – Push versus pull factors. *Bioresource Technology*, 249, 1040–1043. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2017.10.086>
- Colturato, F. (Methanum). (2019). *Entrevista a Felipe Colturato, Methanum*.
- Colturato, F., González, M. J., Robano, M., & Troncoso, C. (2019). *Diseño del plan estratégico de valorización y disposición de residuos sólidos para Motevideo*.
- del Pino, A., Borzacconi, L., Casanova, O., Lopez, I., Passeggi, M., & Barbazán, M. (2012). *Desarrollo y validación de tecnología anaerobia para obtener mejoradores de suelo a partir de residuos agroindustriales de Canelones*.
- Eggersmann. (2019). *PROPUESTA: Supply, Installation and Commissioning of Technology for Composting of MSW Fines*.
- EISA, Ingeniería, E. y T. E. en I. (2017). *Centro de Digestion Anaerobica-FINAL-8-07-18.pdf*.
- EMF, & Foundation, E. M. (2019). How The Circular Economy Tackles Climate Change. *Ellen MacArthur Foundation*, (September), 1–62. Retrieved from www.ellenmacarthurfoundation.org/publications
- European Commission. (2014). *Capital factsheet on separate collection Ljubljana*,

Slovenia.

Fitchner, & LKSur. (2003). *Plan Director de Residuos Sólidos de Montevideo y Área Metropolitana*. Montevideo.

Flamme, S., & Geiping, J. (2012). Quality standards and requirements for solid recovered fuels: A review. *Waste Management & Research*, 30(4), 335–353. <https://doi.org/10.1177/0734242X12440481>

Gómez, D. R., Watterson, J. D., Americano, B. B., Ha, C., Marland, G., Matsika, E., ... Treanton, K. (2006). Combustión estacionaria. *Directrices Del IPCC de 2006 Para Los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero*, 1–47. Retrieved from http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf%5Cnhttp://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol2.html

Lema, P., Acosta, M. J., Barboza, R., Barrios, S., Gabriel, C., & Crosa, M. J. (2017). *Estimación de pérdidas y desperdicios de alimentos en el Uruguay: alcance y causas - Informe Final*.

LKSur. (2013). *Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos Urbanos con Fines Energéticos*. Montevideo.

Lorang, A. G., Soliva I Torrentó, M., & Huerta, Ó. (2005). *El mercado del compost en Cataluña, Oferta y Demanda*.

Masullo, A. (2017). Organic wastes management in a circular economy approach: Rebuilding the link between urban and rural areas. *Ecological Engineering*, 101, 84–90. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.01.005>

McDougall, F. ., & White, P. . (2004). *Gestión Integral de Residuos Sólidos: Inventario de Ciclo de Vida* (Procter &).

Mitschke, T., Linnenberg, C., Nau, D., Pinasco, H., & Ramoska, J. (2016). *Reporte II Purificación Biogas*. Retrieved from www.biovalor.gub.uy

Moreno Casco, J., & Moral Herrero, R. (Editores C. (2008). *Compostaje*. Madrid: Ediciones

Mundi-Prensa.

MVOTMA. (2017). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero*. Retrieved from [http://mba.edu.co/divisiones/Ingenierias/IDS/upload/File/Memorias II-SIIR/3d-Camargo-Colombia-001.pdf](http://mba.edu.co/divisiones/Ingenierias/IDS/upload/File/Memorias%20II-SIIR/3d-Camargo-Colombia-001.pdf)

ONU Medio Ambiente. (2018). Situación de la gestión de RESIDUOS SÓLIDOS en América Latina y el Caribe. In *Bid*. Panamá.

Pipatti, R., Silva Alves, J. W., Gao, Q., López Cabrera, C., Mareckova, K., Oonk, H., ... Yamada, M. (2006). Capítulo 4: Tratamiento biológico de los desechos sólidos. In *Directrices del IPPC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*.

Presidencia de la República. (2021). *Objetivo de Desarrollo Sostenible. Informa Nacional Voluntario Uruguay 2021*.

Rada, E. C., & Ragazzi, M. (2014). Selective collection as a pretreatment for indirect solid recovered fuel generation. *Waste Management*, 34(2), 291–297. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.11.013>

Raichura, A., & McCartney, D. (2006). Composting of municipal biosolids: Effect of bulking agent particle size on operating performance. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 5(3), 235–241. <https://doi.org/10.1139/S06-004>

República Oriental del Uruguay. (2017). *Primera Contribución Determinada a nivel Nacional al acuerdo de París*. Retrieved from [https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Uruguay First/Uruguay_Primera Contribución Determinada a nivel Nacional.pdf](https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Uruguay%20First/Uruguay_Primera%20Contribuci%20n%20Determinada%20a%20nivel%20Nacional.pdf)

Reyes-Torres, M., Oviedo-Ocaña, E. R., Dominguez, I., Komilis, D., & Sánchez, A. (2018). A systematic review on the composting of green waste: Feedstock quality and optimization strategies. *Waste Management*, 77, 486–499. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.037>

Ribas, C. (2015). Desarrollo de un procedimiento de análisis para la determinación de siloxanos en biogás. Aplicación a depósitos controlados de residuos sólidos urbanos

- y estaciones depuradoras de aguas residuales. *TDX (Tesis Doctorals En Xarxa)*, 1–3. Retrieved from <https://www.tdx.cat/handle/10803/301773>
- Ricci, M., & Confalonieri, A. (2016). *Technical Guidance on the Operation of Organic Waste Treatment Plants*. Retrieved from https://www.ccacoalition.org/sites/default/files/resources/2016_technical_guidance_on_operation_of_ow_treatment_plants.pdf
- Robano, M., & González, M. J. (2021). *De residuos a recursos: articulando lo ambiental, lo social y lo económico*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18235/0003641>
- Rocamora, I., Wagland, S. T., Villa, R., Simpson, E. W., Fernández, O., & Bajón-Fernández, Y. (2020). Dry anaerobic digestion of organic waste: A review of operational parameters and their impact on process performance. *Bioresource Technology*, 299(September 2019). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122681>
- Seyring, N., Dollhofer, M., Weißenbacher, J., Herczeg, M., & David, M. (2015). Assessment of separate collection schemes in the 28 capitals of the EU. *BiPRO/CRI*, (November), 1–161. Retrieved from [http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/Separate collection_Final Report.pdf](http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/Separate_collection_Final_Report.pdf)
- Skowrońska, M., & Filipek, T. (2014). Life cycle assessment of fertilizers: A review. *International Agrophysics*, 28(1), 101–110. <https://doi.org/10.2478/intag-2013-0032>
- Soliva, M., & Zalo, M. (2008). *Compostaje de residuos municipales*. Strabag. *MBT Ljubljana Mass Balance*. , (2018).
- Technische Universität Wien. (2012). Biogas To Biomethane Technology Review. *Vienna University of Technology*, (May), 1–15. Retrieved from http://bio.methan.at/sites/default/files/BiogasUpgradingTechnologyReview_ENGLISH.pdf
- Verbeeck, K., Buelens, L. C., Galvita, V. V., Marin, G. B., Van Geem, K. M., & Rabaey, K. (2018). Upgrading the value of anaerobic digestion via chemical production from

grid injected biomethane. *Energy and Environmental Science*, 11(7), 1788–1802.
<https://doi.org/10.1039/c8ee01059e>

Wilken, D., Rauh, S., Bontempo, G., Hofmann, F., Strippel, F., Kramer, A., ... Fürst, M. (2019). *Biowaste to Biogas – The production of energy and fertilizer from organic waste*. Retrieved from <https://biowaste-to-biogas.com/Download/biowaste-to-biogas.pdf>

Wilson, D. C. (David C., United Nations Environment Programme, & International Solid Waste Association. (2017). *Global waste management outlook*.

Woess-Gallasch, S., Bird, N., Enzinger, P., Jungmeier, G., Padinger, R., Pena, N., & Zanchi, G. (2010). *Greenhouse gas benefits of a biogas plant in Austria*. 1–36.

Entrevistas:

- Felipe Colturato – Empresa Methanum, Brasil – Consultor BID – Miércoles 03/07/2019 en BID – Ha operado plantas de DA en Europa con distintas tecnologías y actualmente operando planta de digestión extra-seca en Brasil.
- MIEM/DNE - Arianna Spinelli, Federico Reherrmann y Federico Cánepa – Miércoles 21/8/2019 en DNE – Gas Natural
- Intendencia de Montevideo, Sebastián Bajsa, Gabriela Camps, Jorge Alsina en el marco de la consultoría desarrollada por la autora y equipo técnico para la Intendencia durante el periodo de enero a diciembre 2019.
- CEMPRE – Federico Baraibar, marzo 2020

ANEXO

Cálculos de mezcla de digestado y estructurante para ingreso a la planta de compostaje

Para obtener una buena composición de digestado y estructurante para ingreso al proceso de compostaje, se deben combinar de forma adecuada estos elementos de modo de cumplir con los siguientes parámetros:

Tabla 48: Caracterización de material de entrada a compostaje, según composición fisicoquímica

	Degradabilidad	Humedad	Densidad	C/N	ST	SV/ST	N/SV*(C/N)
Digestado	1	71%	0,85	17	29%	0,66	0,5
Verde Fresco	0,6	30%	0,28	44	70%	0,90	0,5
Chip Fresco	0,2	23%	0,23	1028	77%	0,98	0,5
Verde Recirculado	0,6	29%	0,36	23	71%	0,90	0,5
Chip Recirculado	0,2	23%	0,23	900	77%	0,98	0,5
RANGO CUMPLIR		50-60%	0,44-0,77	25-35			

En base a las ecuaciones y condiciones presentadas en el capítulo 6, se realizaron los siguientes cálculos, señalando en verde las celdas que cumplen con los valores de referencia a obtener:

Tabla 49: Cálculos de posibles combinaciones de material de entrada a compostaje, según composición fisicoquímica

pST D	pSTVF+STVR	pSTVF	pSTVR	pSTCF+STCR	pSTCF	pSTCR	pW D	pW VF	C/N mezcla	Dens. Mezcla	Hum mezcla
0,1	0,1	0,06	0,04	0,8	0,16	0,640	0,23	0,06	124,8	0,28	35%
0,2	0,1	0,06	0,04	0,7	0,14	0,6	0,40	0,05	80,3	0,33	43%
0,3	0,1	0,06	0,04	0,6	0,12	0,5	0,53	0,04	58,1	0,39	49%
0,4	0,1	0,06	0,04	0,5	0,10	0,4	0,64	0,04	44,7	0,44	54%
0,45	0,1	0,06	0,04	0,45	0,09	0,4	0,68	0,04	39,9	0,47	56%
0,5	0,1	0,06	0,04	0,4	0,08	0,3	0,72	0,04	35,9	0,50	58%
0,6	0,1	0,06	0,04	0,3	0,06	0,2	0,80	0,03	29,5	0,57	62%
0,7	0,1	0,06	0,04	0,2	0,04	0,2	0,86	0,03	24,8	0,64	65%
0,8	0,1	0,06	0,04	0,1	0,02	0,1	0,91	0,03	21,1	0,71	67%
0,9	0,1	0,06	0,04	0	0,00	0,0	0,96	0,03	18,1	0,79	69%
0,1	0,2	0,12	0,08	0,7	0,14	0,6	0,22	0,11	91,2	0,29	35%
0,2	0,2	0,12	0,08	0,6	0,12	0,5	0,39	0,10	64,3	0,34	43%
0,3	0,2	0,12	0,08	0,5	0,10	0,4	0,53	0,09	48,8	0,40	49%
0,4	0,2	0,12	0,08	0,4	0,08	0,3	0,63	0,08	38,8	0,45	54%
0,45	0,2	0,12	0,08	0,35	0,07	0,3	0,68	0,07	35,0	0,49	56%
0,5	0,2	0,12	0,08	0,3	0,06	0,2	0,72	0,07	31,7	0,52	58%
0,6	0,2	0,12	0,08	0,2	0,04	0,2	0,79	0,07	26,5	0,58	62%
0,7	0,2	0,12	0,08	0,1	0,02	0,1	0,85	0,06	22,5	0,65	65%
0,8	0,2	0,12	0,08	0	0,00	0,0	0,91	0,06	19,3	0,73	67%
0,1	0,3	0,18	0,12	0,6	0,12	0,5	0,22	0,17	71,6	0,30	36%
0,2	0,3	0,18	0,12	0,5	0,10	0,4	0,39	0,15	53,5	0,35	43%
0,25	0,3	0,18	0,12	0,45	0,09	0,4	0,46	0,14	47,2	0,38	47%

pST D	pSTVF+STVR	pSTVF	pSTVR	pSTCF+STCR	pSTCF	pSTCR	pW D	pW VF	C/N mezcla	Dens. Mezcla	Hum mezcla
0,3	0,3	0,18	0,12	0,4	0,08	0,3	0,52	0,13	42,0	0,41	50%
0,4	0,3	0,18	0,12	0,3	0,06	0,2	0,63	0,12	34,2	0,47	55%
0,45	0,3	0,18	0,12	0,25	0,05	0,2	0,67	0,11	31,1	0,50	57%
0,5	0,3	0,18	0,12	0,2	0,04	0,160	0,72	0,11	28,4	0,53	59%
0,6	0,3	0,18	0,12	0,1	0,02	0,1	0,79	0,10	24,0	0,60	62%
0,7	0,3	0,18	0,12	0	0,00	0,0	0,85	0,09	20,6	0,67	65%
0,1	0,4	0,24	0,16	0,5	0,10	0,4	0,22	0,22	58,8	0,31	36%
0,2	0,4	0,24	0,16	0,4	0,08	0,3	0,39	0,19	45,6	0,36	44%
0,25	0,4	0,24	0,16	0,35	0,07	0,3	0,46	0,18	40,8	0,39	47%
0,3	0,4	0,24	0,16	0,3	0,06	0,2	0,52	0,17	36,8	0,42	50%
0,4	0,4	0,24	0,16	0,2	0,04	0,160	0,63	0,15	30,5	0,48	55%
0,450	0,4	0,240	0,160	0,15	0,030	0,120	0,67	0,15	27,9	0,51	57%
0,5	0,4	0,24	0,16	0,1	0,02	0,1	0,71	0,14	25,7	0,55	59%
0,6	0,4	0,24	0,16	0	0,00	0,0	0,79	0,13	21,9	0,62	62%
0,1	0,5	0,30	0,20	0,4	0,08	0,3	0,22	0,27	49,7	0,32	37%
0,2	0,5	0,30	0,20	0,3	0,06	0,2	0,39	0,24	39,7	0,37	44%
0,25	0,5	0,30	0,20	0,25	0,05	0,2	0,46	0,23	35,9	0,40	47%
0,3	0,5	0,30	0,20	0,2	0,04	0,2	0,52	0,21	32,7	0,43	50%
0,4	0,5	0,30	0,20	0,1	0,02	0,08	0,62	0,19	27,4	0,49	55%
0,45	0,5	0,30	0,20	0,05	0,01	0,0	0,67	0,18	25,3	0,53	57%
0,1	0,6	0,36	0,24	0,3	0,06	0,2	0,22	0,32	42,9	0,33	37%
0,2	0,6	0,36	0,24	0,2	0,04	0,2	0,38	0,28	35,1	0,38	45%
0,25	0,6	0,36	0,24	0,15	0,03	0,1	0,45	0,27	32,0	0,41	48%

pST D	pSTVF+STVR	pSTVF	pSTVR	pSTCF+STCR	pSTCF	pSTCR	pW D	pW VF	C/N mezcla	Dens. Mezcla	Hum mezcla
0,3	0,6	0,36	0,24	0,1	0,02	0,08	0,51	0,25	29,3	0,44	51%
0,4	0,6	0,36	0,24	0	0,00	0,0	0,62	0,23	24,9	0,51	55%
0,1	0,7	0,42	0,28	0,2	0,04	0,2	0,22	0,37	37,7	0,34	38%
0,2	0,7	0,42	0,28	0,1	0,02	0,1	0,38	0,33	31,4	0,39	45%
0,3	0,7	0,42	0,28	0	0,00	0,0	0,51	0,30	26,5	0,46	51%
0,1	0,8	0,48	0,32	0,1	0,02	0,1	0,21	0,43	33,6	0,35	38%
0,2	0,8	0,48	0,32	0	0,00	0,0	0,38	0,37	28,3	0,41	45%
0,1	0,9	0,54	0,36	0	0,00	0,0	0,21	0,47	30,2	0,36	38%

Se indican en letra resalta aquellas combinaciones que cumple con los rangos de mezcla óptimos. La combinación seleccionada en amarillo es la utilizada para el dimensionamiento de la planta

