

Universidad Andina Simón Bolívar

Sede Ecuador

Área de Ambiente y Sustentabilidad

Maestría de Investigación en Cambio Climático, Sustentabilidad y Desarrollo

**Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero por medio de la
valorización de residuos alimenticios**

Estudio de los mercados municipales de Tena, Ecuador

Cristhian David Chicaiza Ortiz

Tutor: Washington Logroño

Quito, 2024



Cláusula de cesión de derecho de publicación

Yo, Cristhian David Chicaiza Ortiz, autor de la tesis titulada “Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero por medio de la valorización de residuos alimenticios: estudio de los mercados municipales de Tena, Ecuador”, mediante el presente documento dejo constancia de que la obra es de mi exclusiva autoría y producción, que la he elaborado para cumplir con uno de los requisitos previos para la obtención del título de Magíster de Investigación en Cambio Climático, Sustentabilidad y Desarrollo en la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador.

1. Cedo a la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador, los derechos exclusivos de reproducción, comunicación pública, distribución y divulgación, durante 36 meses a partir de mi graduación, pudiendo por lo tanto la Universidad, utilizar y usar esta obra por cualquier medio conocido o por conocer, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico. Esta autorización incluye la reproducción total o parcial en los formatos virtual, electrónico, digital, óptico, como usos en red local y en internet.
2. Declaro que, en caso de presentarse cualquier reclamación de parte de terceros respecto de los derechos de autor/a de la obra antes referida, yo asumiré toda responsabilidad frente a terceros y a la Universidad.
3. En esta fecha entrego a la Secretaría General, el ejemplar respectivo y sus anexos en formato impreso y digital o electrónico.

24 de mayo 2024

Firma: _____

Resumen

La digestión anaeróbica se considera una alternativa para tratar los residuos alimenticios. Además, ayuda a mitigar los efectos del cambio climático. Sus productos principales, el biogás y el digestato, tienen aplicaciones en hogares y agricultura. Tena, una ciudad ecoturística en la región Amazónica de Ecuador, fue seleccionada como caso de estudio debido a su relevancia. El estudio tuvo como objetivos: establecer una línea base de los residuos alimenticios en los mercados sur y central, proponer alternativas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG) y realizar una evaluación energética y económica. Para llevar a cabo la investigación, se siguieron estas etapas: encuestas a los propietarios de locales en los mercados de Tena, cuantificación de los residuos alimenticios mediante la técnica del cuarteo y visita al área de compostaje del relleno sanitario para evaluar el estado actual (BAU). Para la evaluación ambiental, se propusieron dos escenarios potenciales basados en la digestión anaeróbica de los residuos de comida: Escenario 1 (S1) con quema directa del biogás y Escenario 2 (S2) considerando el aprovechamiento del biogás como sustituto del gas licuado de petróleo en hogares cercanos. Finalmente, se realizó una estimación del potencial energético y económico calculado en función del metano estimado para 12 meses y experiencias comparadas en estudios con condiciones similares. En comparación con los escenarios S1 y S2, el BAU presenta emisiones de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ 85 y 107 veces más altas, respectivamente. El escenario S2 destaca por su potencial energético, siendo 13.5 veces superior al del escenario S1. En la sección final se consideró una aproximación económica por indicadores como CAPEX y OPEX. Se concluye que el escenario S2 es más ventajoso desde el punto de vista ambiental y energético, a pesar de la mayor inversión inicial.

Palabras clave: digestión anaerobia, residuos alimenticios, valorización energética, huella de carbono, Amazonía, Ecuador

Agradecimientos

Un profundo agradecimiento a las personas venido formado parte de mi formación humana, maestros y colegas; quienes me han transmitido mucha alegría y fortaleza, mis amigos; finalmente, en quienes confío y son un pilar fundamental en mi vida, mi familia.

De igual manera, un agradecimiento sincero a los funcionarios del GAD municipal y responsables de los mercados de la ciudad de Tena; además de los estudiantes de la URAI que colaboraron en la fase de campo de este estudio: Lizeth García, Gabriela Sosa, Jessica Verdezoto, Andrés Calderón, Meliza Villa, Lisbeth Alvarado, Jefferson Sánchez, Paola Calderón, Daniela Chávez, Vicente Quezada, Roy Cerda, Natasha Déleg, Ruth Guevara. Al igual que a los docentes Marco Viteri, Miguel Quishpe, Diego Moya y Jaime Martí por su retroalimentación.

Un agradecimiento a Washington Logroño, por su confianza y permanente colaboración hacia nuevos horizontes sustentables en Ecuador. A la UASB, por la oportunidad de compartir con profesionales con una gran trayectoria dentro y fuera de las clases.

Tabla de contenidos

Figuras y tablas.....	11
Abreviaturas.....	13
Introducción	15
Capítulo primero Estado del arte de la gestión de residuos alimenticios en la Amazonía ecuatoriana.....	23
Capítulo segundo Metodología para la evaluación de sistema de digestión anaerobia en la ciudad de Tena	29
1. Aproximación cualitativa	29
2. Aproximación cuantitativa.....	30
2.1. Evaluación ambiental	30
2.2 Potencial Energético.....	37
2.3 Evaluación económica.....	38
Capítulo tercero Resultados y discusión.....	41
1. Evaluación ambiental.....	41
1.1 Primera etapa: Límites y alcance del estudio.....	41
1.2 Segunda etapa: Levantamiento de la línea base.....	41
1.3 Tercera etapa: Propuesta de alternativas.....	55
1.4 Cuarta etapa: Comparación de emisiones de GHG.....	56
2. Evaluación del potencial energético.....	58
3. Aproximación económica.....	59
Conclusiones.....	63
Obras citadas.....	67
Anexos	87
Anexo 1: Encuestas realizadas a los propietarios de los locales de los mercados de la ciudad de Tena.....	87
Anexo 2: Metodología de muestreo (técnica del cuarteo)	89
Anexo 3: Cálculos para el dimensionamiento.....	91
Anexo 4: Aproximación a la evaluación económica.....	93

Figuras y tablas

Figura 1. Ubicación de los mercados en la ciudad de Tena.....	20
Figura 2. Digestores para contextos en América Latina.....	25
Figura 3. Etapas de la metodología del estudio.	30
Figura 4. Escenario BAU: línea base de la gestión actual de residuos.....	32
Figura 5. Escenario S1 para la gestión de FW.....	34
Figura 6. Escenario S2 para la gestión de FW	34
Figura 7. Sistema actual de tratamiento de la ciudad de Tena para restos orgánicos provenientes de los mercados de la ciudad de Tena.	42
Figura 8. Socialización con los propietarios de los locales en los mercados	43
Figura 9. Porcentaje de la producción de residuos por semana	44
Figura 10. Producción de residuos (kg) de cada día de la semana	45
Figura 11. Tipo de actividad comercial	46
Figura 12. Cambios en relación a la cantidad de residuos en el último año	47
Figura 13. Locales que realizan clasificación de residuos	48
Figura 14. Aprovechamiento de los residuos generados en los mercados	49
Figura 15. Problemas asociados al sistema de desecho de residuos en los mercados ...	50
Figura 16. Preocupación de los comerciantes por la presencia de plagas y animales..	51
Figura 17. Importancia del manejo de residuos.....	52
Figura 18. Necesidad de un programa para el manejo de residuos generados	53
Figura 19. Generación de contaminación ambiental como consecuencia del manejo actual de los residuos	54
Figura 20. Técnica de cuarteo aplicada a los residuos provenientes de los mercados.	90
Tabla 1. Porcentaje de generación de residuos sólidos urbanos en el Tena.....	20
Tabla 2. Criterios de inclusión y exclusión.....	29
Tabla 3. Parámetros considerados para la producción de biogás	32
Tabla 4. Dimensionamiento del biodigestor	57
Tabla 5. Comparación de las emisiones de GHG.....	58
Tabla 6. Comparación del potencial energético generado en las alternativas.	58
Tabla 7. CAPEX y OPEX para el BAU.....	59

Tabla 8. CAPEX y OPEX para el S1.....	60
Tabla 9. CAPEX y OPEX para el S2.....	61
Tabla 10. Accesorios para la implementación de digestores anaerobios.....	93

Abreviaturas

AD: digestión anaeróbica - anaerobic digestion

ALyC: América Latina y el Caribe

BAU: escenario actual (sin cambios) - business as usual

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación -
Food and Agriculture Organization of the United Nations

FW: restos de comida - food waste

GAD: Gobierno Autónomo Descentralizado

GHG: gases de efecto invernadero - greenhouse gases

GIR: gestión integral de residuos

GLP: gas licuado de petróleo

GWP: potenciales de calentamiento global - global warming potential

IPCC: Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático - Intergovernmental Panel
on Climate Change

ISO: Organización Internacional de Normalización - International Organization for
Standardization

MSW: residuos sólidos urbanos/municipales – municipal solid waste

Introducción

Los residuos sólidos urbanos (MSW, por sus siglas en inglés) representan un riesgo para la salud humana y condiciones ambientales, especialmente en América Latina y el Caribe (ALyC), donde las tecnologías para la gestión de MSW se ve limitada en vertederos a cielo abierto y rellenos sanitarios (Narea 2021, 11). A medida que la actividad humana aumenta el consumo de energía y la producción de basura, la digestión anaeróbica (AD, por sus siglas en inglés), un proceso que transforma los residuos en bioenergía, y biofertilizante está ganando interés a nivel mundial (Li, Chen, y Wu 2019, 15). La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) define el desperdicio de alimentos (FW, por sus siglas en inglés) como la pérdida de ingredientes importantes, nutritivos y comestibles en cualquier nivel de la cadena de suministro de alimentos, consume casi una cuarta parte del agua utilizada en la agricultura y contribuye aproximadamente al 8% del total de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GHG, por sus siglas en inglés) (Ali, Mahar, y Sherazi 2019, 114). La gestión sostenible de los FW se presenta como una parte integral de la economía circular y requiere infraestructura, logística y políticas para redirigirlos hacia opciones más sostenibles (Scherhauer et al, 2020, 8).

Los FW tienen importantes repercusiones a lo largo de su ciclo de vida, durante su producción, consumo y disposición. Durante la producción, por ejemplo, se requiere agua, energía y fertilizantes (Kunwar Paritos, et al. 2017, 1). El comportamiento de los consumidores desempeña un papel crucial en la generación de residuos sólidos (Farr-Wharton et al., 2014, 4). Factores como los hábitos de compra, las prácticas culinarias y las tendencias de eliminación contribuyen a la cantidad de residuos sólidos generados en los hogares. Además, los aspectos culturales, como la religiosidad y las normas de consumo de alimentos, pueden influir en las intenciones y los comportamientos de desperdicio de alimentos (Elshaer et al., 2021, 5). Comprender los factores que impulsan el comportamiento de los consumidores en relación con el desperdicio de alimentos es esencial para desarrollar estrategias eficaces para reducirlo (Srivastava et al., 202, 9). Finalmente, en la etapa de disposición final también existen emisiones de GHG en la gestión de FW cuando no son aprovechables y son dispuestos en rellenos sanitarios, incineradoras u otras

formas de gestión, u otros sistemas de gestión de residuos (Papargyropoulou et al., 2014, 2). Diversos estudios han destacado la importancia de gestionar los residuos sólidos urbanos de forma eficiente por medio de un marco jerárquico de residuos alimentarios para priorizar las estrategias de prevención y gestión

La digestión anaerobia (AD, por sus siglas en inglés) permite valorizar materiales con potencial energético y agrícola, al tiempo que se reducen las emisiones de GHG y los lixiviados, extendiendo al mismo tiempo la vida útil de los vertederos (Casallas-Ojeda, Marmolejo-Rebellón, y Torres-Lozada 2020, 140). La AD de los residuos sólidos orgánicos es considerada una técnica tradicional con menor impacto ambiental y ha sido validada mediante diferentes categorías como el potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés), la eutrofización marina (MEP), la toxicidad humana (HT), la ecotoxicidad terrestre (Tecox), etc. Existe también la posibilidad de tratar los FW en un proceso de codigestión con otros sustratos como estiércol (Bernstad Saraiva Schott, Wenzel, y la Cour Jansen 2016, 250) o incluso con lodos procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales con una reducción de GHG, la comerciabilidad del digestato (Uen y Rodríguez 2023, 3), aumentando la producción de biogás, y la recuperación de nutrientes (Cecchi y Cavinato, 2019, 4). La AD emite un 10,4% menos de GHG que la incineración, por ejemplo, la incineración produce 855 kg de CO_{2-eq/t} de residuos, mientras que la AD produce 793 kg de CO_{2-eq/t} de residuos. Además, la AD se puede favorecer con la clasificación de la fracción orgánica de los MSW directamente en los hogares o mecánicamente en los sitios de tratamiento (Matsuda et al. 2012, 14).

La relevancia de la AD es la producción de biogás, cuyo principal componente es el metano, que puede sustituir el gas licuado del petróleo (GLP, por sus siglas en inglés) y su conversión a electricidad para los hogares, incluso para combustibles de transporte debido a su poder calorífico superior a otros elementos como la leña y el estiércol de vaca (Mahmudul et al. 2021, 4). En este contexto, un mecanismo para mejorar la tasa de producción de metano y el rendimiento de la AD son los aditivos. Estos elementos están clasificados en compuestos orgánicos (biocarbón, carbón activado) e inorgánicos (hierro, cobalto) (Baek et al. 2019, 45). El mecanismo de mejora del proceso se atribuye a la eliminación de contaminantes y un aumento en la abundancia de microorganismos responsables de la AD, que pueden recibir o donar electrones (Zhang, Chicaiza-Ortiz, y Zhang 2022, 138). Los elementos orgánicos tienen la capacidad de intercambio iónico, propiedades superficiales, conductividad

eléctrica e hidrofobicidad, además de facilitar la formación de biopelículas (Leca et al. 2023, 88), la inmovilización microbiana (Qi et al. 2021, 177).

Como consecuencia del aumento de la población mundial, los residuos sólidos urbanos aumentan considerablemente, incluidos los residuos alimentarios (Tian et al. 2021, 8). El tratamiento de estos residuos sigue siendo inadecuado, que se demuestra por las emisiones antropogénicas y la generación de lixiviados (Wang, Chi, et al. 2022). Este reto ambiental puede ser aproximado por las plantas de tratamiento de aguas residuales (Márquez et al. 2022, 11), que contiene contaminantes y microorganismos patógenos. La gestión de FW tiene riesgos potenciales para el ambiente y la salud si no se gestionan adecuadamente.

Entre los aditivos destacados para los procesos biológicos, el biocarbón, un material a base de carbono, estabiliza la AD, mejora la producción de CH₄, proporciona nutrientes, secuestra carbono, potencia la actividad microbiana (Kundu et al. 2023, 6), la transferencia de electrones (Liu, Wei, y Leng 2021, 8), la actividad enzimática funcional (Deena et al. 2022, 6), la expresión génica (Li et al. 2022; Zhao et al. 2024, 6), y reduce el tiempo de retardo (Zhang, Zhang, Mou, et al. 2023), el amoníaco, el estrés por toxinas y la inhibición de ácidos grasos volátiles (Nie et al. 2024). El biocarbón promueve la colonización de bacterias acetogénicas sintróficas y arqueas metanogénicas mediante la inmovilización de células y microbios en crecimiento (Qiu et al. 2019).

En Ecuador los estudios de cuantificación de GHG son limitados, particularmente las aplicaciones para la gestión de MSW, técnicas de valorización como la AD y la influencia del uso de aditivos inorgánicos. Ecuador genera 13 652,6 toneladas por día de MSW, de los cuales el 55% es orgánica (Terán et al, 2022, 2). Uno de los componentes principales de la fracción orgánica corresponde a los FW que son generados en los mercados, ferias libres, hoteles y establecimientos educativos, etc. Los FW se los define como los alimentos que han sido preparados para el sustento humano, pero que se desechan durante las fases de venta al por menor y consumo, excluyendo con frecuencia los residuos asociados a cultivos destinados a fines distintos del consumo humano o cuando cambia el destino previsto de los alimentos (O'Connor et al. 2023, 77). Los FW varían en función de su origen: hogares, restaurantes, mercados e industrias alimentarias; por ejemplo, en los restaurantes se generan principalmente restos de comida cocinada, mientras que los residuos domésticos suelen consistir en partes no comestibles de verduras, carnes y

frutas que no suelen estar cocinadas; los mercados y las industrias alimentarias producen que pueden recogerse fácilmente por separado debido a su generación centralizada (Yang et al. 2022, 88). A pesar de esta potencial facilidad para la gestión de FW en los mercados, no son aprovechados en la mayoría de municipios en Ecuador (Cando 2021, 45). El tratamiento de FW por medio de AD permite recuperar los nutrientes orgánicos y generar biogás (Chicaiza Ortiz et al. 2020, 5). Narváez, Vargas, y Espinoza (2013) estimaron que los MSW en Ecuador disponibles podrían producir 2 955 MWh anualmente de electricidad a través la combustión en una central eléctrica de vapor o 5 338 MWh a través de la gasificación acoplado a un motor de combustión interna (ICE, por sus siglas en inglés); también los autores estimaron una producción de 2 942 MWh a través de AD.

Los residuos orgánicos, que son la categoría que abarca los FW de cada municipio ecuatoriano, son manejados por su respectivo Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD). La gestión integral de residuos (GIR) orgánicos contempla el manejo adecuado de los residuos a través de principios de jerarquización, donde las prioridades son la prevención en la generación de residuos, los sistemas de tratamiento y finalmente la disposición final (MAE 2020, 145-148).

De acuerdo con el MAE (2020), los principales sistemas de tratamiento de residuos sólidos orgánicos son: compostaje, takakura, bokashi, lombricultura, sistema aerobio y digestión anaerobia. Los dos más relevantes para este estudio son AD y compostaje, este último considerado como una técnica que imita la descomposición natural de la fracción orgánica de los residuos, controlando las condiciones que aceleran el proceso y su productividad para producir abono rico en nutrientes, minerales, microorganismos benéficos para el suelo mientras reduce la cantidad de lixiviados, malos olores y metano.

Actualmente, existen estudios relacionados con la gestión de residuos en algunos mercados de Ecuador en las provincias de los Ríos (Loyola 2005, 16), Tungurahua como caso de estudio Píllaro (Quishpe Machuca 2015, 45), Chimborazo analizando su capital, Riobamba (Romero Noboa 2015, 88), incluso Iñiguez-Gallardo (2022) ha evidenciado la falta de levantamiento de información en mercados de las ciudades más representativas. Este hecho se evidencia aún más en la Amazonía, donde el número de investigaciones es más limitado. Por ejemplo, en la provincia de Napo, el 53,75% de la superficie se encuentra dentro de seis áreas protegidas (GADP-Napo, 2020, 25). Napo tiene 131 672 habitantes, y según Salazar, (2022), el consumo

energético de Napo es de 87,31 GWh, que incluye los sectores residencial, industrial, comercial y otros.

Las ciudades de la Amazonía necesitan una gestión de residuos eficiente y sostenible debido a su gran biodiversidad y su papel como centro turístico (Chicaiza 2022, 7). La investigación sobre la valorización de los FW se presenta como un enfoque prometedor para encontrar alternativas que no solo aborden el problema de los desechos, sino que también contribuyan a la preservación de los ecosistemas valiosos de la selva amazónica. La implementación de prácticas de separación en la fuente y gestión integral de FW en los mercados municipales podría reducir la carga ambiental y mejorar la economía local al brindar una mejor imagen. Además, se podría fomentar una mayor conciencia ambiental y una mayor participación de los visitantes en estas prácticas al promover su sensibilización y participación. Finalmente, esta iniciativa podría servir como un modelo de desarrollo sostenible que beneficie tanto a los residentes locales como a los turistas, demostrando el potencial de la gestión sostenible de los desechos para promover un equilibrio entre el desarrollo económico y la conservación ambiental en áreas turísticas de gran importancia ecoturística. En ese sentido, se consideró como caso de estudio la ciudad de Tena (ver Figura 1), donde se genera 40 ton/día de MSW y se recolectan aproximadamente 30 ton/día (Cifuentes y Vega 2015, 55), en la Tabla 1 se presenta un detalle del origen de los MSW en la cabecera cantonal.

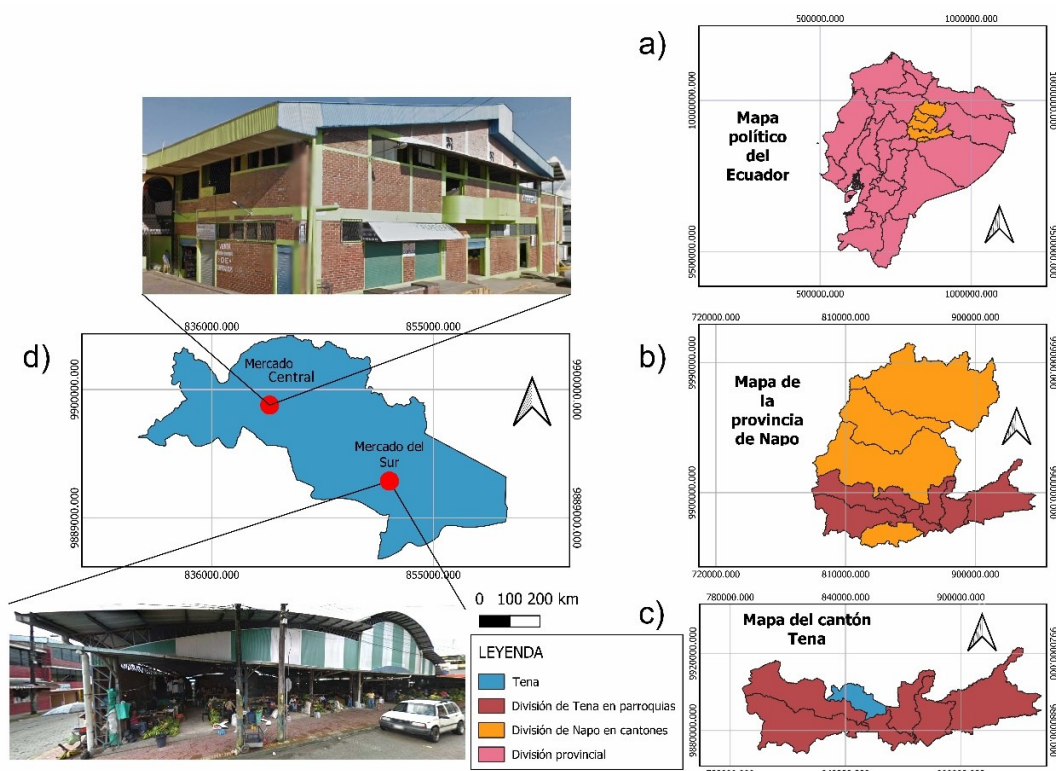


Figura 1. Ubicación de los mercados en la ciudad de Tena. a) Mapa del Ecuador destacando la provincia de Napo b) Mapa provincial destacando el cantón Tena c) Mapa cantonal destacando la parroquia Tena, d) Localización de los dos mercados más representativos.

Adaptado de: Cifuentes y Vega (2015).

Elaboración propia.

Tabla 1
Porcentaje de generación de residuos sólidos urbanos en el Tena

Sector	Porcentaje encontrado (%)
Mercado Sur	38
Mercado Central	30
Hogares, restos de jardines, restaurantes, etc.	22
Otros	10

Fuente: Cifuentes y Vega (2015).

Elaboración propia.

El objetivo de este estudio fue proponer alternativas con potencial de reducción de emisiones de GHG mediante la digestión anaerobia a nivel de dos mercados municipales de Tena. En este sentido, el estudio abarca cuatro objetivos específicos: (i) Desarrollar una revisión de la literatura sobre la valorización de residuos alimentarios mediante digestión anaerobia en relación con las emisiones de gases de efecto invernadero. (ii) Realizar un muestreo de los residuos generados en los dos mercados municipales de Tena y llevar a cabo encuestas a los propietarios de

los locales. (iii) Comparar las emisiones de GHG de las alternativas propuestas con el escenario actual de gestión de los residuos alimentarios. (iv) Realizar una evaluación del potencial energético y un análisis económico aproximado de las alternativas propuestas.

Este trabajo de titulación está organizado en 3 capítulos. El primer capítulo está dedicado a una evaluación del estado del arte de la gestión de residuos alimentarios en la Amazonía ecuatoriana. El segundo capítulo consiste en la explicación de la metodología para la evaluación ambiental y económica de un digestor anaerobio en el contexto de los dos mercados principales de la ciudad de Tena. La metodología consideró no solo el estado de literatura sino también la aplicación de encuestas a los propietarios de los mercados sur y central de la ciudad de Tena, se procedió al cuarteo de residuos durante una semana para determinar el estado actual (BAU). En la evaluación ambiental, se propusieron dos escenarios para el tratamiento de los residuos alimentarios mediante digestión anaerobia: combinado con la quema directa de biogás (S1) y utilizando el biogás como sustituto del gas licuado de petróleo doméstico (S2). Por último, se estimó económicamente la propuesta considerando el potencial energético de metano en un periodo de un año. En el tercer capítulo se discuten los resultados del estudio y finalmente se presentan las conclusiones. Además, se presentan 2 Anexos para facilitar la replicación de la metodología respecto a las encuestas realizadas a los propietarios de los locales de los mercados de la ciudad de Tena y la técnica del cuarteo.

Capítulo primero

Estado del arte de la gestión de residuos alimenticios en la Amazonía ecuatoriana

La gestión de los MSW es una preocupación mundial acuciante que exige estrategias de tratamiento eficaces en función de sus propiedades y origen. Los MSW se pueden clasificar de acuerdo a la naturaleza química de los residuos tanto residuos orgánicos (degradables) como materiales inorgánicos, atribuidos normalmente como no biodegradables (plástico, vidrio, cartón, metales, etc.) de origen domiciliario, institucional y comercial diferente a los hospitales, escombreras, residuos peligrosos provenientes de la industria (Babu, Varamendi y Rene, 2021, 99). Los residuos domésticos, procedentes de entornos residenciales, representan una parte importante de los MSW, junto con los residuos comerciales procedentes de empresas no industriales, los mercados y las ferias libres. La cantidad de los residuos institucionales procedentes de escuelas, universidades depende de la temporada de clases (Zambrano et al, 2023, 5-6).

El tratamiento de los MSW puede llevarse a cabo empleando un tratamiento biológico y termoquímico. Respecto al tratamiento biológico destacan las opciones de compostaje y AD. Mientras que el tratamiento termoquímico se refiere a la conversión de residuos en energía (WtE), considerado como un método prometedor de gestión de MSW, proporciona energía renovable y productos químicos valiosos al tiempo que reduce el volumen de residuos (Funari et al., 2023, 59140). Las tecnologías WtE, incluidas la incineración, la gasificación, y la pirólisis ofrecen alternativas demostradas a escala comercial para los MSW, especialmente para países desarrollados (Oakey, 2016a). La gasificación, con su potencial para convertir los MSW en gas de síntesis empleado en la generación de energía, presenta una opción atractiva, aunque deben abordarse retos como los elevados costes operativos (Dai et al., 2023, 14). La incineración, un método establecido en varios países europeos y asiáticos, reduce los MSW enviados a vertederos, genera energía renovable (Zhang et al., 2021, 14). Sin embargo, la liberación de gases ácidos, dioxinas y metales pesados tóxicos durante la incineración plantea riesgos para el medio ambiente y la salud (Xue y Liu, 2021, 8). Además de estas opciones, existen otras tecnologías que están

emergiendo con mayor fuerza, entre ellas destacan la Gasificación por plasma, carbonización hidrotérmica, torrefacción y licuefacción (Lachos-Perez et al., 2022, 7).

El contenido de celulosa, humedad y poder calorífico de los FW es más alto en comparación con los MSW (Kumar y Samadder 2020, 144; Babu, Prieto Veramendi, y Rene 2021, 47; Vuppaladadiyam et al. 2019, 96). Se ha identificado a la AD como una opción eficaz de gestión de la materia orgánica respecto a las emisiones de GHG en un vertedero considerando los lineamientos del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) (Liu et al. 2012, 233).

La AD es una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno (Anukam et al. 2019, 45), su mayor ventaja es contribuir en la seguridad energética y puede reducir los costes de disposición final de la fracción orgánica de los MSW, que son una de las mayores dificultades a las que se enfrentan los países en desarrollo (Zamri et al. 2021, 77). El interés en la AD ha aumentado en los últimos años (Parra-Orobio, Donoso-Bravo, y Torres-Lozada 2021, 99), al ser un método probado de tratamiento de residuos y recuperación de energía. La AD utiliza un consorcio de bacterias que convierte sustratos orgánicos complejos en biogás (metano y dióxido de carbono) y genera abono orgánico en forma de digestato (Qi et al. 2021, 144).

La AD se compone de cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Durante la fase de hidrólisis se produce una masa molecular baja, que incluye sustancias insolubles o solubles como carbohidratos, polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos, que se degradan en ácidos carboxílicos, glicerol y aminoácidos (Zhang, Chicaiza-Ortiz, y Zhang 2022, 131). La hidrólisis limita la velocidad en la AD, por lo que el pretratamiento del sustrato puede acelerar este proceso. Los compuestos orgánicos simples generados por la hidrólisis se fermentan en ácidos grasos volátiles (VFA, por sus siglas en inglés), hidrógeno y dióxido de carbono durante la acidogénesis. El hidrógeno y el dióxido de carbono se reducen a ácido acético durante la acetogénesis. Las fases de acidogénesis y acetogénesis se combinan para formar la fase de fermentación. La metanogénesis, la fase final, implica la utilización de productos intermedios (hidrógeno y acetato) de las fases anteriores por parte de las arqueas anaerobias para generar metano (Dalke, 2021, 4). En la eficacia de la AD influyen significativamente variables como la temperatura, el pH, la relación C:N, la tasa de carga orgánica (OLR), el tiempo de retención hidráulica (HRT) y los ácidos grasos volátiles (VFA). Se reconocen dificultades, como la idoneidad de los procesos de AD y los diseños de reactores para diversos tipos de residuos que

garanticen una generación de energía y una gestión de FW eficientes (Uddin et al, 2021, 14).

Es necesario abordar los riesgos que plantea el digestato, por la potencial presencia de metales pesados, los microplásticos, las hormonas y otras sustancias químicas presentes. Cuando estos elementos no son gestionados apropiadamente, pueden afectar a los seres humanos, los animales, las plantas y el ambiente (Diéguez-Santana et al. 2022, 44). Los dos digestores más empleados de bajo costo son de domo fijo y tubular, ampliamente utilizados en contextos con bajos ingresos. La Figura 2 compara estas dos opciones de bajo costo, evaluando las ventajas y desventajas de su implementación en contextos de países en desarrollo de acuerdo a Martí Herrero (2019). Se hace una distinción de dos subcategorías para los digestores tubulares: plásticos y geomembrana en la categoría de los digestores tubulares.

	Domo Fijo	Tubular	
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> * Su vida útil es de 20 años al ser construido en ladrillo y cemento * Usan poca agua en la carga (estiércola: agua 1:1) respecto a los biodigestores tubulares * No ocupan espacio en la finca al estar enterrados y no es necesario sistema de protección * Alcanza presiones de biogás muy superiores (1m de columna de agua) a los biodigestores tubulares * Es una tecnología ampliamente validada a nivel internacional (Asia y África) 	<ul style="list-style-type: none"> * Es la tecnología conocida en Latinoamérica * El coste del transporte de materiales es bajo y por ser piezas ligeras y estar prefabricado. * Cualquier productor capacitado puede ser instalador de biogestores tubulares * Instalación rápida (1 o 2 días) después de cavado la zanja 	
		Tubulares Plásticos <ul style="list-style-type: none"> * La relación coste/durabilidad (5-7 años) es acorde a los pequeños productores agropecuarios * Materiales disponibles en ferreterías del mercado local 	Tubulares Geomebrana <ul style="list-style-type: none"> * Vienen prefabricados * Se puede hacer de cualquier tamaño * Vida útil de 15 años * Geomenbrana de PVC: muy fáciles de reparar * Geomembrana de polietileno muy duros y resistentes
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> * Su costo es mayor que los biodigestores tubulares plásticos * No hay experiencia previa consolidada en Sudamérica * No se conoce esta tecnología en la región * No están adaptados para trabajar en climas fríos como los Andes * El transporte de materiales hasta las comunidades puede incrementar costes * Se requiere maestros albañiles formados para que puedan construir biodigestores 	<ul style="list-style-type: none"> * Al estar semienterrados y dejar la cúpula a la vista es necesario proteger el área * Usan más agua en la carga (estiércola: agua 1:3 a 1:5) que los biodigestores de domo fijo * Alcanzan menores presiones de biogás (hasta 15cm de columna de gas) que los de domo fijo * Se suelen usar reservorios de biogás externos para dar más presión y almacenar biogás 	
		Tubulares plásticos <ul style="list-style-type: none"> * Límite en cuanto a tamaños por los plásticos disponibles en mercado * Se puede reparar hasta agujeros de 20cm 	Tubulares geomembrana <ul style="list-style-type: none"> * Costos similares a domo fijo adaptado * Geomembrana PVC: si no es reforzada alcanza presiones de biogás entorno a 5cm de columna de agua * Geomembrana polietileno: reparables hasta agujero de 20cm

Figura 2. Digestores para contextos en América Latina

Fuente: Adaptado de Martí-Herrero (2019).

Elaboración propia.

Además, la producción de metano en los biodigestores anaerobios implica una potencial reducción de los costes de producción por la energía en empresas agrícolas (Barboto, Morán, y Ríos 2020, 63). La AD de FW está asociada con la emisión de GHG, pero en países con una matriz eléctrica basada en combustibles fósiles, la AD puede ser una mejor solución a otras técnicas desde un punto de vista ambiental (Scherhauser et al, 2020, 8). De hecho, el uso de biogás puede ayudar a reducir el 80% de las emisiones de GHG, al mismo tiempo que reduce los lodos de los residuos, elimina los microorganismos patógenos y aporta nutrientes al suelo (Yadav et al. 2022, 78). En contraste, el tratamiento anaeróbico de residuos alimentarios a gran escala está en sus inicios, con desafíos en la eliminación segura de los residuos alimentarios (Li et al. 2020).

El estado del arte sobre la implementación de AD para la valorización de FW a gran escala se posiciona en ciertos países del norte, por ejemplo, en Italia a través de una planta piloto para FW (Mouftahi et al. 2022, 427), la aplicación de AD para tratar el estiércol animal en conjunto con FW en Columbia Británica (Wang, Bi, and Clift 2021), otro estudio desarrollado en Islandia, empleó Aspen Plus v10 para modelar la producción de biogás a partir de MSW, FW y biomasa lignocelulósica en condiciones termófilas, identificando que la codigestión consigue un valor calorífico y un potencial de energía eléctrica óptimos (Llano, Arce, Finger, 2021, 8).

El caso de Västerås en Suecia es también relevante para este estudio, puesto que se ha logrado la producción sostenible de biogás a partir de FW, para abastecer a 21 autobuses de biogás, que permitió la reducción de GHG y la producción sostenible de energía (Liu, 2022, 3). La participación activa de la comunidad en la separación de residuos alimentarios fue fundamental para el éxito del proyecto. En este contexto, la AD ha sido apoyada en programas gubernamentales para la generación de energía renovable, pero también se han identificado desventajas, como un largo período de retención sólida, configuración del proceso complicada y problemas de conversión de metano a electricidad. La variabilidad de la composición de FW plantean desafíos, que se están estudiando junto con nuevas tecnologías como la hidrotermal carbonización y la fermentación de etanol (Bhatia, 2023, 6). Entre los subproductos de FW emergentes se tienen los bioplásticos y biopolímeros, que contribuyen a la reducción de emisiones de GHG y a la conservación de recursos (Roy, 2023, 13).

Respecto a la generación de energía, el biogás es una fuente de energía procedente de la AD, puede generar electricidad, calor y combustible para el transporte. Los usos del biogás son más versátiles gracias a las tecnologías de mejora del biogás y las pilas de combustible. Los estudios muestran una eficiencia del 8%-54% en la generación de electricidad, del 4%-18% en el transporte y del 16%-32% en el calor para determinadas rutas de producción de energía (Srisowmeya, Chakravarthy y Nandhini Devi 2021, 5). El biogás procedente de la AD puede utilizarse para cocinar y calentar y cubrir las necesidades energéticas de los hogares. Según el estudio de Ellacuriaga, González, and Gómez (2022, 8), la AD por sistemas descentralizados cubrió solo el 5,8% de la demanda de calefacción urbana residencial en su estudio. El resultado sugiere un equilibrio clave entre la aceptación pública y la aplicación técnica, sugiriendo que los sistemas a gran escala pueden ser más eficientes que los locales. Uddin et al. (2021, 8) mencionan la importancia de optimizar los procesos de AD, reducir los gastos de capital y aumentar la producción de biogás. La AD se perfila como una alternativa viable para abordar los desafíos de las emisiones de GHG, las complejidades de la eliminación de residuos y las contribuciones sustanciales a la generación de energía renovable (Uddin et al. 2021, 9).

Existen estudios que evalúan la posibilidad de la AD como el reportado en Kigali, capital de Ruanda, donde los residuos orgánicos producen 457 L CH₄/kg de contenido de materia seca de metano, con un valor total de 51 384 375 L CH₄, que corresponde a 180 873 KWh, lo que implica el 54% de la demanda diaria de electricidad de la ciudad (Joselyne et al. 2020, 46). Otro caso de estudio muestra que el proceso integrado de AD en dos etapas es una forma técnica y económicamente viable para aumentar la recuperación de energía, alcanzando un 10,54% más que la producción declarada de la planta de biogás FW de una sola etapa (Li et al. 2020, 85).

Algunos criterios deben considerarse para evitar que sean limitaciones al momento de diseñar un biodigestor: los suelos de los corrales o establos deben estar conectados por gravedad al biodigestor a través de un conducto o canal; no es importante en lugares tropicales que el sol llegue al sistema; sin embargo, para temperaturas menores de 25°C se debe evitar que estén a la sombra de edificios o árboles desde el amanecer hasta el atardecer. Se debe evitar situar el biodigestor donde pasen personas y animales para no alterar la dinámica local (Martí-Herrero 2019, 45).

Varios estudios han buscado incrementar la producción de biogás a través de la optimización de parámetros operacionales, así como el redimensionamiento de los reactores (Mutsvene et al. 2023, 7; Tan et al. 2021, 14; Meena et al. 2021, 11; Tsegaye, Khan, y Leta 2023, 11; Golwala y Kothari 2021, 52). Esto destaca la importancia de implementar sistemas pilotos para garantizar la viabilidad técnica, optimizar el rendimiento del proceso, dimensionar adecuadamente el sistema y resolver problemas potenciales antes de la implementación a escala piloto o escala comercial. Además, estos estudios maximizan la rentabilidad, reduciendo los costos asociados de los potenciales.

Un estudio desarrollado por Martí-Herrero et al. (2019) contempla la operación de un digestor a escala piloto por un año, cargado inicialmente con rumen de vaca (fuente de inóculo), después de ocho semanas con sólo residuos de frutas y verduras para complementar las opciones de compostaje. Hay cuatro zonas: carga, inmersión, captura de biogás y descarga. La zona de carga se compone de dos aberturas, en las que se cargan los residuos vegetales no tratados y se integra el efluente recirculado. En la zona de inmersión, el sustrato se sumerge en el digestor para diluir los FW. La captura de biogás en la tercera zona de implica la utilización de tuberías en la zona elevada. La cuarta zona, la zona de descarga, da acceso al interior del digestor para su mantenimiento. El sistema de reactor de biogás de flujo tapón (PFBR). De esta zona fluyen tres tuberías: una salida superior de efluente líquido, una tubería central de recirculación y una tubería inferior de descarga de sólidos. El digestor utiliza geomembrana negra de HDPE de 1,5 y 2 mm de grosor. Se eligió este material por su bajo coste y sus propiedades físicas fáciles de trabajar (Martí-Herrero et al. 2019, 36). Esto demuestra que se puede contar con este tipo de tratamientos para restos orgánicos incluso en condiciones templadas y sin un tratamiento previo al ingreso al digestor anaerobio.

Capítulo segundo

Metodología para la evaluación de sistema de digestión anaerobia en la ciudad de Tena

El estudio consideró una aproximación mixta, es decir una tanto cuantitativa como cualitativa. Respecto al análisis cuantitativo, se lo distribuyó en 5 etapas, donde se contempló la cuantificación de GHG y viabilidad económica.

1. Aproximación cualitativa

El capítulo 1 del documento consideró los criterios de inclusión y exclusión presentados en la Tabla 2. Se evaluó el estado actual de la gestión de FW, destacando los principales métodos de tratamiento aprobados por las autoridades ambientales en el contexto de Ecuador y se presentó casos de estudio donde se ha evidenciado la factibilidad de los sistemas de AD en el contexto tanto de países del norte como del sur global.

Tabla 2
Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Artículos científicos que se encuentren en el idioma español o inglés, en el periodo comprendido entre el 2017 al 2022.	Artículos científicos que no se encuentren en el idioma inglés y el año de publicación sea anterior al 2017.
Bases de datos: ProQuest, Pubmed, Scopus, SpringerLink, Google Scholar, Wiley Online Library, Web of Science Clarivate, Scielo.	Bases de datos diferentes a las mencionadas. Además, se descartarán los artículos con baja información y poca calidad.
Palabras clave: gases de efecto invernadero, residuos alimenticios, digestión anaerobia, Ecuador, metano, municipal	Estudios donde el sustrato sea aguas residuales, fracción inorgánica, residuos pecuarios
El tipo de diseño de investigación debe ser de carácter experimental cuantitativo y/o cualitativo	El tipo de diseño de investigación no corresponde a un estudio de carácter experimental cuantitativo y/o cualitativo
Artículos de investigación (Full paper), artículos originales publicados, proceeding, capítulos de libro, tesis de posgrado, informes gubernamentales.	Reportes de páginas sin criterio científico.

Fuente: AlRyalat, Malkawi, y Momani (2019).
Elaboración propia.

2. Aproximación cuantitativa

La selección de los dos mercados municipales de Tena como casos de estudio se basa en múltiples su relevancia ambiental, económica y social. La biodiversidad de la ciudad y su posicionamiento como destino turístico demanda de una gestión sostenible de los MSW para preservar los ecosistemas amazónicos. Además, investigar la valorización de los residuos alimentarios en estos mercados ofrece soluciones potenciales en la economía local puesto que puede influir en la percepción de los visitantes. La implementación de prácticas de separación en la fuente y una gestión integral de FW puede motivar la participación de la comunidad como de los turistas. Esto, a su vez, podría establecer a Tena como un modelo de desarrollo sostenible que beneficie tanto a los residentes locales como a los visitantes.

Con base en la revisión de la literatura previamente expuesta, se seleccionó la tecnología más adecuada para el contexto de los mercados municipales de Tena. Se procedió a diseñar el digestor, considerando factores como la capacidad, la eficiencia y los requisitos de mantenimiento, por lo que se escogió el digestor tubular para este caso de estudio.

El estudio estuvo dividido en 3 componentes: ambiental, energético y económico, que corresponden a 6 etapas (ver Figura 3). La evaluación ambiental abarca las primeras 4 etapas, puesto que se establecen los límites del estudio y se aborda la estimación de GHG emitidos. La etapa 5 corresponde a la evaluación energética y la etapa 6 corresponde a una aproximación del componente económico.

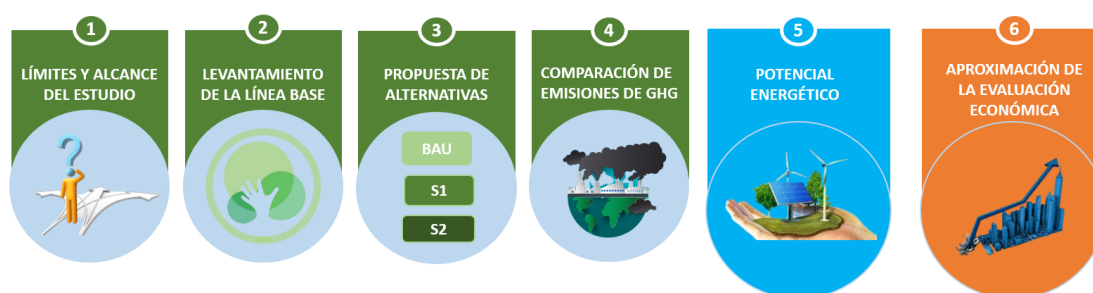


Figura 3. Etapas de la metodología del estudio.
Elaboración propia.

2.1. Evaluación ambiental

Los datos se registraron de acuerdo a la Organización Internacional de Normalización (ISO) 14040 (2006, 45). Se consideraron las siguientes 4 etapas para la evaluación ambiental:

- La primera etapa consistió en establecer los límites y alcance del estudio. Los límites del sistema fueron establecidos de acuerdo a la literatura relacionada con el Análisis del Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés) para la gestión de MSW (Bartolozzi et al. 2018, 53; Zhou et al. 2021, 45; Yeo et al. 2019, 85). Lo que significa que la recolección de los residuos en los dos mercados más importantes de la ciudad de Tena (ver Figura 1), ni la fase de construcción fueron incluidas en el análisis; es decir el estudio se enfoca solamente al tratamiento de los FW provenientes de los 2 mercados en el relleno sanitario “Chimbadero”. La unidad funcional de LCA de este análisis es el tratamiento de 1 ton de restos de los dos mercados de la ciudad.
- La segunda etapa consistió en realizar un levantamiento de la línea base de las características de los mercados 2 municipales de Tena (inventario), que reflejó el estado actual (BAU, por sus siglas en inglés), por medio de encuestas (Anexo 1) y la metodología de cuarteo de los residuos generados. Para ello, se aplicaron las encuestas a los dueños de los locales de los dos mercados. Se aplicó la técnica de cuarteo de los residuos para evaluar la cantidad y la composición neta de residuos en los mercados en la actualidad. La encuesta permitió la evaluación socioeconómica de los productores y usuarios de los dos mercados. Mientras que el cuarteo permitió identificar la composición porcentual y estimar la producción mensual de residuos en los mercados (Montoya y Barriga 2013). Se tomaron muestras diarias de los MSW en cada centro de expendio de comida, siguiendo la recomendación de Alayón Castro (2021) durante una semana. Posteriormente, cada muestra fue pesada y registrada. Luego, se dispuso las muestras en un área plana, que permitió identificar la cantidad y composición de los residuos en los mercados municipales de Tena. Se presenta una descripción más detallada en el (Anexo 2)

El escenario BAU contempla el tratamiento de los lixiviados y el aprovechamiento del abono generado posterior al compostaje, contando con emisiones simultáneamente (ver Figura 4).

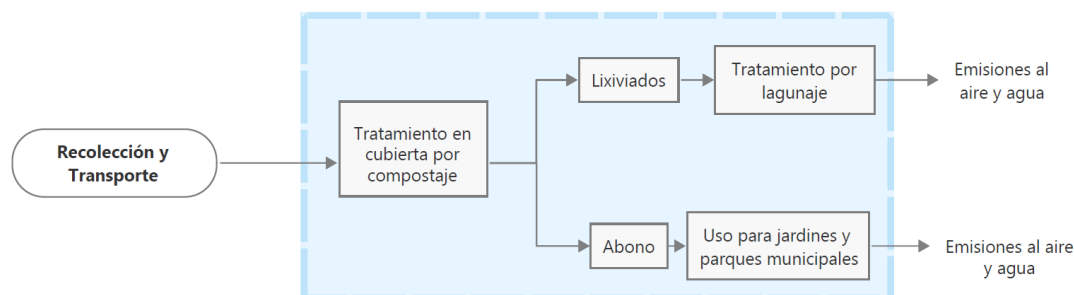


Figura 4. Escenario BAU: línea base de la gestión actual de residuos provenientes del mercado.

Elaboración propia.

- La tercera etapa se basó en proponer dos alternativas considerando las entradas del inventario previamente realizado, además de la valorización teórica de estos residuos por AD empleando los lineamientos presentados para el dimensionamiento (Jiang et al. 2020, 78) y principalmente las ecuaciones presentadas en la guía de diseño y manual de instalación para biodigestores tubulares (Martí-Herrero 2019, 45).

Tabla 3
Parámetros considerados para la producción de biogás.

Parámetro	Valor	Unidades	Caso de estudio
OLR		1 kg _{sv} /m ³ d	
SBP	0,265	m ³ biogás/kg _{sv}	(Martí-Herrero 2019, 678)
BPR	0,265	m ³ biogás/m ³ d	
%SV	26,32	% (B.H*)	
Carga mensual	1 0146	kg/mes	
Carga diaria (masa)	338,2	kg/d	Tena
Carga diaria (sólidos volátiles)	89,01	kg _{sv} /d	

*BH=Base húmeda

Elaboración propia.

Considerando que SBP (Soluble Biodegradable COD) representa la cantidad de materia orgánica disuelta en el sustrato que es fácilmente biodegradable y puede ser convertida en biogás por microorganismos durante el proceso de digestión anaerobia; BPR (Biogas Production Rate) es la tasa de producción de biogás, referida a la cantidad de biogás generado en un sistema de AD durante un período de tiempo específico. Estos términos pueden ser equivalente para este estudio. Por lo que para estimar el volumen total del sistema de tratamiento por digestores anaerobios se aplica la Ecuación 1:

$$V_{BDG} = \text{Carga diaria} * \%SV \quad (\text{Ecuación. 1})$$

Donde, V_{BDG} = Volumen del sistema de tratamiento por biodigestores, $\%SV$ = Porcentaje de Sólidos Volátiles. Para el cálculo del volumen individual de los digestores se dividió el valor total calculado (V_{BDG}) para un valor similar al establecido de 14,16 m³ basados en el artículo de Martí-Herrero (2019, 45), por la disponibilidad de espacio constatada en la visita al relleno sanitario y facilitar su potencial implementación al contar con temperaturas similares.

Posteriormente, se calculó el volumen total del biogás generado en un día por medio de la Ecuación 2, valor que resulta de gran utilidad en los cálculos posteriores. Esta ecuación representa la relación entre la producción de biogás, el volumen del digestor y la tasa de producción de biogás en la AD. El tipo y la composición de los residuos alimentarios, las condiciones operativas y la comunidad microbiana del digestor afectan a la tasa de producción de biogás (BPR), un parámetro clave señalado por Batstone et al. (2002, 70). Suponiendo que el resto de factores permanezcan constantes, el volumen del digestor (V_{BDG}) afecta directamente a la producción de biogás de residuos alimentarios. Es importante reconocer la complejidad de la AD de los FW y los numerosos factores que pueden inhibir la generación de biogás (Owhondah et al. 2016, 987).

$$V_{BIOGÁS} = V_{BDG} * BPR \quad (\text{Ecuación. 2})$$

La primera alternativa (S1) contempló el tratamiento de los residuos por AD y la quema directa del biogás generado. La segunda alternativa (S2) contempló la aplicación de AD y el aprovechamiento del biogás generado por la sustitución de gas licuado del petróleo, al mismo tiempo que se consideró el uso potencial de digestato para fines agrícolas.

La alternativa S1 (ver Figura 5) contempla esfuerzos enfocados únicamente en el tratamiento de los FW, de tal manera que no exista un aprovechamiento energético de los productos de valor agregado (gases presentes en el biogás). La principal ventaja de esta alternativa es la reducción de un importante volumen de residuos orgánicos de manera diferenciada, de tal manera que no existe una mezcla directa de estos residuos

de los mercados con los provenientes del resto de la ciudad; esto favorece también a la reducción de lixiviados y potencialmente a la disminución de GHG en la atmósfera.

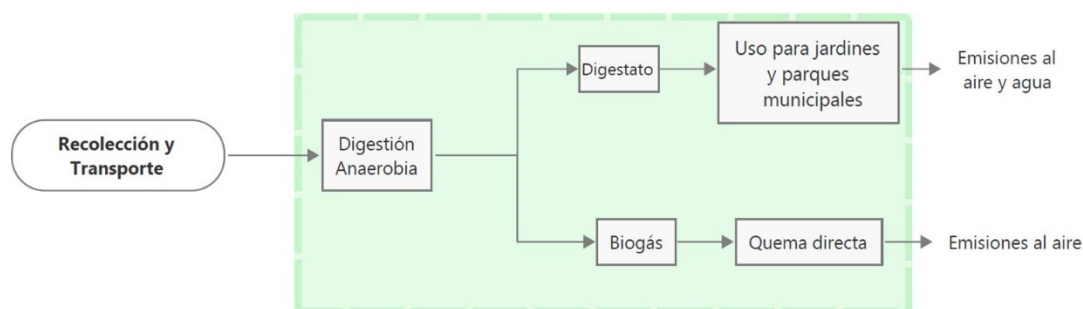


Figura 5. Escenario S1 para la gestión de FW.
Elaboración propia.

S2: Este escenario (ver Figura 6) favorece la gestión de una manera más integral de los FW, además de una potencial reducción de GHG por el aprovechamiento de biogás. Considerando que el digestato también puede producir emisiones de CH_4 dependiendo de las condiciones de almacenamiento. Una gestión adecuada del digestato es clave para evitar las emisiones de GHG (Kowalczyk-Juško et al. 2023, 47; Setoguchi et al. 2022, 85). El digestato se destina al uso que requiere el GAD, en jardines y parques municipales, lo cual favorece a un uso como fertilizante de mejor calidad que el abono generado en el BAU (Ries, Chen, y Park 2023, 77). Además, el beneficio energético principal es el uso del biogás generado en hogares cercanos, por cuanto en ninguno de los dos escenarios anteriores se contemplaba su valorización (Fuldauer et al. 2018, 43). Una de las limitaciones es el tratamiento que debe cumplir el biogás antes de su uso, lo que significa la remoción de H_2S , que permite evitar problemas respiratorios de los usuarios (Schiavon et al. 2018, 84).

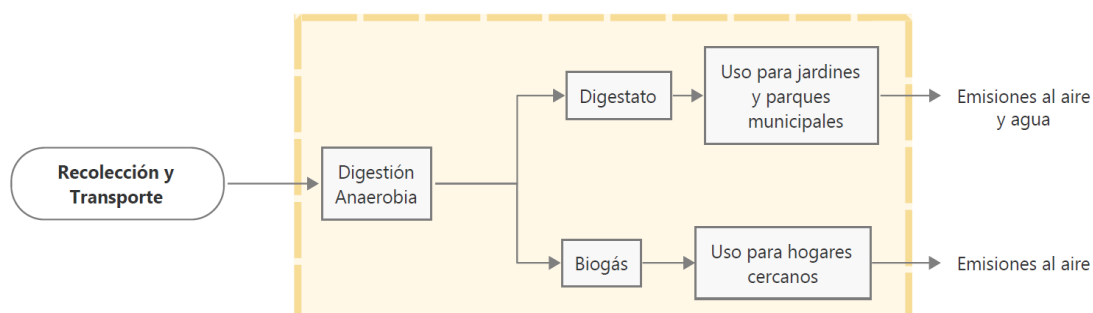


Figura 6. Escenario S2 Alternativa sostenible de la gestión de FW.
Elaboración propia.

- La cuarta etapa consistió en la comparación de emisiones de GHG de las alternativas S1 y S2, empleando la ecuación 5 y 8, respectivamente, en comparación al BAU basadas en los lineamientos de Chen, et al., (2020, 7), que se calculó en la ecuación 3. Para el BAU basado en el compostaje, se he encontrado en la literatura que 1 tonelada de FW puede evitar la producción de 8,4 kg de fertilizantes sintéticos de N, P y K, lo que permite evitar 48 kg de CO_{2eq} (Blengini, 2008, 1377).

$$C_{\text{Emis}(\text{compostaje})} = M_{\text{FW}} * \frac{100-MC}{100} * (0.6*EF_{\text{N}_2\text{O}} + 10*EF_{\text{CH}_4}) * 12/44 - 48\text{KgCO}_2 \quad (\text{Ecuación. 3})$$

Donde $C_{\text{Emis}(\text{compostaje})}$ =Emisiones debidas al compostaje, EF =Emisiones debidas al tratamiento por compostaje: $EF_{\text{N}_2\text{O}}=265$, $EF_{\text{CH}_4}=25$, M_{FW} = Tratamiento de FW diario, MC =contenido de humedad.

La cantidad de digestato se estimó basado un reciente estudio de LCA para 4 escenarios de AD (Tian, H., 2023, 4), que es el equivalente al abono listo para su uso. La cantidad de abono para la unidad funciona del 1 000 kg de FW fueron 4,42 kg de abono NPK, 5,96 kg de óxido de potasio (K₂O) y 8,05 kg de urea. Para escalar estos valores al del presente estudio (338,2 kg FW/d), se calculó un factor de escala, obteniendo una proporción de 0,3382. De esta manera, las cantidades de fertilizante ajustadas fueron 2,02 kg de K₂O, 2,72 kg de urea y 1,49 kg de fertilizante compuesto NPK. La ecuación 4 permitió estimar las cargas evitadas de GHG debidas al aprovechamiento del digestato (C_{Ferti}) empleado en forma de abono en los escenarios S1 y S2. La ecuación considera la masa (m) y los factores de emisión (EF) del fertilizante compuesto N-P-K, el K₂O y la urea. Cuantifica las emisiones directas de la producción de fertilizantes y las emisiones evitadas gracias a la sustitución de los fertilizantes tradicionales por biofertilizantes procedentes de la AD.

$$C_{\text{Ferti}} = EF_{\text{NPK}} * m_{\text{NPK}} + EF_{\text{K}} * m_{\text{K}} + EF_{\text{Urea}} * m_{\text{Urea}} + EF_{\text{Urea-CO}_2} * m_{\text{Urea}} \quad (\text{Ecuación. 4})$$

Para el cálculo de emisiones por el S1 se empleó la Ecuación 5, donde se toman en cuenta las emisiones de CH₄ y CO₂, así como la reducción en la huella de carbono lograda a través del uso de fertilizantes producidos a partir de este proceso. $C_{\text{Emis}(\text{AD-S1})}$ representa las emisiones totales de carbono del sistema de AD en el S1, m_{CH_4} es la

masa de metano producido, multiplicada por 25, en comparación con el CO₂, donde m_{CO_2} es la masa de dióxido de carbono producido, y C_{Ferti} es la reducción en la huella de carbono debido al uso del biofertilizante generado en lugar de los fertilizantes sintéticos convencionales. Esta ecuación permite una evaluación tanto de cargas generadas como evitadas del proceso de DA.

$$C_{Emis(AD-S1)} = 25 * m_{CH_4} + 1 * m_{CO_2} - C_{Ferti} \quad (\text{Ecuación. 5})$$

Por otro lado, La sustitución estimada en términos máxicos de GLP por biogás se calcula utilizando la Ecuación 6. Utilizando la eficiencia de las cocinas que funcionan con biogás ($Eff_{Biogás}$) al 55% y GLP (Eff_{GLP}) al 66%, y valores caloríficos de 46,1 MJ/kg para el biogás ($C_{Biogás}$) y el GLP (C_{GLP}), respectivamente (Arthur et al., 2011, 6).

$$M_{GLP} = \left(\frac{C_{Biogás}}{C_{GLP}} \right) * \left(\frac{Eff_{Biogás}}{Eff_{GLP}} \right) * V_{BIOGÁS} \quad (\text{Ecuación. 6})$$

Esto sugiere que el biogás puede compensar 10,64 kg diarios de GLP. Este valor puede convertirse en unidades energéticas (487,754kJ) mediante 45,837 kJ/kg, según el estudio de Afrane & Ntiamoah, (2011, 539). El factor de emisión del GLP estudiado en un contexto real es de 3,302 kg CO_{2eq} /kg (Weyant et al., 2019, 5). La masa de GLP que podría sustituirse por se presenta en la Ecuación 7.

$$C_{GLP(AD-S2)} = 3,302 \text{ kg CO}_{2eq} / \text{kg} * M_{GLP} \quad (\text{Ecuación. 7})$$

Mientras que el escenario S1 se cauntifica las emisiones generadas y la evitadas por el uso de fertilizantes, el escenario S2 ($C_{Emis(AD-S2)}$) incluye emisiones evitadas debidas al aprovechamiento de GLP ($C_{GLP(AD-S2)}$). Este punto es relevante puesto que se reconoce el biogás como energía renovable, fomentando la seguridad energética y una transición hacia una economía baja en carbono. Los cálculos se realizaron en función de la ecuación 8.

$$C_{Emis(AD-S2)} = C_{Emis} - C_{Ferti} - C_{GLP(AD-S2)} \quad (\text{Ecuación. 8})$$

2.2 Potencial Energético

La quinta etapa consistió en el del potencial energético calculado para el escenario S1 y S2, no se consideró para el BAU puesto que por compostaje no se obtienen productos energéticos aprovechables en este contexto.

Las estimaciones de potencial energético se basaron en los lineamientos de estudios similares (Jiang et al. 2020, 45; Al-Wahaibi et al. 2020, 77), a partir de los cuales se desarrollaron los cálculos para este estudio.

Para la evaluación del potencial de recuperación de energía del S1 (Ep_{FW-S1}) se tomó como base la ecuación 9 planteada por Ludlow et al., (2021).

$$Ep_{FW-S1} = M_{FW} * (100 - MC)/100 * LHV \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde, M_{FW} representa la cantidad de FW tratado, cuyo valor equivale a 121,75 ton/año; MC el contenido de humedad (%), igual a 59,56%; LHV es poder calorífico inferior (MJ/t), equivalente a 17,83 MJ/t.

Tanto el MC como el LHV fueron considerados en base al estudio de Narváez et al., (2013); Posso et al., (2019). Debido a que los datos proporcionados reflejan mejor el contexto de los FW en Ecuador a falta es estudios en provincias de la Amazonía.

Para la evaluación del potencial de recuperación de energía del S2 (Ep_{FW-S2}) se empleó la ecuación 10 como base, calculado en función del biogás generado debido al proceso de AD de FW.

$$Ep_{FW-S2} = M_{GLP} * C_{GLP} * Eff_{GLP} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde Ep_{FW-S2} representa la energía potencial recuperable bajo el contexto del escenario S2, M_{GLP} equivale a la masa de gas licuado de petróleo que podría ser reemplazado por biogás, C_{GLP} indica el contenido energético del GLP, generalmente expresado en calorías o Joules por unidad de masa y Eff_{GLP} se refiere a la eficiencia de conversión del GLP a energía aprovechable.

2.3 Evaluación económica: una aproximación

Los costes de inversión pueden variar significativamente según el país en el que se desarrolle el proyecto, influenciados por los costes laborales y eléctricos de la región. Esta aproximación del análisis económico resulta útil para determinar la viabilidad económica de las alternativas para el tratamiento de FW en Tena. Para este análisis, se elaboró un enfoque basado en las condiciones y precios de Ecuador, así como en tecnologías empleadas en países en desarrollo.

Esta evaluación no se limitó al BAU, que contempla el compostaje, sino que también se extendió a los escenarios S1 y S2, donde el mercado de Tena presta especial atención a los procesos de digestión anaeróbica. Además de considerar los equipos necesarios, el estudio proporciona información sobre el costo de implementación para su posible puesta en marcha. La sexta etapa consistió en el desarrollo de una aproximación de los aspectos económicos basada en los lineamientos de Anaya-Reza et al. (2021, 1065).

La evaluación comprendió los gastos de capital (CAPEX) y los gastos operativos (OPEX). El CAPEX incluyó los gastos iniciales necesarios para establecer las instalaciones de tratamiento de residuos, mientras que la evaluación de OPEX examinó principalmente los gastos recurrentes relacionados con la operación y el mantenimiento regulares de las actividades comerciales. Para calcular el costo de la mano de obra, se utilizaron los lineamientos oficiales del Ministerio de Trabajo (2022).

La metodología empleada para la estimación de los costos de un digestor en el estudio abarcó diversas etapas.

- Revisión de estudios previos: Se llevó a cabo una exhaustiva revisión de la literatura relacionada con la implementación de digestores para la valorización de FW. Este análisis permitió identificar estudios similares y proyectos anteriores, proporcionando una comprensión detallada de las tecnologías utilizadas, los costos asociados y las mejores prácticas en este ámbito.
- Desglose de costos: Se realizó un desglose detallado de los costos asociados con la adquisición de materiales, el uso de maquinaria y la operación del digestor. Esto abarcó los costos de equipo, los materiales de construcción, la instalación, la mano de obra y los costos operativos recurrentes.

Para calcular las tablas generadas en los resultados, se consideraron los costos asociados con la operación de una excavadora para la manipulación y tratamiento de FW al llegar al relleno sanitario. Se tuvieron en cuenta dos componentes principales de costos: el costo de contratación de la excavadora, estimado en 60 USD por hora, y el costo laboral del operador de la maquinaria, calculado en 2,24 USD por hora. Se asumió un régimen operativo de 48 horas al mes. Estos costos se derivaron de cotizaciones actuales de proveedores y tarifas laborales vigentes, lo que proporcionó una estimación precisa para el análisis de rentabilidad del proceso de compostaje y su impacto en la mitigación de emisiones.

Esta evaluación económica es crucial para determinar la viabilidad financiera de la valorización de residuos alimentarios como una contribución concreta a la reducción de la huella de carbono en la industria de gestión de residuos. Es importante destacar que estas cifras sirven como referencia para el presente estudio de caso y pueden ajustarse según las condiciones económicas locales en diversos contextos.

La aplicación de esta metodología permitió obtener una estimación de costos para la implementación de la propuesta de tratamiento por AD para los mercados municipales de Tena, lo que proporciona una base económica sólida para la toma de decisiones. Sin embargo, una de las limitaciones del estudio radica en que no se consideraron los bonos de carbono y su potencial generación de ingresos económicos, como señaló Galgani (2014, 8).

Capítulo tercero

Resultados y discusión

1. Evaluación ambiental

1.1 Primera etapa: Límites y alcance del estudio

Como resultado de la primera etapa de este estudio, se definieron los límites y alcance del mismo. La recolección de residuos en los dos mercados más relevantes de la ciudad de Tena, así como la fase de construcción, quedaron excluidas del estudio. EL alcance se centró en el tratamiento de los FW provenientes de dichos mercados. La unidad funcional corresponde a 1 ton de residuos provenientes de los dos mercados de la ciudad.

1.2 Segunda etapa: Levantamiento de la línea base

Durante la segunda fase del proyecto, se llevó a cabo un estudio de referencia de las características de los mercados municipales de Tena. Para ello se realizó una visita técnica y poder levantar información relevante respecto al tratamiento bajo cubierta (ver Figura 7). Dentro de esta descripción de los escenarios se parte del BAU mencionado en la Figura 4 que contempla el tratamiento biológico, empleando técnicas básicas de compostaje. El tratamiento se lleva a cabo bajo cubierta, cuenta con el volteo mecánico de los operarios de manera periódica, además luego de 3-4 semanas, se cuenta con el producto deseado al contar con las condiciones adecuadas de Temperatura ambiente cuyo valor promedio es 24 °C (Guallo Aguinda et al. 2020, 14) y cuentan con un inóculo bacteriano que es colocado semanalmente para la reducción de olores y la disminución de tiempo del tratamiento.



Figura 7. Sistema actual de tratamiento de la ciudad de Tena para restos orgánicos provenientes de los mercados de la ciudad de Tena.
Fuente: Fotografía tomada por el autor el 20/06/2022.

La socialización del estudio a los propietarios fue llevada con la autorización de los presidentes de las asociaciones y funcionarios públicos, se explicó el propósito de la visita, recolección, encuestas; se respondieron inquietudes ligadas al potencial uso de los datos recabados, no solo por el GAD, sino también para otros municipios (ver Figura 8). Se aplicó la técnica de cuarteo durante una semana, se visitaron los locales comerciales de manera diaria para poder recolectar los residuos donde los propietarios apoyaron con la entrega en bolsas que fueron provistas previamente. Se transportó a un lugar con cubierta para proceder a mezclar los residuos por mercados. Se registró el peso generado de manera diaria para evaluar el porcentaje en la composición de los residuos, que fueron clasificados manualmente en 4 categorías: lignocelulósicos, materia orgánica, papel, plástico.



Figura 8. Socialización con los propietarios de los locales en los mercados.

En el mercado sur (ver Figura 9), se detectaron residuos inorgánicos, como el plástico (2,7%) y el papel (0,9%), lo que representa una clasificación mayoritaria de los residuos en este lugar. Por otro lado, los residuos orgánicos, que incluyen la fracción lignocelulósica, correspondieron al 23,3%, y la materia orgánica, principalmente FW, fue del 72,9%. Este hallazgo demuestra que hay una fracción representativa que requiere una gestión adecuada. Es importante destacar el concepto de residuos lignocelulósicos, cuyo tratamiento es más lento y complejo, a menudo requiere un pretratamiento debido a su estructura rígida de lignina. Estos residuos son difíciles de aprovechar. En contraste, el resto de la materia orgánica se puede aprovechar fácilmente mediante procesos como la digestión anaeróbica, que incluyen cáscaras de maíz, plátano, cacao y otros productos de la zona.

Por otro lado, en el mercado Central la composición es similar (ver Figura 9); sin embargo, se observó una mayor fracción de residuos inorgánicos, con el plástico representando el 3,6% y el papel el 2,0%, lo que dificulta su tratamiento. En cuanto a los residuos orgánicos, la fracción lignocelulósica representó el 30,9%, y la materia orgánica el 63,5%, siendo esta última la de mayor porcentaje.

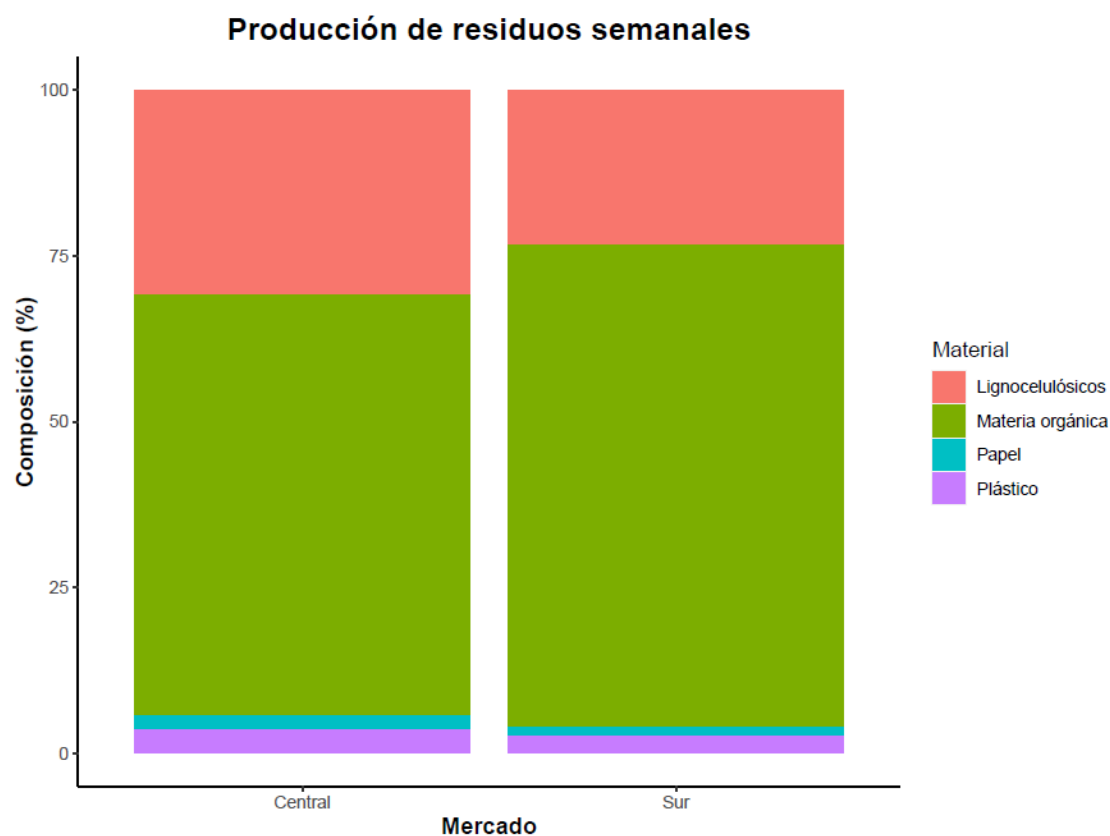


Figura 9. Porcentaje de la producción de residuos (%) por semana en el mercado sur y central

Además, se identificó los días de mayor producción durante la semana en los dos mercados (ver Figura 10) por medio de la recolección. A partir de esa información, para el mercado Sur, se estimó una producción mensual de 6 206 kg, mientras que para el mercado Central fue de 3 940 kg. La suma de los 2 mercados tiene un equivalente a 10 146 kg de manera mensual, equivalente a 121,75 ton/año.

Producción de desechos semanales en mercados

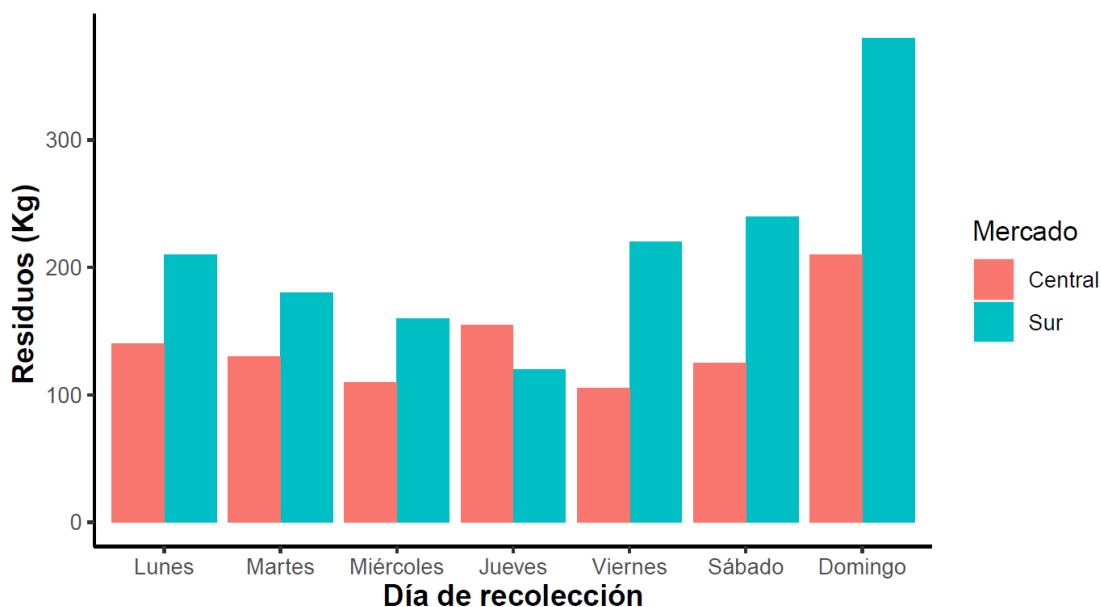


Figura 10. Producción de residuos (kg) de cada día de la semana en el mercado Sur y Central.

Para complementar el levantamiento de la línea base, se realizaron 47 encuestas en el mercado Central y 29 encuestas en el mercado Sur de la ciudad de Tena. Este número corresponde al total de locales operativos durante la fase del estudio. Las encuestas se llevaron a cabo con los propietarios de los establecimientos ubicados en el Mercado Central y el Mercado Sur de la ciudad de Tena durante los meses de agosto y septiembre de 2022. Cabe destacar que se contó con el acompañamiento de los líderes de las asociaciones de trabajadores y la autorización por parte del GAD municipal de Tena.

Tipo de actividad comercial

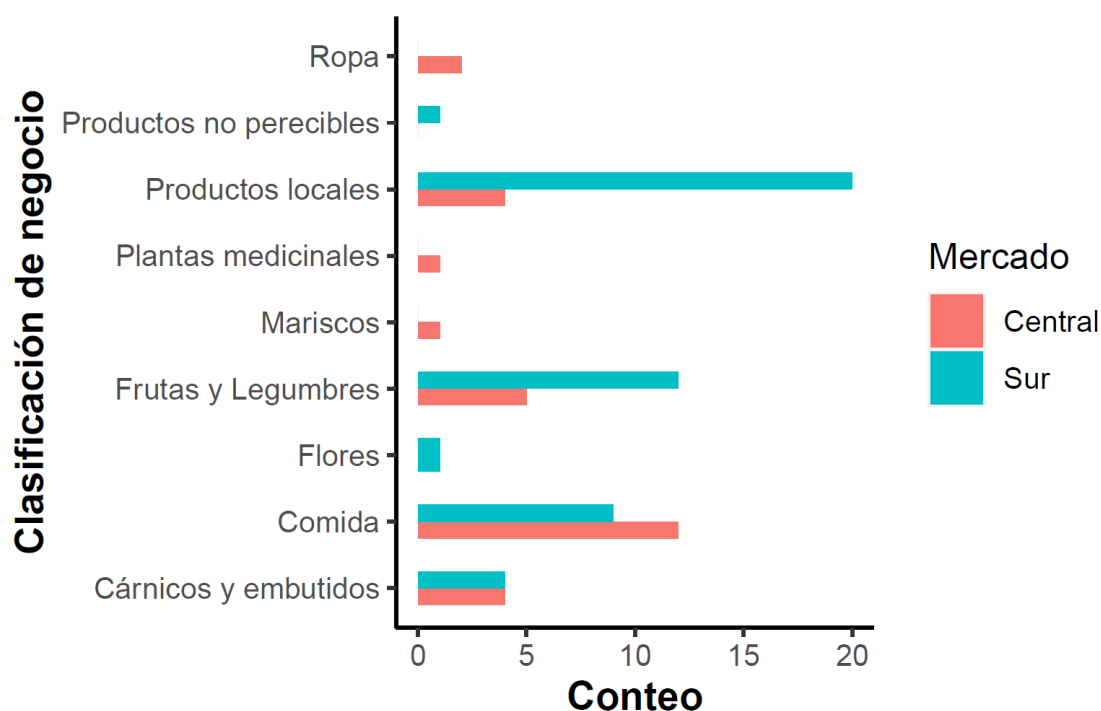


Figura 11. Tipo de actividad comercial para el mercado sur y central
Elaboración propia.

En el Mercado Central, la actividad comercial más predominante es la venta de comida, representando el 41,4% de los locales encuestados (ver Figura 11). Estos establecimientos, principalmente restaurantes y salones, ofrecen una variedad de opciones culinarias a los consumidores. En segundo lugar, se encuentra la venta de frutas y verduras, representando el 17,2% de los locales encuestados. Además, la venta de productos locales de la región ocupa el 13,8% de los locales encuestados, con un enfoque en productos típicos y artesanías que representan la cultura y tradiciones de la región Amazónica. Por último, la venta de cárnicos y embutidos también cuenta con un porcentaje similar al de la categoría anterior.

Por otro lado, en el Mercado Sur, las tres principales actividades comerciales son la venta de productos locales de la región (42,6%), seguida por la venta de frutas y verduras (25,5%) y la venta de comida (19,1%) (ver Figura 11). Considerando estas actividades, los residuos que se generan en mayor cantidad son los restos lignocelulósicos y los plásticos. Los plásticos provienen del uso de bolsas plásticas para la entrega de productos, aunque su volumen no es significativo en comparación con los residuos orgánicos generados.

En ambos mercados, se observa una tendencia similar en cuanto a la generación de residuos, con los residuos orgánicos, especialmente los FW, como los más abundantes. Esto sugiere la necesidad de una gestión adecuada de estos residuos para reducir su impacto ambiental.

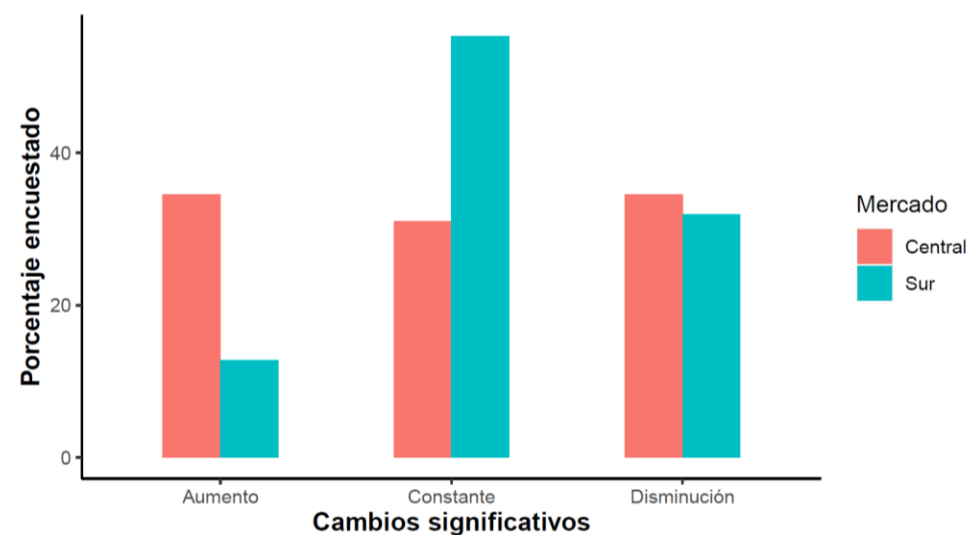


Figura 12. Cambios en relación a la cantidad de residuos en el último año
Elaboración propia.

Como consecuencia del gran impacto causado por la pandemia debida al COVID-19, a la actividad comercial en el año 2020 e inicios del 2021, la rentabilidad de muchos negocios decayó de manera significativa, disminuyendo también la cantidad de residuos totales que se generaban. Sin embargo, en el último año el comercio ha intentado retomar sus actividades con la mayor normalidad posible. En el caso del Mercado Central, no existe una aceptación generalizada de la tendencia de si existe o no algún cambio significativo en relación a la cantidad de desechos producidos por sus negocios donde, según la gráfica, cada tercio de la población total percibe una postura distinta (ver Figura 12).

En el último año el comercio ha intentado retomar sus actividades con la mayor normalidad posible, por lo que muchos considerarían que existirían cambios evidentes en cuanto a la cantidad de residuos que se generan en el Mercado Sur. Sin embargo, el 55,3% de los locales comerciales consideran que han generado la misma cantidad de residuos en relación a los años anteriores, es decir, no sienten que se hayan visto afectados a pesar de los varios problemas que como sociedad global hemos enfrentado. Mientras que el 31,9% ha observado una disminución de los

mismos. Finalmente, la minoría, 12,8%, considera que sus desechos han aumentado en el último año (ver Figura 12).

Clasificación en desechos orgánicos e inorgánicos

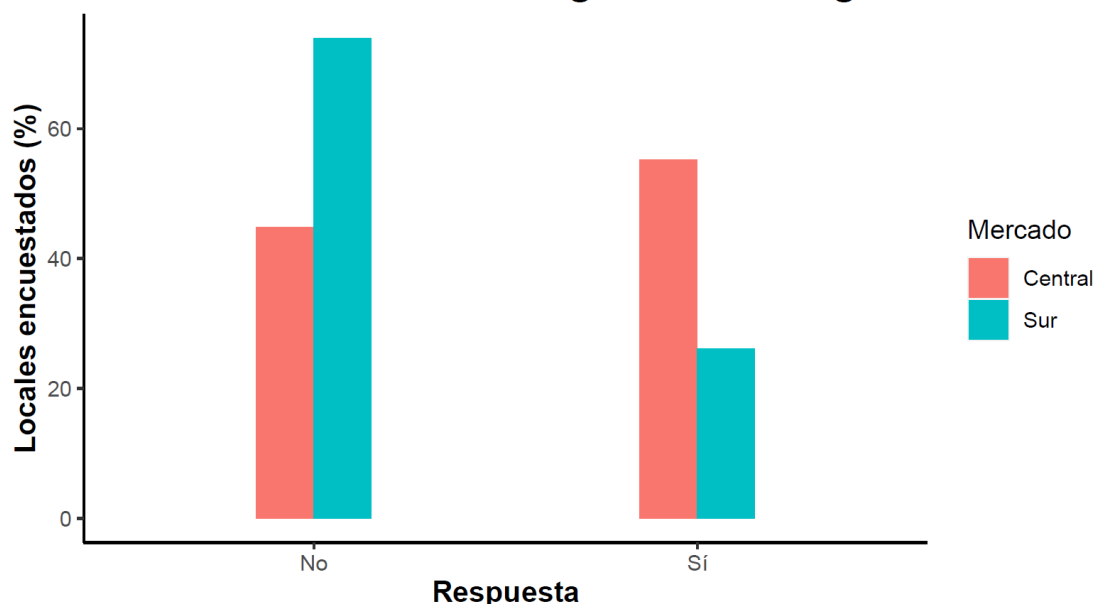


Figura 13. Locales que realizan clasificación de residuos en los mercados del Tena
Elaboración propia.

En cuanto a la clasificación de desechos en residuos orgánicos e inorgánicos, el 44,8% aceptó realizar esta actividad de manera regular, mientras que el porcentaje restante mencionó recolectar todo tipo de desechos en conjunto para el mercado central. Sin embargo, la mayoría de los locales que dijeron no realizar la clasificación de desechos comentaron que se debe a la actividad comercial que realizan, ya que aquellos que se dedican a temas como la venta de ropa y productos no perecibles no generan residuos orgánicos en una cantidad significativa (ver Figura 13).

En cuanto a la clasificación de desechos en el mercado sur, se consultó con los locales comerciales si realizaban la separación únicamente en dos tipos de residuos, orgánicos e inorgánicos. El 73,9% aceptó realizar esta actividad de manera regular, debido a que existe un sistema de recolección por separado en las rutas pre dispuestas por parte de los vehículos recolectores. Sin embargo, el 26,1% mencionó recolectar todo tipo de desechos en conjunto. Esto se debe a que la mayoría de los locales que no realizan la clasificación de desechos mantienen una actividad comercial enfocada en temas como la venta de ropa y productos no perecibles, por lo que no generan residuos orgánicos en una cantidad significativa (ver Figura 13).

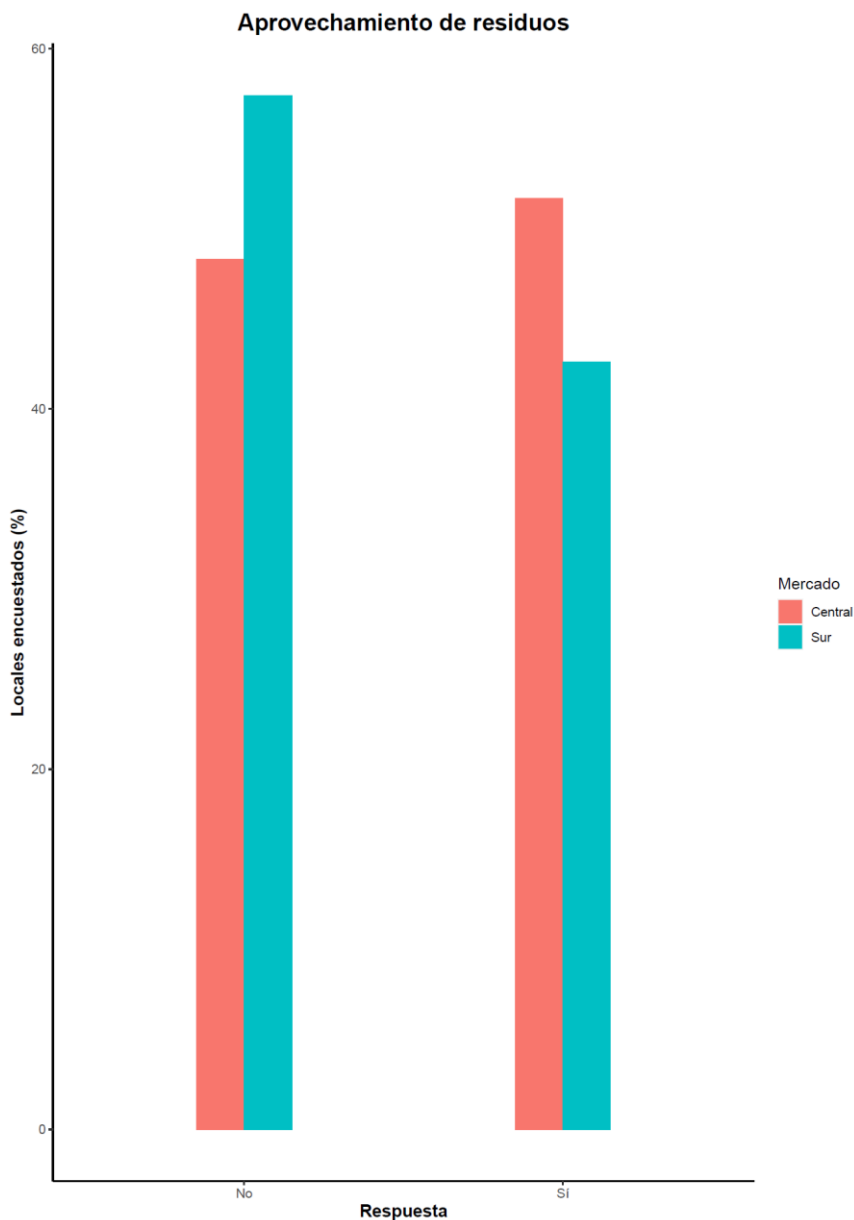


Figura 14. Aprovechamiento de los residuos generados en los mercados
Elaboración propia.

En cuanto al conocimiento público sobre si existe aprovechamiento de los residuos generados en el Mercado Central en productos que permitan el reciclaje o la reutilización de desechos, existió una respuesta dividida entre los locales comerciales donde cerca del 50% dice conocer que existen actividades que permiten aprovechar los residuos que generan, como el proyecto de compost que realizan en el Relleno Sanitario, pero el restante menciona no conocer nada al respecto (ver Figura 14).

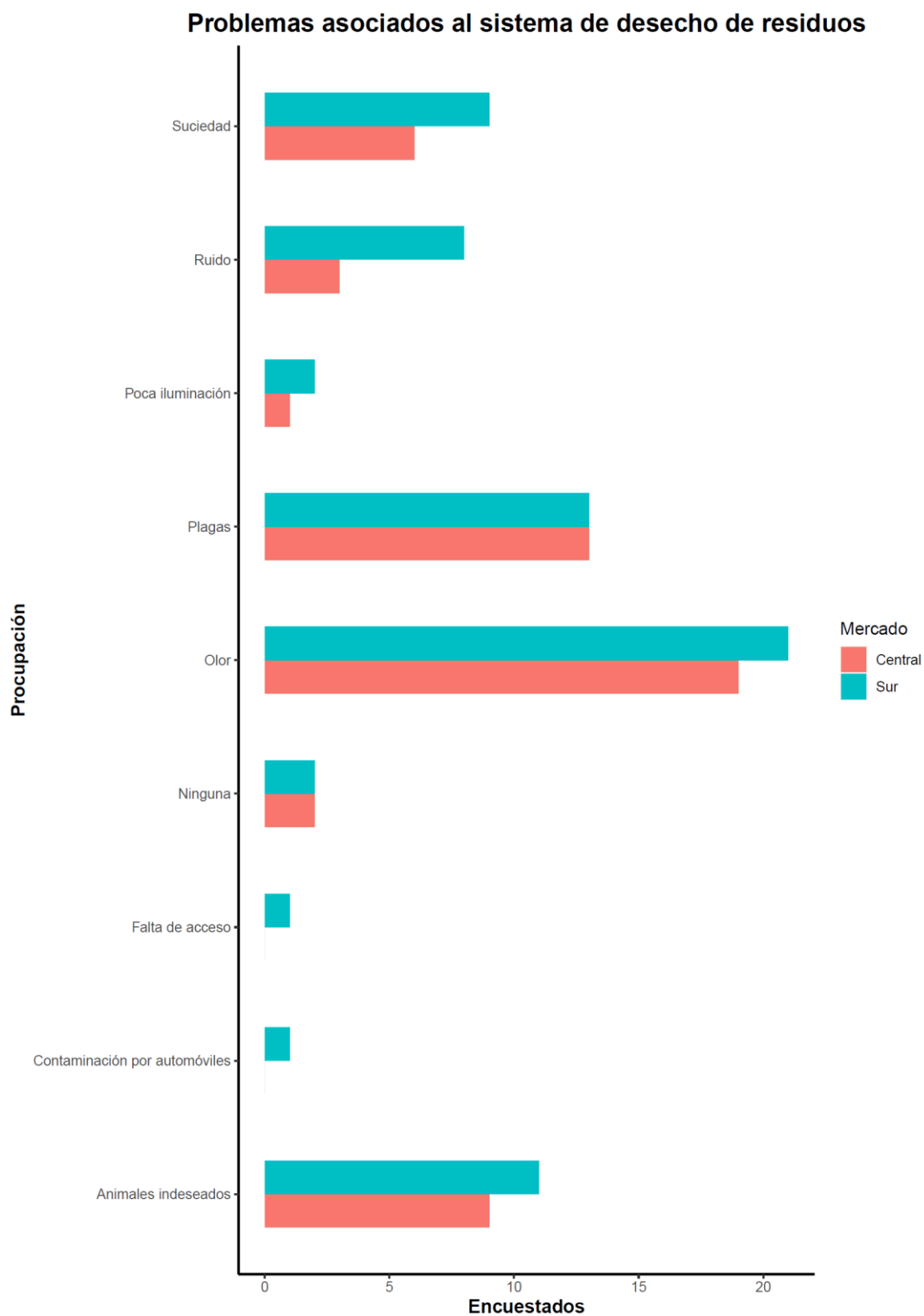


Figura 15. Problemas asociados al sistema de desecho de residuos en los mercados. Elaboración propia.

A pesar de existir varios sistemas para dar la disposición final a los residuos generados en el Mercado Central, los comerciantes aseguran que existen varios

problemas asociados a dichos sistemas que han causado molestia para ellos y los consumidores. Entre éstos se encuentra como uno de los principales el mal olor generado por el almacenamiento de los residuos en las zonas de recolección de los vehículos municipales, además de que produce la presencia de plagas como los mosquitos, cucarachas y ratones, resultando perjudicial para sus actividades comerciales. También consideran que existen problemas como la generación de ruido y suciedad (ver Figura 15).

En cuanto a existir problemas ligados al sistema de recolección para dar la disposición final a los residuos generados en el Mercado Sur, los comerciantes aseguran que existen varios inconvenientes que han causado molestia para ellos y los consumidores. Entre éstos se encuentra como uno de los principales el olor generado por el almacenamiento de los residuos en las zonas de recolección de los vehículos municipales, además de que produce la presencia de plagas como los mosquitos, cucarachas y ratones, resultando perjudicial para sus actividades comerciales. También consideran que existen problemas como la generación de ruido y suciedad (ver Figura 15).

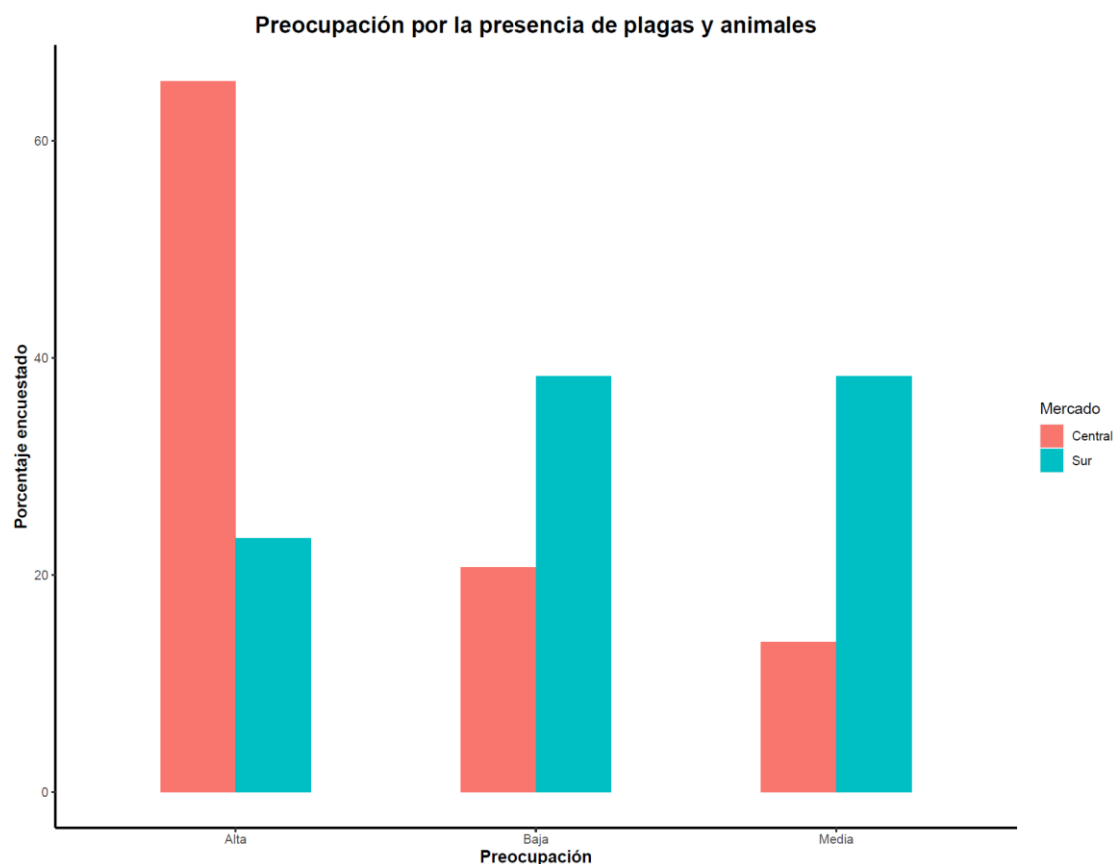


Figura 16. Preocupación de los comerciantes por la presencia de plagas y animales. Elaboración propia.

A pesar de que la mayoría de los locales comerciales dicen percibir la presencia de problemas como parte del actual sistema de recolección de desechos, existe una baja preocupación por parte de los comerciantes. Esto puede deberse al desconocimiento sobre los posibles problemas de salud para los mismos comerciantes y los consumidores que pueden ocasionar la presencia de animales e insectos transmisores de enfermedades. Por lo tanto, una de las soluciones que debe llevarse a cabo de manera inmediata es la realización de charlas o talleres que fortalezcan temas relacionados con el adecuado manejo del ambiente, así como sobre saneamiento y cuidado de la salud pública (ver Figura 16).

Según la información recolectada en la pregunta anterior, se consultó si existe preocupación por parte de los comerciantes del Mercado Sur asociada a la presencia de plagas y animales indeseables que han aparecido mientras realizan sus actividades, y se encontró que más del 70% presenta una baja o media preocupación por este problema. Esto puede deberse al desconocimiento sobre los posibles problemas de salud para los mismos comerciantes y los consumidores que pueden ocasionar la presencia de animales e insectos transmisores de enfermedades. Por lo tanto, una de las soluciones que debe llevarse a cabo de manera inmediata es la realización de charlas o talleres que fortalezcan temas relacionados con el adecuado manejo del ambiente, así como sobre saneamiento y cuidado de la salud pública (ver Figura 16).

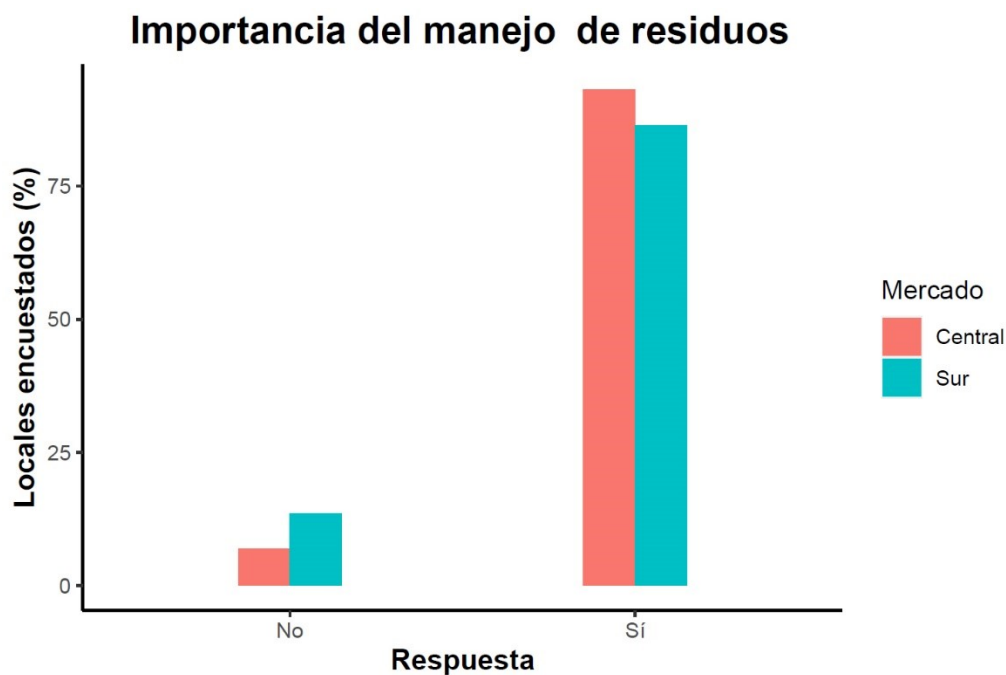


Figura 17. Importancia del manejo de residuos.
Elaboración propia.

Se evaluó la percepción por parte de los comerciantes en cuanto a la importancia del manejo de residuos generados como producto de sus actividades diarias, donde la gran mayoría respondió que si consideraban importante el que exista un adecuado manejo de residuos que disminuyan o mitiguen el impacto de los mismos sobre el ambiente. Sin embargo, cerca del 7% consideraron que de manera personal no es de gran importancia debido a que sus actividades comerciales no generan una cantidad significativa de desechos, es así el caso de los locales que se dedican a la venta de ropa y artesanías (ver Figura 17).

En el Mercado Sur, se evaluó si consideraban importante que se le diera un manejo adecuado a los residuos que son generados en sus locales comerciales a lo que el 97,9% respondió que sí consideraban importante el que exista un adecuado manejo de residuos que disminuyan o mitiguen el impacto de los mismos sobre el ambiente., mientras que el restante se abstuvo de dar una respuesta afirmativa debido a que no generan una gran cantidad de desechos ya que realizan actividades como venta de ropa y/o productos no perecibles (ver Figura 17).

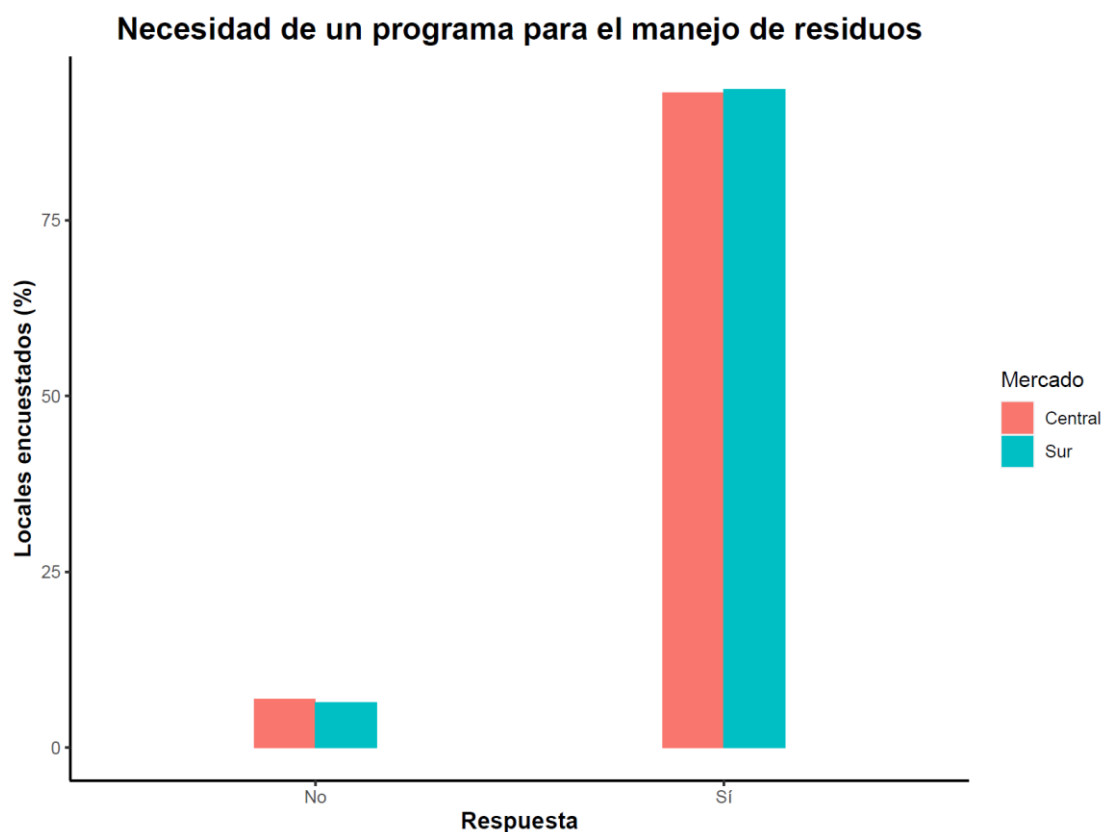


Figura 18. Necesidad de un programa para el manejo de residuos generados. Elaboración propia.

Se evaluó el interés de los comerciantes en la creación de un programa que ayude a mejorar el manejo de residuos generados en el Mercado Central, a lo que el 93,1% respondió que sí consideraban necesario implementar un sistema que monitoree constantemente los residuos que son productos de sus actividades comerciales. Por ejemplo, el programa de compost realizado por el ente encargado de la gestión de residuos en la ciudad (ver Figura 18).

Se evaluó el interés de los comerciantes en la creación de un programa que ayude a mejorar el manejo de residuos generados en el Mercado Sur, a lo que el 93,6% respondió que sí consideraban necesario implementar un sistema que monitoree constantemente los residuos que son productos de sus actividades comerciales (ver Figura 18).

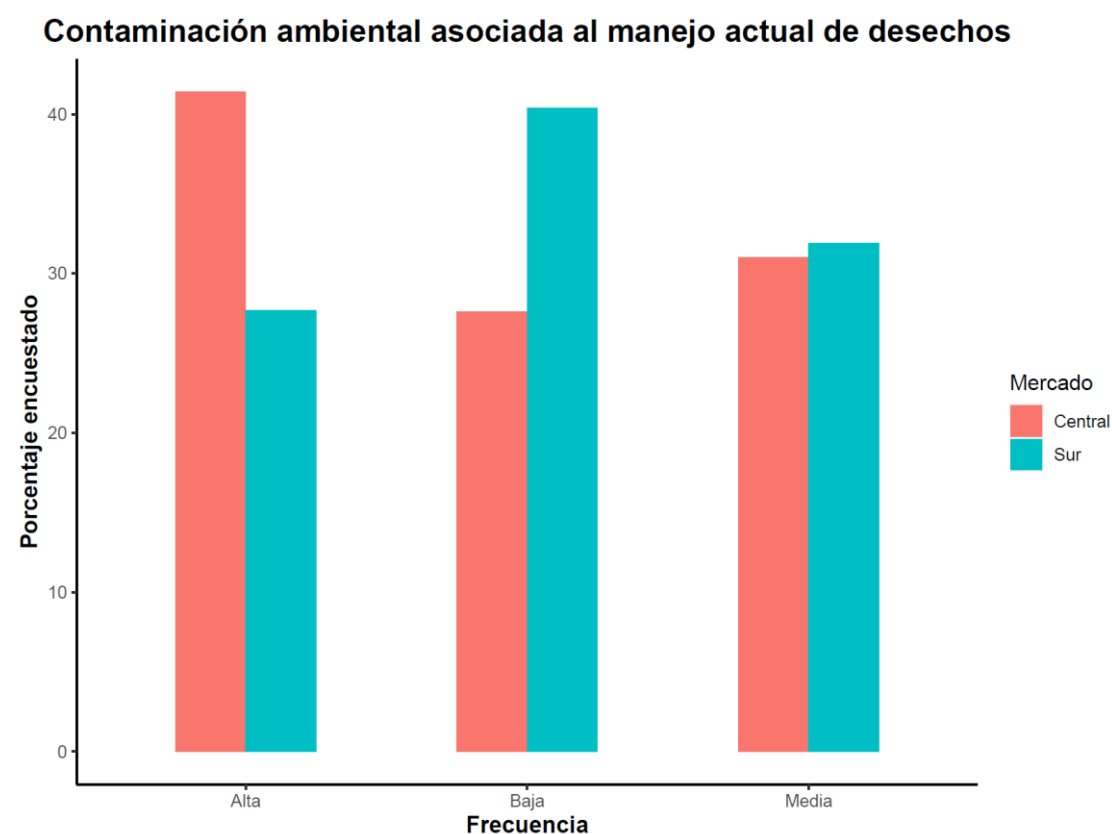


Figura 19. Generación de contaminación ambiental como consecuencia del manejo actual de los residuos.

Elaboración propia.

Con la finalidad de medir la apreciación por parte de los comerciantes del mercado, se consultó si consideraban que la cantidad de desechos generados en conjunto tenían influencia de alguna manera en la contaminación ambiental existente

en la ciudad de Tena, a lo que el 41,4% respondió que sí, porque consideran que el principal problema es en relación al sistema de recolección de desechos y cantidad de desechos generados. Sin embargo, aproximadamente el 50% de los locales comerciales consideran que no tiene mayor grado de incidencia. Esto puede deberse al desconocimiento sobre la importancia de la realización de procesos de saneamiento (ve figura 19).

Con la finalidad de medir la apreciación por parte de los comerciantes del mercado, se consultó si consideraban que la cantidad de desechos generados en conjunto tenían influencia de alguna manera en la contaminación ambiental existente en la ciudad de Tena, a lo que únicamente el 27,2% respondió que sí, porque consideran que el sistema de disposición final es precario en relación al tipo y cantidad de desechos generados. Sin embargo, del porcentaje restante el 40,4% de los locales comerciales consideran que no tiene mayor grado de incidencia. Esto puede deberse al desconocimiento sobre la importancia de la realización de procesos de saneamiento (ver Figura 19).

1.3 Tercera etapa: Propuesta de alternativas

Basados en la necesidad de contar con opciones adaptables al contexto de la provincia de Napo, la propuesta se enfocó en opciones de bajo costo con tecnologías implementadas en Latinoamérica (Martí-Herrero 2019, 678), frente a sistemas establecidos en Europa (Bertasini et al. 2023, 14) y Asia (Kua et al. 2022, 55; Tian et al. 2023, 55; Tun et al. 2020, 21) con altos rendimientos, que requieren calefacción, recirculación, control de parámetros automatizados y una creciente tendencia a la descentralización (Paladino 2022, 45; Del Río-Gamero et al. 2020, 22).

En el escenario S1, a pesar de sus beneficios, se presentan algunas desventajas. Por ejemplo, el hecho de que un producto con potencial uso (digestato) no sea aprovechado como fertilizante y sea enterrado en el relleno sanitario resulta contraproducente. Esto está vinculado a un potencial ahorro en el transporte y pago a los operadores. Otra desventaja es la quema directa del biogás, lo que implica pérdidas energéticas y la liberación directa de metano (CH₄), cuya influencia resulta en aproximadamente 25 veces más que el CO₂ (Tian et al. 2023, 54).

En el escenario S2 propuesto, se favorece una gestión más integral de los FW, con potencial reducción de GHG. A diferencia del escenario S1, en el S2 se

aprovechan los subproductos, especialmente el digestato destinado a jardines y parques municipales, mejorando la calidad del fertilizante respecto al abono generado en el BAU. La valorización del biogás en hogares cercanos proporciona beneficios energéticos adicionales, aunque se destaca la necesidad de tratamiento para remover ciertos gases previo a su uso.

1.4 Cuarta etapa: Comparación de emisiones de GHG

Respecto al BAU, se empleó la ecuación 3, que permitió estimar las 15 208,31 KgCO_{2eq} bajo el sistema actual de gestión por compostaje. Para los escenarios S1 y S2 se contempló la producción mensual de los dos mercados (10 146 kg), este valor se dividió para 30, de tal manera que se pudo encontrar la tasa de carga orgánica (OLR, por sus siglas en inglés) que equivale a una carga de FW de 338,21 kg/día.

El porcentaje de metano teórico equivale a 50-70%, mientras que para el dióxido de carbono 25-45% y otros gases en menor proporción como el H₂S (176 ppm). Se omitieron otros gases que se encuentran en menor concentración. De acuerdo a los cálculos de la ecuación 2, la producción de biogás equivale a 23,59 m³/d, que se distribuyen en metano y dióxido de carbono, 10,14 m³/d y 11,80 m³/d, respectivamente. Las densidades para el CH₄ y CO₂ son 0,668 kg/m³ y 1,842 kg/m³, respectivamente en condiciones normales (Engineering ToolBox, 2003); mientras que la densidad del biogás equivale a 1,2 kg/m³ (Moreno, 2021, 16).

Mientras que para el escenario S2 se contaría con emisiones evitadas debidas al uso de biogás. Es decir, la fracción de metano, por un proceso de combustión poder reducirse a dióxido de carbono en proporciones estequiométricas (CH₄ + 2H₂ = CO₂ + 2H₂O). Esto significa que en lugar de multiplicar por el coeficiente de 25 de la ecuación 6 para metano, se multiplicaría por el valor de 1 al ser combustionado y convertido en CO₂. Por lo que los valores en unidades estandarizadas serían 0,31 + 0,12 (ton CO_{2eq}), cuyo valor resultante es igual a 0,43 ton CO_{2eq} de acuerdo al S2.

A continuación, se presenta la Tabla 4, que recopila los parámetros más relevantes de diseño del biodigestor tubular. Se conoce que la longitud más eficaz de un biodigestor es 7 m, por lo que de acuerdo a los lineamientos de Martí-Herrero (2019) para cumplir una relación óptima entre longitud y diámetro del biodigestor, el

ancho del rollo debe ser de 1,75 m. Esta información es útil para determinar las dimensiones de la zanja.

Tabla 4
Dimensionamiento del biodigestor

Parámetro	Cantidades y unidades
Volumen total	89,01 m ³
Número de digestores	6
Volumen individual de los digestores	11 273,78 L
Densidad restos orgánicos	0,7 ton/ m ³
Ancho del rollo	1,75 m
Longitud de biodigestor y de la zanja	7,5 m
(L/D)	6,8 m
Longitud plástica por capa (se añade 1 m por amarre)	8,62 m
Plástico total (con reservorio) por biodigestor	16,4 m
Ancho inferior de zanja	0,6 m
Ancho superior de zanja	0,8 m
Profundidad de zanja	0,9 m

Elaboración propia.

Las emisiones de GHG se estimaron asumiendo sistemas de compostaje bajo cubierta (Parodi et al. 2022, 76) utilizando los lineamientos. Las emisiones de GHG se estimaron a partir de las emisiones de CH₄ y N₂O resultantes del proceso de compostaje.

Los parámetros utilizados para estimar el GHG del compostaje se basaron en los valores propuestos por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático para proyectos de desarrollo limpio (UNFCCC, 2017, 15), además de Ecoinvent 3.8 bajo los siguientes valores GWP100 de 25 CO_{2eq} para el CH₄ y 265 para el N₂O (IPCC, 2013, 47).

Las diferencias significativas en las emisiones de GEI se presentan en la tabla 5. El BAU emite 85 veces más CO_{2eq} que S1, y 107 veces más que S2. Además, comparando S1 y S2, se observa una ligera diferencia: Se estima que S1 emite 1,25 veces más CO_{2eq} que S2. Los resultados subrayan las ventajas potenciales que puede tener la AD en comparación con el compostaje a la hora de reducir los GEI como parte de la gestión de los FW, destacándose el S2 al tener menores emisiones que los otros escenarios.

Tabla 5
Comparación de las emisiones de GHG

Escenario	Emisiones de dióxido de carbono (kg CO _{2eq})
BAU	15 208,31
S1	177,56
S2	142,43

Elaboración propia.

2. Evaluación del potencial energético.

En la Tabla 6 se presenta un resumen del potencial energético para las alternativas propuestas. Es importante destacar que no se proporciona un valor para el escenario BAU debido a la falta de valorización energética actual para el sistema de compostaje bajo cubierta. Sin embargo, al comparar los valores de potencial energético entre los escenarios S1 y S2, se observa una diferencia significativa.

Específicamente, el valor de 877,87 MJ por año en el escenario S1 representa menos del 1% en comparación con el escenario S2, el cual alcanza los 118,162,43 MJ anuales. Esta disparidad evidencia el considerable potencial energético de la sustitución de biogás por gas licuado de petróleo (GLP) en los hogares circundantes, como se propone en el escenario S2.

Estos hallazgos sugieren que la implementación del escenario S2 podría generar un impacto sustancial en términos de generación de energía y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que respalda aún más la viabilidad y eficacia de esta alternativa propuesta.

Tabla 6
Comparación del potencial energético generado en las alternativas.

Escenario	Valor (MJ/año)
S1	877,87
S2	118 162,43

Elaboración propia.

Considerando que los hogares ecuatorianos utilizan frecuentemente cocinas en base a GLP, que consumen una media de 955,4 MJ mensuales. Esto equivale a 1,13 cilindros de GLP comprimidos según los estándares comerciales (Martínez, 2017, 184). Por lo tanto, después de examinar la producción de S2 (9846,87 MJ/mes), esto permitiría la sustitución de 11,65 cilindros de GLP mensualmente, que es suficiente

para el consumo doméstico de aproximadamente 10 familias mientras el sistema de AD siga operando.

3. Aproximación económica

A continuación, se presentan los cálculos detallados en la Tabla 7 respecto al BAU. El análisis incluyó la estimación del CAPEX y OPEX relacionados con la maquinaria y el personal necesarios. En particular, se evaluó el uso de una excavadora por 60 USD/h, que resulta en un gasto anual de 720 USD, y una volqueta por 25 USD/h, que resulta en un gasto anual de 300 USD. Adicionalmente, se incluyó la compra de geomembrana de polietileno a 7,3 USD por m², lo que resultó en un total de 334,72 USD anuales. El CAPEX fue de 1 354,7 USD.

Se calcularon los salarios de los empleados contratados para el OPEX: un maquinista de excavadora representaría 107,52 USD mensuales y 1 290,24 USD anuales; un maquinista de volqueta equivale a 252 USD mensuales y 3 024 USD anuales, y el equivalente a los trabajadores equivaldría 247,68 USD mensuales, lo que suma un gasto anual de 2 972,16 USD. El OPEX total fue de 7 286,4 USD. Esta estructura proporciona un marco financiero esencial para el BAU y su contribución al tratamiento de FW.

Tabla 7
CAPEX y OPEX para el BAU

CAPEX			
Nombre	Precio	Unidad	Estimación anual (USD)
Excavadora	60	USD/h	720
Volqueta	25	USD/h	300
Geomembrana polietileno	8,5	m ²	389,74
CAPEX (Total)			1409,7426
OPEX			
Nombre	Estimación anual (USD)		
Maquinista excavadora	1290,24		
Maquinista volqueta	3024		
2 Peones	2972,16		
OPEX (Total)	7286,4		

Elaboración propia.

Los costes para el S1 son presentados en la Tabla 8, mientras que los costes para el S2 son presentados en la Tabla 9. En la tabla 10 del Anexo 4 se detallan los

costos de los componentes para los escenarios S1 y S2. Los componentes necesarios para construir y operar un biodigestor incluyen codos, T, tuberías para transportar biogás, válvulas esféricas y reguladoras de presión, tuberías de entrada y salida, ligas de cámara de neumáticos y bridas. Se multiplicó el costo unitario de cada componente por la cantidad requerida, obteniendo así un subtotal por componente, que se suma posteriormente para calcular el valor de cada digestor.

En la parte inferior de la tabla, se identificaron y calcularon los costos de los elementos clave para el escenario S2, como la eliminación de H₂S. Estos elementos incluyen filtros de sulfuro de hidrógeno, válvulas reguladoras de presión, tuberías para el transporte de biogás, teflón y llaves de bola, todos esenciales para el funcionamiento seguro y eficiente del sistema.

Tabla 8
CAPEX y OPEX para el S1

CAPEX		
Nombre	Precio por unidad (USD)	Total (USD)
6 Digestores	5357,47	32144,82
1 Tanque de almacenamiento	1637,20	1637,20
Tuberías de biogás y válvulas para biogás (Accesorios)	1154,22	1154,22
1 Antorcha y arrestallamas para la quema de biogás	500,00	500,00
Total (USD)		35436,24
OPEX		
Nombre	Estimación anual (USD)	
Maquinista excavadora	1290,2	
Maquinista volqueta	3024,0	
2 Peones	2972,2	
Albañil	680,0	
Ayudante/Operador	460,0	
Técnico	1500,0	
Total (USD)	9926,40	

Elaboración propia.

Tabla 9
CAPEX y OPEX para el S2

CAPEX		
Nombre	Precio por unidad (USD)	Total (USD)
6 Digestores	5357,47	32144,82
1 Tanque de almacenamiento	1637,20	1637,20
Tuberías de biogás y válvulas para biogás (Accesorios)		2653,02
Total (USD)		36435,04
OPEX		
Nombre	Estimación anual (USD)	
Maquinista excavadora	1290,2	
Maquinista volqueta	3024,0	
2 Peones	2972,2	
Albañil	680,0	
Ayudante/Operador	460,0	
Técnico	1500,0	
Total (USD)	9926,40	

Elaboración propia.

Los gastos referidos al CAPEX y OPEX reflejan diferencias significativas entre los escenarios considerados, de acuerdo a las tablas anteriores. En comparación con los escenarios S1 y S2, el BAU presenta el menor CAPEX, con 1 409,74 USD. Sin embargo, su OPEX es considerablemente alto (7 286,4 USD), lo que indica mayores costos de operación continua. Por otro lado, los escenarios referidos a AD (S1 y S2) mantienen un OPEX constante de 9 926,4 USD, aunque requieren una inversión inicial más significativa, con 35 436,24 USD y 36 435,04 USD, respectivamente. A pesar de que los escenarios S1 y S2 requieren más capital inicial, pueden ofrecer ventajas en términos de sostenibilidad y operatividad a largo plazo. Por ejemplo, en otros estudios se ha encontrado que la AD puede proporcionar beneficios económicos superiores para el tratamiento de los desechos de alimentos (FW). Lee et al. (2021, 3) llevaron a cabo una evaluación económica de la AD al incorporar lixiviados de FW en una planta de tratamiento de aguas residuales, demostrando su viabilidad favorable. Anjum et al. (2023, 5) también demostraron la viabilidad de esta combinación de enfoques. Además, Paritosh et al. (2017, 5) y Dima et al. (2019, 8) enfatizaron el potencial de producción de bioenergía a través de la AD, resaltando las oportunidades económicas de utilizar FW para la generación de energía. Estos estudios subrayan las ventajas económicas, la viabilidad empresarial y la sostenibilidad financiera de la tecnología AD.

Conclusiones

La gestión integral de MSW en ciudades de la Amazonía es fundamental. Esta gestión promueve un desarrollo sostenible. Dado que más del 50% de los MSW corresponde a la fracción orgánica, principalmente residuos de alimentos, su efectiva valorización puede generar beneficios económicos, ambientales y sociales, fundamentales para la sostenibilidad.

Los desafíos clave en la valorización de los residuos de alimentos resaltan la importancia de la prevención en la jerarquía de gestión de los residuos sólidos municipales. En ausencia de medidas preventivas, la valorización se convierte en un componente fundamental de la gestión.

Considerando la importancia del contexto ecoturístico y los ecosistemas de gran biodiversidad, se seleccionó la ciudad de Tena como caso de estudio, centrándose en los residuos de alimentos generados en los mercados locales. Además, Tena es un importante punto de conexión con las provincias de la sierra para el comercio de productos.

El objetivo del estudio fue establecer un conocimiento detallado de los residuos de alimentos generados en los dos mercados municipales de Tena, identificar alternativas potenciales para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero mediante la digestión anaerobia, evaluar su viabilidad energética y económica.

Se compararon alternativas basadas en variantes de baja tecnología y desde el punto de vista del potencial de reducción de emisiones de GHG. Se llevó a cabo una aproximación económica, y se evaluó el aspecto social a través de encuestas a los dueños de los locales dentro de los mercados.

Se encontró que los mercados incluyen aproximadamente el 63% de materia orgánica y el 23% de fracción lignocelulosa, con potencial para su tratamiento biológico. Sin embargo, algunos desafíos actuales, como el olor y la presencia de plagas, requieren la implementación de programas de gestión de residuos.

El modelo de gestión actual, basado en el compostaje, tiene beneficios directos para el GAD municipal de Tena. Sin embargo, su principal limitación radica en la

baja calidad del compost y la falta de pretratamiento, lo que resulta en la presencia de elementos de tamaño mediano o grande al final del proceso.

Los escenarios S1 y S2, basados en la digestión anaerobia, reducen significativamente las emisiones de GHG en comparación con el escenario BAU. Esta notable reducción de emisiones contribuye a la mitigación del cambio climático en el contexto de una ciudad dentro de la Amazonía.

Se reconoce la necesidad de evaluar otros indicadores ambientales además de la huella de carbono como: agotamiento de recursos abióticos y/o bióticos, acidificación, eutrofización, toxicidad, etc.

Los escenarios S1 y S2 difieren significativamente en la producción potencial de energía anual, destacando la mayor eficiencia energética del escenario S2. Aunque ambos escenarios requieren una inversión inicial más alta, los costos operativos podrían ser más predecibles y eficientes en los años posteriores.

Este estudio es una base para futuras investigaciones en contextos similares, tanto en la Amazonía como en otras regiones del sur global. Se recomienda complementar el estudio mediante la implementación de una prueba piloto a escala reducida para una fracción de los residuos ingresados al relleno sanitario. Se sugiere monitorear continuamente las entradas y salidas del proceso, utilizando parámetros específicos como la demanda química de oxígeno soluble (sCOD), pH, temperatura, ácidos grasos volátiles (VFA), sólidos volátiles (VS), sólidos totales (TS) y contenido de metano.

Esta información permitirá profundizar en aspectos clave para optimizar la operación y facilitar su escalado, después de realizar una evaluación energética y ambiental mediante análisis de ciclo de vida y eficiencia energética, respectivamente que permita un análisis integral para la mejora del sistema de gestión actual en los municipios de la Amazonía.

Además, se sugiere llevar a cabo un análisis económico adicional para evaluar los posibles ingresos por bonos de carbono a largo plazo por la potencial aplicación a fondos tanto nacionales como extranjeros mediante la presentación de proyectos a largo plazo. Se recomienda también estimar otros indicadores financieros como el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR).

La elección del escenario ideal dependerá del presupuesto asignado por parte de los tomadores de decisiones. La producción de biogás y digestato representa una

alternativa de interés para la gestión de residuos, la recuperación de nutrientes y la generación de energía en contextos como la Amazonía.

Obras citadas

- Afrane, G., & Ntiamoah, A. 2011. "Comparative Life Cycle Assessment of Charcoal, Biogas, and Liquefied Petroleum Gas as Cooking Fuels in Ghana". *Journal of Industrial Ecology*, 15(4). <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00350.x>
- Agustini, Caroline Borges, Marisa da Costa, and Mariliz Gutterres. 2020. "Biogas from Tannery Solid Waste Anaerobic Digestion Is Driven by the Association of the Bacterial Order Bacteroidales and Archaeal Family Methanosaetaceae." *Applied Biochemistry and Biotechnology* 192 (2):482-493. doi: 10.1007/s12010-020-03326-6.
- Ali, Asim, Rasool Bux Mahar, y Syed Tufail Hussain Sherazi. 2019. "Methane Augmentation of Anaerobic Digestion of Food Waste in the Presence of Fe₃O₄ and Carbamide Capped Fe₃O₄ Nanoparticles". *Waste and Biomass Valorization* 11 (8):4093. Doi: 10.1007/s12649-019-00732-8.
- Alibardi, L., K. Green, L. Favaro, P. Vale, A. Soares, E. Cartmell, and Y. Bajón Fernández. 2017. "Performance and stability of sewage sludge digestion under CO₂ enrichment: A pilot study." *Bioresource Technology* 245:581-589. doi: 10.1016/j.biortech.2017.08.071.
- AlRyalat, Saif Aldeen S, Lna W Malkawi, y Shaher M Momani. 2019. "Comparing bibliometric analysis using PubMed, Scopus, and Web of Science databases". *JoVE (Journal of Visualized Experiments)* (152):e58494.
- Al-Wahaibi, A., A. I. Osman, A. H. Al-Muhtaseb, O. Alqaisi, M. Baawain, S. Fawzy, y D. W. Rooney. 2020. "Techno-economic evaluation of biogas production from food waste via anaerobic digestion". *Sci Rep* 10 (1):15719. Doi: 10.1038/s41598-020-72897-5.
- Anaya-Reza, Omar, María F. Altamirano-Corona, Gabriel Castelán-Rodríguez, Sergio A. García-González, Alfonso Durán-Moreno. 2021. "Techno-Economic and Environmental Assessment for Biomethane Production and Cogeneration Scenarios from OFMSW in Mexico". *Waste and Biomass Valorization* 13 (2):1059-1075. Doi: 10.1007/s12649-021-01592-x.

- Andreides, Markéta, Petr Dolejš, and Jan Bartáček. 2022. "The prediction of WWTP influent characteristics: Good practices and challenges." *Journal of Water Process Engineering* 49. doi: 10.1016/j.jwpe.2022.103009.
- Anjum, Muzammil, Mobeena Anees, Saima Qadeer, Azeem Khalid, Rajeev Kumar, and M.A. Barakat, 2023. "A recent progress in the leachate pretreatment methods coupled with anaerobic digestion for enhanced biogas production: feasibility, trends, and techno-economic evaluation". *International Journal of Molecular Sciences*(1), 24:763. <https://doi.org/10.3390/ijms24010763>
- Anukam, Anthony, Ali Mohammadi, Muhammad Naqvi, y Karin Granström. 2019 "A Review of the Chemistry of Anaerobic Digestion: Methods of Accelerating and Optimizing Process Efficiency". *Processes* 7 (8). Doi: 10.3390/pr7080504.
- APHA. 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*: American Public Health Association.
- Arthur, R., Baidoo, M. F., Brew-Hammond, A., & Bensah, E. C. 2011. "Biogas generation from sewage in four public universities in Ghana: A solution to potential health risk". *Biomass and Bioenergy*, 35(7). <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.04.019>
- Babu, Renju, Patricia M. Prieto Veramendi, y Eldon R. Rene. 2021. "Strategies for resource recovery from the organic fraction of municipal solid waste". *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 3. Doi: 10.1016/j.cscee.2021.100098.
- Bajon Fernandez, Y., A. Soares, P. Vale, K. Koch, A. L. Mase, and E. Cartmell. 2019. "Enhancing the anaerobic digestion process through carbon dioxide enrichment: initial insights into mechanisms of utilization." *Environ Technol* 40 (13):1744-1755. doi: 10.1080/09593330.2019.1597173.
- Bajón Fernández, Y., K. Green, K. Schuler, A. Soares, P. Vale, L. Alibardi, and E. Cartmell. 2015. "Biological carbon dioxide utilisation in food waste anaerobic digesters." *Water Research* 87:467-475. doi: 10.1016/j.watres.2015.06.011.
- Barboto, Víctor Molina, Jhon Izquierdo Morán, y Roberto Pauta Ríos. 2020. "Efluentes de biodigestores para la producción de bioabonos y biogás". *Magazine de las Ciencias: Revista de Investigación e Innovación* 5 (6).
- Bartolozzi, I., E. Baldereschi, T. Daddi, y F. Iraldo. 2018. "The application of life cycle assessment (LCA) in municipal solid waste management: A comparative

- study on street sweeping services”. *Journal of Cleaner Production* 182:455. Doi: 10.1016/j.jclepro.2018.01.230.
- Batool F, Kurniawan TA, Mohyuddin A, Othman MH, Aziz F, Al-Hazmi H, Goh HH, Anouzla A. 2024 . “Environmental impacts of food waste management technologies: A critical review of life cycle assessment (LCA) studies.” *Trends in Food Science & Technology* 104287 <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104287>.
- Batstone, D., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S., Pavlostathis, S., Rozzi, A., Вавилин, В. 2002. “The IWA anaerobic digestion model no 1 (ADM1)”. *Water Science & Technology*, 45(10), 65-73. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0292>
- Bernstad Saraiva Schott, Anna, Henrik Wenzel, y Jes la Cour Jansen. 2016. “Identification of decisive factors for greenhouse gas emissions in comparative life cycle assessments of food waste management – an analytical review”. *Journal of Cleaner Production* 119:13. Doi: 10.1016/j.jclepro.2016.01.079.
- Bertasini, Davide, Federico Battista, Fabio Rizzioli, Nicola Frison, y David Bolzonella. 2023. “Decarbonization of the European natural gas grid using hydrogen and methane biologically produced from organic waste: A critical overview”. *Renewable Energy* 206:386. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.029>.
- Bhatia, Latika, Harit Jha, Tanushree Sarkar, and Prakash Kumar Sarangi. 2023. “Food Waste Utilization for Reducing Carbon Footprints towards Sustainable and Cleaner Environment: A Review”. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 20 (3). Doi: 10.3390/ijerph20032318.
- Blengini, Gian Andrea. 2008. “Using LCA to evaluate impacts and resources conservation potential of composting: A case study of the Asti District in Italy”. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(12), 1373-1381.
- Cando, Christian. 2021. *Estadística de Información Ambiental. Económica en Gobiernos Autónomos. Descentralizados Municipales Dirección de Estadísticas Agropecuarias y Ambientales – INEC*.
- Cao, X., R. He, and M. Jia. 2023. “Characterization of melanoidins in thermal hydrolysis sludge and effects on dewatering performance.” *Environ Res* 239 (Pt 1):117226. doi: 10.1016/j.envres.2023.117226.

- Casallas-Ojeda, Miguel Reinaldo, Luis Fernando Marmolejo-Rebellón, y Patricia Torres-Lozada. 2020. "Identification of Factors and Variables that Influence the Anaerobic Digestion of Municipal Biowaste and Food Waste". *Waste and Biomass Valorization* 12 (6):2889. Doi: 10.1007/s12649-020-01150-x.
- Cecchi, Franco, and Cristina Cavinato. 2019. "Smart Approaches to Food Waste Final Disposal". *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16 (16). Doi: 10.3390/ijerph16162860
- Chapleur, O., A. Guenne, D. N. Rutledge, and F. Puig-Castellvi. 2023. "Monitoring of cellulose-rich biowaste co-digestion with 3D fluorescence spectroscopy and mass spectrometry-based metabolomics." *Chemosphere* 349:140824. doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.140824.
- Chen, S., Huang, J., Xiao, T., Gao, J., Bai, J., Luo, W., & Dong, B. 2020. "Carbon emissions under different domestic waste treatment modes induced by garbage classification: Case study in pilot communities in Shanghai, China". *Science of the Total Environment*, 717, 137193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137193>
- Chen, Wenhao, Jie Liu, Bin-Hao Zhu, Man-Yi Shi, Shi-Qi Zhao, Miao-Zi He, Peng Yan, Fang Fang, Jin-Song Guo, Weimin Li, and You-Peng Chen. 2022. "The GHG mitigation opportunity of sludge management in China." *Environmental Research* 212. doi: 10.1016/j.envres.2022.113284.
- Chen, Yunmin, Wenjie Xu, Liangtong Zhan, Han Ke, Jie Hu, He Li, Pengcheng Ma, and Junchao Li. 2021. "Geoenvironmental Issues in High-Food-Waste-Content Municipal Solid Waste Landfills." *Journal of the Indian Institute of Science* 101 (4):603-623. doi: 10.1007/s41745-021-00233-5.
- Chicaiza Ortiz, Cristhian David, Vanessa Pamela Navarrete Villa, Christian Orlando Camacho López, y Ángel Fabián Chicaiza Ortiz. 2020. "Evaluation of municipal solid waste management system of Quito – Ecuador through life cycle assessment approach". *LALCA: Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida* 4. Doi: 10.18225/lalca.v4i0.5206.
- Chicaiza, C. D., Logroño, W. N., Chicaiza, Á. F., Chávez, W. N., Cañar, M. E. O. (2022). Environmental Management Strategies in Kichwa Communities of the Amazon of Ecuador. *Revista Ciencia UNEMI*, 15(39), 27-34. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol15iss39.2022pp27-34p>

- Cifuentes, Katerine, y Hugo Vega. 2015. "Implementación de un prototipo de triturador para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos de la Parroquia Tena-Provincia Napo en el 2014".
- Cordova, Stephanie S., Marcus Gustafsson, Mats Eklund, and Niclas Svensson. 2023. "What should we do with CO₂ from biogas upgrading?" *Journal of CO₂ Utilization* 77. doi: 10.1016/j.jcou.2023.102607.
- Crutchik, Dafne, Javiera Barboza, José Ramón Vázquez-Padín, Alba Pedrouso, Ángeles Val del Río, Anuska Mosquera-Corral, and José Luis Campos. 2023. "Integrating food waste management into urban wastewater treatment: Economic and environmental impacts." *Journal of Environmental Management* 345. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.118517.
- Cuetero-Martínez, Yovany, Oscar Monroy-Hermosillo, José Félix Aguirre-Garrido, Ma Eugenia de la Torre-Hernández, and Hugo Ramírez-Saad. 2023. "Changes in the prokaryotic communities occurring along a two-stage anaerobic digestion system treating the organic fraction of solid waste." *Journal of Hazardous Materials Advances* 12. doi: 10.1016/j.hazadv.2023.100383.
- D' Silva, Tinku Casper, Adya Isha, Ram Chandra, Virendra Kumar Vijay, Paruchuri Mohan V. Subbarao, Ritunesh Kumar, Ved Prakash Chaudhary, Harjit Singh, Abid Ali Khan, Vinay Kumar Tyagi, and Kornél L. Kovács. 2021. "Enhancing methane production in anaerobic digestion through hydrogen assisted pathways – A state-of-the-art review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 151. doi: 10.1016/j.rser.2021.111536.
- Dai, M., Yang, H., Wang, J., Yang, F., Zhang, Z., Yu, Y., Liu, G., & Feng, X. 2023. "Energetic, economic and environmental (3E) optimization of hydrogen production process from coal-biomass co-gasification based on a novel method of Ordering Preference Targeting at Bi-Ideal Average Solutions (OPTBIAS)". *Computers and Chemical Engineering*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.108084>
- Dalke, Rachel, Delaney Demro, Yusra Khalid, Haoran Wu, and Meltem Urgun-Demirtas. 2021. "Current status of anaerobic digestion of food waste in the United States". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 151. Doi: 10.1016/j.rser.2021.111554

- Deago, E., M. Ramírez, K. Espino, D. Nieto, M. Barragán, M. García, and J. Guevara-Cedeño. 2023. "Optimizing Anaerobic Digestion at Ambient Temperatures: Energy Efficiency and Cost Reduction Potential in Panama." *Water (Switzerland)* 15 (14). doi: 10.3390/w15142653.
- Deena, S. R., A. S. Vickram, S. Manikandan, R. Subbaiya, N. Karmegam, B. Ravindran, S. W. Chang, and M. K. Awasthi. 2022. "Enhanced biogas production from food waste and activated sludge using advanced techniques - A review." *Bioresour Technol* 355:127234. doi: 10.1016/j.biortech.2022.127234.
- Del Río-Gamero, Beatriz, Alejandro Ramos-Martín, Noemi Melián-Martel, y Sebastián Pérez-Báez. 2020. "Water-Energy Nexus: A Pathway of Reaching the Zero Net Carbon in Wastewater Treatment Plants". *Sustainability* 12 (22). Doi: 10.3390/su12229377.
- Diéguez-Santana, Karel, Cristhian Chicaiza-Ortiz, Jingxin Zhang, y Washington Logroño. 2022. "Anaerobic digestate: pollutants, ecotoxicology, and legislation". In *Anaerobic Digestate Management*, 359. https://doi.org/10.2166/9781789062755_0359
- Dima, Andreea-Daniela, Carmen Mateescu, Oana Cristina Pârvulescu, Eduard-Marius Lungulescu, and Nicoleta Nicula, 2019. "Theoretical and experimental results on the recovery of potato processing residuals by anaerobic digestion". *Revista De Chimie* (7), 70:2524-2529. <https://doi.org/10.37358/rc.19.7.7373>
- Fuldauer, Lena I., Brenda M. Parker, Rokiah Yaman, y Aiduan Borrion. 2018. "Managing anaerobic digestate from food waste in the urban environment: Evaluating the feasibility from an interdisciplinary perspective". *Journal of Cleaner Production* 185:929. Doi: 10.1016/j.jclepro.2018.03.045.
- Funari, V., Toller, S., Vitale, L., Santos, R. M., & Gomes, H. I. 2023. "Urban mining of municipal solid waste incineration (MSWI) residues with emphasis on bioleaching technologies: a critical review". *Environmental Science and Pollution Research*, 30(21), 59128–59150. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26790-z>
- GAD Provincial de Napo (GADP-Napo). 2020. Resumen ejecutivo plan de desarrollo y ordenamiento territorial Napo. https://info.napo.gob.ec/wp-content/uploads/2022/06/Propuesta_Plan_Desarrollo-y-Ordenamiento-Territorial_Provincial_Napo.pdf

- Gahlot, P., G. Balasundaram, B. Ahmed, A. A. Kazmi, and V. K. Tyagi. 2023. "Microbe–material interactions for direct interspecies electron transfer in anaerobic digestion." In *Material-Microbes Interactions: Environmental Biotechnological Perspective*, 47-58. Elsevier.
- Galgani, P., van der Voet, E., & Korevaar, G. 2014. "Composting, anaerobic digestion and biochar production in Ghana. Environmental–economic assessment in the context of voluntary carbon markets". *Waste Management*, 34(12), 2454-2465. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.07.027>
- Golwala, Sitansh Kumar, y Dr Kartik Kothari. 2021. "Maximizing Biogas Yield Through Inoculum and Optimizing Various Operating Parameters: A Review". *Proceedings of the Recent Advances in Renewable Energy Sources- RARES2021*.
- Gu, S., R. Wang, H. Xing, M. Yu, S. Shen, L. Zhao, J. Sun, and Y. Li. 2022. "Effects of different low temperature conditions on anaerobic digestion efficiency of pig manure and composition of archaea community." *Water Science and Technology* 86 (5):1181-1192. doi: 10.2166/wst.2022.267.
- Guallo Aguinda, Ney Gary, Liliana Bárbara Sarduy Pereira, Erik Orozco Crespo, y Karel Diéguez-Santana. 2020. "Las producciones más limpias en el sector textil manufacturero. Un caso de estudio en Tena, Napo, Ecuador". *Mikarimin. Revista Científica Multidisciplinaria* 6 (0):201.
- Han, Youl, Hyatt Green, and Wendong Tao. 2020. "Reversibility of propionic acid inhibition to anaerobic digestion: Inhibition kinetics and microbial mechanism." *Chemosphere* 255:126840.
- Harirchi, S., S. Wainaina, T. Sar, S. A. Nojourni, M. Parchami, M. Parchami, S. Varjani, S. K. Khanal, J. Wong, M. K. Awasthi, and M. J. Taherzadeh. 2022. "Microbiological insights into anaerobic digestion for biogas, hydrogen or volatile fatty acids (VFAs): a review." *Bioengineered* 13 (3):6521-6557. doi: 10.1080/21655979.2022.2035986.
- He, Chao, Hao Song, Tingting Hou, Youzhou Jiao, Gang Li, Yuri V. Litti, Quanguo Zhang, and Liang Liu. 2023. "Simultaneous addition of CO₂-nanobubble water and iron nanoparticles to enhance methane production from anaerobic digestion of corn straw." *Bioresource Technology* 377. doi: 10.1016/j.biortech.2023.128947.

- Indugu, Nagaraju, Bonnie Vecchiarelli, Linda D. Baker, James D. Ferguson, Jairam K. P. Vanamala, and Dipti W. Pitta. 2017. "Comparison of rumen bacterial communities in dairy herds of different production." *BMC Microbiology* 17 (1). doi: 10.1186/s12866-017-1098-z.
- Iñiguez-Gallardo, V., 2022. Contribución de los mercados y ferias libres a la soberanía alimentaria, economía social y solidaria y cambio climático. IV Encuentro Internacional de Investigación en Economía Solidaria e Innovación Social: Conexión Generacional. Universidad Cooperativa de Colombia. <https://repository.ucc.edu.co/handle/20.500.12494/46820>.
- Jasińska, Anna, Anna Grosser, and Erik Meers. 2023. "Possibilities and Limitations of Anaerobic Co-Digestion of Animal Manure—A Critical Review." *Energies* 16 (9). doi: 10.3390/en16093885.
- Jiang, J., L. Li, Y. Li, Y. He, C. Wang, y Y. Sun. 2020. "Bioaugmentation to enhance anaerobic digestion of food waste: Dosage, frequency and economic analysis". *Bioresour Technol* 307:123256. Doi: 10.1016/j.biortech.2020.123256.
- Joselyne, Nikuze Marie, Muthumbi Waweru, Ayub N. Gitau, Uliho Alphonse, y Munyensanga Patrick. 2020. "Evaluating Anaerobic Digestion Technology in Reducing the Quantity of Solid Waste: Case of Kigali Dumpsite". *Journal of Geoscience and Environment Protection* 08 (05):204. Doi: 10.4236/gep.2020.85013.
- Kamal, Hina, Cheng Foh Le, Andrew Salter, and Asgar Ali. 2021. "Extraction of protein from food waste: An overview of current status and opportunities." *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 20. doi: 10.1111/1541-4337.12739.
- Karekar, S., R. Stefanini, and B. Ahring. 2022. "Homo-Acetogens: Their Metabolism and Competitive Relationship with Hydrogenotrophic Methanogens." *Microorganisms* 10 (2). doi: 10.3390/microorganisms10020397.
- Kong, D., K. Zhang, J. Liang, W. Gao, and L. Du. 2019. "Methanogenic community during the anaerobic digestion of different substrates and organic loading rates." *MicrobiologyOpen* 8 (5). doi: 10.1002/mbo3.709.
- Koonaphapdeelert, Sirichai, Pruk Aggarangsi, and James Moran. 2020. "Introduction to Biomethane." In *Biomethane : Production and Applications*, edited by Sirichai Koonaphapdeelert, Pruk Aggarangsi and James Moran, 1-15. Singapore: Springer Singapore.

- Kowalczyk-Juśko, Alina, Patrycja Pochwatka, Jakub Mazurkiewicz, Jakub Pulka, Barbara Kępowicz, Damian Janczak, y Jacek Dach. 2023. "Reduction of Greenhouse Gas Emissions by Replacing Fertilizers with Digestate". *Journal of Ecological Engineering* 24 (4):312. Doi: 10.12911/22998993/161013.
- Kua, Harn Wei, Xin He, Hailin Tian, Abhimanyu Goel, Tingting Xu, Wen Liu, Dingding Yao, Srikanth Ramachandran, Xiao Liu, Yen Wah Tong, Yanjun Dai, Yinghong Peng, y Chi-Hwa Wang. 2022. "Life cycle climate change mitigation through next-generation urban waste recovery systems in high-density Asian cities: A Singapore Case Study". *Resources, Conservation and Recycling* 181:106265. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106265>.
- Kumar, Atul, y S. R. Samadder. 2020. "Performance evaluation of anaerobic digestion technology for energy recovery from organic fraction of municipal solid waste: A review". *Energy* 197. Doi: 10.1016/j.energy.2020.117253.
- Kundu, R., B. Kunnoth, S. Pilli, V. R. Polisetty, and R. D. Tyagi. 2023. "Biochar symbiosis in anaerobic digestion to enhance biogas production: A comprehensive review." *Journal of Environmental Management* 344. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.118743.
- Kundu, R., B. Kunnoth, S. Pilli, V. R. Polisetty, and R. D. Tyagi. 2023. "Biochar symbiosis in anaerobic digestion to enhance biogas production: A comprehensive review". *Journal of Environmental Management* 344. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.118743.
- Kunwar Paritosh, Sandeep K. Kushwaha, Monika Yadav, Nidhi Pareek, Aakash Chawade, Vivekanand Vivekanand, 2017. "Food Waste to Energy: An Overview of Sustainable Approaches for Food Waste Management and Nutrient Recycling". *BioMed Research International* 19. <https://doi.org/10.1155/2017/2370927>
- Lachos-Perez, D., César Torres-Mayanga, P., Abaide, E. R., Zobot, G. L., De Castilhos, F. 2022. "Hydrothermal carbonization and Liquefaction: differences, progress, challenges, and opportunities". *Bioresource Technology*, 343. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126084>
- Leca, Estelle, Bastien Zennaro, Jérôme Hamelin, Hélène Carrère, y Cecilia Sambusiti. 2023. "Use of additives to improve collective biogas plant performances: A comprehensive review". *Biotechnology Advances*:108129.

- Lee, Pul-Eip, Wonbae Lee, Hee-Sung Moon, Jun-Hwa Kwon, Hueon Namkung, Wonseok Lee, Myungsoo Yoo et al., 2021. "A feasibility study on effect of food waste leachate additions in the full-scale waste leachate treatment facility after the african swine fever outbreak in South Korea", *Energies* (23), 14:8045. <https://doi.org/10.3390/en14238045>
- Li, J., L. Li, M. Suvarna, L. Pan, M. Tabatabaei, Y. S. Ok, and X. Wang. 2022. "Wet wastes to bioenergy and biochar: A critical review with future perspectives." *Sci Total Environ* 817:152921. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.152921.
- Li, Kun, Kaijun Wang, Jingyao Wang, Quan Yuan, Chuan Shi, Jing Wu, y Jiane Zuo. 2020. "Performance assessment and metagenomic analysis of full-scale innovative two-stage anaerobic digestion biogas plant for food wastes treatment". *Journal of Cleaner Production* 264. Doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121646.
- Li, Yue, Yinguang Chen, y Jiang Wu. 2019. "Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: A review". *Applied Energy* 240:120. Doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.243.
- Lin, Long, Ajay Shah, Harold Keener, and Yebo Li. 2019. "Techno-economic analyses of solid-state anaerobic digestion and composting of yard trimmings". *Waste management* 405-416 <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.037>.
- Liu, Minrui, Yaqin Wei, and Xiaoyun Leng. 2021. "Improving biogas production using additives in anaerobic digestion: A review." *Journal of Cleaner Production* 297. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126666.
- Liu, Minrui, Yaqin Wei, y Xiaoyun Leng. 2021. "Improving biogas production using additives in anaerobic digestion: A review". *Journal of Cleaner Production* 297. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126666.
- Liu, Tingting, Qian Zhang, Xiaowen Kang, Jiaqi Hou, Tao Luo, and Yi Zhang. 2022. "Household Food Waste to Biogas in Västerås, Sweden: A Comprehensive Case Study of Waste Valorization." *Sustainability* 14 (19). doi: 10.3390/su141911925.
- Liu, Tingting, Qian Zhang, Xiaowen Kang, Jiaqi Hou, Tao Luo, and Yi Zhang. 2022. "Household Food Waste to Biogas in Västerås, Sweden: A Comprehensive Case Study of Waste Valorization" *Sustainability* 14 (19). Doi: 10.3390/su141911925.

- Liu, Xiao, Xingbao Gao, Wei Wang, Lei Zheng, Yingjun Zhou, y Yifei Sun. 2012. "Pilot-scale anaerobic co-digestion of municipal biomass waste: Focusing on biogas production and GHG reduction". *Renewable Energy* 44:463. Doi: 10.1016/j.renene.2012.01.092.
- Liu, Zhen, Jinzhi Huang, Yiqing Yao, Mengyi Wang, and Anjie Li. 2022. "Effect of Pretreatment by Freeze Vacuum Drying on Solid-State Anaerobic Digestion of Corn Straw." *Fermentation* 8 (6). doi: 10.3390/fermentation8060259.
- Logan, M., and C. Visvanathan. 2019. "Management strategies for anaerobic digestate of organic fraction of municipal solid waste: Current status and future prospects." *Waste Manag Res* 37 (1_suppl):27-39. doi: 10.1177/0734242X18816793.
- Loyola, María Cristina Acosta. 2005. "Propuesta para la Gestión Integral de Residuos Sólidos en la Ciudad de Vinez, Provincia de los Ríos-Ecuador".
- Luo, G., D. De Francisci, P. G. Kougias, T. Laura, X. Zhu, and I. Angelidaki. 2015. "New Steady-State Microbial Community Compositions and Process Performances in Biogas Reactors Induced by Temperature Disturbances." In *Biological Treatment of Solid Waste: Enhancing Sustainability*, 83-104. Apple Academic Press.
- MAE. 2020. Manual de aprovechamiento de residuos orgánicos municipales.
- Mahmudul, H. M., Delwar Akbar, Mohammad Rasul, Ramadas Narayanan, and Md Mofijur Rahman. 2021. "Estimation of the sustainable production of gaseous biofuels, generation of electricity, and reduction of greenhouse gas emissions using food waste in anaerobic digesters". *Fuel* 310. Doi : 10.1016/j.fuel.2021.122346.
- Márquez, P., M. C. Gutiérrez, M. Toledo, J. Alhama, C. Michán, and M. A. Martín. 2022. "Activated sludge process versus rotating biological contactors in WWTPs: Evaluating the influence of operation and sludge bacterial content on their odor impact". *Process Safety and Environmental Protection* 160:775-785. doi: 10.1016/j.psep.2022.02.071.
- Martí-Herrero, J., G. Soria-Castellón, A. Diaz-de-Basurto, R. Alvarez, y D. Chemisana. 2019. "Biogas from a full scale digester operated in psychrophilic conditions and fed only with fruit and vegetable waste". *Renewable Energy* 133:676. Doi: 10.1016/j.renene.2018.10.030.

- Martí-Herrero, Jaime. 2019. *Biodigestores Tubulares: guía de diseño y manual de instalación* (2019) J. Martí Herrero.
- Martínez, J., Martí-Herrero, J., Villacís, S., Riofrio, A. J., & Vaca, D. 2017. "Analysis of energy, CO₂ emissions and economy of the technological migration for clean cooking in Ecuador". *Energy Policy*, 107, 182-187. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.04.033>
- Matsuda, Takeshi, Junya Yano, Yasuhiro Hirai, y Shin-ichi Sakai. 2012. "Life-cycle greenhouse gas inventory analysis of household waste management and food waste reduction activities in Kyoto, Japan". *The International Journal of Life Cycle Assessment* 17 (6):743. Doi: 10.1007/s11367-012-0400-4.
- Meena, M., S. Shubham, K. Paritosh, N. Pareek, y V. Vivekanand. 2021. "Production of biofuels from biomass: Predicting the energy employing artificial intelligence modelling". *Bioresour Technol* 340:125642. Doi: 10.1016/j.biortech.2021.125642.
- Mei, Ran, Masaru K. Nobu, Takashi Narihiro, and Wen-Tso Liu. 2020. "Metagenomic and Metatranscriptomic Analyses Revealed Uncultured Bacteroidales Populations as the Dominant Proteolytic Amino Acid Degraders in Anaerobic Digesters." *Frontiers in Microbiology* 11. doi: 10.3389/fmicb.2020.593006.
- Ministerio de Trabajo. 2022. Acuerdo Ministerial No. MDT-2022- 216 Moreno M. 2011. *Manual para la producción de biogás* FAO. ISBN 978-95-306892-0 <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- Mouftahi, Mawaheb, Pietro Bartocci, Nawel Tlili, Nejib Hidouri, Federica Liberti, and Francesco Fantozzi. 2022. "Pilot-Scale Anaerobic Digestion of Food Waste Under Mesophilic Conditions: A Case-Study at Umbria Region (Italy)" *In Water-Energy-Nexus in the Ecological Transition*, 425-427.
- Muntau, M., M. Leuhn, D. Polag, Y. Bajon-Fernandez, and K. Koch. 2021. "Effects of CO₂ enrichment on the anaerobic digestion of sewage sludge in continuously operated fermenters." *Bioresour Technol* 332:125147. doi: 10.1016/j.biortech.2021.125147.
- Mutsvene, Boldwin, Manimagalay Chetty, Sheena Kumari, y Faizal Bux. 2023. "Biohydrogen production from brewery wastewater in an Anaerobic baffled reactor. A preliminary techno-economic evaluation". *South African Journal of Chemical Engineering* 43:9. Doi: 10.1016/j.sajce.2022.09.012.

- Narea, Marcel Szantó. 2021. "Escenario actual y prospectivo de la gestión de los residuos sólidos urbanos en la región de América Latina y el Caribe". *Estado y Políticas Públicas* 17:85. Doi: https://revistaeypp.flacso.org.ar/files/revistas/1635737163_85-101.pdf.
- Narváez, R., G. Vargas, y F. Espinoza. 2013. "Potential of waste-to-energy implementation in Ecuador". *Int. J. Energy Eng* 3 (6):279.
- Nie, W., S. He, Y. Lin, J. J. Cheng, and C. Yang. 2024. "Functional biochar in enhanced anaerobic digestion: Synthesis, performances, and mechanisms." *Science of the Total Environment* 906. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.167681.
- O'Connor, Jessica, Sheila Skeaff, Phil Bremer, Gina Lucci, y Miranda Miroso. 2023. "A critical review of on-farm food loss and waste: future research and policy recommendations". *Renewable Agriculture and Food Systems* 38. Doi: 10.1017/s1742170523000169.
- Oshiki, Mamoru, Yoshihiro Takaki, Miho Hirai, Takuro Nunoura, Atsushi Kamigaito, and Satoshi Okabe. 2022. "Metagenomic Analysis of Five Phylogenetically Distant Anammox Bacterial Enrichment Cultures." *Microbes and Environments* 37 (3). doi: 10.1264/jsme2.ME22017.
- Owhondah, R., Walker, M., Ma, L., Nimmo, B., Ingham, D., Poggio, D., Pourkashanian, M. 2016. "Assessment and parameter identification of simplified models to describe the kinetics of semi-continuous biomethane production from anaerobic digestion of green and food waste". *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 39(6), 977-992. <https://doi.org/10.1007/s00449-016-1577-x>
- Paladino, Ombretta. 2022. "Data Driven Modelling and Control Strategies to Improve Biogas Quality and Production from High Solids Anaerobic Digestion: A Mini Review". *Sustainability* 14 (24). Doi: 10.3390/su142416467.
- Paritosh, Kunwar, Sandeep Kushwaha, Monika Yadav, Nidhi Pareek, Aakash Chawade, and Vivekanand Vivekanand, 2017. "Food waste to energy: an overview of sustainable approaches for food waste management and nutrient recycling". *Biomed Research International*, 2017:1-19. <https://doi.org/10.1155/2017/2370927>
- Parodi, Alejandro, Gianfranco Villamonte-Cuneo, Ana Maria Loboguerrero, Deissy Martínez-Barón, y Ian Vázquez-Rowe. 2022. "Embedding circularity into the

- transition towards sustainable agroforestry systems in Peru”. *Science of The Total Environment* 838. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156376.
- Parra-Orobio, Brayan Alexis, Andrés Donoso-Bravo, y Patricia Torres-Lozada. 2021. “Pre-dimensioning of Small-Scale Anaerobic Reactors of Food Waste Through Biochemical Methane Potential Assays and Kinetic Models”. *BioEnergy Research*. Doi: 10.1007/s12155-021-10291-3.
- Perman, Ebba, Anna Schnürer, Annika Björn, and Jan Moestedt. 2022. “Serial anaerobic digestion improves protein degradation and biogas production from mixed food waste.” *Biomass and Bioenergy* 161. doi: 10.1016/j.biombioe.2022.106478.
- Pradhan, Prajal, Steffen Kriewald, Luís Costa, Diego Rybski, Tim G. Benton, Günther Fischer, and Jürgen P. Kropp. 2020. “Urban Food Systems: How Regionalization Can Contribute to Climate Change Mitigation.” *Environmental Science & Technology* 54 (17):10551-10560. doi: 10.1021/acs.est.0c02739.
- Qi, Q., C. Sun, C.D., Chicaiza., T. Zhang, J. Zhang, H. Tian, Y. He, y Y. W. Tong. 2021. “Enhancement of methanogenic performance by gasification biochar on anaerobic digestion”. *Bioresour Technol* 330:124993. Doi: 10.1016/j.biortech.2021.124993.
- Qiu, L., Y. F. Deng, F. Wang, M. Davaritouchae, and Y. Q. Yao. 2019. “A review on biochar-mediated anaerobic digestion with enhanced methane recovery.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 115. doi: 10.1016/j.rser.2019.109373.
- Quishpe Machuca, María Belén. 2015. “Diseño de un plan de manejo ambiental para la disposición final de los residuos sólidos del mercado San Luis del municipio del cantón Píllaro.”
- Ries, Jonathan, Zhihao Chen, y Yujin Park. 2023. “Potential Applications of Food-Waste-Based Anaerobic Digestate for Sustainable Crop Production Practice”. *Sustainability* 15 (11). Doi: 10.3390/su15118520.
- Romero Noboa, Danny Paúl. 2015. “Diseño de un Sistema de Manejo Integral de Residuos Sólidos en el mercado la esperanza, ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo, Marzo-Diciembre 2014”

- Roy, P., A. K. Mohanty, P. Dick, M. Misra. 2023. "A Review on the Challenges and Choices for Food Waste Valorization: Environmental and Economic Impacts". *ACS Environ Au* 3 (2):58-75. Doi: 10.1021/acsenvironau.2c00050.
- Sarangi, P. K., T. Anand Singh, N. Joykumar Singh, K. Prasad Shadangi, R. K. Srivastava, A. K. Singh, A. K. Chandel, N. Pareek, and V. Vivekanand. 2022. "Sustainable utilization of pineapple wastes for production of bioenergy, biochemicals and value-added products: A review." *Bioresource Technology* 351. doi: 10.1016/j.biortech.2022.127085.
- Scano, Efsio Antonio, Carla Asquer, Agata Pistis, Luca Ortu, Valeria Demontis, and Daniele Cocco. 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.004>
- Scherhauser, S., J. Davis, P. Metcalfe, S. Gollnow, F. Colin, F. De Menna, M. Vittuari, and K. Östergren. 2020. "Environmental assessment of the valorisation and recycling of selected food production side flows". *Resources, Conservation and Recycling* 161. Doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104921.
- Schiavon, Marco, Elena Cristina Rada, Lucian-Ionel Cioca, Vincenzo Torretta, y Marco Ragazzi. 2018. "Environmental and managerial advantages of treatment plants exploiting biogas from food waste". *International Journal of Energy Production and Management* 3 (4):292. Doi: 10.2495/eq-v3-n4-292-306.
- Setoguchi, Akira, Kazato Oishi, Yoshiaki Kimura, Akifumi Ogino, Hajime Kumagai, y Hiroyuki Hirooka. 2022. "Carbon footprint assessment of a whole dairy farming system with a biogas plant and the use of solid fraction of digestate as a recycled bedding material". *Resources, Conservation & Recycling Advances* 15. Doi: 10.1016/j.rcradv.2022.200115.
- Sevillano, C. A., A. A. Pesantes, E. P. Carpio, E. J. Martinez, and X. Gomez. 2021. "Anaerobic Digestion for Producing Renewable Energy-The Evolution of This Technology in a New Uncertain Scenario." *Entropy* 23 (2):23. doi: 10.3390/e23020145.
- Srisowmeya, G., M. Chakravarthy, and G. Nandhini Devi. 2021. "Sustainable energy production from food waste—advanced production strategies and management in the anaerobic digestion process" In *Advanced Technology for the*

- Conversion of Waste Into Fuels and Chemicals, 123-149
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.127>.
- Tan, Jia Boh, Nur Syakina Jamali, Wei En Tan, Hasfalina Che Man, y Zurina Zainal Abidin. 2021. “Techno-Economic Assessment of On-Farm Anaerobic Digestion System Using Attached-Biofilm Reactor in the Dairy Industry”. *Sustainability* 13 (4). Doi: 10.3390/su13042063.
- Terán, C., J. Argüello, C. Cando, D. Salazar, y J. Muñoz. 2022. “Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales Gestión de Agua Potable y Saneamiento”. [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2021/Residuo_solidos_2021/Presentaci%C3%B3n%20residuos%202021%20v07JA_CGTP%20\(Rev%20%20CGTPE\)%20\(Rev.%20Dicos\).pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2021/Residuo_solidos_2021/Presentaci%C3%B3n%20residuos%202021%20v07JA_CGTP%20(Rev%20%20CGTPE)%20(Rev.%20Dicos).pdf)
- Tian, H., M. Yan, J. Zhou, Q. Wu, Y. W. Tiong, H. T. Lam, J. Zhang, y Y. W. Tong. 2023. “A closed loop case study of decentralized food waste management: System performance and life cycle carbon emission assessment”. *Sci Total Environ* 899:165783. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.165783.
- Tian, Xiaoyu, Bernie A. Engel, Haiyang Qian, En Hua, Shikun Sun, and Yubao Wang. 2021. “Will reaching the maximum achievable yield potential meet future global food demand?” *Journal of Cleaner Production* 294. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126285.
- Torres-Sebastián, M. J., J. G. Colli-Mull, L. Escobedo-Sánchez, D. Martínez-Fong, L. Rios-Solis, M. E. Gutiérrez-Castillo, G. López-Jiménez, M. L. Moreno-Rivera, L. R. Tovar-Gálvez, and A. J. Espadas-Álvarez. 2022. “Methane, a renewable biofuel: from organic waste to bioenergy.” *Biofuels* 13 (7):907-917. doi: 10.1080/17597269.2021.2016105.
- Tsegaye, Dejene, Mohammed Mazharuddin Khan, y Seyoum Leta. 2023. “Optimization of Operating Parameters for Two-Phase Anaerobic Digestion Treating Slaughterhouse Wastewater for Biogas Production: Focus on Hydrolytic–Acidogenic Phase”. *Sustainability* 15 (6). Doi: 10.3390/su15065544.
- Tun, Maw Maw, Petr Palacky, Dagmar Juchelkova, y Vladislav Sít'ář. 2020. “Renewable Waste-to-Energy in Southeast Asia: Status, Challenges,

- Opportunities, and Selection of Waste-to-Energy Technologies”. *Applied Sciences* 10 (20). Doi: 10.3390/app10207312.
- Uddin, M. N., Sk Yasir Arafat Siddiki, M. Mofijur, F. Djavanroodi, M. A. Hazrat, Pau Loke Show, S. F. Ahmed, and Yu-Ming Chu. 2021. “Prospects of Bioenergy Production From Organic Waste Using Anaerobic Digestion Technology: A Mini Review” *Frontiers in Energy Research* 9. Doi: 10.3389/fenrg.2021.627093.
- Uen, Tinn-Shuan, and Luis F. Rodríguez. 2023. “An integrated approach for sustainable food waste management towards renewable resource production and GHG reduction” *Journal of Cleaner Production* 412. Doi: 10.1016/j.jclepro.2023.137251
- van Dijk, Michiel, Tom Morley, Marie Luise Rau, and Yashar Saghai. 2021. “A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050.” *Nature Food* 2 (7):494-501. doi: 10.1038/s43016-021-00322-9.
- Vuppaladadiyam, Arun K., Ming Zhao, Muhammad Zaki Memon, Abdul F. Soomro, y Wang Wei. 2019. “Solid Waste as a Renewable Source of Energy: A Comparative Study on Thermal and Kinetic Behavior of Three Organic Solid Wastes”. *Energy & Fuels* 33 (5):4378. Doi: 10.1021/acs.energyfuels.9b00661.
- Wang, Binghan, Liangmao Zhang, Jianhong Shi, Yinglong Su, Dong Wu, and Bing Xie. 2023. “Genome-centric metagenomics revealed functional traits in high-solids anaerobic co-digestion of restaurant food waste, household food waste and rice straw.” *Bioresource Technology* 376. doi: 10.1016/j.biortech.2023.128926.
- Wang, Chunxiao, Yu Yang, Yulin Wang, Dou Wang, Xiaoqing Xu, Yubo Wang, Liguan Li, Chao Yang, and Tong Zhang. 2022. “Absolute quantification and genome-centric analyses elucidate the dynamics of microbial populations in anaerobic digesters.” *Water Research* 224. doi: 10.1016/j.watres.2022.119049.
- Wang, L., Y. Chi, K. Du, Z. Zhou, F. Wang, and Q. Huang. 2022. “Hydrothermal treatment of food waste for bio-fertilizer production: Formation and regulation of humus substances in hydrochar.” *Sci Total Environ* 838 (Pt 1):155900. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155900.
- Wang, L., Y. Chi, K. Du, Z. Zhou, F. Wang, and Q. Huang. 2022. “Hydrothermal treatment of food waste for bio-fertilizer production: Formation and regulation

- of humus substances in hydrochar.” *Sci Total Environ* 838, 155900. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155900
- Weyant, C. L., Thompson, R., Lam, N. L., Upadhyay, B., Shrestha, P., Maharjan, S., Rai, K., Adhikari, C., Fox, M. C., & Pokhrel, A. K. 2019. “In-Field Emission Measurements from Biogas and Liquefied Petroleum Gas (LPG) Stoves”. *Atmosphere*, 10(12), <https://doi.org/10.3390/atmos10120729>
- Xu, S., Z. Qiao, L. Luo, Y. Sun, J. W. C. Wong, X. Geng, and J. Ni. 2021. “On-site CO₂ bio-sequestration in anaerobic digestion: Current status and prospects.” *Bioresource Technology* 332. doi: 10.1016/j.biortech.2021.125037.
- Xue, Y., Liu, X. 2021. “Detoxification, solidification and recycling of municipal solid waste incineration fly ash: A review”. *Chemical Engineering Journal*, 420, 130349.
- Yadav, M., C. Joshi, K. Paritosh, J. Thakur, N. Pareek, S. K. Masakapalli, y V. Vivekanand. 2022. “Organic waste conversion through anaerobic digestion: A critical insight into the metabolic pathways and microbial interactions”. *Metab Eng* 69:323. doi: 10.1016/j.ymben.2021.11.014.
- Yang, Na, Fangling Li, Yang Liu, Tao Dai, Qiao Wang, Jiebao Zhang, Zhiguang Dai, y Boping Yu. 2022. “Environmental and Economic Life-Cycle Assessments of Household Food Waste Management Systems: A Comparative Review of Methodology and Research Progress”. *Sustainability* 14 (13). doi: 10.3390/su14137533.
- Ye, Rongzhong, Qusheng Jin, Brendan Bohannon, Jason K. Keller, and Scott D. Bridgham. 2014. “Homoacetogenesis: A potentially underappreciated carbon pathway in peatlands.” *Soil Biology and Biochemistry* 68:385-391. doi: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.10.020>.
- Yeo, J., S. S. Chopra, L. Zhang, y A. K. An. 2019. “Life cycle assessment (LCA) of food waste treatment in Hong Kong: On-site fermentation methodology”. *J Environ Manage* 240:343. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.03.119.
- Zambrano, Patricio Vladimir Méndez, Jessica Paola Arcos Logroño, Rogelio Estalin Ureta Valdez, and Estefanía Freytez Boggio. 2023. “Sistemas de tratamiento y valorización de residuos sólidos” Puerto Madero Editorial Académica. ISBN 978-987-82816-3-6 .
- Zamri, M. F. M. A., Saiful Hasmady, Afifi Akhilar, Fazril Ideris, A. H. Shamsuddin, M. Mofijur, I. M. Rizwanul Fattah, y T. M. I. Mahlia. 2021. “A

- comprehensive review on anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 137. doi: 10.1016/j.rser.2020.110637.
- Zhang Pengshuai, Cristhian Chicaiza-Ortiz, y Jingxin Zhang. 2022. “Chapter 7: Additive strategies for enhanced anaerobic digestion for Bioenergy and Biochemicals”. *Biomass, Biofuels, Biochemicals 1st Edition Microbial Fermentation of Biowastes*, 362. Zhang, Le ; Wah Tong, Yen; Zhang, Jingxin; Pandey, Ashok.
- Zhang, J., F. Mao, K. C. Loh, K. Y. Gin, Y. Dai, and Y. W. Tong. 2018. “Evaluating the effects of activated carbon on methane generation and the fate of antibiotic resistant genes and class I integrons during anaerobic digestion of solid organic wastes.” *Bioresour Technol* 249:729-736. doi: 10.1016/j.biortech.2017.10.082.
- Zhang, Mengyu, Zihao Qiao, Suyun Xu, Liwen Luo, Jonathan Wong, Fan Lü, and Hongbo Liu. 2023. “Pulsed CO₂ feeding promotes methane yield in anaerobic digester by diverting acidogenic pathways.” *Chemical Engineering Journal* 471. doi: 10.1016/j.cej.2023.144756.
- Zhang, P., T. Zhang, J. Chen, J. Zhang, and Y. He. 2023. “Novel Role of Hematite in Anaerobic Digestion: Manipulating Membrane-Bound Electron Transport Chain by the Construction of Biological Capacitors with Humic Acid.” *Environ Sci Technol* 57 (29):10828-10837. doi: 10.1021/acs.est.3c01867.
- Zhang, Pengshuai, Cristhian Chicaiza-Ortiz, and Jingxin Zhang. 2022. “Chapter 7: Additive strategies for enhanced anaerobic digestion for Bioenergy and Biochemicals.” In *Biomass, Biofuels, Biochemicals 1st Edition Microbial Fermentation of Biowastes*, 362. Zhang, Le ; Wah Tong, Yen; Zhang, Jingxin; Pandey, Ashok.
- Zhang, R., H. Elmashad, K. Hartman, F. Wang, G. Liu, C. Choate, y P. Gamble. 2007. “Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion”. *Bioresource Technology* 98 (4):929. doi: 10.1016/j.biortech.2006.02.039.
- Zhang, Rong, Min Zhang, Huaqian Mou, Zijing An, Hailu Fu, Xiaomei Su, Chongjun Chen, Jianrong Chen, Hongjun Lin, and Faqian Sun. 2023. “Comparison of mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge driven by biochar derived from kitchen waste.” *Journal of Cleaner Production* 408. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.137123.

- Zhang, Y., Wang, L., Chen, L., Ma, B., Zhang, Y., Ni, W., & Tsang, D. C. W. 2021. "Treatment of municipal solid waste incineration fly ash: State-of-the-art technologies and future perspectives". *Journal of Hazardous Materials*, 411(125132). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125132>
- Zhao, W., T. Hu, H. Ma, D. Li, Q. Zhao, J. Jiang, L. Wei. 2024. "A review of microbial responses to biochar addition in anaerobic digestion system: Community, cellular and genetic level findings." *Bioresource Technology* 391. doi: 10.1016/j.biortech.2023.129929.
- Zhou, Hewen, Qing Yang, Eid Gul, Mengmeng Shi, Jiashuo Li, Minjiao Yang, Haiping Yang, Bin Chen, Haibo Zhao, Yunjun Yan, Güneş Erdoğan, Pietro Bartocci, y Francesco Fantozzi. 2021. "Decarbonizing university campuses through the production of biogas from food waste: An LCA analysis". *Renewable Energy* 176:565. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.007>.

Anexos

Anexo 1: Encuestas realizadas a los propietarios de los locales de los mercados de la ciudad de Tena

¿Qué tipo de actividad comercial realiza?

¿Qué tipo de residuos genera?

¿La generación de residuos ha tenido un cambio significativo durante el último año?

¿Usted clasifica o separa los residuos sólidos de su negocio en orgánicos e inorgánicos?

- Sí
- No

¿Sabe si son aprovechados (reciclan/reutilizan/compostan) los residuos producidos en el mercado?

- Sí
- No

¿Cuáles de las siguientes molestias se asocia al sistema de residuos actual?

- Animales indeseados (ratones, perros, gatos...)
- Plagas (mosquitos, cucarachas, lagartijas...)
- Olor
- Ruido
- Se corta el acceso peatonal
- Contaminación por automóviles
- Suciedad
- Poca iluminación
- Ninguna

¿Cuál es el grado de preocupación o importancia de las plagas y presencia de animales?

- Baja

- Media
- Alta

¿Considera importante el manejo adecuado de los residuos en su negocio y en el mercado?

- Sí
- No

¿Considera necesario un programa para manejar los residuos generados por el mercado?

- Sí
- No

¿Cree que el manejo de desechos actual en el mercado municipal está contaminando el ambiente?

- Casi no influye
- Medianamente
- Significativamente

Anexo 2: Metodología de muestreo (técnica del cuarteo)

Se aplicó la técnica de cuarteo de los residuos planteada por (Montoya & Barriga, 2013) para evaluar la cantidad y la composición neta de residuos en los mercados en la actualidad. Para aplicar este método se requirieron de al menos 2 personas. Los pasos para aplicar el método de cuarteo fueron los siguientes:

1. Recopilación de muestras

Se seleccionó y determinó los 2 mercados de la ciudad. Se tomaron muestras diarias de residuos sólidos de manera personal en cada centro de expendio de comida, debidamente etiquetadas. Según (Alayón Castro, 2021) para el método de cuarteo considerando el sector comercial, la muestra debe tomarse directamente en el origen de producción por día durante una semana.

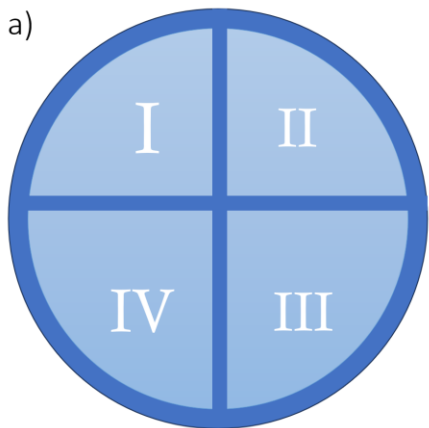
2. Preparación de las muestras

Se pesó y registró cada muestra. Alayón Castro, (2021) indica que, las muestras de generación de residuos que no superen los 90 kg se proceden directamente a la clasificación y pesaje de los residuos sólidos por tipo de material.

3. Cuarteo de los residuos a caracterizar

Se dispuso las muestras sobre un área plana, se creó un círculo de aproximadamente 1,5 m de radio, y se subdividió en cuatro cuadrantes de igual tamaño, con su respectiva numeración (I, II, III, IV) siguiendo la metodología de (Alayón Castro, 2021) y se homogeneizó con palas hasta observar que los mismos tengan una distribución uniforme. Un cuadrante fue escogido aleatoriamente para la caracterización (Gavilanes & Arellano, 2013), como se indica en la Figura 20.

a)



b)



Figura. 20 Técnica de cuarteo aplicada a los residuos provenientes de los mercados del Tena, a) representación esquemática, b) Fotografía tomada después de la recolección. Elaboración propia.

Anexo 3: Cálculos para el dimensionamiento

El desarrollo de los cálculos se presenta a continuación:

$$V_{BDG} = \text{Carga diaria} * \%SV \quad (\text{Ecuación. 1})$$

$$V_{BDG} = (338,2) * (26,32/100) \quad (\text{Ecuación. 1})$$

$$V_{BDG} = 89,01 \text{ kg}_{SV}/d \quad (\text{Ecuación. 1})$$

$$V_{BDG} = 89,01 \text{ m}^3 \quad (\text{Ecuación. 1})$$

$$V_{BIOGÁS} = V_{BDG} * BPR \quad (\text{Ecuación. 2})$$

$$V_{BIOGÁS} = 89,01 \text{ m}^3 * 0,265 \text{ m}^3 \text{ biogás}/\text{m}^3 d \quad (\text{Ecuación. 2})$$

$$V_{BIOGÁS} = 23,59 \text{ m}^3 \text{ biogás}/d \quad (\text{Ecuación. 2})$$

$$C_{\text{Emis}(\text{compostaje})} = M_{FW} * \frac{100-MC}{100} * (0,6 * EF_{N_2O} + 10 * EF_{CH_4}) * 12/44 - 48 \text{KgCO}_2 \quad (\text{Ecuación. 3})$$

$$C_{\text{Emis}(\text{compostaje})} = 338,2 \text{ kg}/d * \frac{100-59,56}{100} * (0,6 * 265 + 10 * 25) * 12/44 - 48 \text{KgCO}_2 \quad (\text{Ecuación. 3})$$

$$C_{\text{Emis}(\text{compostaje})} = 338,2 \text{ kg}/d * 0,404 * (409) * 0,2727 - 48 \text{KgCO}_2 \quad (\text{Ecuación. 3})$$

$$C_{\text{Emis}(\text{compostaje})} = 15\ 208,31 \text{ KgCO}_{2eq} \quad (\text{Ecuación. 3})$$

$$C_{\text{Ferti}} = EF_{NPK} * m_{NPK} + EF_K * m_K + EF_{Urea} * m_{Urea} + EF_{Urea-CO_2} * m_{Urea} \quad (\text{Ecuación. 4})$$

$$C_{\text{Ferti}} = 1,46 \text{ kg CO}_{2eq}/\text{kg} * 1,49 \text{ kg} + 1,54 \text{ kg CO}_{2eq}/\text{kg} * 2,018 \text{ kg} + 1,72 \text{ kg CO}_{2eq}/\text{kg} * 2,72 \text{ kg} + 1,57 \text{ kg CO}_{2eq}/\text{kg} * 2,72 \text{ kg} \quad (\text{Ecuación. 4})$$

$$C_{\text{Ferti}} = (2,1704 + 3,10852 + 4,6864 + 4,2744) \text{ kgCO}_{2eq} \quad (\text{Ecuación. 4})$$

$$C_{\text{Ferti}} = 14,24 \text{ kgCO}_{2eq} \quad (\text{Ecuación. 4})$$

$$C_{\text{Emis}(\text{AD-S1})} = 25 * M_{CH_4} + 1 * M_{CO_2} - C_{\text{Ferti}} \quad (\text{Ecuación. 5})$$

$$C_{\text{Emis}(\text{AD-S1})} = 25 \text{ kgCO}_{2eq}/\text{kg} * 6,8 \text{ kg} + 1 \text{ kg CO}_{2eq}/\text{kg} * 21,80 \text{ kg} - 14,24 \text{ kgCO}_{2eq} \quad (\text{Ecuación. 5})$$

$$C_{\text{Emis}(\text{AD-S1})} = (170 + 21,80) \text{ kgCO}_{2eq} - 14,24 \text{ kgCO}_{2eq} \quad (\text{Ecuación. 5})$$

$$C_{\text{Emis}(\text{AD-S1})} = 177,56 \text{ kgCO}_{2eq} \quad (\text{Ecuación. 5})$$

$$M_{GLP} = \left(\frac{C_{\text{Biogas}}}{C_{GLP}} \right) * \left(\frac{Eff_{\text{Biogas}}}{Eff_{GLP}} \right) * V_{BIOGÁS} \quad (\text{Ecuación. 6})$$

$$M_{GLP} = \left(\frac{25 \text{ MJ}/\text{m}^3}{46,1 \text{ MJ}/\text{kg}} \right) * \left(\frac{55\%}{66\%} \right) * 23,59 \text{ m}^3/d \quad (\text{Ecuación. 6})$$

$$M_{GLP} = 0,542 * 0,833 * 23,59 \text{ kg}/d \quad (\text{Ecuación. 6})$$

$$M_{GLP} = 10,64 \text{ kg}/d \quad (\text{Ecuación. 6})$$

$$C_{GLP(\text{AD-S2})} = 3,302 \text{ kgCO}_{2eq}/\text{kg} * M_{GLP} \quad (\text{Ecuación. 7})$$

$$C_{GLP (AD-S2)} = 3,302 \text{ kg CO}_{2eq} / \text{kg} * 10,64 \text{ kg} \quad (\text{Ecuación. 7})$$

$$C_{GLP (AD-S2)} = 35,13 \text{ kg CO}_{2eq} \quad (\text{Ecuación. 7})$$

$$C_{Emis(AD-S2)} = C_{Emis} - C_{Ferti} - C_{GLP(AD-S2)} \quad (\text{Ecuación. 8})$$

$$C_{Emis(AD-S2)} = 25 \text{ kgCO}_{2eq} / \text{kg} * 6,8 \text{ kg} + 1 \text{ kg CO}_{2eq} / \text{kg} * 21,80 \text{ kg} - 14,24 \text{ kgCO}_{2eq} - 35,13 \text{ kgCO}_{2eq} \quad (\text{Ecuación. 8})$$

$$C_{Emis(AD-S2)} = (170 + 21,80) \text{ kgCO}_{2eq} - 14,24 \text{ kgCO}_{2eq} - 35,13 \text{ kgCO}_{2eq} \quad (\text{Ecuación. 8})$$

$$C_{Emis(AD-S2)} = 142,43 \text{ kgCO}_{2eq} \quad (\text{Ecuación. 8})$$

$$Ep_{FW-S1} = M_{FW} * (100 - MC) / 100 * LHV \quad (\text{Ecuación. 9})$$

$$Ep_{FW-S1} = 121,75 \text{ ton/año} * (100\% - 59,56\%) / 100\% * 17,83 \text{ MJ/ton} \quad (\text{Ecuación. 9})$$

$$Ep_{FW-S1} = 877,87 \text{ MJ/año} \quad (\text{Ecuación. 9})$$

$$Ep_{FW-S2} = M_{GLP} * C_{GLP} * Eff_{GLP} \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$Ep_{FW-S2} = 10,64 \frac{\text{kg}}{\text{d}} * 46,1 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} * 66\% * 365 \frac{\text{d}}{\text{año}} \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$Ep_{FW-S2} = 118 162,43 \text{ MJ/año} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Anexo 4: Aproximación a la evaluación económica.

Tabla. 10

Accesorios para la implementación de digestores anaerobios.

Escenario	Unidad	Elemento	Costo Unitario	Total
S1 y S2	4	Codos 3/4"	2,48	9,92
	4	T 3/4"	0,49	1,96
	13	Tuberías para el transporte de biogás (3/4")	6	78,00
	4,6	Tuberías para el transporte de biogás (3/4")	6	27,60
	1	Válvula esférica	14,35	14,35
	1	Válvula reguladora de presión	15	15
	5	Tubería para entrada y salida del biodigestor (4")	6,00	27,60
	20	Liga de cámara de neumático (también llamada boya o tubo). (20m)	0,50	10,00
	1	Brida (adaptador)(3/4")	7,94	7,94
		Sub-total (por cada digestor)		192,37
		TOTAL(para los 6 digestor)		1154,22
S2		Sistema de distribución incluida la remoción de H₂S		
	6	Filtro de sulfuro de hidrógeno	150,00	900,00
	6	Válvula reguladora de presión	33,53	201,18
	60	Tuberías para el transporte de biogás (m)	6,00	360,00
	4	Teflón	0,30	1,20
	6	Llaves de bola	6,07	36,42
		TOTAL		2653,02

Elaboración propia.