

Proyecto Fin de Máster

Máster en Ingeniería Ambiental

Análisis de ciclo de vida comparativo entre la deposición en vertedero y el tratamiento biológico mediante digestión anaerobia de residuos de frutas y verduras generados en mercados abiertos

Autor: Elena Jiménez Páez

Tutor: Bernabé Alonso Fariñas/ Ángeles Trujillo Reyes

Dpto. Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2021



Proyecto Fin de Máster
Ingeniería Ambiental

**Análisis de ciclo de vida comparativo entre la
deposición en vertedero y el tratamiento biológico
mediante digestión anaerobia de residuos de
frutas y verduras generados en mercados abiertos**

Autor:

Elena Jiménez Páez

Tutor:

Bernabé Alonso Fariñas

Ángeles Trujillo Reyes

Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

Proyecto Fin de Máster: Análisis de ciclo de vida comparativo entre la deposición en vertedero y el tratamiento biológico mediante digestión anaerobia de residuos de frutas y verduras generados en mercados abiertos

Autor: Elena Jiménez Páez
Tutor: Bernabé Alonso Fariñas
Ángeles Trujillo Reyes

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal

A mi familia
A mis profesores
A mis amigos

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mi tutor Bernabé por ayudarme con este proyecto, enseñarme conocimientos sobre el análisis de ciclo de vida los cuales desconocía, y por proponerme llevar a cabo este proyecto, el cual ha sido un gran reto. Agradecer a mi cotutora y compañera Ángeles por cada hora, minuto y segundo que me ha cedido para la realización de este proyecto. No sabría cómo agradecerle todo el esfuerzo y dedicación que me has brindado, intentando sacar tiempo hasta debajo de las piedras para sacar adelante este trabajo. Gracias por recordarme de nuevo lo que me gusta este mundo (a pesar de lo duro que es), por cada charla, risas, llantos y toda tu dedicación y aportación de conocimientos. Sabes que eres una persona muy importante, y espero que aún me tengas que aguantar unos añitos más compi.

A pesar de las condiciones que hemos tenido este año, comenzando la presencialidad varios meses más tarde del comienzo del curso, me gustaría agradecer a todos mis compañeros del máster por los momentos vividos, pero sobre todo a mis niños del grupo de Whatsapp “Grupo 4 ACV”. Emprendimos juntos en un principio sin conocernos, sin saber si trabajaríamos bien conjuntamente, si seríamos capaces de encajar 6 personas totalmente desconocidas sin que volasen cuchillos, pero finalmente hemos sido un apoyo mutuo, siendo capaces de llegar hasta el final de este periodo como una piña. Os quiero chic@s.

Me gustaría seguir agradeciendo a mis niñas Cristina y Jenni, que a pesar de la distancia Huelva-Sevilla-Córdoba y de las restricciones que se han llevado durante este año, provocando que no nos hayamos visto casi en un año, todo el amor que se sembró durante la carrera ha seguido perdurando y que cuando nos vemos parece que todo ese tiempo sin vernos no ha pasado. Os quiero mucho.

Agradecer a mi compañero de vida, Plácido, por hacerme siempre ver la luz al final del túnel, por saber qué decir para animarme en cada momento y por todo el apoyo, paciencia y cariño que me has dado en este periodo.

Por último, agradecer a mi familia, por todo el apoyo que me han dado para seguir adelante con mis estudios. Gracias por estar a mi lado en todos los momentos de estrés, al pensar en que no iba a ser capaz de llegar a todo y por cada mensaje de ánimo y mimo que me dabais en el momento correcto. Os quiero mucho.

Elena Jiménez Páez
Sevilla, 2021

Resumen

El aumento de la población mundial, junto con el crecimiento del consumo per cápita, ha venido acompañado de un gran incremento de la producción de frutas y verduras que, según los datos estadísticos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, alcanzó en 2019 una producción mundial de más de 2.000 millones de toneladas, de las cuales entorno a un 13 % fueron producidas en el conjunto de países que forman la Cuenca Mediterránea. De esta producción de frutas y verduras, se desperdicia anualmente un 60% de productos hortícolas convirtiéndose por tanto en residuos de frutas y verduras (FVW fruit vegetables waste en inglés).

En la actualidad, los métodos más comunes para la gestión de residuos alimentarios son la incineración y el depósito en vertederos. Estas alternativas presentan algunos inconvenientes, como la emisión de gases y el cúmulo de biomasa, ya que una vez depositado el residuo puede provocar la contaminación del suelo o lixiviación, y la ocupación del terreno. Debido a que la producción de residuos continúa creciendo de forma exponencial y para evitar su depósito en el vertedero, se han modificado las leyes con respecto a la acumulación y gestión de los residuos. Por este motivo surge el tratamiento de los residuos alimentarios (bioresiduos) mediante digestión anaerobia, ya que de esta forma se puede obtener un combustible de origen biogénico (biogás), y producir energía eléctrica y térmica.

El presente trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto europeo “Employing Circular Economy Approach for OFMSW Management within the Mediterranean Countries (CEOMED)”. Dicho proyecto propone diseñar nuevos planes de gestión para los residuos de frutas y verduras generados en los mercados mayoristas de las ciudades de Amán y Sfax. El objetivo principal de este trabajo se centra en la realización de un Análisis de Ciclo de Vida comparativo con el fin de identificar y comparar los impactos ambientales del sistema utilizado actualmente por el mercado mayorista de la ciudad de Amán (Jordania) para la gestión y el tratamiento de los residuos de frutas y verduras generados, frente a una nueva alternativa que se propone para el tratamiento de éstos mediante la aplicación del proceso de digestión anaerobia.

Según los resultados obtenidos, tras llevar a cabo el análisis comparativo, el Sistema 2 tendría menor impacto ambiental que el Sistema 1. Con la alternativa propuesta, se evitaría el transporte de los residuos y las emisiones que esto conlleva, además de la emisión de metano a la atmósfera que se genera por la descomposición de los residuos. Por otro lado, a pesar de que los dos sistemas generan energía eléctrica que

es vendida al tendido eléctrico, en el sistema 2, se vende 5 veces más (389%) de energía eléctrica que en el vertedero. La venta de la energía a la Red eléctrica generaría beneficios económicos y medioambientales, ya que la energía eléctrica que se utiliza en la Red eléctrica actualmente proviene de combustibles fósiles, y en este caso proviene de energía verde. Además, en el sistema 2 se generan dos coproductos que no se obtendrían en el sistema 1, compost y fertiirrigante. Con la producción diaria de estos productos, se evitaría aproximadamente el consumo de 11,7 y 30 kg de fertilizantes inorgánicos como el nitrato de amonio y nitrato de calcio, respectivamente.

Abstract

The increase in population worldwide, couple with growth in per capita consumption, has been accompanied by a higher increase in the production of fruit and vegetables. According to the statistical database of the Food and Agriculture Organisation of the United Nations, it reached a worldwide production of more than 2 billion tonnes in 2.019, of which around 13 % was produced in the countries that make up the Mediterranean Basin. Of this production, 60 % of horticultural products are wasted annually and thus become fruit and vegetable waste (FVW).

Currently, the most common methods for food waste management are incineration and landfilling. These alternatives have some disadvantages, such as gas emissions and biomass accumulation, since once the waste is deposited it can cause soil contamination or leachate, and land occupation. Since waste production continues to grow exponentially and avoid landfilling, the laws regarding the accumulation and management of waste have been modified. For this reason, the treatment of food waste (biowaste) by anaerobic digestion has arisen since this way a fuel of biogenic origin (biogas) can be obtained, and electrical and thermal energy can be produced.

This work has been developed in the framework of the European project "Employing Circular Economy Approach for OFMSW Management within the Mediterranean Countries (CEOMED)". This project proposes to design new management strategies for fruit and vegetable waste generated in the wholesale markets of the cities of Amman and Sfax. The main objective of this work focuses on carrying out a comparative Life Cycle Assessment to identify and compare the environmental impacts of the system currently used by the wholesale market of the city of Amman (Jordan) for the management and treatment of fruit and vegetable waste generated, compared to a new alternative proposed for the treatment of these by applying the anaerobic digestion process.

According to the results obtained, after carrying out the comparative analysis, System 2 would have a lower environmental impact than System 1. With the proposed alternative, the transport of waste and its emissions, as well as the emission of methane into the atmosphere generated by the decomposition of waste, would be avoided. On the other hand, although both systems generate electricity that is sold to the grid, in system 2, 5 times more electricity (389%) is sold than in the landfill. Selling the energy to the Grid would generate economic and environmental benefits, as the electrical energy currently used in the Grid comes from fossil

fuels and, in this case, it comes from green energy. In addition, system 2 generates two co-products that would not be obtained in system 1, compost and fertiirrigant. With the daily production of these products, the consumption of approximately 11.7 and 30 kg of inorganic fertilizers such as ammonium nitrate and calcium nitrate, respectively, would be avoided.

Índice

Agradecimientos	IX
Resumen	XI
Abstract	XIII
Índice	XV
Índice de Tablas	XVII
Índice de Figuras	XIX
1 Introducción	1
2 Objetivos	7
3 Alcance	8
3.1 Definición de los sistemas a estudiar	8
3.2 Función del sistema de estudio	8
3.3 Unidad funcional	8
3.4 Límites del sistema	8
3.5 Descripción de los sistemas	9
3.5.1 <i>Descripción del Sistema 1: Situación actual de gestión y tratamiento de los residuos de frutas y verduras generados en el mercado mayorista de la ciudad de Amán (Jordania)</i>	9
3.5.2 <i>Descripción del sistema 2: Situación que se propone para el tratamiento de los residuos de frutas y verduras generados en el mercado mayorista de la ciudad de Amán (Jordania)</i>	15
3.6 Procedimientos de asignación, expansión del sistema	18
3.7 Categorías de impacto ambiental seleccionadas y metodología de evaluación de impacto	19
3.8 Requisitos de calidad de datos	20
3.9 Suposiciones	22
3.9.1 Suposiciones del Sistema 1	22
3.9.2 Suposiciones del Sistema 2	23
3.10 Limitaciones	24
3.10.1 <i>Limitaciones del Sistema 1</i>	24
4 Análisis de inventario	25
4.1 Balances de materia y energía del Sistema 1. Situación actual	25
4.2 <i>Recogida de residuos y transporte (11km)</i>	25
4.3 <i>Estación de transferencia</i>	27

4.4	<i>Transporte (25 km)</i>	28
4.5	<i>Vertedero</i>	28
4.6	Balances de materia y de energía del Sistema 2. Situación propuesta	30
4.7	<i>Pretratamiento mecánico</i>	30
4.8	<i>Tanque de almacenamiento con agitación</i>	30
4.9	<i>Digestor anaerobio</i>	31
4.10	<i>Proceso de cogeneración</i>	33
4.11	<i>Centrifugación y tratamiento del digerido</i>	33
4.12	<i>Energía eléctrica vendida al tendido eléctrico</i>	36
4.13	<i>Contenido de nitrógeno. Impactos evitados</i>	37
	5Evaluación de impacto	41
	6Interpretación de resultados	43
6.1	<i>Calentamiento global</i>	43
6.2	<i>Ecotoxicidad terrestre</i>	44
6.3	<i>Escasez de recursos fósiles</i>	44
6.4	<i>Toxicidad humana no cancirogénica</i>	45
	7Conclusión	46
	8Bibliografía	47
	9Anexo	51
9.1	<i>ANEXO I. Cálculo del indicador de la calidad de dato (DQI) para ambos sistemas</i>	51
9.2	<i>ANEXO II. Análisis de los sistemas utilizando el software simapro</i>	54
9.3	<i>ANEXO III. Resolución del método de descomposición de primer orden (FOD), mediante las Directrices del Método IPCC (IPCC, 2019, 2006b, 1996)</i>	60
9.4	<i>ANEXO IV. Diseño de la cinta transportadora utilizada en la planta de digestión anaerobia</i>	67
9.5	<i>ANEXO V. Resultados de los valores obtenidos de las categorías de impacto en Simapro</i>	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Categorías de impacto ambiental evaluadas en el método Recipe 2016 Mindpoint (H).	19
Tabla 2. Criterios utilizados para la evaluación de la calidad de datos.	21
Tabla 3. Calidad de datos total de las categorías de impacto ambiental para cada sistema estudiado.	22
Tabla 4. Factor de emisión de CO ₂ por efecto del transporte terrestre (adaptada de IPCC (2006a)).	26
Tabla 5. Factor de emisión de N ₂ O por efecto del transporte terrestre (adaptada de IPCC (2006a)).	26
Tabla 6. Factor de emisión de CH ₄ por efecto del transporte terrestre (adaptada de IPCC (2006a)).	26
Tabla 7. Análisis de Inventario del Sistema 1.	39
Tabla 8. Análisis de Inventario del Sistema 2.	40
Tabla 9. Impactos asociados a cada categoría de impacto seleccionadas para el Sistema 1 Escenario A.	41
Tabla 10. Impactos asociados a cada categoría de impacto seleccionadas para el Sistema 1 Escenario B.	42
Tabla 11. Impactos asociados a cada categoría de impacto seleccionadas para el Sistema 2.	42
Tabla 12. Cálculo DQI del Sistema 1.	51
Tabla 13. Cálculo de DQI del Sistema 2.	53
Tabla 14. Fracción de carbono orgánico degradable (DOC _F) que se descompone para diferentes tipos de residuos (IPCC, 2019, 2006b, 1996).	63
Tabla 15. Clasificación y factor de corrección de metano (MCF) (IPCC, 2019, 2006b, 1996).	64
Tabla 16. Estimación del Factor de oxidación (OX) (IPCC, 2019, 2006b, 1996).	66
Tabla 17. Peso específico aparente de algunos materiales en T/m ³ y ángulo máximo de inclinación de la banda*.	70
Tabla 18. Estimación de la velocidad normal de trabajo. Los valores de V _N (velocidad normal de trabajo) y V _M (velocidad máxima de trabajo) se representan en m/min*.	70
Tabla 19. Coeficiente K para bandas inclinadas*.	71
Tabla 20. Ancho mínimo necesario. *.	71
Tabla 21. Selección del tipo de banda.	72
Tabla 22. Potencia neta en CV necesaria para el movimiento de la banda en vacío horizontal. Para cada 30 metros por minuto de velocidad (W1).	72
Tabla 23. Potencia neta en CV necesaria para transporte horizontal de la carga (W2).	73
Tabla 24. Potencia en CV necesaria para la elevación del material (W3).	73
Tabla 25. Potencia a añadir por cada tripper de descarga CV (W4).	74
Tabla 26. Factor de tensión de poleas finales y del tensor (β)	74
Tabla 27. Valor de coeficiente K.	74

Tabla 28. Categorías de impacto obtenidas en Simapro.....	75
Tabla 29. Categorías de impacto obtenidas en Simapro.....	77
Tabla 30. Categorías de impacto obtenidas en Simapro.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de las etapas del proceso de digestión anaerobia (Vilches, 2018).	4
Figura 2. Límites del sistema.	9
Figura 3. Descripción del sistema 1 (T: Transporte; B: Bomba; E: Extracción de lixiviados; R: Recirculación de lixiviados).	10
Figura 4. Esquema de la disposición del vertedero de Al Ghabawi (Hadjidimoulas, 2018).	11
Figura 5. Representación del diseño general del vertedero de Al Ghabawi (Hadjidimoulas, 2018).	13
Figura 6. Detalle de las capas que forman el recubrimiento final de las celdas llenas y el diseño de los pozos verticales para la extracción del gas de vertedero (Hadjidimoulas, 2018).	13
Figura 7. Distribución de los lixiviados.	15
Figura 8. Descripción del sistema 2 (T: Transporte; B: Bomba).	16
Figura 9. Descripción del balance en la estación de transferencia.	27
Figura 10. Descripción del balance en el digestor anaerobio.	33
Figura 11. Comparativa del impacto ambiental asociado a cada categoría para los sistemas 1 y 2.	43
Figura 12. Modelos escogidos en Simapro para la resolución del Escenario A del Sistema 1.	54
Figura 13. Modelos escogidos en Simapro para la resolución del Escenario B del Sistema 1.	55
Figura 14. Modelo creado en Simapro para la recogida de residuos y transporte, Escenarios A y B del Sistema 1.	56
Figura 15. Modelo creado en Simapro para las emisiones que se producen en las celdas deposito, Escenarios A y B del Sistema 1.	57
Figura 16. Modelos seleccionados en Simapro para la resolución del Sistema 2.	58
Figura 17. Modelo creado en Simapro para las emisiones que se producen en el volteo de compost en el Sistema 2.	59

1 INTRODUCCIÓN

El aumento de la población mundial, junto con el crecimiento del consumo per cápita, ha venido acompañado de un gran incremento de la producción de frutas y verduras que, según los datos estadísticos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), alcanzó en 2019 una producción mundial de más de 2.000 millones de toneladas, de las cuales entorno a un 13 % fueron producidas en el conjunto de países que forman la Cuenca Mediterránea (FAO, 2021).

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) ha informado que anualmente un tercio de los alimentos producidos para el consumo humano se pierde o se desperdicia a nivel mundial, de los cuales el mayor desperdicio lo comparten los productos hortícolas, en un 60 % aproximadamente (FAO, 2021). Los residuos de frutas y verduras (FVW, de las siglas en inglés de Fruit and Vegetables Waste) no solo se generan durante la producción, sino que también se producen grandes cantidades de residuos durante la cadena de distribución, con una pérdida total que oscila entre el 18 y el 30 % (Arhoun et al., 2019). En la región mediterránea, la cantidad de FVW podría aumentar en 396 millones de toneladas para 2025. Cientos de mercados mayoristas se distribuyen en toda la región Mediterránea. Por ejemplo, la tasa de flujo de residuos varía de 3 a 5 toneladas por día en los mercados abiertos ubicados en Ammán (Jordania).

Las frutas y las verduras son altamente biodegradables, y tienen una velocidad de degradación muy elevada debido al alto contenido en humedad y materia orgánica (aproximadamente el 75 % son azúcares y hemicelulosa, de fácil biodegradación, el 10 % celulosa y el 5 % lignina), y esto ocurre aún más rápido cuando muestran signos de daños mecánicos o están excesivamente maduras. Esto genera altas complicaciones ambientales incluso para la eliminación a corto plazo ya que se liberan gases y lixiviados que pueden provocar daños a la salud pública y al medioambiente (Saber et al., 2021). Además, la generación de FVW aumenta los costos de operación de los mercados debido tanto a las pérdidas de ventas como a los costos de transporte y eliminación (Scano et al., 2014). Se estimó que más de un 80 % de los FVW que se producen mundialmente se vertían o se trasportaban a vertederos y plantas de incineración (Liu et al., 2012).

Según el Artículo 22 de la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados, *“con objetivo de cumplir esta ley se ha de avanzar hacia una sociedad del reciclado con un alto nivel de eficiencia de los recursos, el Gobierno y las autoridades competentes deberán adoptar las medidas necesarias a través de los planes y programas de gestión de residuos para garantizar que la cantidad de residuos domésticos y comerciales destinados a la preparación para la reutilización y el reciclado para las fracciones de papel, metales, vidrio, plástico, biorresiduos u otras fracciones reciclables deberá alcanzar, en conjunto, como mínimo el 50% en peso”*. Esta razón es uno de los motivos por lo que se requiere cada vez más una tecnología que sea

eficiente para la gestión de residuos orgánicos (frutas y verduras) debido a las preocupaciones ambientales y económicas, como son el cambio climático, la eutrofización y la disminución de energía fósil y materias primas (Liu et al., 2012; Wang, J. Y., Liu, X. Y., Kao, J. C., & Stabnikova, 2006).

En la actualidad, los métodos más comunes para la gestión de residuos alimentarios son la incineración y el depósito en vertederos. El principal inconveniente del cúmulo de biomasa es que puede haber fugas una vez depositado el residuo y provocar la contaminación del suelo o lixiviación y la ocupación del terreno. Pero, según el Artículo 24 Biorresiduos de la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados, las autoridades ambientales promoverán las medidas mencionadas en el artículo 22, además, podrán añadir en los planes y programas de gestión de residuos:

1. Recogida separada de biorresiduos para destinarlos al compostaje o a la digestión anaerobia en particular de la fracción vegetal, los biorresiduos de grandes generadores y los biorresiduos generados en los hogares.

2. El compostaje doméstico y comunitario.

3. El tratamiento de biorresiduos recogidos separadamente de forma que se logre un alto grado de protección del medio ambiente llevado a cabo en instalaciones específicas sin que se produzca la mezcla con residuos mezclados a lo largo del proceso. En su caso, la autorización de este tipo de instalaciones deberá incluir las prescripciones técnicas para el correcto tratamiento de los biorresiduos y la calidad de los materiales obtenidos.

4. El uso del compost producido a partir de biorresiduos y ambientalmente seguro en el sector agrícola, la jardinería o la regeneración de áreas degradadas, en sustitución de otras enmiendas orgánicas y fertilizantes minerales.

La digestión anaerobia podría considerarse una opción sostenible para el tratamiento de los residuos de frutas y verduras generados en mercados mayoristas, ya que permite la optimización y gestión de la producción del metano reduciendo significativamente la liberación de emisiones de gases de efecto invernadero y los olores desagradables, a la vez que permite la recuperación de nutrientes y otros materiales para las enmiendas del suelo (Arhoun et al., 2019; Saber et al., 2021). Este tratamiento se está estudiando con algunos residuos alimentarios, por ejemplo, Trujillo Reyes et al. (2019) estudió la producción de biogás en digestores anaerobios de comportamiento discontinuo con residuos de frambuesa, como la fresa, Cubero-Cardoso et al. (2020) realizaron un estudio del comportamiento que tenían digestores semi-continuos de digestión anaerobia con extrusionado de fresa (residuo de fresa), Acarley, F. et al. (2020) realizaron un estudio de producción de biogás mediante digestión anaerobia a partir de aguamiel, un subproducto del café.

La digestión anaerobia es un proceso biológico que transforma la materia orgánica, gracias a microorganismos anaeróbicos (ausencia de oxígeno), en biogás (CH_4 , CO_2 , H_2 , H_2S) y en un digestato, mezcla de productos minerales como N, P, K, Ca y compuestos de difícil degradación (Serrano, 2015). La

composición del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso, pero normalmente tiene un contenido de CH₄ entre 45-85 % y 15-45 % de CO₂, con otros gases en pequeñas cantidades (H₂, H₂S, NH₃ y N₂) (Schnürer and Jarvis, 2018). La digestión anaerobia presenta algunas ventajas fundamentales en comparación con otras tecnologías de tratamiento, como la posibilidad de trabajar en diferentes rangos de temperatura (psicrofílico, mesofílico y termofílico), altas tasas de carga orgánica, alta eficiencia y, también, el metano producido puede ser utilizado como fuente de energía para calefacción y electricidad debido a su valor calorífico (35,793 kJ/m³ ; a 1 atm y 0 °C), que equivale a 1 kg de carbón crudo o 0,76 kg de carbón estándar (Fermoso et al., 2018; Serrano, 2015; Wheatley, 1990; Zeng et al., 2007). El uso del biogás para el suministro energético reduce la deforestación, la erosión del suelo y la contaminación ambiental, y también puede mejorar la eficiencia energética de varios procesos de producción debido a la contribución energética que proporciona (Bozym et al., 2015). Además, después del proceso de digestión anaerobia, se produce un residuo húmedo llamado digestato. El digestato es una mezcla de materia orgánica parcialmente estabilizada, biomasa microbiana y compuestos inorgánicos. Debido a su elevado contenido en carbono, nitrógeno y fósforo, varios autores han propuesto que el digestato podría emplearse como fuente de nutrientes para la agricultura (Albuquerque et al., 2012; Fermoso et al., 2018; Kaparaju et al., 2012; Tsachidou et al., 2019). No obstante, existen una serie de parámetros ambientales y operacionales que deben controlarse para que el desarrollo del proceso de digestión anaerobia sea correcto. Estos parámetros son: el pH, alcalinidad, potencial redox, nutrientes, sustancias tóxicas o inhibidores, temperatura, agitación, tiempo de retención hidráulica (TRH) o la velocidad de carga orgánica (VCO) (Schnürer and Jarvis, 2018). Uno de los inconvenientes de la digestión anaerobia es que tiene elevados costes de implantación, por lo que no resulta rentable para instalaciones de pequeño tamaño.

En la **Figura 1**, se representan las diferentes etapas del proceso de digestión anaerobia que son la hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

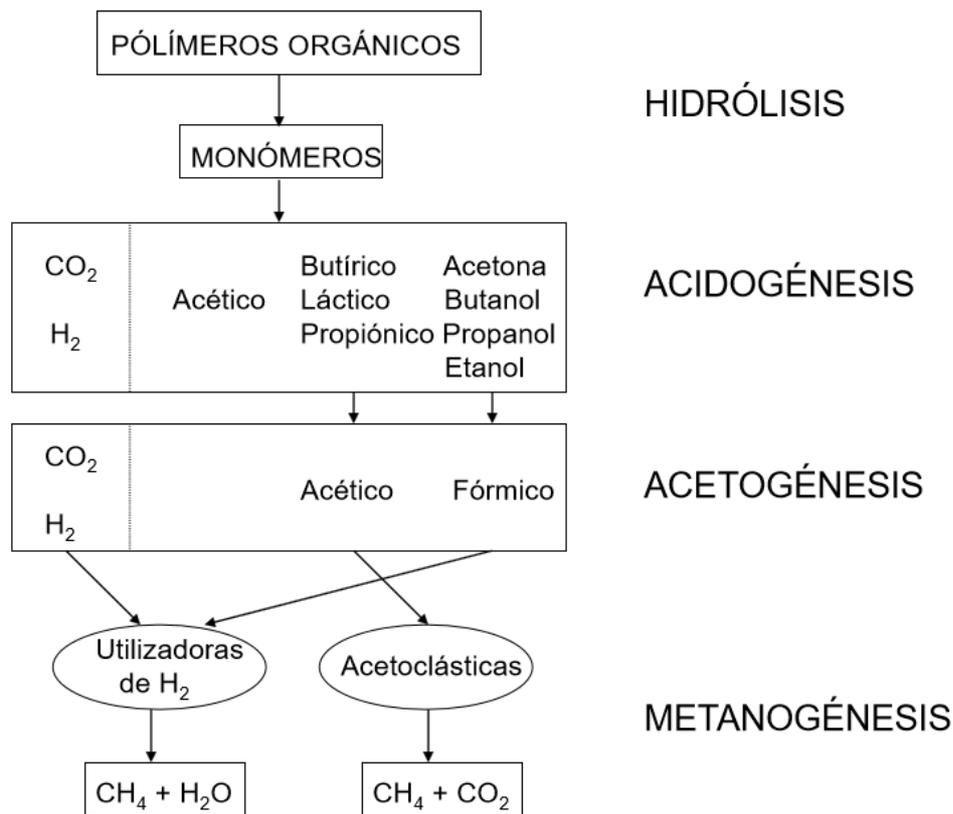


Figura 1. Esquema de las etapas del proceso de digestión anaerobia (Vilches, 2018).

En primer lugar, se produce la etapa de hidrólisis, que es la fase en la que se descomponen las cadenas largas de materia orgánica más complejas en otras cadenas orgánicas más cortas y simples. Esta descomposición la realizan bacterias hidrolíticas que actúan en el exterior de la célula considerándose exoenzimas. Durante este proceso ya se produce CO_2 y su pH óptimo es de 5,3 y 6,7, dependiendo del sustrato. Tras la etapa de hidrólisis se produce la etapa de acidogénesis, que es la fase en la que se convierten los productos intermedios de cadenas orgánicas más cortas en ácidos de cadena corta C2-C6, hidrógeno y dióxido de carbono. Las dos primeras fases las realizan las bacterias hidrolíticas-acidogénicas y acetogénicas, cuya función es hidrolizar y fermentar cadenas complejas en ácidos orgánicos simples. El crecimiento bacteriano en esta etapa es rápido y su valor óptimo de pH es entre 5,5 y 6,7. Ya en esta etapa se empieza a producir H_2S , CO_2 y NH_3 . A continuación, se produce la etapa de acetogénesis, donde se degradan los ácidos orgánicos de cadena corta en ácido acético. Las bacterias acetogénicas transforman el ácido propiónico y butírico en ácido acético. Su crecimiento es muy lento y sus reacciones son complicadas debido a la acumulación de hidrógeno disuelto. Por último, se produce la etapa de metanogénesis. La metanogénesis es el proceso más lento y por tanto más dominante y el que marca la cinética. Su función es transformar el ácido acético en metano y dióxido de carbono. Su pH óptimo se encuentra en un rango de entre 6,8 y 7,5 (Aqualimpia Engineering e.K., 2017).

En los procesos anaerobios, es necesario controlar varios parámetros, como son la alimentación, temperatura, grado de mezcla, cantidad de nutrientes, pH, alcalinidad, concentración de ácidos grasos volátiles, fenoles, azúcares y producción de biogás.

La digestión anaerobia es una de las alternativas que se presenta al depósito en vertedero o a la incineración para intentar reducir la acumulación de residuos, pero los impactos que se reducen con este hecho no están estudiados en profundidad, por lo que es necesario realizar un análisis durante todo el periodo de vida útil para la obtención de esos datos específicos.

Los impactos ambientales que producen alteraciones y aceleran el cambio climático son por ejemplo los gases de efecto invernadero, la eutrofización o el uso del suelo. Como se ha comentado con anterioridad, la gestión de residuos en la mayoría de las ciudades sigue siendo insatisfactoria a pesar de los esfuerzos que se están realizando para abordarlos. Esta es una de las razones por las que se requiere utilizar la herramienta de análisis del ciclo de vida (ACV), para poder evaluar y comparar las cargas ambientales causadas por diferentes opciones de tratamientos.

La evaluación del ciclo de vida es, por tanto, una herramienta utilizada para la investigación y valoración de los impactos ambientales de un producto, proceso o actividad causados por su existencia, y ayuda a evaluar e implementar oportunidades de mejoras ambientales. El ACV es un marco metodológico para estimar y evaluar los impactos ambientales atribuibles al ciclo de vida de un producto, proceso o servicio. Es decir, desde la extracción de las materias primas hasta el procesamiento, fabricación, distribución, uso, reparación y mantenimiento de los materiales, y eliminación o reciclaje (Bhupendra and Chandel, 2017).

Con esta herramienta se han realizado diversos estudios sobre la evaluación ambiental de opciones de tratamientos de residuos. Por ejemplo, Khandelwal et al. (2019) realizó un estudio comparativo de los sistemas convencionales de tratamiento de residuos sólidos urbanos (RSU) con otras opciones de tratamiento, como la instalación y recuperación de material, el compostaje y la digestión anaerobia, obteniendo como resultado del análisis de sensibilidad que los impactos ambientales se reducen considerablemente al aumentar la tasa de reciclaje. Oyoo, Leemans, and Mol (2014) compararon cuatro escenarios diferentes de gestión de residuos en la ciudad de Kampala de Uganda: vertido a cielo abierto y compostaje, vertedero, combinación de compostaje, reciclaje y vertedero, combinación de digestión anaeróbica, compostaje, reciclaje y vertedero, obteniendo como resultado que la integración del reciclaje de residuos en el sistema formal de gestión de residuos de Kampala produciría impactos ambientales mínimos y mejoraría la situación actual. Otro estudio fue el realizado por Dong et al., (2013) que comparó tres alternativas de tratamiento en Hangzhou, China: vertedero con recuperación energética (escenario 1), vertedero sin recuperación energética (escenario 0) e incineración con recuperación energética (escenario 2), obteniendo como resultado que el escenario 0 presenta el peor desempeño ambiental, y que una vez que se recolecta y trata el gas (escenario 1), todos los impactos ambientales disminuyen significativamente.

En algunos de los países que conforman la Cuenca Mediterránea, los residuos de frutas y verduras generados en los mercados mayoristas de las ciudades (y sus envases) están siendo depositados en vertedero

(CEOMED, 2019). Esta acción está generando acumulaciones de grandes cantidades de materia orgánica, lo que provoca emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), reduce el espacio de almacenamiento y se reduce la vida útil del vertedero. Es por esta razón que se va a realizar un análisis de ciclo de vida comparativo en la ciudad de Amán (Jordania) entre la situación actual (almacenamiento de residuos de frutas y verduras en vertederos) con una situación que propone construir una planta de digestión anaerobia utilizando esos residuos de frutas y verduras que actualmente se arrojan a vertedero para obtener energía eléctrica a partir del biometano producido.

Para la realización del análisis de ciclo de vida comparativo se van a seguir las normas europeas UNE-EN-ISO 14040-44:

- Norma UNE-EN-ISO 14040:2006. Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia.
- Norma UNE-EN-ISO 14044:2006. Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y Directrices.

Según dichas normas, la realización de un ACV consta de cuatro fases: (1) definición del objetivo y alcance, (2) inventario del ciclo de vida, (3) evaluación del impacto del ciclo de vida, y (4) interpretación de resultados.

2 OBJETIVOS

El presente trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto europeo “Employing Circular Economy Approach for OFMSW Management within the Mediterranean Countries (CEOMED)”, el cual está financiado por el programa marco Horizon2020 mediante el programa ENI CBC “Mediterranean Sea Basin Programme”. Dicho proyecto pretende diseñar nuevos planes de gestión de residuos en las ciudades de Sfax (Túnez) y Amán (Jordania), que se centra y aborda los residuos generados en los mercados mayoristas de frutas y verduras. Siguiendo un enfoque de economía circular, la fracción orgánica de los residuos de mercados será tratada mediante un proceso biológico (digestión anaerobia) utilizando el digerido como fertilizante.

Enmarcado en el desarrollo del proyecto CEOMED, el presente trabajo tiene como objetivo principal la realización de un Análisis de Ciclo de Vida comparativo con el fin de identificar y comparar los impactos ambientales del sistema utilizado actualmente por el mercado mayorista de la ciudad de Amán para la gestión y el tratamiento de los residuos de frutas y verduras generados, cuyo fin de vida es el vertedero, frente a un nuevo sistema de gestión de los residuos generados en el mercado que propone la aplicación del proceso de digestión anaerobia.

Los destinatarios de este estudio serán los gestores de los mercados locales, los agricultores locales, los más de 2.500 clientes diarios que tiene el mercado y el personal técnico y administrativo de la ciudad de Amán.

Con los resultados obtenidos en este proyecto, se determinarán los beneficios ambientales potenciales cuando los residuos son tratados en la planta de digestión anaerobia en vez de ser depositados en el vertedero.

3 ALCANCE

3.1 Definición de los sistemas a estudiar

El sistema objeto de estudio es el fin de vida de las frutas y verduras que son desechadas en el mercado mayorista de la ciudad de Amán (Jordania), es decir, la gestión de estos residuos generados, tanto en la situación actual como en la situación que se propone, contemplando el potencial de calentamiento global, así como la categoría de impacto ambiental principal.

- Sistema 1: Situación actual de gestión y tratamiento de los residuos de frutas y verduras generados en el mercado mayorista de la ciudad de Amán (Jordania). Los residuos son tratados previamente en la estación de transferencia Al Shaer y luego depositados en el vertedero Al Ghabawi. Para el tratamiento de los lixiviados generados en la estación de transferencia se propone estudiar dos escenarios diferentes: (A) Emisión al suelo y (B) Tratamiento de aguas residuales.

- Sistema 2: Situación que se propone para el tratamiento de los residuos de frutas y verduras generados en el mercado mayorista de la ciudad de Amán (Jordania). Se propone mediante la aplicación de un tratamiento biológico de digestión anaerobia cuyos subproductos serán biogás y digerido. El biogás, será transformado mediante cogeneración en energía térmica y eléctrica, que serán empleadas en el funcionamiento de la maquinaria de la planta, y, además, la electricidad excedente será vendida al tendido eléctrico. Por otro lado, el digerido generado será transformado en biofertilizante para su uso en jardinería.

3.2 Función del sistema de estudio

La función del sistema a estudiar es la gestión y tratamiento de los residuos de frutas y verduras generados en el mercado mayorista de Amán, de manera controlada, con el fin de evitar problemas medioambientales.

3.3 Unidad funcional

La unidad funcional a la que se van a referenciar las entradas y salidas de los sistemas a estudiar será 5.000 kilogramos de FVW diarios, ya que es la cantidad de residuos estimada que se tratará diariamente.

3.4 Límites del sistema

Los límites de los sistemas a estudiar que han sido considerados en este proyecto son los siguientes:

- Límites geográficos. Límite del sistema a nivel del mercado mayorista de Amán.
- Etapas incluidas en el análisis. Recogida y transporte de residuos, y gestión de estos (**Figura 2**).

- Etapas excluidas en el análisis. Al tratarse de un ACV comparativo entre dos sistemas, las siguientes etapas no han sido tenidas en cuenta, ya que son iguales para los dos sistemas a estudiar: extracción de materia prima, transporte de las semillas hasta su cultivo para la producción de fruta y verdura, transporte de los productos al mercado, el uso/consumo de estos y la gestión y el tratamiento de los residuos de envases generados en el mercado. Asimismo, las etapas de construcción y desmantelamiento de ambas instalaciones también han sido excluidas, no por el hecho de ser un ACV comparativo, sino por la vida útil de estas respecto a la unidad funcional, asumiendo que el impacto será mucho menor que el de la etapa de tratamiento de los residuos.



Figura 2. Límites del sistema.

3.5 Descripción de los sistemas

El mercado mayorista central de frutas y verduras de la ciudad de Amán (Jordania) fue construido en 1995 con el objetivo de comercializar los productos agrícolas jordanos. Este mercado comprende las oficinas de la dirección del mercado junto con 406 establecimientos comerciales y edificios de servicios. A diario, se reciben en el mercado, aproximadamente, 3.350 toneladas de frutas, verduras y diferentes tipos de hierbas. La cantidad de frutas y verduras que no se vende en el mercado o que no se encuentra en buen estado para su venta, junto con los residuos generados de envases, suele ser de aproximadamente 15-22 toneladas diarias, de los cuales se ha cuantificado que de FVW son solo 5.000 kg/d (CEOMED progress report, 2020). Según los datos aportados por el proyecto CEOMED, los FVW generados en el mercado presentan la siguiente caracterización: 15 % de sólidos totales (ST), de los cuales un 90 % son sólidos volátiles (SV), su contenido en carbono es del 46,5%, su contenido en nitrógeno es de 1,9% y su humedad es del 85 %.

3.5.1 Descripción del Sistema 1: Situación actual de gestión y tratamiento de los residuos de frutas y verduras generados en el mercado mayorista de la ciudad de Amán (Jordania)

En la **Figura 3** se representa el diagrama de flujo que describe el Sistema 1, correspondiente con la situación actual para el tratamiento de los residuos de frutas y verduras generados en el mercado mayorista de la ciudad de Amán (Jordania).

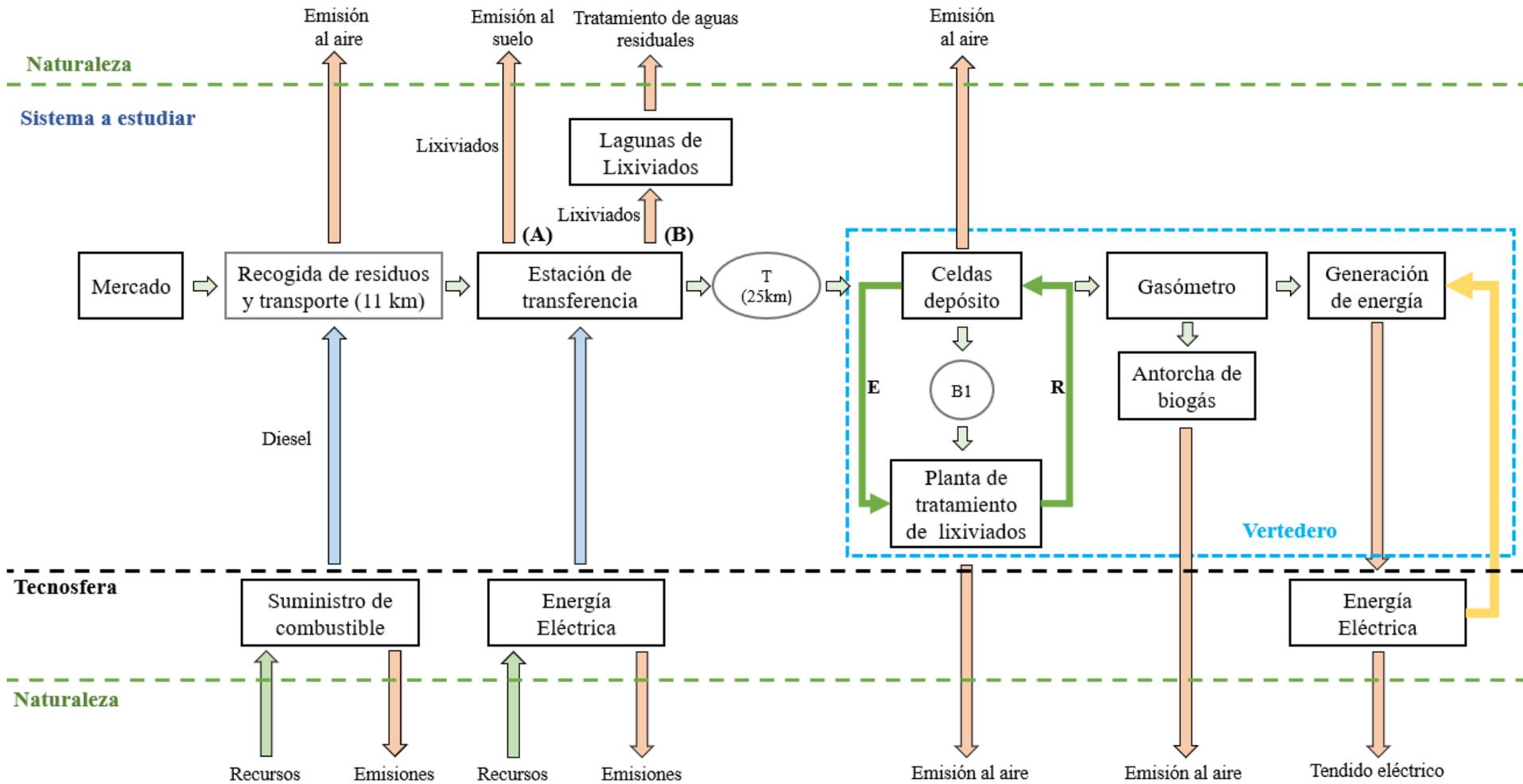


Figura 3. Descripción del sistema 1 (T: Transporte; B: Bomba; E: Extracción de lixiviados; R: Recirculación de lixiviados).

Los residuos generados en el mercado mayorista, compuestos por material de envasado, además de los residuos de frutas y verduras, son recogidos manualmente y depositados en 110 contenedores de 1.100 L de capacidad que se encuentran distribuidos por las zonas de funcionamiento del mercado. Posteriormente, un camión de recogida cargado mecánicamente y provisto de un mecanismo interno de compactación, carga y transporta los residuos generados en el mercado mayorista, una vez al día, hasta la estación de transferencia más cercana situada a unos 11 km de distancia (CEOMED progress report, 2020). En la estación de transferencia de Al Shaer, los residuos son compactados utilizando un sistema de compactación hidráulica. La producción de lixiviados en la compactación depende en gran medida del grado de compactación, la composición de los residuos sólidos, el contenido de humedad y la profundidad y la intensidad de la lluvia (Nzeadibe, Ayadiuno, and Akukwe 2010). Debido al desconocimiento de la cantidad aproximada de lixiviados generados tras la compactación de estos residuos, para este proyecto se ha supuesto una pérdida de un 10 % de masa. Por tanto, a la salida de la estación de transferencia se tienen dos corrientes, 4.500 kg/d (90 % de los residuos generados) con destino al vertedero, y una cantidad de lixiviados de 500 kg/d (10 % de los residuos generados). Para esta cantidad de lixiviados se ha supuesto una humedad del 90 %, quedando un 10 % restante de materia seca. Para el tratamiento de los lixiviados generados se han propuesto dos escenarios de estudio: (A) Emisión al suelo y (B) Tratamiento de aguas residuales. Para la opción A, se propone el vertido de los lixiviados directamente al suelo, mientras que en la opción B, se propone su tratamiento en plantas de tratamiento de aguas residuales. Por otro lado, los residuos ya compactados son trasladados en camiones hasta el vertedero Al Ghabawi (**Figura 4**) donde son depositados en celdas.

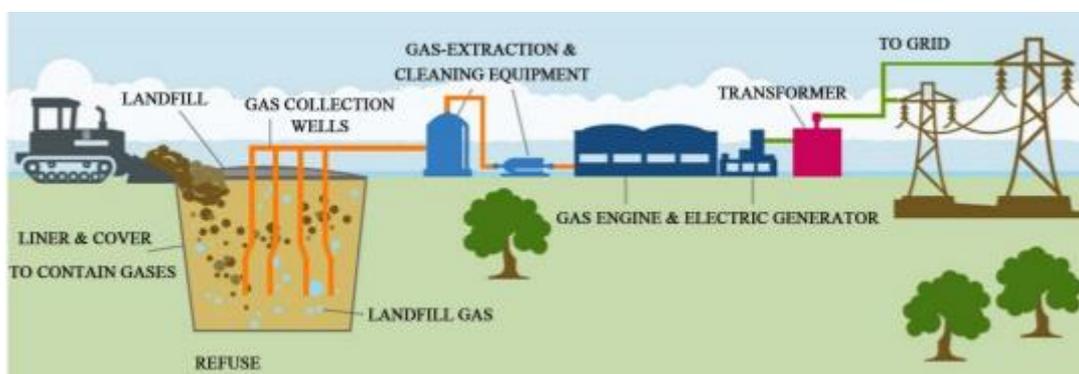


Figura 4. Esquema de la disposición del vertedero de Al Ghabawi (Hadjidimoulas, 2018).

El vertedero Al Ghabawi está situado en la zona de Uhd (31 55 79.75N 36 11 38.13E), y cuenta con una superficie total de 2 km². Da servicio al municipio de Amán, Zarqa y los municipios de Ruseifeh, principalmente a través de una estación de transferencia, y a algunas empresas privadas, hospitales, universidades y al ejército. La estación de transferencia Al Shaer, dónde son recogidos los residuos del municipio de Amán, se encuentra a unos 25 km de distancia del vertedero. La vida útil del vertedero Al Ghabawi se ha estimado hasta el año 2035. Esta estimación dependerá en gran medida de la generación futura de desechos, el crecimiento de la población y los desechos.

La cantidad de residuos que recibe el vertedero se pesa con una báscula única que se encuentra conectada a un sistema de gestión informatizada. Actualmente, el vertedero cuenta con cinco celdas disponibles para el vertido de los residuos, de las cuales tres están completamente llenas y cubiertas, e incluyen la instalación de una red de recogida de gas de vertedero. Las celdas cuatro y cinco se encuentran activas y en proceso de llenado. Para los próximos años el vertedero de Al Ghabawi cuenta con un proyecto de ampliación en el que se construirán cuatro nuevas celdas (**Figura 5**) (Hadjimoulas, 2018). El llenado de estas celdas se lleva a cabo utilizando maquinaria agrícola o de construcción provistas de palas. Todos los residuos deben ser cubiertos con material de suelo de permeabilidad media (tierra), ya sea éste el tapado provisional o final de la celda. Cuando las celdas han sido llenadas, como en el caso de las celdas 1, 2 y 3, se construye un recubrimiento final de varias capas que empieza por los residuos y va ascendiendo. En la **Figura 6**, se muestran detalladas todas las capas que forman el recubrimiento final. Por encima del material del suelo para la cubierta de los residuos, así como de la capa de formación superior, se coloca una capa para aislar el contorno, hecha de materiales homogéneos de granulometría aumentada, con un diámetro máximo de 15 cm y un espesor medio de 50 cm. A continuación, se coloca una capa de barrera de revestimiento de arcilla geosintética (GCL, de las siglas en inglés Geosynthetic Clay Lining) de 7 mm de grosor y de baja permeabilidad al agua, 5×10^{-11} m/s. Luego, se estratifica el material de grava (capa de drenaje) de clase granulométrica 20/40 y de 20 cm de espesor, con un índice de permeabilidad al agua entre $1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-3}$ m/s. Esto es seguido por una separación geotextil, con un peso de 200 g/m^2 , utilizado para proteger la capa superpuesta contra la capa de drenaje. Finalmente, se coloca una capa de protección, hecha de materiales uniformes de granulometría aumentada con 15 cm de diámetro máximo y 100 cm de espesor.

La producción de biogás en un vertedero de este tipo se lleva a cabo a través de cinco etapas más o menos diferenciadas. Una primera etapa denominada etapa de adaptación, donde el contenido orgánico de los residuos se degrada bajo el efecto de los microorganismos inmediatamente después de ser depositados en el vertedero. En esta fase, la degradación es aerobia, debido al aire capturado en el interior de la masa de residuos. Las etapas de transición, acidogénesis y formación de metano son en las que tiene lugar la degradación anaerobia, es decir, cuando el oxígeno ha sido consumido. Y finalmente, la última etapa, la etapa de maduración, que comienza cuando todo el material biodegradable se ha convertido en CH_4 y CO_2 . La duración de cada una de las etapas varía y depende de la cantidad de materiales orgánicos depositados en el vertedero, la disponibilidad de nutrientes, la humedad de los residuos y su nivel de descomposición.

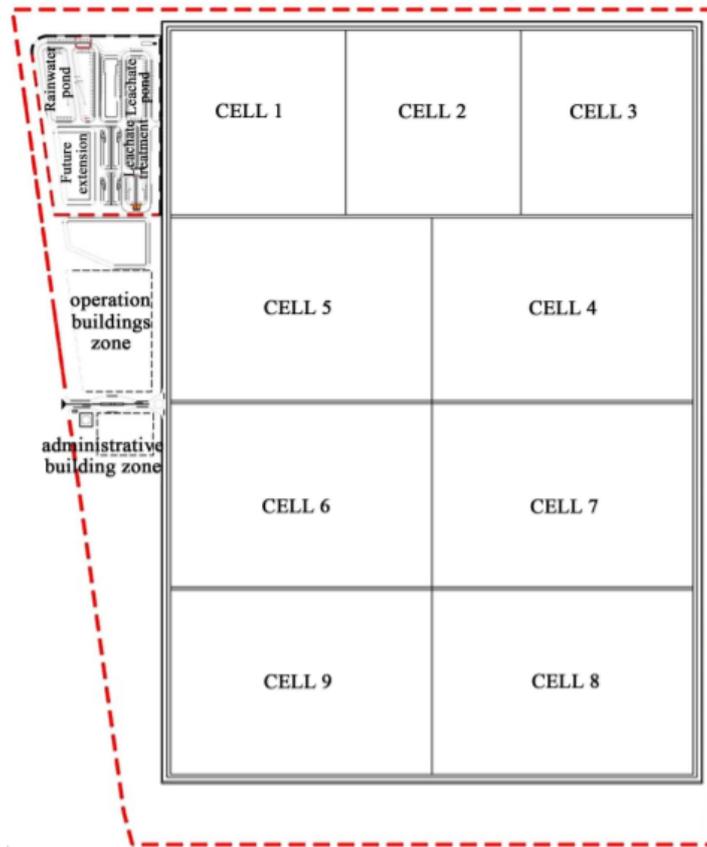


Figura 5. Representación del diseño general del vertedero de Al Ghabawi (Hadjidimoulas, 2018).

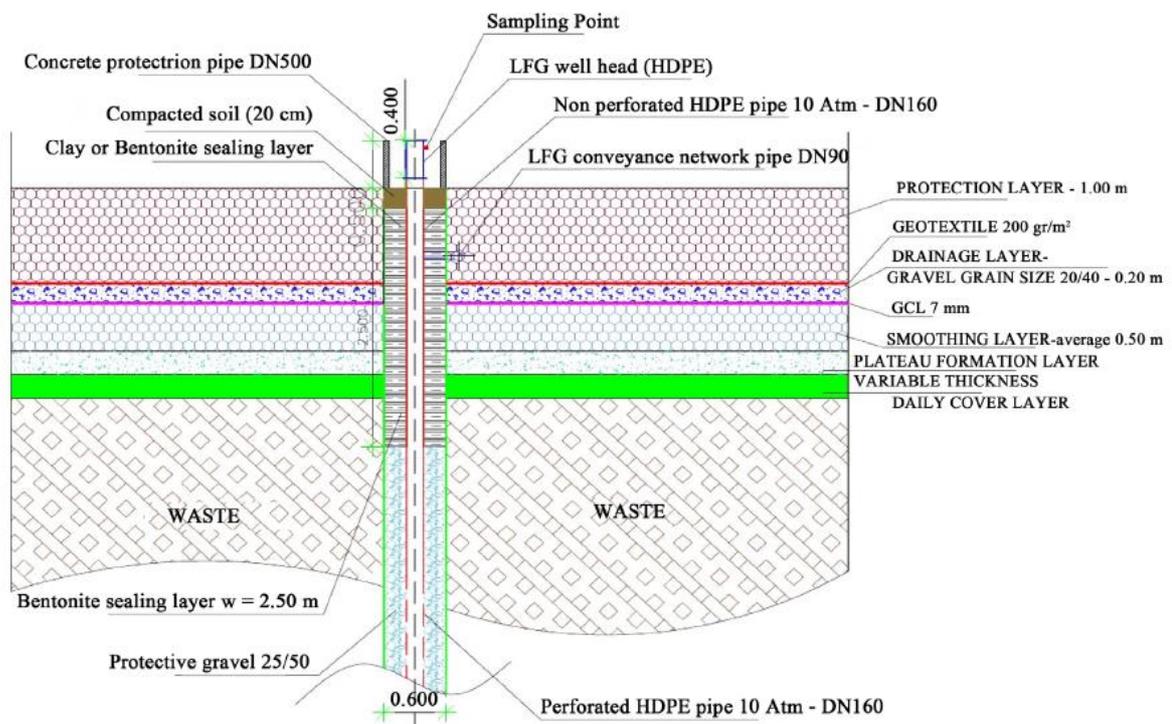


Figura 6. Detalle de las capas que forman el recubrimiento final de las celdas llenas y el diseño de los pozos verticales para la extracción del gas de vertedero (Hadjidimoulas, 2018).

El gas de vertedero es extraído de unos pozos verticales que fueron perforados previamente, contruídos/rellenados con tubos de polietileno de alta densidad y reodeados de grava que actúa como filtro para evitar la ingestión de sólidos. El espacio anular alrededor de la parte superior del pozo está rellena y sellada con arcilla o bentonita con el fin de evitar el escape del gas de vertedero. Los últimos 20 cm hasta la parte superior del pozo se llenaron con tierra compactada. La profundidad de los pozos varía según la ubicación y debe estar siempre a 2 – 3 metros por encima del fondo del vertedero. Actualmente, el vertedero cuenta con un total de 537 pozos repartidos por las celdas llenas. Una descripción más detallada se muestra en la **Figura 6**. Además, el vertedero cuenta con una estación de extracción de gas de vertedero y su correspondiente antorcha, instalada como medida de seguridad en el caso de existencia de fuga de gas de vertedero o producción en exceso. El gas de vertedero extraído se almacena en un gasómetro, y posteriormente, se transforma en energía eléctrica mediante generación con una eficiencia del 30 % (**Figura 4**). Parte de la energía eléctrica generada se utiliza para el funcionamiento del vertedero. La energía eléctrica que no es demandada para el funcionamiento del vertedero es vendida al tendido eléctrico, ya que el Greater Amman Municipality (GAM) tiene un acuerdo con las compañías eléctricas para tratar la energía eléctrica generada a partir del biogás (CEOMED progress report, 2021).

Los lixiviados generados en el interior del vertedero son extraídos con ayuda de 16 pozos de extracción localizados en varias posiciones. En cada pozo hay instalada una bomba para bombear los lixiviados del fondo del vertedero a la superficie donde son almacenados en las lagunas de la planta de tratamiento de lixiviados (**Figura 7**). El vertedero cuenta con un total de ocho lagunas impermeables de almacenamiento para los lixiviados generados, pretendiendo disminuir posibles infiltraciones. Además, el vertedero cuenta con cuatro estanques de almacenamiento de lixiviados de emergencia que son considerados como estanques temporales, ya que no reciben ningún tipo de tratamiento. Los lixiviados generados en las celdas depósitos del vertedero, que previamente son almacenados en las balsas de la planta de tratamiento de lixiviados, son recirculados, para atenuar la actividad biológica y otras reacciones químicas y físicas que ocurren dentro del vertedero. Este sistema de recirculación se utiliza como tratamiento de los lixiviados ya que tiene grandes beneficios. Al recircular los lixiviados se logra un aumento en la humedad de los residuos dispuestos, que a su vez genera un aumento de la tasa de producción de gas de vertedero en la celda (Hadjidimoulas, 2018). El vertedero de Al Ghabawi consta de un sistema de recirculación vertical compuesto por 37 pozos para las celdas llenas. Para su instalación se excavaron agujeros de 3.5 m de profundidad en los residuos, y se instaló un tubo de polietileno de alta densidad. Estos sistemas verticales se conectan con una instalación de tuberías horizontales, por encima del suelo de la capa de cubierta, que transfiere el lixiviado recirculado desde la balsa de filtración de la planta de tratamiento de lixiviados a los pozos. Con el fin de proporcionar la presión necesaria para guiar el lixiviado a los pozos, se construyó una estación de bombeo donde se instalan bombas sumergibles. Este diseño permite recircular el lixiviado a cada celda de forma independiente y controlar la cantidad de lixiviado recirculado en relación con el gas de vertedero producido (Hadjidimoulas, 2018).

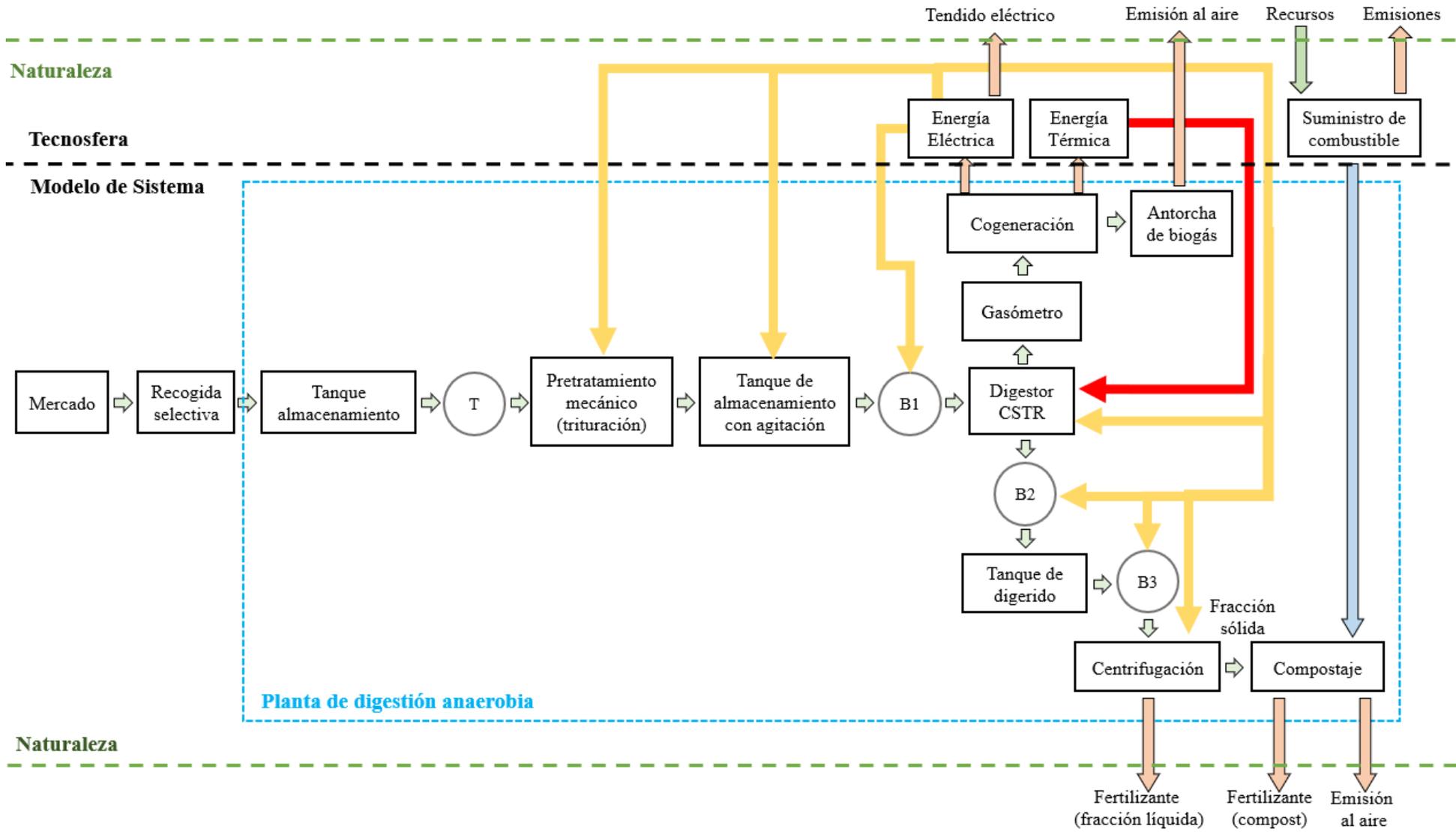


Figura 7. Distribución de los lixiviados.

3.5.2 Descripción del sistema 2: Situación que se propone para el tratamiento de los residuos de frutas y verduras generados en el mercado mayorista de la ciudad de Amán (Jordania)

En la **Figura 8** se representa el diagrama de flujo que describe el Sistema 2, correspondiente con la situación que se propone para el tratamiento de los residuos de frutas y verduras generados en el mercado mayorista de la ciudad de Amán (Jordania).

Figura 8. Descripción del sistema 2 (T: Transporte; B: Bomba).



Los residuos generados en el mercado, compuestos por los envases y las frutas y verduras desechadas, serán separados mediante un proceso de recogida selectiva haciendo uso de diferentes contenedores distribuidos por las zonas de funcionamiento del mercado. Los envases serán destinados a la estación de transferencia Al Shaer, y posteriormente serán depositados en el vertedero Al Ghabawi. Por otro lado, los FVW recogidos selectivamente serán transportados mediante carretillas manuales hasta un tanque de almacenamiento situado en la planta de digestión anaerobia que será construida en el mismo recinto del mercado, ya que éste dispone de una superficie de 40.000 m² asignados para desarrollos futuros (CEOMED progress report, 2020). De este modo, los costes de transporte serán inexistentes.

La primera etapa de la planta de digestión anaerobia propuesta (**Figura 8**) será el almacenamiento de los residuos en un tanque que se encuentra a temperatura ambiente (20 °C) donde se irán acumulando los FVW tras su llegada diaria. Estos residuos se van a transportar mediante una cinta transportadora (T), para la que se ha asumido que será capaz de transportar a la unidad de pretratamiento mecánico (triturador) 450 kg/h de FVW. La unidad de pretratamiento mecánico o triturador tendrá una capacidad de 450 kg/h, y reducirá el tamaño de partícula de los FVW hasta 3 mm. Esta trituradora constará de dos bocas, una superior por la que la cinta transportadora irá introduciendo el residuo, y otra por la parte inferior, por la que directamente saldrá el residuo ya triturado para ser depositado en un tanque de almacenamiento con agitación. En estas primeras etapas de la planta de digestión anaerobia se trabajará en régimen discontinuo, de manera que la cinta transportadora y el triturador no estarán en funcionamiento las 24 h. Este tanque estará provisto de un sistema de agitación en condiciones de mezcla perfecta y su capacidad máxima será de 3.000 kg de residuo triturado diarios. Desde el tanque de almacenamiento, el sustrato ya triturado y homogeneizado, será alimentado al digestor anaerobio con ayuda de una bomba (B1). El digestor anaerobio será un digestor de tanque agitado continuo (CSTR), cuyo volumen total será de 432 m³, mientras que su volumen útil será de 340 m³. Las condiciones operacionales del digestor anaerobio serán las siguientes: un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 25 días, una velocidad de carga orgánica (VCO) de 2,5 kg SV/m³-d, y una temperatura de trabajo en condiciones mesofílicas (35-37 °C) (CEOMED progress report, 2020). También, el digestor estará equipado con un sistema de calentamiento térmico con el que se mantendrán las condiciones mesofílicas de trabajo, y un sistema eléctrico que pondrá en funcionamiento el agitador radial del que está provisto. Además, contará con un sistema que controlará el pH, el oxígeno disuelto, la presión de rotación y la velocidad de la agitación; y, por último, con una unidad de medición de la composición del biogás que incorpora sensores de CO₂ y CH₄. El proceso de digestión anaerobia finalizará con la obtención de dos productos principales, biogás (60 % CH₄ – 40 % CO₂) (CEOMED progress report, 2020). El biogás generado en el digestor se almacenará en un gasómetro provisto de una antorcha de seguridad (Feliu and Flotats, 2019). El 95 % del biogás generado será tratado mediante cogeneración para generar energía térmica y eléctrica, con una eficiencia del 45 % y el 39 %, respectivamente (Serrano et al. 2021), mientras que el 5% restante del biogas generado será quemado por completo en la antorcha de

seguridad, produciendo CO₂ biogénico y H₂O. La energía térmica generada será incorporada a la línea de calentamiento térmico del digestor anaerobio, mientras que la energía eléctrica generada se utilizará para el funcionamiento de la planta de digestión anaerobia (trituration, agitación, bombeo, etc.). La energía eléctrica que no sea demandada para el funcionamiento de la planta será vendida al tendido eléctrico, ya que el Greater Amman Municipality (GAM) tiene un acuerdo con las compañías eléctricas para tratar la energía eléctrica generada a partir de biogás. Por otra parte, el digerido generado en el proceso de digestión anaerobia será almacenado en un tanque, y posteriormente, será tratado en una centrífuga tubular donde se separará en dos fases, obteniéndose así un digerido líquido y un digerido sólido. Para el transporte del digerido desde el digestor hasta el tanque y desde el tanque a la centrífuga se emplearán bombas (B2 y B3). El digerido líquido será utilizado directamente como fertilizante líquido en jardinería (irrigación), mientras que el digerido sólido será tratado mediante compostaje para finalmente obtener un fertilizante orgánico (compost) cuyas características lo harán apto para su aplicación como enmienda orgánica en jardinería. El compostaje implica la conversión de la materia orgánica, produciendo así CO₂, N₂, NH₃ y un material sólido recalcitrante, a menudo denominado compost que contiene sustancias húmicas (Espzarza et al., 2020). Según Manu et al., 2021, el nitrógeno total en los digeridos de diferentes tipos de desperdicio de alimentos oscila entre el 1,1 % y el 9,6 %, con un valor promedio del 4,6 %. Debido al alto contenido de nitrógeno, la relación carbono (C) / nitrógeno (N) del digerido es menor, llegando a ser aproximadamente 11 en la literatura, lo que es mucho más baja que la proporción óptima de C/N (20-30) para un compostaje efectivo (Cerdeira et al., 2018). Rincón et al. (2019) estudia la aplicación del proceso de compostaje a la fracción sólida del digerido generado mediante la aplicación del proceso de digestión anaerobia a una mezcla de residuos biodegradables (ADB) compuesta por residuos biodegradables de hipermercado, grasas de la industria alimentaria y residuos de cereales. Para este residuo, similar al estudiado en este proyecto, se reporta una ratio C/N de 10,15 (similar al referenciado en la bibliografía) y para el que se cuantifican que las emisiones de amoníaco durante el proceso de compostaje son dominantes, atribuyéndose que puede estar relacionado con la baja relación C/N del digerido. La emisión de amoníaco reportada, y supuesta para el residuo tratado en este trabajo, sería de 0,33 kg NH₃ /t de residuo. Finalmente, en el proceso de compostaje, el volteo de las hileras de digerido se llevará a cabo con maquinaria agrícola provista de palas.

3.6 Procedimientos de asignación, expansión del sistema

Para la asignación de emisiones y cargas ambientales al servicio principal, tratamiento del residuo, y subproductos, se va a emplear el método de asignación por expansión del sistema, que consiste en asignar todos los impactos del sistema al producto/proceso/servicio principal y restarle créditos, que se contabilizan como impactos evitados, por la generación subproductos. En este proyecto, para la asignación se tendrá en cuenta que en el Sistema 1 se obtendrá energía eléctrica como subproducto, mientras que en el Sistema 2,

además de energía eléctrica se obtendrán, biofertilizantes (fracción líquida y compost) que se destinarán a la venta.

Impactos producto/servicio = Impactos del ciclo de vida producto/servicio - Créditos subproductos

3.7 Categorías de impacto ambiental seleccionadas y metodología de evaluación de impacto

Los impactos ambientales se han calculado aplicando la metodología Recipe 2016 Midpoint (H), cuantificando, por tanto, las emisiones y las extracciones de recursos de los sistemas en un número limitado de categorías de impacto ambiental. Las categorías de impacto ambiental que evalúa el método Recipe 2016 Midpoint (H), se muestran en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Categorías de impacto ambiental evaluadas en el método Recipe 2016 Mindpoint (H).

Categorías de impacto ambiental	Unidad
<i>Calentamiento global</i>	kg CO ₂ eq
<i>Agotamiento del ozono estratosférico</i>	kg CFC11 eq
<i>Radiación ionizante</i>	kBq Co-60 eq
<i>Formación de ozono, salud humana</i>	kg Nox eq
<i>Formación de partículas finas</i>	kg PM _{2,5} eq
<i>Formación de ozono, ecosistemas terrestres</i>	kg Nox eq
<i>Acidificación terrestre</i>	kg SO ₂ eq
<i>Eutrofización de agua dulce</i>	kg P eq
<i>Eutrofización terrestre</i>	kg N eq
<i>Ecotoxicidad terrestre</i>	kg 1,4- DCB
<i>Ecotoxicidad marina</i>	kg 1,4- DCB
<i>Ecotoxicidad de agua dulce</i>	kg 1,4-DCB
<i>Toxicidad cancerígena humana</i>	kg 1,4- DCB
<i>Toxicidad humana no cancérogénica</i>	kg 1,4- DCB
<i>Uso del suelo</i>	m ² crop eq
<i>Escasez de recursos minerales</i>	kg Cu eq
<i>Escasez de recursos fósiles</i>	kg oil eq
<i>Consumo de agua</i>	m ³

De las categorías de impacto ambiental anteriormente citadas, este proyecto se centrará inicialmente en la evaluación de las que se listan a continuación. Sin embargo, una vez obtenidos los resultados, se analizarán, además, aquellas categorías de impacto ambiental que muestren una mayor diferencia para ambas alternativas de tratamiento.

1. Calentamiento global (emisión de Gases de Efecto Invernadero, kg CO₂ equivalente).

El aumento progresivo de la temperatura del planeta a causa de los gases de efecto invernadero se traduce en un interés por conocer, tanto por parte de los clientes como de los productores, la denominada huella de carbono.

2. Ecotoxicidad terrestre (kg 1,4-Diclorobenceno equivalente).

Predice los efectos de la contaminación en aquellos ecosistemas en los que se está perdiendo calidad ambiental por efecto de la contaminación y de las actividades humanas. Por ejemplo, la contaminación producida por los vertidos de aguas residuales y los lixiviados de vertederos incontrolados entre otros, producen acumulación en el suelo de sustancias contaminantes.

3. Toxicidad humana no cancerígena (kg 1,4-Diclorobenceno equivalente).

La liberación a la atmósfera de gases, sustancias o partículas puede provocar daños directos a la atmósfera, alterando su composición y funcionalidad. Esto puede provocar deterioros en la capa de ozono al aumentar la radiación ultravioleta en la superficie terrestre, aumentando los riesgos en la salud humana pudiendo provocar enfermedades en los ojos, daños al sistema inmunitario o problemas respiratorios o en la piel.

4. Escasez de recursos fósiles (kg oil eq)

El consumo actual de combustibles fósiles ha aumentado, y esto está provocando alteraciones en los gases de efecto invernadero, ya que al quemar los combustibles fósiles se aumenta la emisión de dióxido de carbono, provocando un aumento de temperatura y del calentamiento global. Los recursos fósiles son limitados, ya que tardan mucho tiempo en generarse, por lo que es probable que se agoten como no se tome medida al respecto.

3.8 Requisitos de calidad de datos

Para realizar la evaluación de la calidad de datos utilizados en este proyecto, y recogidos en las **Tablas 6 y 7** para cada ítem, se han seguido los pasos propuestos en el manual de uso del software CCaLC2 (Azapagic, 2016), desarrollado por la Universidad de Manchester. En primer lugar, se ha evaluado la procedencia de la información recogida, teniendo en cuenta la antigüedad de los datos, el origen geográfico de los datos, fuente de datos, integridad de los datos y reproducibilidad de los datos.

El indicador de calidad del dato individual (Data Quality Indicator, DQI) se calcula como la suma ponderada de los cinco indicadores citados, evaluados del 1 a 3 según los criterios expuestos en la **Tabla 2**. Según queda recogido en el manual del uso del software CCaLC2, se ha asignado el siguiente peso a cada uno de los indicadores: antigüedad de los datos (20 %), origen geográfico de los datos (10 %), fuente de datos (30 %), integridad de los datos (20 %) y reproducibilidad de los datos (20 %). Una vez

determinado su valor numérico, la calidad del dato individual se clasifica como alta (21-30), media (11-20) o baja (1-10).

Tabla 2. Criterios utilizados para la evaluación de la calidad de datos.

Criterios	Calidad alta	Calidad media	Calidad baja
<i>Antigüedad (años)</i>	< 5	5-10	> 10
<i>Origen geográfico</i>	Jordania	Europa	Otros
<i>Fuente de datos</i>	Fiable	Poco fiable	Nada fiable
<i>Integridad del dato</i>	Consideración completa	Consideración de los más relevantes	Consideración de algunos relevantes
<i>Reproducibilidad</i>	Completamente reproducible	Parcialmente reproducible	No reproducible

Además, estas fuentes se han dividido en dos categorías:

- De cantidad: aquellas que sirven para dimensionar o cuantificar los flujos del proceso
- De tecnosfera: incluidas en la base de datos, “*Ecoinvent 3 – allocation at point of substitution – unit*” del software SimaPro, es decir, cuando el valor no es un recurso/emisión directo desde/a la naturaleza.

Los valores obtenidos para la calidad de datos (DQI) pueden verse en el **Anexo I**.

Tras haber calculado los impactos de cada sistema, es posible calcular la calidad de dato total (DQT) de las categorías de impacto ambiental seleccionadas (Calentamiento global, ecotoxicidad terrestre, toxicidad no cancerígena humana, escasez de recursos fósiles). Este indicador sirve para conocer la certidumbre con la que se pueden llevar a cabo las interpretaciones de los resultados obtenidos, ya que, si un ítem con una baja calidad de dato tiene un gran peso sobre las categorías de impacto ambiental, las conclusiones que se saquen a partir de esa categoría de impacto ambiental no se pueden llevar a cabo con certeza. Al igual que la DQI, la DQT se puede clasificar en función de su valor numérico: Alta (233-300), media (167-233) o baja (100-166). Esta DQT se puede calcular aplicando la siguiente fórmula:

$$DQT_{c.j.} = \sum_{i=0}^n Ii.c.i \cdot DQSi \quad \text{Ecuación 1}$$

donde $DQT_{c.j.}$ es la calidad de datos total para la categoría de impacto, $DQSi$ es la calidad de datos del subsistema i para la categoría de impacto C.I. (1,2 o 3), y el peso del subsistema para cada categoría de impacto se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$Ii.c.i = \frac{\text{Impacto del subsistema}}{\text{Impacto del sistema}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Por tanto, complementándose con los datos presentados en el **Anexo I**, se obtiene para cada categoría de impacto ambiental los valores de DQT:

Tabla 3. Calidad de datos total de las categorías de impacto ambiental para cada sistema estudiado.

Categoría de impacto ambiental	Sistema 1		Sistema 2	
	DQT	Calidad	DQT	Calidad
<i>Calentamiento global</i>	300	Alta	300	Alta
<i>Ecotoxicidad terrestre</i>	300	Alta	300	Alta
<i>Toxicidad no cancerígena humana</i>	300	Alta	300	Alta
<i>Escasez de recursos fósiles</i>	300	Alta	300	Alta

Se observa que todos los valores de DQT calculados han obtenido la puntuación máxima, ya que todos los valores de DQI tienen un valor de calidad alta o media, de modo que la DQI del ítem a los que se refieren van a tener siempre la máxima valoración.

3.9 Suposiciones

3.9.1 Suposiciones del Sistema 1

1. Se ha supuesto una pérdida de un 10 % de masa de FVW al compactar los residuos en la estación de transferencia, masa correspondiente a la corriente de lixiviados. Además, se ha estimado una humedad del 90 % para esta corriente.
2. Se va a suponer que el compactador hidráulico de la unidad de transferencia utilizado en este proyecto tendrá una potencia lineal con respecto al compactor reportado en el proyecto realizado por Mendía (2020).
3. Para llevar a cabo los cálculos en el análisis de inventario, debido al desconocimiento de estos datos, se ha supuesto una densidad de 1 kg/L tanto para el residuo de FVW como para los lixiviados generados durante el proceso.
4. Se va a considerar despreciable el consumo de diesel requerido por la maquinaria agrícola o de construcción provista de pala al depositar los FVW en las celdas del vertedero.
5. Se va a suponer una eficiencia de captura de biogás en el vertedero de un 75 % (Hadjidimoulas, 2018).
6. Se supondrá que la composición del biogás generado en las celdas depósito del vertedero será de 50 % de CH₄ y un 50 % de CO₂.
7. Richard et al. 2021 reportan que, en una planta donde se transforma biogás en energía, sería aceptable suponer que aproximadamente un 5 % de la producción diaria de biogás podría ser desviada hasta la antorcha de seguridad, ya sea por pérdidas o por una producción en exceso. En el presente trabajo se ha supuesto el desvío del 5 % de la producción diaria hasta la antorcha de seguridad.

8. Se supone una eficiencia de la antorcha de seguridad del 100 %, siendo todo el CH₄ que llega a la antorcha transformado a CO₂ biogénico y H₂O.

3.9.2 Suposiciones del Sistema 2

1. En la unidad de pretratamiento, el residuo será tratado en una trituradora cuya capacidad varia desde 150 hasta 600 kg/mm·h dependiendo del producto, del tamaño de corte y de la condición (FAM, 2021). Esta maquinaria es específica para el corte de frutas y verduras. Para el dimensionamiento de la unidad de trituración se ha supuesto que la capacidad de la trituradora será de 150 kg/mm·h, una forma de corte liso en cubos y un tamaño de 3 mm. Por tanto, la trituradora tendrá una capacidad de 450 kg/h y una potencia de 2,2 kW.

2. No se tendrá en cuenta el consumo de energía eléctrica de la electrónica del digestor para medir el pH, el oxígeno disuelto, la presión de rotación y la velocidad de la agitación, así como para medir la composición del biogás mediante sensores de CO₂ y CH₄ y controlar la temperatura.

3. Para la realización del balance de materia en la planta de digestión anaerobia se ha supuesto que la biodegradabilidad de la materia orgánica en el proceso de digestión anaerobia será del 70 % (CEOMED progress report, 2020).

4. Richard et al. 2021 reportan que en una planta de digestión anaerobia sería aceptable suponer que aproximadamente un 5 % de la producción diaria de biogás podría ser desviada hasta la antorcha de seguridad, ya sea por pérdidas o por una producción en exceso. En el presente trabajo se ha supuesto el desvío del 5 % de la producción diaria hasta la antorcha de seguridad.

5. Se supone una eficiencia de la antorcha del 100 %, siendo todo el CH₄ que llega a la antorcha transformado a CO₂ biogénico y H₂O.

6. Previo al proceso de cogeneración, no se tendrá en cuenta la limpieza o “upgrading” del biogás para la eliminación de posibles trazas de ácido sulfhídrico o hidrógeno, entre otros. Se supondrá un biogás con una composición del 60 % de CH₄ y un 40 % de CO₂ (CEOMED progress report, 2021).

7. En este proyecto se va a suponer que todo el calor generado mediante cogeneración se va a utilizar en el proceso de digestión anaerobia para mantener las condiciones mesofílicas de trabajo del digestor.

8. Se va a suponer que en el tanque de digerido no se producirá biogás por lo que no sería necesario conectarlo al gasómetro.

9. Según Richard (2021), la literatura sugiere que un 50 % de la materia orgánica de la fracción sólida del digerido se degrada en el proceso de maduración del compost, es por ello que para este trabajo se ha supuesto este valor.

10. Se ha supuesto una pérdida del 85 % del agua que contiene el digerido por evaporación en el proceso de compostaje (CEOMED progress report, 2021).

11. Se ha supuesto una emisión de amoníaco en el proceso de compostaje de 326,20 mg NH₃ /kg de residuo, que fue la reportada por Rincón et al. (2019) para un sustrato similar.

12. El volteo de las hileras de digerido en el proceso de compostaje se llevará a cabo con maquinaria agrícola provista de palas cuyo consumo de diesel se va a suponer que será de 0,47 L diesel/tn residuos (Richard et al., 2021).

3.10 Limitaciones

3.10.1 Limitaciones del Sistema 1

1. Debido a la escasa información existente de la composición de lixiviados de residuos de frutas y verduras que se producen en la estación de transferencia tras la compactación, se ha supuesto que los porcentajes de C y N tanto en la corriente de lixiviados como la del residuo compactado se mantienen constantes. Además, debido al desconocimiento del resto de materia de la que se compone, no se va a tener en cuenta ese valor al realizar los cálculos.
2. Según Sánchez et al. (2015), la materia orgánica localizada de los residuos que llegan al vertedero de Al-Ghadawi puede dividirse en las siguientes dos categorías:
 - Material que se degrada inmediatamente (3 meses-5 años)
 - Material que se degrada a un ritmo muy lento (5 a más de 50 años).

A partir del método IPCC aplicado para la obtención emisiones de metano en el vertedero, se ha supuesto que un 70 % de la materia orgánica se degrada rápidamente (ver Anexo III), quedando por tanto un 30 % restante que se degrada más lentamente y que formará parte de los lixiviados. Este 30 % de materia orgánica junto con la materia inorgánica/ inerte que contienen los residuos y no se degradan, serán los lixiviados que se acumulen en las celdas. Para el tratamiento de estos lixiviados el vertedero cuenta con un sistema de recirculación con el que pretende enriquecer la producción de metano. Los lixiviados que no se descomponen son drenados y acumulados en las balsas de la planta de tratamiento de los lixiviados. Debido al desconocimiento de la cantidad de lixiviados generados y que se degradan en el transcurso de la recirculación, no se van a tener en cuenta las emisiones que se producen durante este proceso.

4 ANÁLISIS DE INVENTARIO

Para llevar a cabo el análisis de inventario de este proyecto se han tenido en cuenta datos aportados por el proyecto europeo CEOMED, bajo el que se enmarca el presente trabajo, de literatura científica y de la base de datos ECOINVENT (ver **Anexo II**). Estos datos han sido utilizados para calcular los balances de materia y energía de las situaciones a estudiar. Todos los datos que se han obtenido en el inventario (**Tablas 7 y 8**) están referenciados para un día de trabajo.

4.1 Balances de materia y energía del Sistema 1. Situación actual

4.2 Recogida de residuos y transporte (11km)

En el mercado se generan diariamente 5.000 kg FVW, que serán transportados hasta la estación de transferencia Al-Shaer en camiones con compactación hidráulica. A partir de datos obtenidos mediante comunicación personal, se conoce que un camión con compactador hidráulico consume 110 L cuando transporta 12 t. Como en este proyecto se transportarán 5 t de residuos, el consumo de diesel será:

$$\text{Consumo de diesel de los camiones} = 5 \text{ t} \cdot \frac{110 \text{ L}}{12 \text{ t}} = 45,84 \text{ L diesel Ecuación 3 (Ítem 1)}$$

A partir de la densidad del diesel (850 kg/m³), se calcula la masa de diesel:

$$\text{Cantidad de diesel consumido} = 45,84 \text{ L diesel} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \cdot \frac{850 \text{ kg diesel}}{1 \text{ m}^3} = 39 \text{ kg diesel}$$

Además del consumo de diesel, también es necesario calcular las emisiones de CO₂, N₂O y CH₄ que se producen durante el proceso de recogida de basura el transporte. Para ello se va a utilizar el método de cálculo de emisiones por combustión propuesto en el Capítulo 3 del Volumen de Energías del Modelo IPCC (2006a).

Para poder calcular las emisiones es necesario conocer el PCI del diesel (42.600 kJ/kg), ya que para obtener los factores de emisión por defecto de CO₂, N₂O y CH₄ es necesario convertir el diesel consumido de kilogramo a terajulio, debido a que en las tablas provenientes del método IPCC los factores a utilizar están expresados en kg/TJ:

$$\text{Conversión a TJ de diesel} = 39 \text{ kg diesel} \cdot \frac{42.600 \text{ kJ}}{1 \text{ kg}} \cdot \frac{1 \text{ TJ}}{1.000.000.000 \text{ kJ}} = 0,00166 \text{ TJ diesel Ecuación 4}$$

A continuación, se calculan las emisiones de CO₂, N₂O y CH₄ respectivamente, a partir de las Tablas expuestas en el método IPCC (**Tablas 4,5 y 6**):

$$\text{Cantidad de CO}_2 \text{ emitido} = 0,00166 \text{ TJ diesel} \cdot \frac{74.100 \text{ kg}}{1 \text{ TJ}} = 123 \text{ kg CO}_2 \text{ Ecuación 5 (Ítem 6)}$$

Cantidad de N₂O emitido = 0,00166 TJ diesel · $\frac{3,9 \text{ kg}}{1 \text{ TJ}}$ = 0,00647 kg N₂O Ecuación 6 (Ítem 7)

Cantidad de CH₄ emitido = 0,00166 TJ diesel · $\frac{3,9 \text{ kg}}{1 \text{ TJ}}$ = 0,00647 kg CH₄ Ecuación 7 (Ítem 8)

Tabla 4. Factor de emisión de CO₂ por efecto del transporte terrestre (adaptada de IPCC (2006a)).

Tipo de combustible	Por defecto (kg/TJ)
<i>Gasolina para motores</i>	69.300
<i>Gas/Diesel Oil</i>	74.100
<i>Gases licuados de petróleo</i>	63.100
<i>Queroseno</i>	71.900
<i>Lubricantes</i>	73.300
<i>Gas natural comprimido</i>	56.100
<i>Gas natural licuado</i>	56.100

Tabla 5. Factor de emisión de N₂O por efecto del transporte terrestre (adaptada de IPCC (2006a)).

Tipo de combustible	Por defecto (kg/TJ)
<i>Gasolina para motores-sin controlar</i>	33
<i>Gasolina para motores-catalizador de oxidación</i>	25
<i>Gasolina para motores-vehículo para servicio ligero con poco kilometraje</i>	3,8
<i>Gas/Diesel Oil</i>	3,9
<i>Gas natural</i>	92
<i>Gas licuado de petróleo</i>	62
<i>Etanol, camiones Estados Unidos</i>	260
<i>Etanol, automóviles, Brasil</i>	18

Tabla 6. Factor de emisión de CH₄ por efecto del transporte terrestre (adaptada de IPCC (2006a)).

Tipo de combustible	Por defecto (kg/TJ)
<i>Gasolina para motores-sin controlar</i>	3,2
<i>Gasolina para motores-catalizador de oxidación</i>	8
<i>Gasolina para motores-vehículo para servicio ligero con poco kilometraje</i>	5,7
<i>Gas/Diesel Oil</i>	3,9
<i>Gas natural</i>	3
<i>Gas licuado de petróleo</i>	0,2
<i>Etanol, camiones Estados Unidos</i>	41
<i>Etanol, automóviles, Brasil</i>	0

4.3 Estación de transferencia

En la compactación hidráulica de los residuos de frutas y verduras (A) que tiene lugar en la estación de transferencia se produce una pérdida de un 10 % de masa. Por tanto, a la salida de la estación de transferencia se tienen dos corrientes, 4.500 kg/d (B) (90 % de los residuos generados) con destino al vertedero, y una cantidad de lixiviados de 500 kg/d (C) (10 % de los residuos generados) (Ítem 10). Para esta cantidad de lixiviados se ha supuesto una humedad del 90 %, quedando un 10 % restante de sería materia seca. Para el tratamiento de los lixiviados generados se han propuesto dos escenarios de estudio: (A) Emisión al suelo y (B) Tratamiento de aguas residuales. Para la opción A, se propone el vertido de los lixiviados directamente al suelo, mientras que en la opción B, se propone su tratamiento en plantas de tratamiento de aguas residuales.

A continuación, se muestra el balance de materia que se produce en la estación de transferencia, para el que se ha supuesto que los porcentajes de C y N tanto en la corriente de lixiviados como la del residuo compactado se mantienen constantes. Además, debido al desconocimiento del resto de materia de la que se compone, no se va a tener en cuenta ese valor al realizar los cálculos.

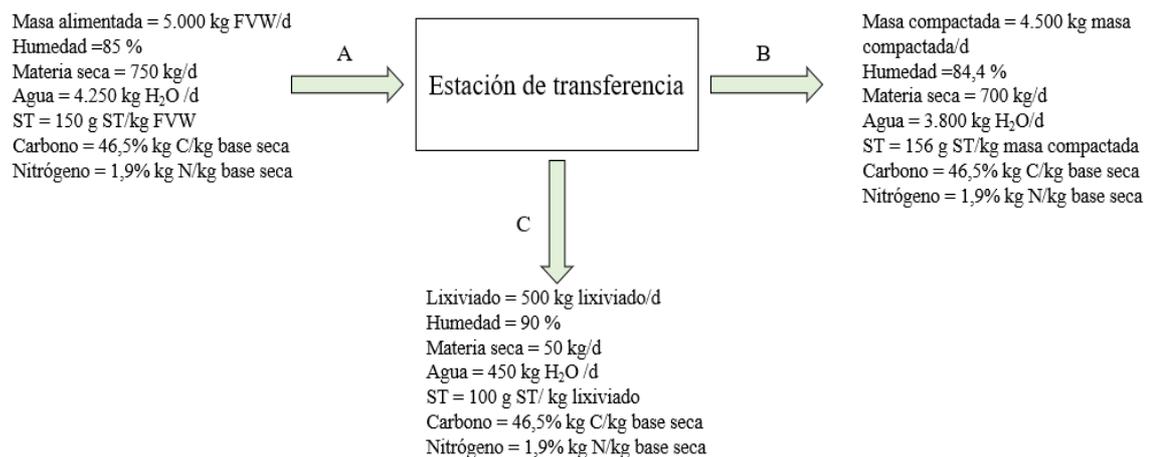


Figura 9. Descripción del balance en la estación de transferencia.

A continuación, se muestran los cálculos realizados para conocer la composición del lixiviado en el escenario A a partir de los sólidos totales del lixiviado (Ecuaciones 8 y 9).

$$\text{Cantidad de Carbono} = \frac{500 \text{ kg lixiviado}}{1 \text{ d}} \cdot \frac{100 \text{ g ST}}{\text{kg lixiviado}} \cdot \frac{46,5 \text{ g C}}{100 \text{ g ST}} = 23.250 \frac{\text{g C}}{\text{d}} = 23,25 \frac{\text{kg C}}{\text{d}} \quad \text{Ecuación 8}$$

(Ítem 4)

$$\text{Cantidad de Nitrógeno} = \frac{500 \text{ kg lixiviado}}{1 \text{ d}} \cdot \frac{100 \text{ g ST}}{\text{kg lixiviado}} \cdot \frac{1,9 \text{ g N}}{100 \text{ g ST}} = 950 \frac{\text{g N}}{\text{d}} = 0,95 \frac{\text{kg N}}{\text{d}} \quad \text{Ecuación 9}$$

(Ítem 5)

Además de estos 50 kg de materia seca los lixiviados están compuestos por 450 kg de agua, cuya composición no repercute a la emisión al suelo.

Por otro lado, en el escenario B, los 500 kg de lixiviados generados diariamente, con la misma composición obtenida en las **Ecuaciones 8 y 9**, serán destinados a tratamiento de agua residual.

Según reporta Mendía 2020, un compactador hidráulico para el tratamiento de residuos sólidos urbanos (RSU) con una capacidad de tratamiento de 135 m³/h requiere una potencia de 56 kW en la jornada de trabajo. Para este proyecto se ha supuesto una potencia lineal con la capacidad del compactador hidráulico y una densidad de FVW de 1 kg/L para tratar los 5.000 kg de FVW que llegan a la estación de transferencia. Por tanto, la energía consumida por el compactador será:

$$\text{Energía consumida por el compactador} = \frac{5.000 \frac{\text{kg FVW}}{\text{d}} \cdot \frac{1 \text{ L FVW}}{1 \text{ kg FVW}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1.000 \text{ L}} \cdot 56 \text{ kW}}{135 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} =$$

$$2,074 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \quad \text{Ecuación 10 (Ítem 2)}$$

4.4 Transporte (25 km)

La masa compactada ha de transportarse desde la estación de transferencia al vertedero recorriendo así 25 km de distancia (viaje de ida). Este transporte se realizará con un camión. Teniendo en cuenta los 4.500 kg masa compactada/d y que el camión solo hace viaje de ida, se obtiene un consumo:

$$\text{Consumo total} = 4,50 \text{ t masa compactada} \cdot 25 \text{ km} = 112,5 \text{ tkm} \quad \text{Ecuación 11 (Ítem 3)}$$

4.5 Vertedero

Para calcular la cantidad de metano que se emite en el vertedero se ha utilizado el método IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (IPCC, 2019, 2006b, 1996), desarrollado para la eliminación de residuos sólidos. El desarrollo de este método junto con la definición de cada uno de los parámetros se encuentra descritos en el **Anexo III**. En este método la estimación depende de las categorías de residuos, la fracción de carbón orgánico degradable y el gas CH₄ en el relleno.

Para obtener las emisiones de metano (**Ecuación 64**) ha de calcularse primero el metano generado (ver **Ecuación 65 y 66 en Anexo III**).

$$Q_{\text{CH}_4 \text{ generado}} = 1,64 \frac{\text{Gg masa compactada}}{\text{año}} \cdot 0,073 \frac{\text{Gg C}}{\text{Gg masa compactada}} \cdot 0,7 \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot \left(\frac{16}{12}\right)$$

$$= 0,028 \frac{\text{Gg CH}_4}{\text{año}} \quad (\text{Ecuación resolución 65 y 66})$$

En cuanto a las emisiones al aire en el vertedero ($Q_{\text{CH}_4 \text{ emitido}}$), en las celdas depósito se generan emisiones de CO₂ y CH₄. La emisión de CO₂, como es de origen biogénico, no se contabiliza como emisión de gas de efecto invernadero. Por otro lado, la emisión al aire de CH₄ se obtiene a partir del biogás fugado, como se explica en el método IPCC (**Anexo III**).

$$Q_{\text{CH}_4 \text{ emitido}} = (Q_{\text{CH}_4 \text{ generado}} - R_T) \cdot (1 - \text{OX}_T)$$

Donde $R_T = Q_{CH_4 \text{ generado}} \cdot 0,75$

$$Q_{CH_4 \text{ emitido}} = 1,64 \frac{\text{Gg masa compactada}}{\text{año}} \cdot 0,073 \frac{\text{Gg C}}{\text{Gg masa compactada}} \cdot 0,7 \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot \left(\frac{16}{12}\right) - [0,75 \cdot Q_{CH_4 \text{ generado}}] \text{ (Resolución Ecuación 64)}$$

$$Q_{CH_4 \text{ emitido}} = 0,007 \frac{\text{Gg CH}_4}{\text{año}} \text{ Ecuación 45}$$

$$Q_{CH_4 \text{ emitido}} = 0,007 \frac{\text{Gg CH}_4}{\text{año}} \cdot \frac{1.000.000 \text{ kg}}{1 \text{ Gg}} \cdot \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ d}} = 19,18 \frac{\text{kg CH}_4}{\text{d}} \text{ (Ítem 9)}$$

Una vez calculado el metano generado ($Q_{CH_4 \text{ generado}}$) y el emitido ($Q_{CH_4 \text{ emitido}}$), se conoce la cantidad de metano que es capturado (R_T) y posteriormente almacenado en el gasómetro. Del total almacenado en el gasómetro, el 95 % será tratado mediante generación y transformado en energía eléctrica, siendo el 5 % del metano restante quemado en la antorcha de seguridad. Teniendo en cuenta la densidad del metano, se va a obtener el caudal volumétrico del CH_4 generado (R_T) en el vertedero:

$$R_T = Q_{CH_4 \text{ generado}} - Q_{CH_4 \text{ emitido}} \text{ Ecuación 12}$$

$$R_T = 0,028 \frac{\text{Gg CH}_4}{\text{año}} - 0,007 \frac{\text{Gg CH}_4}{\text{año}} = 0,021 \frac{\text{Gg CH}_4}{\text{año}}$$

$$R_T = 0,021 \frac{\text{Gg CH}_4}{\text{año}} \cdot \frac{1.000.000 \text{ kg}}{1 \text{ Gg}} \cdot \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ d}} = 57,53 \frac{\text{kg CH}_4}{\text{d}} \text{ Ecuación 13}$$

$$\text{Metano destinado a generación} = 57,53 \frac{\text{kg CH}_4}{\text{d}} \cdot \frac{95 \text{ kg}}{100 \text{ kg}} = 54,66 \frac{\text{kg CH}_4}{\text{d}} \text{ Ecuación 14}$$

$$\text{Metano emitido por la antorcha} = 57,53 \frac{\text{kg CH}_4}{\text{d}} \cdot \frac{5 \text{ kg}}{100 \text{ kg}} = 2,87 \frac{\text{kg CH}_4}{\text{d}} \text{ Ecuación 15}$$

Teniendo en cuenta el valor del poder calorífico (PCI) del metano (50 GJ/t) se puede obtener la energía generada a partir del metano llevado a generación:

$$\text{Energía generada} = 54,66 \frac{\text{kg CH}_4}{\text{d}} \cdot \frac{1 \text{ t}}{1.000 \text{ kg}} \cdot \frac{50 \text{ GJ}}{1 \text{ t}} \cdot \frac{1.000.000 \text{ kJ}}{1 \text{ GJ}} \cdot \frac{2,778 \times 10^{-4} \text{ kWh}}{\text{kJ}} = 759,22 \frac{\text{kWh}}{\text{d}}$$

Ecuación 16

Por último, se obtendrá el dato de la energía eléctrica obtenida en la generación, teniendo en cuenta una eficiencia en la transformación de un 30 %, ya que según Cadena Z. et al. (2012) esta varía entre un 25 y un 45 %:

$$\text{Energía eléctrica generada} = 759,22 \cdot \text{kWh} \cdot 30 \% = 227,8 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \text{ Ecuación 17 (Ítem 11)}$$

4.6 Balances de materia y de energía del Sistema 2. Situación propuesta

Para realizar el cálculo de los balances de materia y de energía en este Sistema 2, se ha realizado el dimensionamiento de la planta de digestión anaerobia para el tratamiento de los residuos totales generados diariamente en el mercado mayorista. Para ello, se ha partido de los datos proporcionados por el proyecto CEOMED para el diseño de una planta piloto de pequeña escala y de datos bibliográficos.

4.7 Pretratamiento mecánico

Para el transporte de los residuos desde el tanque de almacenamiento hasta la unidad de pretratamiento mecánico se utilizará una cinta transportadora cuya capacidad dependerá del sistema de trituración, suponiéndose su capacidad máxima igual a la de la trituradora siendo su valor 0,45 t/h. El consumo de energía eléctrica de la cinta transportadora será:

$$W = (W1 + W2 + W3 + W4) \cdot (1 + \beta) \cdot (1 + K1) \text{ Ecuación 18}$$

De modo que la potencia total necesaria de la cinta transportadora será:

$$W = (0,024 + 0,1 + 0,05 + 0) \cdot (1 + 0,105) \cdot (1 + 0,75) \cong 0,336 \text{ CV}$$
$$0,336 \text{ CV} \cdot \frac{1 \text{ kW}}{1,24102 \text{ CV}} \cdot \frac{3.600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{11 \text{ h}}{1 \text{ d}} \cdot \frac{2,778 \times 10^{-4} \text{ kWh}}{1 \text{ kJ}} = 2,76 \frac{\text{kWh}}{\text{d}}$$

Los parámetros de la **Ecuación 18** han sido calculados y explicados en el **Anexo IV**, donde se ha desarrollado el diseño de la cinta transportadora. Tras el transporte, el FVW será triturado en la unidad de pretratamiento mecánico.

Para la unidad de pretratamiento mecánico se ha buscado y seleccionado una trituradora con una capacidad de 0,45 t/h que consumirá una potencia de 2,2 kW (FAM, 2021). Por tanto, se obtiene que el requerimiento de energía eléctrica del triturador o unidad de pretratamiento será:

$$\frac{2,2 \text{ kW}}{1 \text{ s}} \cdot \frac{3.600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{11 \text{ h}}{1 \text{ d}} = \frac{79.200 \text{ kJ}}{1 \text{ d}} \cdot \frac{2,778 \times 10^{-4} \text{ kWh}}{1 \text{ kJ}} = 24,2 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \text{ Ecuación 19}$$

La energía eléctrica total que se consumirá en el pretratamiento mecánico será, por tanto:

$$\begin{aligned} &\text{Energía eléctrica total consumida en el pretratamiento mecánico} = \\ &\text{Energía eléctrica de la cinta} + \text{Energía eléctrica del triturador} = \frac{2,76 \text{ kWh}}{\text{d}} + \frac{24,2 \text{ kWh}}{\text{d}} = \\ &27,0 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \text{ Ecuación 20} \end{aligned}$$

4.8 Tanque de almacenamiento con agitación

A continuación, se va a calcular la energía eléctrica que requerirá el tanque de agitación, que como se comentó en el apartado 3.5.2, se encuentra justo debajo de la trituradora y tendrá una capacidad máxima

de 3.000 kg. Para obtener el valor de capacidad máxima del tanque de almacenamiento, se tuvo en cuenta que se almacenarán cada hora 450 kg de FVW triturados, además de la cantidad de FVW triturado que se alimenta al digestor por hora (208 kg FVW/h, teniendo en cuenta que el digestor anaerobio trabaja 24 h). Suponiendo una densidad de FVW de 1 kg/L, y utilizando el dato de la capacidad máxima de 3.000 kg, se obtiene que el volumen máximo de FVW que se agitará en el tanque será 3 m³. Para calcular la energía eléctrica consumida por la agitación del tanque (**Ecuación 21**) será necesaria la energía que se consume por la agitación, cuyo valor es 300 kJ/ m³ digestor·d reportado por Serrano et al. (2021).

$$\text{Energía eléctrica total consumida} = 3 \text{ m}^3 \cdot \frac{300 \text{ kJ}}{\text{m}^3 \text{ digestor} \cdot \text{d}} \cdot 2,778 \times 10^{-4} \frac{\text{kWh}}{\text{kJ}} = 0,25 \frac{\text{kWh}}{\text{d}}$$

Ecuación 21

4.9 Digestor anaerobio

La alimentación al digestor, del residuo ya triturado y homogeneizado proveniente del tanque de almacenamiento con agitación, se realizará con ayuda de una bomba peristáltica. Para calcular el consumo de energía eléctrica por el bombeo se tendrá en cuenta el valor de 1.800 kJ/ m³ alimentado al digestor reportado por Serrano et al. (2021).

$$\text{Energía eléctrica consumida por la bomba de alimentación (B1)} = \frac{1.800 \text{ kJ}}{\text{m}^3} \cdot \frac{5.000 \text{ kg}}{\text{d}} \cdot \frac{1 \text{ L}}{1 \text{ kg}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1.000 \text{ L}} \cdot \frac{2,778 \times 10^{-4} \text{ kWh}}{\text{kJ}} = 2,5 \frac{\text{kWh}}{\text{d}}$$

Ecuación 22

Teniendo en cuenta los datos aportados por el proyecto CEOMED (CEOMED progress report 2020) sobre la caracterización del sustrato, se han obtenido los ST, SV y SM alimentados diariamente.

$$\text{Sólidos totales alimentados} = 5.000 \text{ kg FVW} \cdot \left(\frac{15 \text{ kg ST}}{100 \text{ kg FVW}} \right) = 750 \text{ kg} \frac{\text{ST}}{\text{d}}$$

Ecuación 23

$$\text{Sólidos volátiles alimentados} = \frac{750 \text{ kg ST}}{\text{d}} \cdot \frac{90 \text{ kg SV}}{100 \text{ kg ST}} = 675 \text{ kg} \frac{\text{SV}}{\text{d}}$$

Ecuación 24

$$\text{Sólidos minerales} = \text{Sólidos totales} - \text{Sólidos volátiles} = \frac{750 \text{ kg ST}}{\text{d}} - \frac{675 \text{ kg SV}}{\text{d}} =$$

$$75 \left(\frac{\text{kg SM}}{\text{d}} \right)$$

Ecuación 25

Para llevar a cabo los cálculos del balance de materia, en primer lugar, se ha calculado el volumen útil del digestor tras realizar el dimensionamiento de la planta de digestión anaerobia:

$$\text{Volumen útil del digestor} = \frac{675 \text{ kg} \frac{\text{SV}}{\text{d}}}{2,5 \frac{\text{kg SV}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}}} = 270 \text{ m}^3$$

Ecuación 26

El volumen útil del digestor será un 80 % del volumen total, ya que se ha aplicado un coeficiente de seguridad de un 20 % para evitar un desbordamiento en el caso de que se produzca un fallo en el sistema, siendo finalmente el volumen total del digestor de aproximadamente 340 m³.

El digestor anaerobio requiere energía térmica y eléctrica para su funcionamiento. A continuación, se detallan los cálculos para la obtención de la energía térmica consumida en el digestor anaerobio. Para ello, se ha tenido en cuenta la energía necesaria para mantener las condiciones mesofílicas de trabajo y las

pérdidas térmicas que hay en la pared del digestor. Por otro lado, para la obtención de la energía eléctrica consumida se ha tenido en cuenta la agitación en el digestor. Para estos cálculos se han considerado los siguientes datos:

- Capacidad calorífica del agua: 4,18 kJ/kg·K
- Densidad del FVW: 1 kg/ L (CEOMED progress report, 2020)
- Energía consumida por la agitación: 300 kJ/ m³ digestor·d (Serrano et al., 2021)
- Se ha asumido una pérdida de un 10 % de energía térmica en las paredes del digestor (Serrano et al., 2021)

$$\text{Energía térmica consumida} = \text{Energía condiciones mesofílicas} + \text{Pérdidas por pared} = 5.000 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \cdot 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot (35 - 20)\text{K} + 0,1 \cdot 5000 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \cdot 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot (35 - 20)\text{K} = 344.850 \text{ kJ} \cdot$$

$$2,778 \times 10^{-4} \frac{\text{kWh}}{\text{kJ}} = 96 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \quad \text{Ecuación 27}$$

$$\text{Energía eléctrica consumida por la agitación} = 300 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ digestor}\cdot\text{d}} \cdot 270 \text{ m}^3 \text{ útiles digestor} \cdot$$

$$2,778 \times 10^{-4} \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 22,5 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \quad \text{Ecuación 28}$$

El biogás generado en el digestor anaerobio se calcula teniendo en cuenta que por cada kilogramo de SV degradado se generan 1.120 litros de biogás a partir de una biodegradabilidad del 70 % (CEOMED progress report, 2020). Además, como se comentó en el punto 3.5.2, el 95 % de este biogás generado se destinará a cogeneración (**Ecuación 30**), mientras que el 5 % restante se quemará por completo en la antorcha de seguridad (**Ecuación 31**).

$$\text{Caudal de biogás generado} = \left(\frac{675 \text{ kg SV}}{\text{d}} \cdot \frac{70 \text{ kg SV degradado}}{100 \text{ kg SV}} \right) \cdot \frac{1,12 \text{ m}^3 \text{ biogás}}{\text{kg SV degradado}\cdot\text{d}} = 529,2 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{d}} \quad \text{Ecuación 29}$$

$$\text{Biogás destinado a cogeneración} = \frac{529,2 \text{ m}^3 \text{ biogás}}{\text{d}} \cdot \frac{95 \text{ kg biogás almacenado}}{100 \text{ kg biogás}} = 502,7 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{d}} \quad \text{Ecuación 30}$$

$$\text{Biogás destinado a la antorcha} = \frac{529,2 \text{ m}^3 \text{ biogás}}{\text{d}} \cdot \frac{5 \text{ kg biogás almacenado}}{100 \text{ kg biogás}} = 26,4 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{d}} \quad \text{Ecuación 31}$$

Teniendo en cuenta que el gas del digestor contiene un 60 % de metano:

$$\frac{502,74 \text{ m}^3 \text{ biogás}}{\text{d}} \cdot 60 \% = 301,65 \frac{\text{m}^3 \text{ CH}_4}{\text{d}} \quad \text{Ecuación 32}$$

Conociendo el poder calorífico del metano a 1 atm y 0 °C (35,793 kJ/L) se puede obtener la energía generada a partir del metano:

$$\text{Energía total generada} = \frac{301,65 \text{ m}^3 \text{ CH}_4}{\text{d}} \cdot \frac{35,793 \text{ kJ}}{\text{L}} \cdot \frac{1.000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} = \frac{10.796.803,7 \text{ kJ}}{\text{d}} \cdot \frac{2,778 \times 10^{-4} \text{ kWh}}{\text{kJ}} = 2.999,35 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \quad \text{Ecuación 33}$$

Para el cálculo de la energía eléctrica total consumida en el digester anaerobio se ha tenido en cuenta:

$$\begin{aligned} \text{Energía eléctrica total consumida} &= \text{Energía consumida agitación} + \\ \text{Energía consumida bombeo alimentación} &= \frac{22,5 \text{ kWh}}{\text{d}} + \frac{2,5 \text{ kWh}}{\text{d}} = 25 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \quad \text{Ecuación 34} \end{aligned}$$

4.10 Proceso de cogeneración

A continuación, se obtendrán los datos de las energías térmica y eléctrica generadas en la cogeneración, teniendo en cuenta una eficiencia del 45 y del 39 %, respectivamente (**Ecuación 35 y 36**):

$$\text{Energía térmica generada} = 2.999,35 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \cdot 45 \% = 1.350 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \quad \text{Ecuación 35}$$

$$\text{Energía eléctrica generada} = 2.999,35 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \cdot 39 \% = 1.170 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \quad \text{Ecuación 36}$$

4.11 Centrifugación y tratamiento del digerido

Por otro lado, en el digester anaerobio además de biogás también se genera un digerido (**Ecuación 40**), que será alimentado mediante una bomba peristáltica hasta un tanque de almacenamiento, y desde ese tanque, utilizando otra bomba peristáltica, se alimentará el digerido en una centrífuga tubular. Ambas bombas serán iguales ya que transportarán el mismo caudal de digerido (**Ecuación 49**). Para el cálculo del caudal másico del digerido se tendrán en cuenta los sólidos totales, volátiles y minerales, además de la biodegradabilidad del sustrato:

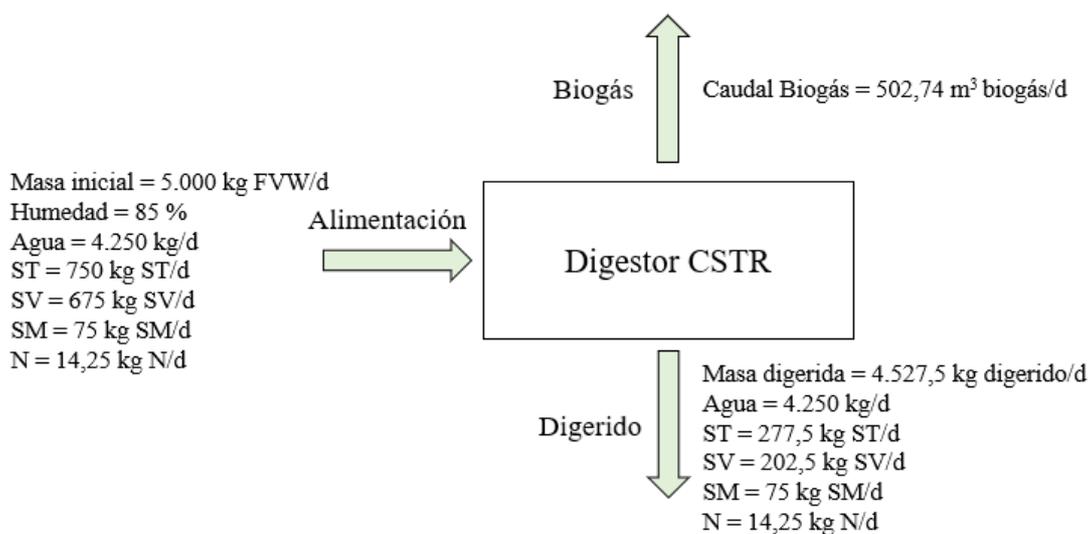


Figura 10. Descripción del balance en el digester anaerobio.

Para poder calcular la cantidad de digerido que se genera en el digester, es necesario realizar un balance de materia previo de ST, SV y SM. Para ello, hay que tener en cuenta que los sólidos minerales que contiene el sustrato no se biodegradan y, por tanto, van directamente a la corriente del digerido. Además, se va a suponer que el contenido de agua que contiene el sustrato no interviene en el proceso de digestión anaerobia, de modo que será la misma que en la corriente de digerido. A continuación, se procede al cálculo del balance de materia en el digester:

$$\text{Contenido de agua en el sustrato} = 5000 \frac{\text{kg FVW}}{\text{d}} - 750 \frac{\text{kg ST}}{\text{d}} = 4.250 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{d}} \quad \text{Ecuación 37}$$

$$\text{Materia orgánica}_{\text{alimentación}} = \text{Materia orgánica}_{\text{reacciona (biogás)}} - \text{Materia orgánica}_{\text{no reacciona (digerido)}} \quad \text{Ecuación 38}$$

$$675 \frac{\text{kg SV}}{\text{d}} = \left(\frac{675 \text{ kg SV}}{\text{d}} \cdot \frac{70 \text{ kg SV degradado}}{100 \text{ kg SV}} \right) - \text{Materia orgánica}_{\text{no reacciona}}$$

$$\text{Materia orgánica}_{\text{no reacciona}} = 202,5 \frac{\text{kg SV digerido}}{\text{d}}$$

Teniendo en cuenta que los sólidos totales son la suma de los sólidos minerales y los sólidos volátiles, se calculan los ST del digerido (**Ecuación 39**):

$$\text{ST}_{\text{digerido}} = 202,5 \frac{\text{kg SV digerido}}{\text{d}} + 75 \frac{\text{kg SM digerido}}{\text{d}} = 277,5 \frac{\text{kg ST digerido}}{\text{d}} \quad \text{Ecuación 39}$$

Teniendo en cuenta que el agua que contiene el sustrato no interviene en el proceso de digestión anaerobia, y que por tanto, pasa a la corriente de digerido, el caudal másico de digerido será:

$$\text{Caudal másico de digerido} = 277,5 \frac{\text{kg ST digerido}}{\text{d}} + 4.250 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{d}} = 4.527,5 \frac{\text{kg digerido}}{\text{d}} \quad \text{Ecuación 40}$$

El digerido generado será alimentado en una centrifuga tubular, obteniéndose como resultado una fracción sólida y una fracción líquida. Según los datos proporcionados por el proyecto CEOMED (2021), en el proceso de centrifugación se obtendrá un 75 % de fase sólida (FS) y un 25 % de fase líquida (FL), siendo por tanto 3.395,6 kg/d y 1.131,9 kg/d (**Ítem 6**), respectivamente.

Una vez que se han determinado los caudales de FS y FL, se va a calcular la cantidad de ST, SV y SM que contiene cada fase:

$$\text{ST}_{\text{FS}} = 277,5 \frac{\text{kg ST digerido}}{\text{d}} \cdot \frac{75 \text{ kg FS}}{100 \text{ kg digerido}} = 208 \frac{\text{kg ST}_{\text{FS}}}{\text{d}} \quad \text{Ecuación 41}$$

$$\text{SV}_{\text{FS}} = 202,5 \frac{\text{kg SV digerido}}{\text{d}} \cdot \frac{75 \text{ kg FS}}{100 \text{ kg digerido}} = 152 \frac{\text{kg SV}_{\text{FS}}}{\text{d}} \quad \text{Ecuación 42}$$

$$\text{SM}_{\text{FS}} = 75 \frac{\text{kg SM digerido}}{\text{d}} \cdot \frac{75 \text{ kg FS}}{100 \text{ kg digerido}} = 56,25 \frac{\text{kg SM}_{\text{FS}}}{\text{d}} \quad \text{Ecuación 43}$$

$$\text{ST}_{\text{FL}} = 277,5 \frac{\text{kg ST digerido}}{\text{d}} \cdot \frac{25 \text{ kg FS}}{100 \text{ kg digerido}} = 69 \frac{\text{kg ST}_{\text{FL}}}{\text{d}} \quad \text{Ecuación 44}$$

$$\text{SV}_{\text{FL}} = 202,5 \frac{\text{kg SV digerido}}{\text{d}} \cdot \frac{25 \text{ kg FS}}{100 \text{ kg digerido}} = 51 \frac{\text{kg SV}_{\text{FL}}}{\text{d}} \quad \text{Ecuación 45}$$

$$SM_{FL} = 75 \frac{\text{kg SM digerido}}{\text{d}} \cdot \frac{25 \text{ kg FS}}{100 \text{ kg digerido}} = 18,75 \frac{\text{kg SM}_{FL}}{\text{d}} \quad \text{Ecuación 46}$$

Tras la centrifugación, la fracción líquida será utilizada para irrigación, mientras que la fracción sólida de digerido será tratada mediante compostaje, con el fin de estabilizar la materia resultante del proceso de digestión anaerobia. Para ello, se supuso una degradación de la materia orgánica del 50 %, y que un 85 % del agua se evapora durante el proceso. De este modo, la cantidad de compost final generado será (Ecuación 49):

$$ST \text{ Compost} = (SV_{FS} \cdot \frac{50 \text{ kg materia orgánica degradada}}{100 \text{ materia orgánica}}) + SM_{FS} \quad \text{Ecuación 47}$$

$$ST \text{ Compost} = 152 \frac{\text{kg } SV_{FS}}{\text{d}} \cdot 0,5 + 56,25 \frac{\text{kg } SM_{FS}}{\text{d}} = 132,3 \frac{\text{kg } ST \text{ Compost}}{\text{d}}$$

$$H_2O \text{ compost} = 3.395,6 \frac{\text{kg } FS}{\text{d}} - 208 \frac{\text{kg } ST_{FS}}{\text{d}} = 3.188 \frac{\text{kg } H_2O}{\text{d}} \quad \text{Ecuación 48}$$

$$\text{Cantidad de compost} = 3.188 \frac{\text{kg } H_2O}{\text{d}} \cdot \frac{15 \text{ kg } H_2O}{100 \text{ kg } H_2O} + 132,3 \frac{\text{kg } ST \text{ compost}}{\text{d}} = 610,5 \frac{\text{kg } \text{compost}}{\text{d}}$$

Ecuación 49 (Ítem 7)

Como se ha mencionado anteriormente, el compostaje implica la conversión de la materia orgánica, produciendo así CO₂, N₂, NH₃ y un material sólido recalcitrante, a menudo denominado compost que contiene sustancias húmicas (Espzarza et al., 2020). Rincón et al. (2019) estudia la aplicación del proceso de compostaje a la fracción sólida del digerido generado mediante la aplicación del proceso de digestión anaerobia a una mezcla de residuos biodegradables (ADB) compuesta por residuos biodegradables de hipermercado, grasas de la industria alimentaria y residuos de cereales. Para este residuo, similar al estudiado en este proyecto, se cuantifica que las emisiones de amoníaco durante el proceso de compostaje son dominantes, atribuyéndose que puede estar relacionado con la baja relación C/N del digerido. La emisión de amoníaco reportada, y supuesta para el residuo tratado en este trabajo, sería de 0,33 kg NH₃ /t de residuo (Ítem 2). En el proceso de compostaje, la masa de compost estará dispuesta en hileras que serán volteadas utilizando maquinaria agrícola, por lo que va a consumir diesel. Según Richard (2021), el diesel que se consume en el volteo de las hileras es 0,47 L diesel/tn residuos (ver Ecuación 50).

Además del consumo de diesel, como se ha visto en el Sistema 1, también es necesario calcular las emisiones de CO₂, N₂O y de CH₄ que se producen durante el proceso de volteo. Para ello se va a utilizar el método de cálculo de emisiones por combustión propuesto en el Capítulo 3 del Volumen de Energías del Modelo IPCC (2006a).

$$\text{Conversión a energía consumida por el diesel} = 0,47 \frac{\text{L}}{\text{t FVW}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3 \text{ diesel}}{1000 \text{ L diesel}} \cdot \frac{850 \text{ kg diesel}}{1 \text{ m}^3 \text{ diesel}} \cdot \frac{42.600 \text{ kJ}}{1 \text{ kg}}$$

$$\frac{1 \text{ TJ}}{1.000.000.000 \text{ kJ}} = 1,7 \cdot 10^{-5} \frac{\text{TJ}}{\text{t FVW}} \quad \text{Ecuación 50 (Ítem 1)}$$

A continuación, se calculan las emisiones de CO₂, N₂O y de CH₄, respectivamente, a partir de las tablas expuestas en el método IPCC (Tabla 4,5 y 6):

$$\text{Cantidad de CO}_2 \text{ emitido} = 1,7 \cdot 10^{-5} \frac{\text{TJ}}{\text{t FVW}} \cdot \frac{74.100 \text{ kg}}{1 \text{ TJ}} = 1,26 \text{ kg CO}_2 \text{ Ecuación 51 (Ítem 3)}$$

$$\text{Cantidad de N}_2\text{O emitido} = 1,7 \cdot 10^{-5} \frac{\text{TJ}}{\text{t FVW}} \cdot \frac{3,9 \text{ kg}}{1 \text{ TJ}} = 0,0000663 \text{ kg N}_2\text{O Ecuación 52 (Ítem 4)}$$

$$\text{Cantidad de CH}_4 \text{ emitido} = 1,7 \cdot 10^{-5} \frac{\text{TJ}}{\text{t FVW}} \cdot \frac{3,9 \text{ kg}}{1 \text{ TJ}} = 0,0000663 \text{ kg CH}_4 \text{ Ecuación 53 (Ítem 5)}$$

Finalmente, se va a calcular la energía necesaria para las dos bombas peristálticas (**Ecuación 54**) y la centrifugación del digerido (**Ecuación 55**), cuyo dato principal requerido es la energía consumida por la centrifugación, que será de 3,5 kWh/ m³ digerido (Serrano et al., 2021):

$$\text{Energía eléctrica consumida por la bomba 2 y 3} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{d}} \right) = \frac{1.800 \text{ kJ}}{\text{m}^3} \cdot \frac{4.527,5 \text{ kg digerido}}{\text{d}}$$

$$\frac{1 \text{ L digerido}}{1 \text{ kg digerido}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3 \text{ digerido}}{1000 \text{ L digerido}} = \frac{8.149,5 \text{ kJ digerido}}{\text{d}} \cdot \frac{2,778 \times 10^{-4} \text{ kWh}}{\text{kJ}} =$$

$$2,264 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \text{ cada bomba Ecuación 54}$$

$$\text{Energía eléctrica consumida por la centrifugación} = \frac{3,5 \text{ kJ}}{\text{m}^3 \text{ digerido}} \cdot \frac{4.527,5 \text{ kg digerido}}{\text{d}}$$

$$\frac{1 \text{ L digerido}}{1 \text{ kg digerido}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3 \text{ digerido}}{1000 \text{ L digerido}} \cdot \frac{2,778 \times 10^{-4} \text{ kWh}}{\text{kJ}} = 0,0044 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \text{ Ecuación 55}$$

La energía eléctrica total consumida en el bombeo del digerido y en el proceso de centrifugación será:

$$\text{Energía eléctrica total} = 2,264 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} + 2,264 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} + 0,0044 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} = 4,53 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \text{ Ecuación 56}$$

4.12 Energía eléctrica vendida al tendido eléctrico

Por último, se calcula la energía eléctrica que se venderá al tendido eléctrico, es decir, la energía producida en exceso tras la retroalimentación a la planta de digestión anaerobia:

$$\text{Energía que se vende al tendido eléctrico} = \text{Energía eléctrica generada} - \text{Energía eléctrica consumida Ecuación 57}$$

Energía eléctrica consumida

- = Energía eléctrica consumida pretratamiento mecánico
- + Energía eléctrica consumida tanque de almacenamiento con agitación
- + Energía eléctrica consumida digestor anaerobio
- + Energía eléctrica consumida bombeo y centrifugación del digerido

$$\text{Energía eléctrica consumida} = 27 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} + 0,25 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} + 25 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} + 4,53 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} = 56,78 \frac{\text{kWh}}{\text{d}}$$

$$\text{Energía que se vende al tendido eléctrico} = 1.170 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} - 56,78 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} = 1.113 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \text{ (Ítem 8)}$$

4.13 Contenido de nitrógeno. Impactos evitados

Según bibliografía uno de los fertilizantes sólidos inorgánicos más utilizados en la jardinería es el nitrato amónico (NH_4NO_3). El nitrato de amonio o nitrato amónico es una sal formada por iones nitrato y amonio que se usa principalmente como fertilizante debido a su alto contenido en nitrógeno (34-34,5 %). Por otro lado, como fertilizante líquido, según bibliografía, el más utilizado es el nitrato de calcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), cuyo contenido en nitrógeno es de 11,85 %. A partir del contenido de nitrógeno de las fases del digerido generado en el proceso de digestión anaerobia, se obtendrá la cantidad de nitrato amónico y nitrato cálcico evitado al ser sustituido por ambas fases.

Para realizar estos cálculos, hay que tener en cuenta que en el reactor no se produce reacción nuclear, por lo que todo el contenido de nitrógeno que tiene el sustrato pasa directamente a la corriente de digerido. En el proceso de centrifugación, se obtendrán la FS y FL, siendo la suma de ambas fases el contenido de nitrógeno del digerido. Debido a la suposición proporcionada por el proyecto CEOMED (2021), la eficiencia de separación de la centrífuga proporciona un 75 % de FS y un 25 % FL, por lo que se va a estimar que la cantidad de nitrógeno se va a repartir equitativamente en las fases, obteniendo por tanto:

$$N_{\text{FS}} + N_{\text{FL}} = 14,25 \text{ kg N Ecuación 58}$$

$$N_{\text{FS}} = 14,25 \frac{\text{kg N}}{\text{d}} \cdot \frac{75 \text{ kg } N_{\text{FS}}}{100 \text{ kg N}} = 10,69 \text{ kg } N_{\text{FS}} \text{ Ecuación 59}$$

$$N_{\text{FL}} = 14,25 \frac{\text{kg N}}{\text{d}} \cdot \frac{25 \text{ kg } N_{\text{FL}}}{100 \text{ kg N}} = 3,56 \text{ kg } N_{\text{FL}} \text{ Ecuación 60}$$

Una vez que se ha obtenido la cantidad de nitrógeno que hay en la FS y la FL, se ha de calcular la cantidad de nitrógeno que queda finalmente en el compost:

$$N_{\text{compost}} = N_{\text{FS}} - N_{\text{biodegradado}} - N_{\text{emisiones compostaje}} \text{ Ecuación 61}$$

$$N_{\text{biodegradado}} = 10,69 \text{ kg } N_{\text{FS}} \cdot \frac{50 \text{ kg } N_{\text{biodegradado}}}{100 \text{ kg } N_{\text{FS}}} = 5,34 \text{ kg } N_{\text{biodegrada}}$$

$$\begin{aligned} N_{\text{emisiones compostaje}} &= 0,33 \frac{\text{kg NH}_3}{\text{t FVW}} \cdot 5 \frac{\text{t FVW}}{\text{d}} \cdot \frac{1 \text{ kmol NH}_3}{17 \text{ kg NH}_3} \cdot \frac{1 \text{ kmol N}}{1 \text{ kmol NH}_3} \cdot \frac{14 \text{ kg N}}{1 \text{ kmol N}} \\ &= 1,36 \text{ kg } N_{\text{emitido compostaje}} \end{aligned}$$

$$N_{\text{compost}} = 10,69 - 5,34 - 1,36 = 3,98 \text{ kg } N_{\text{compost}}$$

A continuación, a partir del nitrógeno contenido en el compost, se van a realizar los cálculos para conocer la cantidad de nitrato de amonio que se evitaría comprar como fertilizante en jardinería al ser sustituido por compost. Del mismo modo, se realizarán los cálculos para conocer la cantidad de nitrato de calcio:

Se sabe, por tanto, que por cada kilogramo de nitrato amónico se tiene 0,34 kg N, por lo que:

$$\text{Cantidad de nitrato amónico evitado} = \frac{3,98 \text{ kg N}}{0,34 \text{ kg N}} = 11,7 \text{ kg Nitrato amónico Ecuación 62}$$

Se sabe, por tanto, que por cada kilogramo de nitrato de calcio se tiene 0,1185 kg N, por lo que:

$$\text{Cantidad de nitrato cálcico evitado} = \frac{3,56 \text{ kg N}}{0,1185 \text{ kg N}} = 30 \text{ kg Nitrato de calcio} \text{ **Ecuación 63**}$$

Tabla 7. Análisis de Inventario del Sistema 1.

Nº Item	Nombre	Tipo	Sección	Sub-sección	Referencia datos	Valor	Unid.	Back-ground	
1	Combustible Diesel	Entrada	Recogida de basura y transporte	Prensado	Ecuación 3	45,84	Ldiesel/d	Diesel {RER} market group for APOS, U	
2	Energía Eléctrica	Entrada	Estación de transferencia	Compactador hidráulico	Ecuación 10	2,074	kWh/d	Electricity, medium voltage {JO} market for electricity, medium voltage APOS, U	
3	Transporte	Entrada	Transporte		Ecuación 11	112,5	tkm/d	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, euro5 {RER} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 APOS, U	
4	Carbono	Emisión al suelo	Estación de transferencia	Compactador hidráulico	Ecuación 8	23,25	kg/d	Nitrogen, total	Alternativa A
5	Nitrógeno	Emisión al suelo	Estación de transferencia	Compactador hidráulico	Ecuación 9	0,95	kg/d	TOC, Total Organic Carbon	
6	CO ₂	Emisión al aire	Recogida de basura y transporte		Ecuación 5	123,00	kg CO ₂ /d	Carbon dioxide	
7	N ₂ O	Emisión al aire	Recogida de basura y transporte		Ecuación 6	6,47E-03	kg N ₂ O/d	Dinitrogen monoxide	
8	CH ₄	Emisión al aire	Recogida de basura y transporte		Ecuación 7	6,47E-03	kg CH ₄ /d	Methane	
9	CH ₄	Emisión al aire	Vertedero	Celdas depósito	Ecuación 64	19,18	kg CH ₄ /d	Methane	
10	H ₂ O	Agua a tratamiento	Recogida de basura y transporte	Compactador hidráulico		0,50	m ³ H ₂ O/d	Wastewater, average {Europe without Switzerland} treatment of wastewater, average, capacity 1E9l/year APOS, U	Alternativa B
11	Energía eléctrica	Co-producto	Vertedero	Generación de energía	Ecuación 17	227,80	kWh/d	Electricity mix, AC, consumption mix, at consumer, < 1kV EU-27 S	
9	Residuos FVW	Producto principal	Vertedero	Tratamiento de residuos	Referencia del informe (pilot demonstration-progress report 10 Mayo 2020). (Al-Ghabawi Landfill, 2019)	5000,00	kg/d		

Tabla 8. Análisis de Inventario del Sistema 2.

Nº Item	Nombre	Tipo	Sección	Sub-sección	Referencia datos	Valor por u.f	Unid.	Background
1	Uso de maquinaria	Entrada	Compostaje	Volteo de compost	Ecuación 50	8,50E-05	TJ/d	Diesel, burned in agricultural machinery {GLO} market for diesel, burned in agricultural machinery APOS, U
2	NH ₃	Emisión al aire	Compostaje	Maduración del compost	Emisión de amonio en el proceso de compostaje aplicado a la fracción sólida de residuos biológicos de DA (residuos biológicos de hipermercado, grasas de la industria alimentaria y residuos de cereales). Ref: (Rincón, 2021)	1,65	kg NH ₃ / d	Ammonia
3	CO ₂	Emisión al aire	Compostaje	Volteo del compost	Ecuación 51	1,26	kg CO ₂ /d	Carbon dioxide
4	N ₂ O	Emisión al aire	Compostaje	Volteo del compost	Ecuación 52	6,63E-05	kg N ₂ O/d	Dinitrogen monoxide
5	CH ₄	Emisión al aire	Compostaje	Volteo del compost	Ecuación 53	6,63E-05	kg CH ₄ /d	Methane
6	Fertilizante para jardinería (fracción líquida)	Coproducto	Planta de digestión anaerobia	Centrifugación	Ecuación 40	1132	kg/d	Calcium nitrate {GLO} market for APOS, U
7	Compost	Coproducto	Planta de digestión anaerobia	Compostaje	Ecuación 49	686,2	kg compost/d	Ammonium nitrate, as N {GLO} market for APOS, U
8	Energía eléctrica	Coproducto	Planta de digestión anaerobia	Cogeneración	Ecuación 57	1113	kWh/d	Electricity, high voltage {JO} market for electricity, high voltage APOS, U
9	Residuos FVW	Producto principal	Planta de digestión anaerobia	Tratamiento de residuos	Referencia del informe (pilot demonstration-progress report 10 Mayo 2020). (Al-Ghabawi Landfill, 2019)	5000	kg/d	

5 EVALUACIÓN DE IMPACTO

En este apartado se van a mostrar los datos obtenidos en ambos sistemas de estudio, y así determinar la influencia en el análisis final de los resultados por el método propuesto en la norma UNE EN ISO 14040-44 (Midpoint 2016 (H)). Para evaluar los impactos se ha incorporado la expansión del sistema en cada representación obteniéndose los siguientes resultados. En el **ANEXO V**, se muestran las tablas completas que se han obtenido para cada sistema, mostrando todas las categorías de impactos disponibles en el software SimaPro.

Para la selección de las categorías de impacto, y como se explicó en el apartado 3.7, se ha llevado a cabo un análisis con el software Simapro. Las categorías con mayor impacto, y que han sido seleccionadas, son el calentamiento global, la ecotoxicidad terrestre, la toxicidad humana no carcinogénica y la escasez de recursos fósiles. A continuación, se muestran las emisiones asociadas a las categorías de impacto seleccionadas para ambos sistemas (**Tablas 9, 10 y 11**).

Los impactos ambientales que se muestran en las **Tablas 9 y 10** correspondientes con el sistema 1 Escenario A y B, respectivamente, no presentan ninguna diferencia significativa en los valores de cada etapa por cada categoría de impacto. Es por esta razón, y porque actualmente se realiza la emisión de los lixiviados al suelo, que se va a simplificar el estudio del sistema 1, realizando una representación comparativa entre el Escenario A (lixiviados con emisión al suelo) del sistema 1 con el sistema 2.

Tabla 9. Impactos asociados a cada categoría de impacto seleccionadas para el Sistema 1 Escenario A.

Categorías de Impacto	Total	Residuos FVW	Transporte	Celdas depósito	Electricidad medio voltaje	Impacto Evitado
						Electricidad mix energético
<i>Calentamiento global (kg CO₂ eq)</i>	645,66	0	186,97	586,91	1,24	-129,47
<i>Ecotoxicidad terrestre (kg 1,4-DCB)</i>	579,01	0	658,98	0	0,37	-80,35
<i>Toxicidad humana no cancerígena (kg 1,4-DCB)</i>	12,19	0	14,28	0	0,03	-0,09
<i>Escasez de recursos fósiles (kg oil eq)</i>	7,92	0	59,47	0	0,21	-51,76

Tabla 10. Impactos asociados a cada categoría de impacto seleccionadas para el Sistema 1 Escenario B.

Categorías de impacto	Total	Residuos FVW	Transporte	Celdas depósito	Electricidad medio voltaje	Tratamiento de aguas	Impacto Evitado
							Electricidad mix energético
<i>Calentamiento global (kg CO₂ eq)</i>	645,75	0	186,97	586,91	1,24	0,09	-129,47
<i>Ecotoxicidad terrestre (kg 1,4-DCB)</i>	579,07	0	658,98	0	0,37	0,06	-80,35
<i>Toxicidad humana no cancerígena (kg 1,4-DCB)</i>	13,48	0	14,28	0	0,03	1,29	-0,09
<i>Escasez de recursos fósiles (kg oil eq)</i>	7,94	0	59,47	0	0,21	0,01	-51,76

En la **Tabla 11**, se muestran los impactos asociados a cada categoría de impacto para la alternativa de tratamiento de residuos propuesta:

Tabla 11. Impactos asociados a cada categoría de impacto seleccionadas para el Sistema 2.

Categorías de impacto	Total	Residuos FVW	Transporte (Volteo de Compost)	Impacto Evitado		
				Electricidad alto voltaje	Compost (Nitrato de amonio)	Irrigación (Nitrato de calcio)
<i>Calentamiento global (kg CO₂ eq)</i>	-806,91	0	0,929	-618,33	-96,43	-93,09
<i>Ecotoxicidad terrestre (kg 1,4-DCB)</i>	-630,50	0	1,212	-386,60	-141,51	-103,61
<i>Toxicidad humana no cancerígena (kg 1,4-DCB)</i>	-89,16	0	4,746	-10,16	-43,70	-40,05
<i>Escasez de recursos fósiles (kg oil eq)</i>	-271,11	0	0,30	-249,03	-12,66	-9,71

6 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Para determinar la influencia en el análisis final de los resultados por el método propuesto en la norma UNE EN ISO 14040-44, se emplean los datos obtenidos con expansión de sistema, haciéndose una comparativa de cada una de las etapas. En la siguiente sección se ha abordado una discusión exhaustiva que determina los principales contribuyentes a cada categoría de impacto para una mejor comprensión de las diferencias ambientales entre ambas alternativas.

A continuación, en la **Figura 11** se muestra la comparativa del impacto ambiental asociado para cada categoría estudiada en ambos sistemas.

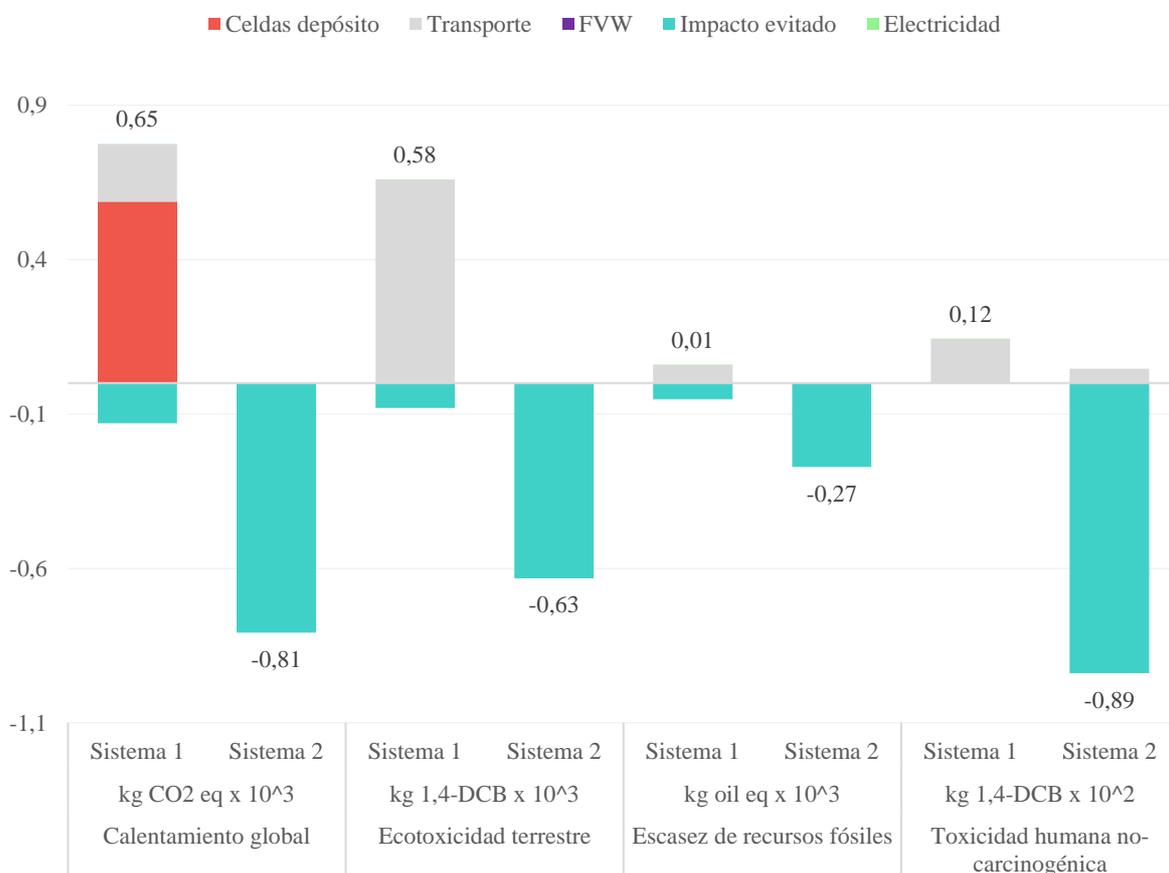


Figura 11. Comparativa del impacto ambiental asociado a cada categoría para los sistemas 1 y 2.

6.1 Calentamiento global

Como se observa en la **Figura 11**, para la categoría de impacto de calentamiento global en el Sistema 1, la captura del biogás generado en las celdas del vertedero donde se depositan y descomponen los residuos, es la etapa que emite mayor contenido de CO₂, concretamente un 91 % (581 kg CO₂ eq) de las emisiones asociadas a esta categoría. Esto se debe a que el sistema de captura de biogás instalado en el vertedero tiene una eficiencia

del 75 %, emitiéndose a la atmósfera un 25 % del biogás generado. La composición del biogás emitido a la atmósfera es un 60 % de CH₄ y un 40 % de CO₂, y aunque el metano permanece en la atmósfera durante un periodo más corto de tiempo y se emite en cantidades más pequeñas que el dióxido de carbono, su potencial de calentamiento global es mucho mayor que el dióxido de carbono. Un alto valor de potencial de calentamiento global implica un aumento de la huella de carbono, y por tanto también el impacto del calentamiento global. Al contrario de lo que sucede en el Sistema 1, en el Sistema 2 el proceso de digestión anaerobia se lleva a cabo bajo condiciones controladas, por lo que las emisiones de metano a la atmósfera podrían considerarse insignificantes.

El transporte también es una etapa influyente en el sistema 1, como se muestra en la **Figura 11**, ya que se corresponde con 186,97 kg CO₂ equivalente de las emisiones asociadas a esta categoría. Esto se debe al dióxido de carbono de origen fósil que se emite por el uso y consumo de combustible de los camiones utilizados en la recogida y transporte de residuos, y en el transporte de los residuos de la estación de transferencia al vertedero, contribuyendo estos procesos con un 22 y 7 % de los impactos asociadas a esta categoría, respectivamente. Este impacto en el sistema 2 es despreciable, ya que esta etapa es inexistente.

Finalmente, los créditos evitados en el sistema 1 son mucho menores que los impactos asociados a esta categoría de impacto (-20 %), siendo a su vez muy inferiores a los créditos evitados en el sistema 2. Los créditos evitados en el sistema 2, se corresponden con un -77 % de la electricidad que se vende al tendido eléctrico, un -12 % del nitrato de amonio y un -12 % del nitrato de calcio.

6.2 Ecotoxicidad terrestre

La etapa de transporte tiene gran influencia en el sistema 1 para esta categoría, al contrario de lo que sucede en la alternativa de tratamiento de los residuos de frutas y verduras que se propone. Esto se debe a que la construcción de la planta de digestión anaerobia se ha propuesto localizarla en el mismo recinto en el que se sitúa el mercado. De este modo, en comparación con el sistema actual, se eliminaría el transporte de estos residuos a la estación de transferencia y al vertedero, evitándose el consumo de un combustible de origen fósil, así como todas las emisiones de CO₂, N₂O y CH₄ provocadas por la combustión del diesel. Además, el sistema 1 tuvo menor impacto evitado en la categoría de ecotoxicidad terrestre debido a que tiene menores créditos asignados que el sistema 2 (61 % electricidad, 23 % nitrato de amonio y 17 % nitrato de calcio), ya que solo se produce como coproducto la electricidad que se vende al tendido eléctrico, que a su vez es menor que la vendida en el sistema 2.

6.3 Escasez de recursos fósiles

A pesar de que tanto en el sistema 1 como en el sistema 2 el biogás generado es transformado en energía, como se ha mencionado anteriormente, la cantidad producida en el sistema 1 es mucho menor, debido a su baja degradación y eficiencia en su recolección, generando una baja proporción de electricidad. Además, cabe mencionar que en el sistema 2, aproximadamente, un 92 % de energía eléctrica producida se vende a la Red eléctrica, autoconsumiéndose el 8 % restante. De este modo se evita la compra de energías de origen fósil. Por

otro lado, a diferencia del sistema 1, en el proceso de digestión anaerobia, además de generarse biogás, que es transformado en energía eléctrica mediante cogeneración, se obtienen como coproductos compost y fertiirrigante cuyo uso evitaría el consumo y/o producción de los fertilizantes inorgánicos empleados actualmente, como el nitrato de amonio y el nitrato de calcio. De este modo, como se observa en la **Figura 11**, con la alternativa propuesta se estaría evitando un impacto mucho mayor que no tiene lugar en la situación actual, correspondiéndose prácticamente todo los impactos del sistema 2 con créditos evitados.

6.4 Toxicidad humana no cancerígena

En esta categoría, los impactos asociados al transporte son los más relevantes en ambos sistemas, aunque en el sistema 2 es un 67 % (**Tablas 9 y 11**) menor que en el sistema 1. En el sistema 2 puede deberse al volteo de compost, ya que es necesario utilizar camiones provistos de palas que van a consumir combustible de origen fósil, produciendo emisiones de CO₂, N₂O y CH₄. A pesar de los impactos negativos del sistema 2, se puede observar en la **Figura 11**, que prevalecen los créditos evitados, correspondiéndose con un 11 % de electricidad, 49 % de nitrato de amonio y 45% de nitrato de calcio.

7 CONCLUSIÓN

En este proyecto se ha realizado un Análisis de Ciclo de Vida comparativo entre el sistema actual y una alternativa propuesta para el tratamiento de los residuos de frutas y verduras generados en el mercado mayorista de la ciudad de Amán. Con este análisis se ha pretendido investigar cuál de los dos sistemas sería más respetuoso con el medio ambiente, es decir, cuál de los dos generaría un menor impacto ambiental.

Según los resultados obtenidos, tras llevar a cabo el análisis comparativo, el Sistema 2 tendría menor impacto ambiental que el Sistema 1. Con la alternativa propuesta, se evitaría el transporte de los residuos y las emisiones que esto conlleva, además de la emisión de metano a la atmósfera que se genera por la descomposición de los residuos. Por otro lado, a pesar de que los dos sistemas generan energía eléctrica que es vendida al tendido eléctrico, en el sistema 2, se vende 5 veces más (389%) de energía eléctrica que en el vertedero. La venta de la energía a la Red eléctrica generaría beneficios económicos y medioambientales, ya que la energía eléctrica que se utiliza en la Red eléctrica actualmente proviene de combustibles fósiles, y en este caso proviene de energía verde. Además, en el sistema 2 se generan dos coproductos que no se obtendrían en el sistema 1, compost y fertiirrigante. Con la producción diaria de estos productos, se evitaría aproximadamente el consumo de 11,7 y 30 kg de fertilizantes inorgánicos como el nitrato de amonio y nitrato de calcio, respectivamente.

Por último, además de llevar a cabo el análisis de ciclo de vida, sería recomendable realizar un análisis de costes económicos para comprobar la rentabilidad de la alternativa propuesta, ya que, aunque se podría decir que medioambientalmente es sostenible habría que realizar un estudio más exhaustivo incluyendo los costes de implantación de la planta de digestión anaerobia.

8 BIBLIOGRAFIA

- Acarley, F., & Quipuzco, L., 2020. Producción de metano mediante digestión anaerobia de aguamiel, subproducto del beneficio húmedo del café. *Agroindustrial Science* 7–16.
- Alburquerque, J.A., de la Fuente, C., B., M.P., 2012. Chemical properties of anaerobic digestates affecting C and N dynamics in amended soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 15–22. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.007>
- Aqualimpia Engineering e.K., 2017. Fases de la digestión anaeróbica [WWW Document]. URL <https://www.aqualimpia.com/digestion-anaerobica/> (accessed 3.5.20).
- Arhoun, B., Villen-Guzman, M., Gomez-Lahoz, C., Rodriguez-Maroto, J.M., Garcia-Herruzo, F., Vereda-Alonso, C., 2019. Anaerobic co-digestion of mixed sewage sludge and fruits and vegetable wholesale market waste: Composition and seasonality effect. *Journal of Water Process Engineering* 31, 100848. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100848>
- Azapagic, A., 2016. CCalc2 © for Windows Manual (V1.1). University of Manchester.
- Bhupendra, K.S., Chandel, M.K., 2017. Life cycle assessment of potential municipal solid waste management strategies for Mumbai, India. *Waste Management & Research* 35(1), 79–91. <https://doi.org/https://doi.org/10.1177/0734242X16675683>
- Bozym, M., Florczak, I., Zdanowska, P., Wojdalski, J., Klimkiewicz, M., 2015. An analysis of metal concentrations in food wastes for biogas production. *Renewable Energy* 467–472.
- CEOMED progress report, 2021. Progress report of April about pilot plant demonstration in Amman Wholesale Market 283.
- CEOMED progress report, 2020. Progress report of November about pilot plant demonstration in Amman Wholesale Market.
- Cerda, A., Artola, A., Font, X., Barrera, R., Gea, T., Sánchez, A., 2018. Composting of food wastes: Status and challenges. *Bioresource Technology* 248, 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.133>
- Cubero-Cardoso, J., Muñoz-Arjona, A., Trujillo-Reyes, Á., Serrano, A., Alonso-Fariñas, B., Rodríguez-Gutiérrez, G., Urbano, J., Borja, R., Feroso, F.G., 2020. Mesophilic semi-continuous anaerobic digestion of strawberry extrudate pretreated with steam explosion. *Foods* 9, 1–11. <https://doi.org/10.3390/FOODS9121887>
- Dong, J., Chi, Y., Zou, D., Fu, C., Huang, Q., Ni, M.N., Mingjiang, 2013. Comparison of municipal solid waste

treatment technologies from a life cycle perspective in China 32, 13–23.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1177/0734242X13507311>

FAM, 2021. Industrial food cutting solutions [WWW Document]. URL <https://www.fam.be/es/machine/tridis180> (accessed 7.7.21).

FAO, 2021. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. [WWW Document]. URL <http://www.fao.org/platform-food-loss-waste/es/> (accessed 4.5.21).

FAOSTAT, 2021. Base de datos estadísticos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. [WWW Document]. URL <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (accessed 4.5.21).

Feliu, Á., Flotats, X., 2019. Los gases renovables. Un vector energético emergente., Fundación. ed.

Fermoso, F.G., Serrano, A., A.-F., B., Fernández-Bolaños, J., Borja, R., Rodríguez-Gutiérrez, G., 2018. Valuable Compound Extraction, Anaerobic Digestion, and Composting: A Leading Biorefinery Approach for Agricultural Wastes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 8451–8468.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b02667>

Hadjidimoulas, C., 2018. Methane Gas Emissions: Methods of Improving the Efficiency of the Biggest Landfill Gas Waste to Energy Project in the Middle East Installed in Amman, Jordan. *OALib* 05, 1–35.
<https://doi.org/10.4236/oalib.1104476>

IPCC, 2019. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

IPCC, 2006a. CAPÍTULO 3. Combustión Móvil. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero 2, 78.

IPCC, 2006b. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Vol 5. Cap 3.

IPCC, 1996. Orientaciones del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios de gases efecto invernadero. 5, 1–35.

Juan Cadena Z, Juan Mora F, S.P.L., 2012. Análisis de viabilidad financiera de una central de generación de energía eléctrica a partir del biogás de vertedero, *Scientia et technica* 2 (51) 1-7.

Kaparaju, P., Rintala, J., Oikari, A., 2012. Agricultural potential of anaerobically digested industrial orange waste with and without aerobic post-treatment. *Environmental Technology* 85–94.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1080/09593330.2011.551839>

Khandelwal, H., Thalla, A.K., Kumar, S., Kumar, R., 2019. Life cycle assessment of municipal solid waste management options for India. *Bioresource Technology* 288, 121515.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121515>

- Liu, X., Gao, X., Wang, W., Zheng, L., Zhou, Y., Sun, Y., 2012. Pilot-scale anaerobic co-digestion of municipal biomass waste: Focusing on biogas production and GHG reduction. *Renewable Energy* 44, 463–468. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.092>
- Mendía, V. de la V., 2020. Planta de separación y clasificación y estación de transferencia de residuos sólidos urbanos para la villa 31. Universidad Nacional de San Martín.
- Nzeadibe, T.C., Ayadiuno, R.U., Akukwe, T.I., 2010. Solid waste governance in Owerri urban area, Nigeria: problems and prospects. *Waste management (New York, N.Y.)* 30, 355–357. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.11.009>
- Oyoo, R., Leemans, R., Mol, A.P.J., 2014. Comparison of environmental performance for different waste management scenarios in East Africa: The case of Kampala City, Uganda. *Habitat International* 44, 349–357. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2014.07.012>
- Richard, E.N., Hilonga, A., Machunda, R.L., Njau, K.N., 2021. Life cycle analysis of potential municipal solid wastes management scenarios in Tanzania: the case of Arusha City. *Sustainable Environment Research* 31, 1–13. <https://doi.org/10.1186/s42834-020-00075-3>
- Rincón, C.A., De Guardia, A., Couvert, A., Le Roux, S., Soutrel, I., Daumoin, M., Benoist, J.C., 2019. Chemical and odor characterization of gas emissions released during composting of solid wastes and digestates. *Journal of Environmental Management* 233, 39–53. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.009>
- Saber, M., Khitous, M., Kadir, L., Abada, S., Tirichine, N., Moussi, K., Saidi, A., Akbi, A., Aziza, M., 2021. Enhancement of organic household waste anaerobic digestion performances in a thermophilic pilot digester. *Biomass and Bioenergy* 144, 105933. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105933>
- Sánchez, A., Artola, A., Font, X., Gea, T., Barrena, R., Gabriel, D., Sánchez-Monedero, M.Á., Roig, A., Cayuela, M.L., Mondini, C., 2015. Greenhouse Gas from Organic Waste Composting: Emissions and Measurement. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11906-9_2
- Scano, E.A., Asquer, C., Pistis, A., Ortu, L., Demontis, V., Cocco, D., 2014. Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant. *Energy Conversion and Management* 77, 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.004>
- Schnürer, A., Jarvis, Å., 2018. The digested residues, Microbiology of the biogas process. Swedish University of Agricultural Sciences: Uppsala, Sweden.
- Serrano, A., 2015. Tratamiento de residuos y subproductos agroindustriales mediante co-digestión anaerobia. Facultad de Ciencias. Universidad de Córdoba. Facultad de Ciencias. Universidad de Córdoba. Facultad

de Ciencias. Universidad de Córdoba. España. 9-10.

- Serrano, A., Villa-Gomez, D., Feroso, F.G., Alonso-Fariñas, B., 2021. Is anaerobic digestion a feasible alternative to the combustion of olive mill solid waste in terms of energy production? A critical review. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 15, 150–162. <https://doi.org/10.1002/bbb.2159>
- Trujillo-Reyes, Á., Cubero-Cardoso, J., Rodríguez-Gutiérrez, G., García-Martín, J.F., Rodríguez-Galán, M., Borja, R., Serrano, A., Feroso, F.G., 2019. Extraction of phenolic compounds and production of biomethane from strawberry and raspberry extrudates. *Biochemical Engineering Journal* 147, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2019.03.023>
- Tsachidou, B., Scheuren, M., Gennen, J., Debbaut, V., Toussaint, B., Hissler, C., George, I., Delfosse, P., 2019. A, Biogas residues in substitution for chemical fertilizers: Region., comparative study on a grassland in the Walloon Region. *Science of the Total Environment* 212–225. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.238>
- Vilches, L., 2018. Principales procesos biológicos. Universidad de Sevilla.
- Wang, J. Y., Liu, X. Y., Kao, J. C., & Stabnikova, O., 2006. Digestion of pre-treated food waste in a hybrid anaerobic solid–liquid (HASL) system. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 81(3), 345/351.
- Wheatley, A., 1990. *Anaerobic Digestion: A Waste Treatment Technology*. Elsevier Applied Science.
- Zeng, X., Ma, Y., Ma, L., 2007. Utilization of straw in biomass energy in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 976–987. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.10.003>

9 ANEXO

9.1 ANEXO I. CÁLCULO DEL INDICADOR DE LA CALIDAD DE DATO (DQI) PARA AMBOS SISTEMAS

Tabla 12. Cálculo DQI del Sistema 1

Categoría	Item	Nombre	Tipo	Sección	Sub-sección	Antigüedad	Origen geográfico	Fuente	Integridad del dato	Reproducibilidad	DQI
Cantidad	1	Uso de maquinaria	Entrada	Recogida de basura y transporte	Prensado	3	2	2	2	3	2,4 (Alta)
Tecnosfera	2	Energía Eléctrica	Entrada	Estación de transferencia	Compactador hidráulico	3	3	3	3	3	3 (Alta)
Tecnosfera	3	Transporte	Entrada	Transporte		3	2	3	3	3	2,9 (Alta)
Cantidad	4	Carbono orgánico total	Emisión al suelo	Estación de transferencia	Compactador hidráulico	3	3	2	2	2	2,3 (Alta)
Cantidad	5	Nitrógeno total	Emisión al suelo	Estación de transferencia	Compactador hidráulico	3	3	2	2	2	2,3 (Alta)
Cantidad	6	CO ₂	Emisión al aire	Recogida de basura y transporte		3	3	3	3	3	3 (Alta)
Cantidad	7	N ₂ O	Emisión al aire	Recogida de basura y transporte		3	3	3	3	3	3 (Alta)

Continuación Tabla 12. Cálculo DQI del Sistema 1

Categoría	Item	Nombre	Tipo	Sección	Sub-sección	Antigüedad	Origen geográfico	Fuente	Integridad del dato	Reproducibilidad	DQI
Cantidad	8	CH ₄	Emisión al aire	Recogida de basura y transporte		3	3	3	3	3	3 (Alta)
Cantidad	9	CH ₄	Emisión al aire	Recogida de basura y transporte	Celdas depósito	3	3	3	3	3	3 (Alta)
Tecnosfera	10	H ₂ O	Agua a tratamiento	Recogida de basura y transporte	Compactador hidráulico	3	3	3	3	3	3 (Alta)
Tecnosfera	11	Energía eléctrica	Co-producto	Vertedero	Generación de energía	3	2	3	3	3	2,9 (Alta)
Cantidad	12	Residuos FVW	Producto principal			3	3	3	3	3	3 (Alta)

Tabla 13. Cálculo de DQI del Sistema 2

Categoría	Item	Nombre	Tipo	Sección	Sub-sección	Antigüedad	Origen geográfico	Fuente	Integridad del dato	Reproducibilidad	DQI
Tecnosfera	1	Combustible	Entrada	Compostaje	Volteo de compost	3	2	3	3	3	2,9 (Alta)
Cantidad	2	NH ₃	Emisión al aire	Compostaje	Maduración del compost	3	2	3	3	3	2,9 (Alta)
Cantidad	3	CO ₂	Emisión al aire	Compostaje	Volteo del compost	3	3	3	3	3	3 (Alta)
Cantidad	4	N ₂ O	Emisión al aire	Compostaje	Volteo del compost	3	3	3	3	3	3 (Alta)
Cantidad	5	CH ₄	Emisión al aire	Compostaje	Volteo del compost	3	3	3	3	3	3 (Alta)
Tecnosfera	6	Fertilizante para jardinería (fracción líquida)	Coproducto	Planta de digestión anaerobia	Centrifugación	3	2	3	3	3	2,9 (Alta)
Tecnosfera	7	Compost	Coproducto	Planta de digestión anaerobia	Compostaje	3	2	3	3	3	2,9 (Alta)
Tecnosfera	8	Energía eléctrica	Producto principal	Planta de digestión anaerobia	Cogeneración	3	2	3	3	3	2,9 (Alta)
Cantidad	9	Residuos FVW	Producto principal			3	3	3	3	3	3 (Alta)

9.2 ANEXO II. ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS UTILIZANDO EL SOFTWARE SIMAPRO

1. Sistema 1 Escenario A

Figura 12. Modelos escogidos en Simapro para la resolución del Escenario A del Sistema 1.

Productos								
Especificación de residuo	Material por defecto/tipo de residuo	Cantidad	Ud.	Cantidad	Categoría	Comentario		
Residuos de FVW	All waste types	5000	kg	Mass	Market			
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	Comentario
Electricity, medium voltage [JO] market for electricity, medium voltage APOS, U		227,8	kWh	Indefinido				
Entradas								
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	Comentario
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	Comentario
Recogida de residuos y transporte (11 km). Sistema 1		5000	kg	Indefinido				Transporte/prensado (comunicación personal)
Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, euro5 [RER] market for transport, freight, lorry 3.5-		112,5	tkm	Indefinido				Transporte hacia celdas depósito
Celdas depósito		4500	kg	Indefinido				Celdas depósito
Entradas conocidas desde la tecnósfera (electricidad/calor)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	Comentario
Electricity mix, AC, consumption mix, at consumer, < 1kV EU-27 S		2,074	kWh	Indefinido				Energía requerida por el compactador hidráulico
Salidas								
Emisiones al aire		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	Comentario
Emisiones al agua		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	Comentario
Emisiones al suelo		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	Comentario
Nitrogen		23,25	kg	Indefinido				
Carbon		0,95	kg	Indefinido				

2. Sistema 1 Escenario B

Figura 13. Modelos escogidos en Simapro para la resolución del Escenario B del Sistema 1.

Productos								
Especificación de residuo	Material por defecto/tipo de residuo	Cantidad	Ud.	Cantidad	Categoría	Comentario		
Sistema 1, Escenario B, Lixiviados a tratamiento de aguas	All waste types	5000	kg	Mass	Market			
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados								
		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Mín	Máx	Comentario
Electricity, medium voltage (JO) market for electricity, medium voltage APOS, U		227,8	kWh	Indefinido				
(Insertar línea aquí)								
Entradas								
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Mín	Máx	Comentario
(Insertar línea aquí)								
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)								
		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Mín	Máx	Comentario
Recogida de residuos y transporte (11 km). Sistema 1		5000	kg	Indefinido				Transporte/prensado (comunicación personal)
Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, euro5 (RER) market for transport, freight, lorry 3.5-		112,5	tkm	Indefinido				Transporte hacia celdas depósito
Celdas depósito		4500	kg	Indefinido				Celdas depósito
(Insertar línea aquí)								
Entradas conocidas desde la tecnósfera (electricidad/calor)								
		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Mín	Máx	Comentario
Electricity mix, AC, consumption mix, at consumer, < 1kV EU-27 S		2,074	kWh	Indefinido				Energía requerida por el compactador hidráulico
(Insertar línea aquí)								
Salidas								
Emissiones al aire	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Mín	Máx	Comentario
(Insertar línea aquí)								
Emissiones al agua	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Mín	Máx	Comentario
(Insertar línea aquí)								
Emissiones al suelo	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Mín	Máx	Comentario
(Insertar línea aquí)								
Flujos finales de residuos	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Mín	Máx	Comentario
(Insertar línea aquí)								
Emissiones no materiales	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Mín	Máx	Comentario
(Insertar línea aquí)								
Aspectos sociales	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Mín	Máx	Comentario
(Insertar línea aquí)								
Asuntos economicos	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Mín	Máx	Comentario
(Insertar línea aquí)								
Salidas conocidas a la tecnósfera. Residuos y emisiones para tratamiento								
		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Mín	Máx	Comentario
Wastewater, average (Europe without Switzerland) treatment of wastewater, average, capacit		0,5	m3	Indefinido				
(Insertar línea aquí)								

Ambos escenarios tienen en común la recogida de residuos y transporte y las emisiones en las celdas depósito:

Figura 14. Modelo creado en Simapro para la recogida de residuos y transporte, Escenarios A y B del Sistema 1.

Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos		Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación %	Categoría		Comentario	
Recogida de residuos y transporte (11 km). Sistema 1		1	kg	Mass	100 %	Road\Transformation			
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	Comentario	
Entradas									
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)		Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	Comentario
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	Comentario	
Diesel (RER) market group for APOS, U		0,0078	kg	Indefinido					
Entradas conocidas desde la tecnósfera (electricidad/calor)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	Comentario	
Salidas									
Emisiones al aire		Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	Comentario
Carbon dioxide			0,0246	kg	Indefinido				Método IPCC Energía
Dinitrogen monoxide			0,00000129	kg	Indefinido				Método IPCC Energía
Methane			0,00000129	kg	Indefinido				Método IPCC Energía

Figura 15. Modelo creado en Simapro para las emisiones que se producen en las celdas deposito, Escenarios A y B del Sistema 1.

Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos		Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación %	Tipo de residuo	Categoría	
Celdas depósito		1	kg	Mass	100 %	no definido	Fuels\Bi...\Transforma	
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	Co
Entradas								
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	Co
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	Co
Entradas conocidas desde la tecnósfera (electricidad/calor)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	Co
Salidas								
Emisiones al aire	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	Co
Carbon dioxide, biogenic		0	kg	Indefinido				
Methane		0,003836	kg	Indefinido				

3. Sistema 2

Figura 16. Modelos seleccionados en Simapro para la resolución del Sistema 2.

Productos								
Especificación de residuo	Material por defecto/tipo de residuo	Cantidad	Ud.	Cantidad	Categoría	Comentario		
Sistema 2, Aplicación de digestión anaerobia	All waste types	5000	kg	Mass	Transformation			
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	Comentario
Electricity, high voltage {JO} market for electricity, high voltage APOS, U		1113	kWh	Indefinido				
Ammonium nitrate, as N {GLO} market for APOS, U		11,7	kg	Indefinido				
Calcium nitrate {GLO} market for APOS, U		30	kg	Indefinido				
(Insertar línea aquí)								
Entradas								
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	Comentario
(Insertar línea aquí)								
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	Comentario
Volteo del compost		686	kg	Indefinido				
(Insertar línea aquí)								
Entradas conocidas desde la tecnósfera (electricidad/calor)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	Comentario
(Insertar línea aquí)								

Figura 17. Modelo creado en Simapro para las emisiones que se producen en el volteo de compost en el Sistema 2.

Productos									
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos		Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación %	Categoría	Comentario		
Volteo del compost		1	ton	Mass	100 %	Road\Market			
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	Comentario	
Entradas									
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)		Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	Comentario
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	Comentario	
Diesel, burned in agricultural machinery {GLO} market for diesel, burned in agricultural mach		0,000017	TJ	Indefinido					
Entradas conocidas desde la tecnósfera (electricidad/calor)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	Comentario	
Salidas									
Emisiones al aire		Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	Comentario
Ammonia			0,33	kg	Indefinido				
Dinitrogen monoxide			0,00000001326	kg	Indefinido				
Methane			0,00000001326	kg	Indefinido				
Carbon dioxide			0,000252	kg	Indefinido				

9.3 ANEXO III. RESOLUCIÓN DEL MÉTODO DE DESCOMPOSICIÓN DE PRIMER ORDEN (FOD), MEDIANTE LAS DIRECTRICES DEL MÉTODO IPCC (IPCC, 2019, 2006b, 1996)

En las Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, se describen dos métodos para estimar las emisiones de CH₄ provenientes de los SEDS (sitios de eliminación de desechos sólidos): el método del equilibrio de masas (nivel 1) y el método de descomposición de primer orden (FOD, del inglés First Order Decay) (nivel 2), cuya última modificación fue publicada en 2019 mediante el documento “2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”(IPCC, 2019).

La metodología del IPCC para estimar las emisiones de CH₄ provenientes de los SEDS se basa en el método de descomposición de primer orden (FOD). En este método se formula la hipótesis de que el componente orgánico degradable (carbono orgánico degradable, COD) de los desechos se descompone lentamente a lo largo de unas pocas décadas, durante las cuales se forman el CH₄ y el CO₂. Si las condiciones permanecen constantes, el índice de producción del CH₄ depende únicamente de la cantidad de carbono restante en los desechos. De aquí resulta que las emisiones de CH₄ generadas por los desechos depositados en un vertedero son las más altas durante los primeros pocos años siguientes a la eliminación y que, luego, éstas decaen a medida que el carbono degradable de los desechos es consumido por las bacterias responsables de la descomposición.

La transformación de la materia degradable de los SEDS en CH₄ y CO₂ se produce a través de una cadena de reacciones y reacciones paralelas. El método IPCC ha adoptado, por lo tanto, el relativamente simple modelo FOD como base para la estimación de las emisiones de CH₄ generadas por los SEDS.

Se describe, por tanto, tres niveles para estimar las emisiones de CH₄ generados en los SEDS:

- Nivel 1: las estimaciones de los métodos de Nivel 1 se basan en el método FOD del IPCC que usa principalmente datos por defecto de la actividad y parámetros por defecto.
- Nivel 2: utilizan el método FOD del IPCC y algunos parámetros por defecto, pero requieren datos de la actividad específicos del país de buena calidad sobre la eliminación actual e histórica de desechos en los SEDS.
- Nivel 3: se basan en el uso de datos de la actividad específicos del país, de buena calidad y en el uso del método FOD, ya sea con (1) parámetros principales desarrollados al nivel nacional, o (2) parámetros específicos del país derivados de mediciones.

En este proyecto se va a realizar el estudio del método de descomposición de primer orden (FOD), Nivel 1.

Las emisiones de CH₄ procedentes de la eliminación de desechos sólidos durante un solo año pueden estimarse con la **Ecuación 64**. El CH₄ se genera como resultado de la descomposición de materias orgánicas bajo condiciones anaeróbicas. Una parte del CH₄ generado se oxida en la cubierta de la eliminación de desechos sólidos (SEDS) o puede recuperarse para obtener energía o la quema en antorcha. La cantidad de CH₄ realmente emitido a partir de los SEDS será,

$$\text{Emisiones de CH}_4 = \left[\sum_x \text{CH}_4 \text{generado}_{x,T} - R_T \right] \cdot (1 - \text{OX}_T) \quad \text{Ecuación 64}$$

Donde:

- Emisiones de CH₄= metano emitido durante el año *T*, en Gg
- *T*= año del inventario
- *x*= categoría o tipo de desecho y/o material
- *R_T*= metano recuperado durante el año *T*, en Gg
- *OX_T*= factor de oxidación durante el año *T*, (fracción)

El CH₄ potencial que se genera a través de los años puede estimarse sobre la base de las cantidades y la composición de los desechos eliminados en los SEDS y de las prácticas de gestión en los sitios de eliminación.

La base para el cálculo de la generación de metano es la cantidad de carbono orgánico degradable disuelto (DDOC, del inglés, Decomposable Degradable Organic Carbon) (DDOC_m) como se define en la **Ecuación 65**.

$$\text{DDOC}_m = W \cdot \text{DOC} \cdot \text{DOC}_F \cdot \text{MCF} \quad \text{Ecuación 65}$$

Donde:

- DDOC_m es la parte del carbono orgánico que se degrada en condiciones anaeróbicas en los SEDS referido en unidad de masa que se deposita en el vertedero (Gg).
- *W* se corresponde con la cantidad de desechos que se depositan en el vertedero al año, en este caso los residuos FVW, expresado en Gg.
- DOC es la fracción de carbono orgánico degradable contenido en los desechos.
- DOC_F se corresponde con una fracción de carbono orgánico degradable que se descompone bajo condiciones anaeróbicas.
- MCF es el factor de corrección de CH₄ para la descomposición aeróbica durante el año de deposición. Su valor se expresa en fracción.

Por lo que, para determinar la cantidad de CH₄ que se forma a partir del material que puede descomponerse, se multiplica la fracción de CH₄ contenida en el gas de vertedero generado por el cociente de pesos moleculares CH₄/C (**Ecuación 66**).

$$\text{CH}_4 \text{generado}_T = \text{DDOC}_m \cdot F \cdot \frac{16}{12} \quad \text{Ecuación 66}$$

Donde:

- CH₄ generado_T es la cantidad de metano producido a partir del residuo en descomposición.
- DDOC_m es la parte del carbono orgánico que se degrada en condiciones anaeróbicas en los SEDS referido en unidad de masa que se deposita en el vertedero (Gg).

- F se corresponde con la fracción volumétrica de CH₄ en el gas de vertedero generado.
- 16/12 es el cociente de pesos moleculares CH₄/C

ELECCIÓN DE LOS FACTORES Y PARÁMETROS DE EMISIÓN

➤ **Cantidad de desechos que se depositan en el vertedero al año (W)**

$$W = 4.500 \frac{\text{kg masa compactada}}{\text{d}} \cdot 365 \frac{\text{d}}{\text{año}} \cdot \frac{1 \text{ Gg masa compactada}}{1.000.000 \text{ kg masa compactada}} = 1,64 \frac{\text{Gg masa compactada}}{\text{año}} \text{ Ecuación}$$

67

➤ **Carbono orgánico degradable (DOC)**

El carbono orgánico degradable (DOC) es el carbono orgánico de los desechos que puede acceder a la descomposición bioquímica y debe expresarse en Gg de C por Gg de desechos. El DOC en los desechos brutos se estima sobre la base de la composición de los desechos y puede calcularse a partir del promedio ponderado del contenido de carbono degradable de los diversos componentes (tipos y/o materiales de desecho) de la corriente de desechos. La ecuación siguiente permite estimar el DOC con los valores de contenido de carbono por defecto:

$$\text{DOC} = \sum_i (\text{DOC}_i \cdot W_i) \text{ Ecuación 68}$$

Donde:

- DOC = fracción de carbono orgánico degradable en los desechos brutos, Gg de C/Gg de desechos.
- DOC_i = fracción de carbono orgánico degradable en los desechos de tipo i.
- W_i = fracción de tipo de desecho i por categoría de desecho.

El valor de DOC se puede estimar mediante el uso de valores por defecto del contenido de carbono tal y como se representa en la **Ecuación 69**:

$$\text{DOC} = 0,40 (A) + 0,17(B) + 0,15 (C) + 0,30 (D) \text{ Ecuación 69}$$

Donde A es el porcentaje de los residuos que corresponde al papel, cartón y los textiles; B es el porcentaje de los residuos que corresponde a los desechos de jardín y de los parques u otros desechos orgánicos putrescibles (excluidos los alimentos); C es el porcentaje de los residuos que corresponde a los restos de alimentos; y D es el porcentaje de los residuos que corresponde a madera y paja.

Según el método IPCC, se exhorta a utilizar valores nacionales si se dispone de ellos. Como para este proyecto se conoce la cantidad de carbono que contienen los FVW (46,5 %), se va a determinar cuál es la fracción de carbono orgánico degradable (DOC) (**Ecuación 70**). Para ello es necesario saber la cantidad de sólidos totales que contienen los FVW, en este caso 150 g ST/kg FVW.

$$\text{Cantidad de DOC} = 156 \frac{\text{g ST}}{\text{kg masa compactada}} \cdot \frac{46,5 \text{ g C}}{100 \text{ g ST}} = 72,54 \frac{\text{g C}}{\text{kg masa compactada}} = 0,073 \frac{\text{kg C}}{\text{kg masa compactada}} \quad \text{Ecuación 70}$$

➤ **Fracción del carbono orgánico degradable que se descompone (DOC_F)**

La fracción del carbono orgánico degradable que se descompone (DOC_F) es una estimación de la fracción de carbono que se degrada en última instancia y que se libera desde un SEDS y refleja el hecho de que una parte del carbono orgánico degradable no se degrada, o se degrada muy lentamente, bajo condiciones anaeróbicas en el SEDS. El valor por defecto recomendado para DOC_F según se muestra en la **Tabla 14**, es de 0,7, bajo la hipótesis de que el residuo para el que se está desarrollando este proyecto se considera un residuo altamente descomponible debido a que pertenece a desperdicio de comida. El valor de DOC_F depende de muchos factores, como la temperatura, la humedad, el pH, la composición de los desechos entre otros, por lo que varía según la ciudad en la que se encuentre.

Tabla 14. Fracción de carbono orgánico degradable (DOC_F) que se descompone para diferentes tipos de residuos (IPCC, 2019, 2006b, 1996).

Tipo de residuo	Valor DOC_F recomendado
Residuos con menor capacidad de descomposición. Ej. madera, productos de madera sintética, ramas de árboles (madera)	0,1
Residuos con moderada capacidad de descomposición Ej. pañales, papel, etc...	0,5
Residuos con alta capacidad de descomposición, Ej. desperdicios de comida, pastos (desechos de jardines y parques, excluidos los árboles) sucursales)	0,7
Residuos a granel. Se utiliza cuando se desconocen las fracciones de residuos de descomposición menor, moderada y alta en los RSU.	0,5

➤ **Factor de corrección de metano (MCF)**

Las prácticas de eliminación de desechos varían respecto del control, la disposición de los desechos y la gestión del sitio. El factor de corrección de CH₄ (MCF) da cuenta del hecho de que, a partir de una cantidad dada de desechos, los SEDS no gestionados producen menos CH₄ que los SEDS anaeróbicos gestionados. En los SEDS no gestionados, una fracción mayor de desechos se descompone aeróbicamente en la capa superior. En los SEDS no gestionados con eliminación profunda y/o con un alto nivel freático, la fracción de desechos que se degrada aeróbicamente debe ser más pequeña que en un SEDS de poca profundidad. Los SEDS semi-aeróbicos gestionados lo son de manera pasiva por introducción de aire en la capa de desechos para crear un entorno semi-aeróbico dentro del SEDS. En relación con la gestión de los desechos sólidos, el MCF es específico a esa área y

debe interpretarse como el factor de corrección para la gestión de desechos que refleja el aspecto de la gestión abarcado.

Se asigna un MCF a cada una de las categorías representadas en la **Tabla 15**, de la cual se ha considerado que el factor de corrección de metano que más se ajusta en este proyecto es 0,5, debido a que se corresponde con un sitio semi-aeróbico gestionado de eliminación de desechos sólidos (como se explica en el apartado 3.5.1), donde deben garantizar la ubicación controlada de los desechos e incluir todas las estructuras siguientes para introducir aire en las capas de desechos: (i) material de la cubierta permeable; (ii) sistema de drenaje para la lixiviación; (iii) estanques de regulación y (iv) sistema de ventilación de gases.

Tabla 15. Clasificación y factor de corrección de metano (MCF) (IPCC, 2019, 2006b, 1996).

Clasificación	MCF
Gestionado, anaerobico ¹	1
Bien gestionado, semi-aeróbico²	0,5
Moderadamente gestionado, semi-aeróbico ³	0,7
Bien gestionado con aireación activa ⁴	0,4
Moderadamente gestionado con aireación activa ⁵	0,7
No gestionado, profundo (residuos >5m) ⁶	0,8
No gestionado, superficie (residuos <5m) ⁷	0,4
Sin categoría ⁸	0,6

¹Sitios anaeróbicos gestionados de eliminación de desechos sólidos: Deben implementar la colocación controlada de los desechos (es decir: los desechos son dirigidos a áreas específicas de deposición donde se ejerce un cierto control sobre la recuperación informal de residuos reciclables y la quema de basuras) e incluir por lo menos uno de los siguientes elementos: (i) material protector de la cubierta; (ii) compactación mecánica o (iii) nivelación de los desechos.

²Sitios semi-aeróbico gestionado de eliminación de desechos sólidos, donde deben garantizar la ubicación controlada de los desechos e incluir todas las estructuras siguientes para introducir aire en las capas de desechos: (i) material de la cubierta permeable; (ii) sistema de drenaje para la lixiviación; (iii) estanques de regulación y (iv) sistema de ventilación de gases.

³Sitios gestionados semi-aeróbico bajo una de las siguientes condiciones, se considera como administración deficiente; (i) estado de hundimiento del lixiviado sistema de drenaje; (ii) cierre de válvula de drenaje o apertura de la salida de drenaje a la atmósfera; (iii) taponamiento y salida de ventilación de gas.

⁴La aireación activa de los vertederos gestionados incluye la tecnología de aireación in situ a baja presión, aire burbujeo, bioventilación, ventilación pasiva con extracción (succión). Estos deben estar controlados la colocación de residuos e incluirá lixiviados, sistema de drenaje para evitar el bloqueo del aire penetración y (i) material de cobertura; (ii) inyección de aire o sistema de extracción de gas sin secado de residuos.

⁵Equipado con un activo de aireación gestionados cuando se encuentra bajo una de las siguientes condiciones, se considera mala administración; (i) bloqueo del sistema de aireación debido a fallo de drenaje; (ii) falta de humedad disponible para microorganismos debido a la aireación a alta presión.

⁶Sitios no gestionados poco profundos de eliminación de desechos sólidos: todos los SEDS que no cumplen con los criterios de los SEDS gestionados y que tienen profundidades de menos de 5 metros.

⁷Sitios no gestionados de eliminación de desechos sólidos - profundos y/o con capa freática elevada: Todos los SEDS que no cumplen con los criterios de los SEDS gestionados y que tienen profundidades mayores o iguales a 5 metros y/o una capa freática elevada cercana al nivel del suelo. La última situación corresponde al llenado con desechos de un terreno con aguas fluviales, como un estanque, río o humedal.

⁸Sitios no categorizados de eliminación de desechos sólidos: Sólo si los países no pueden categorizar sus SEDS dentro de las cuatro anteriores categorías de SEDS gestionados y no gestionados pueden emplear el MCF para esta categoría

➤ **Fracción de CH₄ generado en el vertedero (F)**

En los SEDS, la mayor parte de los desechos generan un gas con aproximadamente 50 por ciento de CH₄. Sólo los materiales que incluyen cantidades sustanciales de grasa o aceite pueden generar gas con mucho más del 50 por ciento de CH₄. Por lo tanto, se alienta a emplear el valor por defecto del IPCC para la fracción de CH₄ en el gas de vertedero generado (0,5). La fracción de CH₄ en el gas de vertedero generado no debe confundirse con el CH₄ medido en el gas emitido desde los SEDS. Por tanto, se recomienda el valor de la fracción de CH₄ (F) en el gas de vertedero sea de **0,5**.

➤ **Factor de oxidación (OX)**

El factor de oxidación (OX) refleja la cantidad de CH₄ que se oxida en el suelo u otra materia que cubre los desechos. La oxidación del CH₄ se produce por la acción de microorganismos metanotróficos en suelos de cobertura y puede variar desde insignificante hasta el 100 por ciento del CH₄ producido internamente. El espesor, las propiedades físicas y el contenido de humedad de los suelos de cobertura afectan directamente la oxidación del CH₄.

El valor predeterminado del factor de oxidación es cero (ver **Tabla 16**). El uso del valor de oxidación de 0,1 está justificado para los SEDS cubiertos y bien gestionados para estimar tanto la difusión a través de la cubierta como las fugas a través de las grietas y/o fisuras. Para este proyecto se desconoce la cantidad de metano que se oxida en el suelo, por esta razón se va a suponer que el valor es 0.

Tabla 16. Estimación del Factor de oxidación (OX) (IPCC, 2019, 2006b, 1996).

Tipo de sitio	Factor de oxidación (OX)
Gestionados* y no categorizados *Gestionado, pero no cubierto con material aireado	0
Gestionados cubiertos con material oxidante del CH ₄ Ej. Suelo, abono orgánico (compost)	0,1

➤ **Metano recuperado al año en Gg (R_T)**

El CH₄ generado en un vertedero puede recuperarse y quemarse en una antorcha o dispositivo de energía. La cantidad de CH₄ que se recupera se expresa como R_T. Si el gas recuperado se utiliza para generar energía, las emisiones resultantes de gas de efecto invernadero deben calcularse. Sin embargo, las emisiones provenientes de la quema en antorcha son insignificantes, pues las emisiones de CO₂ son de origen biogénico y las emisiones de CH₄ y N₂O son muy pequeñas, de modo que no se exigen su estimación.

Se pueden utilizar valores específicos de cada país, pero sería necesario realizar una investigación significativa para comprender el impacto en recuperación de los siguientes parámetros: tipo de cobertura, porcentaje de residuos cubiertos por el proyecto de recuperación, presencia de un revestimiento, estado abierto o cerrado y otros factores.

En el vertedero de Al Ghabawi, según reporta Hadjidimoulas (2018) se recupera un 75 % del metano generado, por tanto:

$$R_T = 0,75 \cdot Q_{CH_4,generado} \quad \text{Ecuación 71}$$

9.4 ANEXO IV. DISEÑO DE LA CINTA TRANSPORTADORA UTILIZADA EN LA PLANTA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

Para el diseño de la cinta transportadora se ha supuesto que recorrerá horizontalmente una distancia de 5 m y que tendrá una altura de 1,5 m. Esta cinta transportará montones de basura, por lo que su peso específico será de 1,2 t/h y tendrá una velocidad máxima de 2 m/s (ver **Tabla 17**). En este proyecto habrá de tenerse en cuenta que se transportarán materiales en grandes trozos con un ancho de banda de 500 mm (ver **Tabla 18**).

En el diseño de la banda se deben tratar los siguientes aspectos:

- Ancho y forma de la banda.
- La velocidad de transporte.
- Potencia necesaria.
- Especificaciones (tipo de accionamiento, tipo de tensor, cojinetes finales y arco de contacto)

Dada la granulometría del material a transportar que será en grandes trozos, la velocidad máxima de trabajo (ver **Tabla 18**) será:

V_M (velocidad máximo de trabajo) \approx 80 m/min (1,33 m/s).

El caudal másico de FVW que se transportará será de 0,45 t/h, ya que dependerá de la capacidad máxima de la trituradora de modo que se pueda trabajar en discontinuo y no se produzcan acumulaciones.

De las dos velocidades máximas obtenidas en las **Tablas 17 y 18**, se ha de escoger la más restrictiva, en este caso se empezará con una velocidad de diseño de 1,33 m/s, a partir de la cual se va a calcular la

capacidad unitaria (Q_m en $\frac{m^3}{m \cdot s}$), mediante la relación:

$$Q = Q_m \cdot v \cdot K \text{ Ecuación 72}$$

Siendo:

- Q el caudal volumétrico (m^3/h) del material a transportar, calculado como $Q = \text{Caudal másico}(t/h) / \text{densidad} (1.000 \text{ kg}/m^3)$
- V es la velocidad de transporte/accionamiento de la cinta transportadora
- K es una constante que depende del ángulo de inclinación de la banda con respecto a la horizontal. En este caso es de $\delta = \text{tag}^{-1} (1,5/ 5) = 16,7^\circ$, para el cual resulta interpolando una constante $K = 0,876$ (Ver **Tabla 19**).

De este modo la capacidad unitaria será:

$$Q_m = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot v \cdot K} = \frac{0,45 \frac{t}{h}}{1 \frac{t}{m^3} \cdot 1,16 \frac{m}{s} \cdot 0,876} = 0,39 \left(\frac{m^3}{\frac{h}{m}} \right) \text{ Ecuación 73}$$

Para la capacidad obtenida, a partir de la **Tabla 20**, se obtiene el ancho de banda mínimo que necesitará la cinta transportadora. En este caso se va a suponer que el tamaño de partícula será uniforme y de un tamaño medio de 100 mm ya que en el mercado tienen todo tipo de frutas y verduras. Para este tamaño medio se obtiene que el ancho mínimo de banda será de 550 mm.

Una vez se haya seleccionado el ancho mínimo de banda, se ha de obtener la inclinación que va a tener la banda (**Tabla 21**). En este caso se ha de elegir de las siguientes posibilidades, la banda que mejor se ajuste a la capacidad obtenida (Q_m) (primer valor superior a Q_m):

- Banda plana de 300 mm de ancho de banda, con una capacidad de $12 \frac{m^3}{\frac{h}{m}} \frac{m}{s}$
- Banda en forma de artesa normal a 20° de 300 mm de ancho de banda, con una capacidad de $20 \frac{m^3}{\frac{h}{m}} \frac{m}{s}$
- Banda en forma de artesa normal a 30° de 300 mm de ancho de banda, con una capacidad de $23 \frac{m^3}{\frac{h}{m}} \frac{m}{s}$
- Banda en forma de artesa estrecha a 30° de 300 mm de ancho de banda, con una capacidad de $91 \frac{m^3}{\frac{h}{m}} \frac{m}{s}$

Entre las cuatro posibles opciones se selecciona la primera, es decir, la banda plana, ya que su capacidad es mayor que la Q_m calculada, guardando así un margen de seguridad. Además, es la más pequeña de todas las opciones resultando más económica en inversión. A continuación, se comprueba la velocidad de transporte para la banda seleccionada:

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot Q_m \cdot K} = \frac{0,45}{1 \cdot 12 \cdot 0,876} = 0,04 \frac{m}{s} \text{ Ecuación 74}$$

Se llega entonces a que la banda idónea para el transporte del material en este caso será una banda plana de 300 mm de ancho, con una capacidad de $12 \frac{m^3}{\frac{h}{m}} \frac{m}{s}$ y una velocidad de accionamiento de 0,04 m/s.

Se calcula a continuación la potencia necesaria de la cinta, mediante la siguiente relación:

$$W = (W1 + W2 + W3 + W4) \cdot (1 + \beta) \cdot (1 + K1) \text{ Ecuación 75}$$

donde todas las variables están tabuladas y sacadas de las **Tablas 22-27** e indican lo siguiente:

- W1 es la potencia neta en CV necesaria para el movimiento de la banda en vacío horizontal para cada 30 m/min de velocidad, por tanto, como se tiene una velocidad distinta (0,04 m/s), el valor W1 que habrá que utilizar en la fórmula del cálculo de la potencia es:

$$W1 = W1) \text{ tabulado} \cdot (0,56/0,5)$$

Este valor depende del ancho de banda (300 mm) y de la distancia entre centros de tambores o poleas extremas (L=5,23 m). Se obtiene un W1) tabulado= 0,3, por tanto:

$$W1 = 0,3 \cdot 0,04/0,5 = 0,024 \text{ (CV)}$$

- W2 es la potencia neta en CV necesaria para el transporte horizontal de la carga. Este valor depende del caudal másico de alimentación (0,45 t/h) y de la distancia entre centros de tambores o poleas extremas (L=5,23 m). Se obtiene un W2 = 0,1 CV.

- W3 es la potencia en CV necesaria para la elevación del material. Este valor depende del caudal másico de alimentación (0,45 t/h) y de la elevación (H = 1,5 m). Se obtiene interpolando un W3 = 0,05 (CV)

- W4 es la potencia en CV a añadir por cada tripper de descarga. En este caso no se dispone de tripper de descarga alguno, por tanto, W4 = 0.

- β es el factor de tensión en las poleas finales y del tensor, cuyo valor depende del tipo de accionamiento, tipo de tensor y cojinetes finales usados. Se selecciona para esta cinta un accionamiento simple, con poleas desnudas, horizontal automático y cojinetes finales de bolas. Se obtiene por tanto un factor $\beta = 0,105$.

- K1 es un coeficiente cuyo valor depende del arco de contacto y tipo de tensor. Para este caso de tensor automático, con polea desnuda y arco de contacto de 180 ° se obtiene un valor de K1 = 0,75.

A continuación, se van a adjuntar las tablas utilizadas para el diseño de la cinta transportadora:

Tabla 17. Peso específico aparente de algunos materiales en T/m³ y ángulo máximo de inclinación de la banda*.

Material	Peso específico T/m ³	Inclinación máxima		Material	Peso específico T/m ³	Inclinación máxima	
		Angulo	Veloc. máxima m/s			Angulo	Veloc. máxima m/s
Basalto (0-100 mm)	1,60	20°	2,0	Mortero	2,4	20°	2,0
Montones de basura	1,20	20°	2,0	Fosfato	1,2	15°	1,5
Hormigón	1,75-2,4	15°-25°	2,0	Piritas	2,00-2,50	18°-22°	2,5
Carbón seco o mojado	0,65-0,78	20°	1,5	Centeno	0,68-0,79	25°	2,5
Carbón briquetas	0,9	15°	1,5	Remolacha	0,65-0,75	20°	2,5
Tierra seca	1,10-1,3	18°	2,5	Arena seca	1,60	18°	2,5
Tierra húmeda	1,60-1,70	22°	2,5	Arena húmeda	2,00	22°	2,5
Mineral fino	1,70	18°	2,5	Escoria seca	0,60	20°	1,2
Arena de moldeo	1,30	24°	2,0	Carbón en mina	0,72-0,87	20°	2,5
Avena	0,43-0,60	25°	2,5	Sal	1,00	18°	2,5
Grava seca	1,85	18°	2,5	Arcilla seca	1,80	23°	1,5
Cok	0,35-0,55	18°-20°	2,0	Trigo	0,76	15°-20°	3,5
Cemento	1,2-1,3	22°	2,0	Caliza	1,20-1,60	20°-23°	2,5

*Se entra en la tabla con el tipo de material.

Tabla 18. Estimación de la velocidad normal de trabajo. Los valores de V_N (velocidad normal de trabajo) y V_M (velocidad máxima de trabajo) se representan en m/min*.

Ancho de banda (mm)	PRODUCTOS A TRANSPORTAR							
	Granos y materiales ligeros		Minerales molidos		Minerales trozos medio		Materiales pesados en grandes trozos	
	V _N	V _M	V _N	V _M	V _N	V _M	V _N	V _M
400	60	120	60	75	60	90		
500	75	180	75	120	75	100	75	80
600	90	180	90	120	90	120	90	100
700	100	180	100	120	100	130	95	110
800	110	200	110	140	110	150	110	110
1 000	120	200	120	150	120	170	120	120
1 200	120	200	120	150	120	170	120	120

*Se entra en la tabla con el tamaño del material y se elije el valor del ancho de banda.

De los valores obtenidos de velocidad máxima que puede tener la cinta transportadora en las **Tablas 17 y 18** se elije el valor más restrictivo.

Tabla 19. Coeficiente K para bandas inclinadas*.

δ°	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
K	1	0,99	0,98	0,97	0,95	0,93	0,91	0,89	0,85	0,81

δ°	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
K	0,78	0,76	0,73	0,71	0,68	0,66	0,64	0,61	0,59	0,56

*Se entra en la tabla con la inclinación calculada.

Tabla 20. Ancho mínimo necesario. *

Ancho de la banda	Clase y dimensión del material		PESO ESPECIFICO DEL MATERIAL EN KG/M ³				Separación rodillos de retorno
	Uniforme	Con filos	450	900	1.200/1.600	2.000/2.400	
			Separación entre rodillos de ida				
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
300	38	100	1.650	1.500	1.500	1.400	3.000
350	48	115	1.650	1.500	1.500	1.400	3.000
400	60	130	1.650	1.500	1.500	1.400	3.000
450	75	150	1.650	1.500	1.500	1.400	3.000
500	90	165	1.650	1.500	1.500	1.300	3.000
550	100	185	1.650	1.500	1.450	1.250	3.000
600	115	200	1.650	1.500	1.400	1.225	3.000
650	125	230	1.525	1.370	1.200	1.225	3.000
700	140	260	1.525	1.370	1.200	1.225	3.000
750	155	290	1.525	1.370	1.200	1.060	3.000
800	170	320	1.525	1.370	1.200	1.060	3.000
850	185	350	1.525	1.370	1.200	1.060	3.000
900	200	380	1.525	1.370	1.200	1.060	3.000
950	215	410	1.525	1.370	1.200	1.060	3.000
1.000	230	440	1.525	1.370	1.200	1.060	3.000
1.050	245	470	1.370	1.370	1.200	1.060	2.750
1.100	260	500	1.370	1.200	1.200	1.060	2.750
1.150	275	540	1.370	1.200	1.200	1.060	2.750
1.200	290	600	1.370	1.200	1.200	1.060	2.750
1.250	305	660	1.370	1.200	1.100	1.060	2.750
1.300	320	720	1.300	1.100	1.100	1.000	2.750
1.380	335	800	1.300	1.100	1.100	1.000	2.750

* Se entra en la tabla con la clase y dimensión del material.

Tabla 21. Selección del tipo de banda.

Ancho banda mm	Banda plana m ² /h	Banda en forma de artesa					
		L ₁ = L ₂ mm	$\alpha = 20^\circ$ m ² /h	$\alpha = 30^\circ$ m ² /h	L ₁ mm	L ₂ mm	$\alpha = 30^\circ$ m ² /h
300	12	132	20	23	—	—	—
350	17	148	31	35	—	—	—
400	23	165	42	50	—	—	—
450	30	182	55	67	—	—	—
500	38	200	70	84	235	132	91
550	48	216	87	97	256	137	104
600	58	232	106	110	277	142	118
650	69	249	126	131	293	160	146
700	81	266	148	162	310	178	174
750	94	290	177	201	340	184	215
800	108	315	197	240	370	200	256
850	123	332	220	276	390	215	290
900	139	350	254	312	410	230	330
950	156	365	286	351	427	240	371
1000	173	380	318	390	445	250	413
1050	192	400	354	433	467	265	459
1100	212	420	390	476	490	280	505
1150	233	442	438	528	515	297	566
1200	255	465	467	574	540	315	607
1250	278	482	508	627	560	327	691
1300	301	500	550	680	580	340	775
1350	302	510	587	722	592	360	802
1380	304	520	625	765	605	380	830

Tabla 22. Potencia neta en CV necesaria para el movimiento de la banda en vacío horizontal. Para cada 30 metros por minuto de velocidad (W1).

Ancho mm	Distancia entre centros de tambores o poleas extremas en metros											
	15	30	60	90	120	150	180	240	305	365	460	550
300	0,3	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	1,1	1,3	—	—	—
350	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,2	1,4	—	—	—
400	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0	1,3	1,5	—	—	—
450	0,3	0,4	0,6	0,7	0,9	1,0	1,2	1,5	1,7	2,1	2,5	—
500	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,1	1,3	1,6	1,9	2,2	2,8	—
550	0,4	0,5	0,7	0,8	1,0	1,2	1,4	1,8	2,1	2,5	3,1	—
600	0,5	0,6	0,8	0,9	1,1	1,3	1,5	1,9	2,3	2,7	3,3	—
650	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	2,1	2,5	2,9	3,5	4,3
700	0,5	0,6	0,9	1,0	1,3	1,5	1,7	2,2	2,7	3,1	3,6	4,6
750	0,6	0,7	1,0	1,1	1,4	1,6	1,8	2,4	2,9	3,3	3,8	4,9
800	0,6	0,7	1,0	1,1	1,5	1,7	1,9	2,5	3,0	3,5	4,0	5,3
850	0,7	0,8	1,1	1,3	1,7	1,9	2,1	2,8	3,3	3,9	4,6	5,7
900	0,7	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,3	3,0	3,6	4,2	5,1	6,0
950	0,8	1,0	1,3	1,7	2,0	2,3	2,5	3,2	3,9	4,5	5,5	6,4
1 000	0,9	1,1	1,4	1,8	2,2	2,5	2,7	3,4	4,1	4,7	5,8	6,8
1 050	0,9	1,2	1,5	1,9	2,3	2,6	2,9	3,6	4,3	5,0	6,1	7,1
1 100	0,9	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,1	3,9	4,6	5,3	6,5	7,5
1 150	1,0	1,3	1,7	2,1	2,6	3,0	3,4	4,2	4,9	5,7	6,9	8,0
1 200	1,0	1,4	1,8	2,2	2,7	3,2	3,6	4,4	5,2	6,0	7,2	8,4
1 250	1,1	1,5	1,9	2,3	2,8	3,4	3,8	4,6	5,5	6,4	7,5	8,8
1 300	1,1	1,6	2,0	2,4	2,9	3,6	4,0	4,8	5,8	6,7	7,8	9,2
1 380	1,3	1,8	2,2	2,6	3,1	3,9	4,3	5,1	6,2	7,2	8,2	9,7

NOTA.—Si los cojinetes de los rodillos son de deslizamiento y no a bolas, aumentense estos valores en un 75 %.

Tabla 23. Potencia neta en CV necesaria para transporte horizontal de la carga (W2).

<i>Distancia entre centros de tambores o poleas en metros</i>												
<i>Tm/h</i>	15	30	60	90	120	150	180	240	305	365	460	550
10	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6
50	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0	1,3	1,5	1,8	2,2	2,6
100	0,6	0,7	1,0	1,3	1,5	1,8	2,0	2,5	3,0	3,6	4,3	5,1
150	1,0	1,2	1,7	2,1	2,5	3,0	3,3	4,3	5,2	5,8	7,1	8,4
200	1,3	1,6	2,2	2,7	3,3	3,9	4,3	5,6	6,7	7,6	9,6	11,3
250	1,5	1,9	2,6	3,3	3,9	4,6	5,2	6,6	7,9	9,2	11,2	13,3
300	2,0	2,4	3,2	4,0	5,0	5,9	6,8	8,6	10,3	12,0	14,7	16,9
350	2,4	2,9	3,9	4,8	6,0	7,1	8,1	10,2	12,3	14,4	17,6	20,7
400	2,7	3,3	4,4	5,6	6,8	8,0	9,2	11,5	13,9	16,3	19,8	23,3
450	3,0	3,6	5,0	6,3	7,8	9,2	10,5	13,2	15,8	18,4	22,5	26,6
500	3,3	4,0	5,4	6,9	8,3	9,7	11,2	14,1	17,0	19,9	24,2	28,5
600	3,9	4,8	6,5	8,2	10,0	11,7	13,4	16,8	20,4	23,9	29,0	34,2
700	4,5	5,6	7,6	9,6	11,7	13,6	15,7	19,7	23,7	27,8	33,8	39,9
800	5,2	6,4	8,7	11,0	13,3	15,5	17,8	22,5	27,2	31,6	38,7	45,6
900	5,9	7,2	9,9	12,5	15,1	17,7	20,4	25,6	30,9	36,1	44,0	51,9
1 000	6,5	7,9	10,8	13,7	16,6	19,5	22,4	28,2	33,9	39,6	48,4	57,0
1 200	7,7	9,4	12,8	16,2	19,6	23,0	26,4	33,5	40,1	47,0	57,2	67,4
1 400	8,9	10,8	14,8	18,7	22,7	26,6	30,5	38,4	46,3	54,2	66,0	77,8
1 600	10,6	13,5	17,7	22,5	27,2	31,9	36,6	46,1	55,4	65,0	79,2	93,4
1 800	11,8	14,4	19,7	25,0	30,2	35,5	40,7	51,2	61,7	72,2	88,0	103,7
2 000	13,0	15,9	21,7	27,4	33,2	39,0	44,8	56,3	67,9	79,4	96,8	114,1

NOTA.—Si los cojinetes de los rodillos son de deslizamiento y no a bolas, aumentense estos valores en un 75 %.

Tabla 24. Potencia en CV necesaria para la elevación del material (W3).

<i>Elevación en metros</i>														
<i>Tm/h</i>	1,5	3	4,5	6	7,5	9	12	15	18	21	25	30	38	46
10	0,05	0,11	0,15	0,22	0,28	0,33	0,44	0,57	0,66	0,78	0,89	1,11	1,39	1,67
50	0,29	0,56	0,84	1,11	1,40	1,67	2,22	2,78	3,33	3,89	4,44	5,55	6,96	8,34
100	0,58	1,12	1,68	2,22	2,80	3,34	4,44	5,56	6,66	7,78	8,91	11,10	13,90	16,68
150	0,84	1,68	2,51	3,33	4,20	5,01	6,66	8,34	9,99	11,67	13,32	16,65	20,85	25,02
200	1,14	2,28	3,41	4,55	5,68	6,81	9,09	11,4	13,6	15,9	18,2	22,7	28,4	34,1
250	1,43	2,84	4,25	5,66	7,08	8,48	11,31	14,2	16,9	19,8	22,6	28,2	35,3	42,4
300	1,68	3,36	5,02	6,66	8,4	10,0	13,3	16,7	19,9	23,3	26,6	33,3	41,7	50,0
350	1,97	3,92	5,86	7,77	9,8	11,7	15,5	19,6	23,2	27,2	31,0	38,8	48,6	58,3
400	2,28	4,56	6,82	9,1	11,3	13,6	19,2	22,8	27,2	31,8	36,4	45,4	56,8	68,2
450	2,53	5,05	7,58	10,1	12,6	15,2	20,2	25,3	30,3	35,4	40,4	50,5	63,1	75,8
500	2,79	5,56	8,34	11,1	13,9	16,7	22,2	27,8	33,3	38,9	44,4	55,6	69,5	83,3
600	3,36	6,72	10,04	13,3	16,8	20,0	26,6	33,4	39,8	46,6	53,2	66,6	83,4	100,0
700	3,94	7,84	11,72	15,5	19,6	23,4	31,0	39,0	46,4	54,4	62,0	77,6	97,2	116,6
800	4,56	9,12	13,64	18,2	22,6	27,2	38,4	45,6	54,4	63,6	72,8	90,8	113,6	136,4
900	5,05	10,1	15,2	20,2	25,3	30,3	40,4	50,5	60,6	70,7	80,8	101	126	152
1 000	5,8	11,2	16,8	22,2	28,0	33,4	44,4	55,6	66,6	77,8	88,8	111	139	167
1 200	6,7	13,4	20,1	26,6	33,6	40,0	53,2	66,8	79,6	93,2	106,4	133	167	200
1 400	7,9	15,7	23,4	31,0	39,2	46,8	62,0	78	93	109	124	155	194	223
1 600	9,1	18,2	27,3	36,8	45,2	54,4	76,8	91	109	127	145	181	227	263
1 800	10,1	20,2	30,3	40,4	50,5	60,6	80,8	101	121	141	162	202	253	303
2 000	11,4	22,8	34,1	45,5	56,8	68,1	90,9	114	136	159	182	227	284	341

NOTA.—Si la transportadora es descendente, se restará esta potencia de la correspondiente para el transporte en horizontal.

Tabla 25. Potencia a añadir por cada tripper de descarga CV (W4).

<i>Ancho de banda</i>	<i>CV</i>
300 mm	0,40
400 mm	0,80
500 mm	1,20
600 mm	1,70
800 mm	2,70
1 000 mm	4,00
1 200 mm	6,00
1 400 mm	8,00

Tabla 26. Factor de tensión de poleas finales y del tensor (β)

<i>Tipo de accionamiento</i>	<i>Tipo de tensor</i>	<i>COJINETES FINALES</i>			
		<i>De deslizamiento</i>	<i>De bolas</i>		
Simple	Poleas desnudas	Horizontal	Tornillo	0,120	0,115
Simple	Poleas desnudas	Vertical	Automático	0,115	0,110
Simple	Poleas desnudas	Horizontal	Automático	0,108	0,105
Simple	Poleas recubiertas	Vertical	Automático	0,110	0,105
Simple	Poleas recubiertas	Horizontal	Automático	0,105	0,103
Tándem		V. y H.	Automático	0,103	0,102

Tabla 27. Valor de coeficiente K

<i>Arco de contacto</i>	<i>TENSOR DE TORNILLO</i>		<i>TENSOR DE CONTRAPESO</i>	
	<i>Polea desnuda</i>	<i>Polea recubierta</i>	<i>Polea desnuda</i>	<i>Polea recubierta</i>
160°	1,15	0,98	0,75	0,60
180°	1,00	0,87	0,64	0,52
200°	0,87	0,73	0,54	0,40
210°	0,83	0,67	0,50	0,40
225°	0,70	0,63	0,43	0,34
250°	0,62	0,52	0,37	0,28
275°	0,55	0,43	0,31	0,23
300°	0,45	0,37	0,26	0,19
360°	0,37	0,27	0,21	0,13
400°	0,27	0,20	0,14	0,11
420°	0,25	0,19	0,13	0,09
450°	0,22	0,16	0,11	0,07
480°	0,19	0,14	0,09	0,06

9.5 ANEXO V. RESULTADOS DE LOS VALORES OBTENIDOS DE LAS CATEGORÍAS DE IMPACTO EN SIMAPRO

1. Sistema 1. Situación A

Tabla 28. Categorías de impacto obtenidas en Simapro.

Categorías de impacto	Unidad	Total	Residuos de frutas y verduras.	Recogida de basura y transporte	Transporte	Celdas depósito	Producto evitado	
							Electricidad Medio voltaje	Electricidad Mix energético
<i>Calentamiento global</i>	kg CO ₂ eq	645,6566	0	141,2872	45,6856	586,90800	1,24481	-129,4689
<i>Agotamiento del ozono estratosférico</i>	kg CFC11 eq	8,28E-05	0	1,05E-04	3,36E-05	0	4,99E-07	-5,63E-05
<i>Radiación ionizante</i>	kBq Co-60 eq	1,5062	0	1,2022	0,3977	0	0,17738	-0,2710
<i>Formación de ozono, salud humana</i>	kg NOx eq	0,0372	0	0,0665	0,1165	0	0,00220	-0,1480
<i>Formación de partículas finas</i>	kg PM2.5 eq	0,0282	0	0,0481	0,0342	0	0,00241	-0,0565
<i>Formación de ozono, ecosistemas terrestres</i>	kg NOx eq	0,0410	0	0,0710	0,1182	0	0,00221	-0,1504
<i>Acidificación terrestre</i>	kg SO ₂ eq	0,0699	0	0,1499	0,0880	0	0,00760	-0,1757
<i>Eutrofización de agua dulce</i>	kg P eq	0,0004	0	0,0007	0,0002	0	0,00000	-0,0006
<i>Eutrofización marina</i>	kg N eq	2,9295	2,92950	0,0001	0,0000	0	0,00000	-0,0001

Continuación Tabla 28. Categorías de impacto obtenidas en Simapro.

Categorías de impacto	Unidad	Total						Producto evitado	
			Residuos de frutas y verduras.	Recogida de basura y transporte	Transporte	Celdas depósito	Electricidad medio voltaje	Electricidad Mix energético	
<i>Ecotoxicidad terrestre</i>	579,0115	0	58,8886	600,0964	0	0,37341	-80,3469	579,0115	
<i>Ecotoxicidad marina</i>	0,2319	0	0,1421	0,1271	0	0,00007	-0,0374	0,2319	
<i>Ecotoxicidad de agua dulce</i>	0,5983	0	0,2250	0,4763	0	0,00038	-0,1034	0,5983	
<i>Toxicidad cancerígena humana</i>	0,0349	0	0,0869	0,0387	0	0,00044	-0,0911	0,0349	
<i>Toxicidad no cancerígena humana</i>	12,1906	0	4,8108	9,4657	0	0,02567	-2,1116	12,1906	
<i>Uso del suelo</i>	0,5519	0	0,5917	0,2007	0	0,00000	-0,2405	0,5519	
<i>Escasez de recursos minerales</i>	0,0118	0	0,0092	0,0031	0	0,00003	-0,0005	0,0118	
<i>Escasez de recursos fósiles</i>	7,9245	0	44,6071	14,8605	0	0,21321	-51,7563	7,9245	
<i>Consumo de agua</i>	-0,2329	0	-0,0029	0,0013	0	0,00319	-0,2344	-0,2329	

2. Sistema 1. Situación B

Tabla 29. Categorías de impacto obtenidas en Simapro.

Categorías de impacto	Unidad	Total	Residuos de frutas y verduras.	Recogida de basura y transporte	Transporte	Celdas depósito	Electricidad Medio voltaje	Agua a tratamiento	Producto evitado
									Electricidad Mix energético
<i>Calentamiento global</i>	kg CO ₂ eq	645,7466	0	141,2872	45,6856	586,9080	1,2448	0,0899	-129,4689
<i>Agotamiento del ozono estratosférico</i>	kg CFC11 eq	0,0001	0	0,0001	0	0	0	0	-0,0001
<i>Radiación ionizante</i>	kBq Co-60 eq	1,5301	0	1,2022	0,3977	0	0,1774	0,0239	-0,2710
<i>Formación de ozono, salud humana</i>	kg NO _x eq	0,0377	0	0,0665	0,1165	0	0,0022	0,0005	-0,1480
<i>Formación de partículas finas</i>	kg PM2.5 eq	0,0285	0	0,0481	0,0342	0	0,0024	0,0003	-0,0565
<i>Formación de ozono, ecosistemas terrestres</i>	kg NO _x eq	0,0415	0	0,0710	0,1182	0	0,0022	0,0005	-0,1504
<i>Acidificación terrestre</i>	kg SO ₂ eq	0,0712	0	0,1499	0,0880	0	0,0076	0,0014	-0,1757
<i>Eutrofización de agua dulce</i>	kg P eq	0,0009	0	0,0007	0,0002	0	0,0000	0,0005	-0,0006
<i>Eutrofización marina</i>	kg N eq	0,0029	0	0,0001	0,0000	0	0,0000	0,0029	-0,0001

Continuación Tabla 29. Categorías de impacto obtenidas en Simapro.

									Producto evitado
Categorías de impacto	Unidad	Total	Residuos de frutas y verduras	Recogida de basura y transporte	Transporte	Celdas depósito	Electricidad medio voltaje	Agua a tratamiento	Electricidad Mix energético
<i>Ecotoxicidad terrestre</i>	kg 1,4-DCB	579,0714	0	58,8886	600,0964	0	0,3734	0,0598	-80,3469
<i>Ecotoxicidad marina</i>	kg 1,4-DCB	0,2400	0	0,1421	0,1271	0	0,0001	0,0081	-0,0374
<i>Ecotoxicidad de agua dulce</i>	kg 1,4-DCB	0,6093	0	0,2250	0,4763	0	0,0004	0,0110	-0,1034
<i>Toxicidad cancerígena humana</i>	kg 1,4-DCB	0,0627	0	0,0869	0,0387	0	0,0004	0,0278	-0,0911
<i>Toxicidad no cancerígena humana</i>	kg 1,4-DCB	13,4838	0	4,8108	9,4657	0	0,0257	1,2933	-2,1116
<i>Uso del suelo</i>	m ² a crop eq	0,5611	0	0,5917	0,2007	0	0,0000	0,0092	-0,2405
<i>Escasez de recursos minerales</i>	kg Cu eq	0,0119	0	0,0092	0,0031	0	0,0000	0,0001	-0,0005
<i>Escasez de recursos fósiles</i>	kg oil eq	7,9389	0	44,6071	14,8605	0	0,2132	0,0144	-51,7563
<i>Consumo de agua</i>	m ³	-0,6818	0	-0,0029	0,0013	0	0,0032	-0,4489	-0,2344

3. Sistema 2

Tabla 30. Categorías de impacto obtenidas en Simapro.

Categorías de impacto	Unidad	Total	Residuos de frutas y verduras.	Volteo de Compost	Impacto evitado		
					Electricidad alto voltaje	Compost (Nitrato de amonio)	Irrigación (Nitrato de calcio)
<i>Calentamiento global</i>	kg CO ₂ eq	-806,9100	0	0,9293	-618,3262	-96,4268	-93,0863
<i>Agotamiento del ozono estratosférico</i>	kg CFC11 eq	-0,0049	0	5,7E-07	-0,0003	-0,0024	-0,0022
<i>Radiación ionizante</i>	kBq Co-60 eq	-2,2763	0	0,0074	-1,3040	-0,4991	-0,4805
<i>Formación de ozono, salud humana</i>	kg NOx eq	-1,0647	0	0,0107	-0,7121	-0,1881	-0,1751
<i>Formación de partículas finas</i>	kg PM2.5 eq	-0,3847	0	0,0571	-0,2721	-0,0941	-0,0757
<i>Formación de ozono, ecosistemas terrestres</i>	kg NOx eq	-1,0791	0	0,0108	-0,7234	-0,1899	-0,1765
<i>Acidificación terrestre</i>	kg SO ₂ eq	-1,0536	0	0,4486	-0,8452	-0,3529	-0,3042
<i>Eutrofización de agua dulce</i>	kg P eq	-0,0098	0	0,0000	-0,0027	-0,0033	-0,0038
<i>Eutrofización marina</i>	kg N eq	-0,0030	0	0,0000	-0,0006	-0,0021	-0,0002
<i>Ecotoxicidad terrestre</i>	kg 1,4-DCB	-630,5025	0	1,2122	-386,5964	-141,5089	-103,6094

Continuación de Tabla 30. Categorías de impacto obtenidas en Simapro.

Categorías de impacto	Unidad	Total	Residuos de frutas y verduras.	Volteo de Compost	Impacto Evitado		
					Electricidad Alto voltaje	Compost (Nitrato de amonio)	Irrigación (Nitrato de calcio)
<i>Ecotoxicidad marina</i>	kg 1,4-DCB	-2,1972	0	0,0013	-0,1800	-1,0652	-0,9532
<i>Ecotoxicidad de agua dulce</i>	kg 1,4-DCB	-3,2154	0	0,0022	-0,4975	-1,4453	-1,2748
<i>Toxicidad cancerígena humana</i>	kg 1,4-DCB	-1,1671	0	0,0006	-0,4383	-0,3672	-0,3623
<i>Toxicidad no cancerígena humana</i>	kg 1,4-DCB	-89,1638	0	4,7460	-10,1588	-43,7030	-40,0479
<i>Uso del suelo</i>	m ² a crop eq	-29,7966	0	0,0039	-1,1571	-14,9003	-13,7431
<i>Escasez de recursos minerales</i>	kg Cu eq	-0,4664	0	0,0001	-0,0023	-0,2492	-0,2150
<i>Escasez de recursos fósiles</i>	kg oil eq	-271,1081	0	0,2971	-249,0313	-12,6615	-9,7124
<i>Consumo de agua</i>	m ³	-2,6360	0	0,0002	-1,1279	-0,8250	-0,6833