

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Mitigación de la huella de carbono mediante digestión anaerobia en un municipio rural de Colombia

Valentina Osorio Gómez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de ingeniería y administración
Palmira, Colombia
2024

Mitigación de la huella de carbono mediante digestión anaerobia en un municipio rural de Colombia

Valentina Osorio Gómez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Ambiental

Directora:

Ph.D. Luz Stella Cadavid Rodríguez

Codirectora:

Ph.D. Natalia Andrea Cano Londoño

Línea de Investigación:

Energías Alternativas

Grupo de Investigación:

Prospectiva ambiental

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de ingeniería y administración
Palmira, Colombia

2024

*Dedicado a mis padres:
Adriana María Gómez &
Fabio Osorio Montoya,
gracias por ser mi más grande apoyo,
sin ustedes esto no sería posible.*

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

A handwritten signature in black ink, reading "Valentina Osorio Gómez", is written over a horizontal line.

Valentina Osorio Gómez

Fecha 01/12/2023

Agradecimientos

A las profesoras: Luz Stella Cadavid Rodríguez, mi directora, y a la profesora Natalia Andrea Cano Londoño; mi co-directora; por la confianza, apoyo, enseñanza y por permitirme participar de este proyecto.

A la Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, quien con sus recursos académicos y físicos me permitieron ejecutar el trabajo.

Al Laboratorio de Investigaciones Ambientales, por brindarme el espacio óptimo para desarrollar esta investigación.

Finalmente, gracias a todas las personas que estuvieron presente en este proceso.

Resumen

Mitigación de la huella de carbono mediante digestión anaerobia en un municipio rural de Colombia

Entre los desafíos ambientales que enfrenta el municipio de Tumaco (Colombia), están el suministro energético y la disposición de Residuos Orgánicos (RSO), especialmente los correspondientes a la pesca artesanal (RP) y los Residuos de Frutas y Verduras (RFV). Por ello, la población recurre a plantas estacionarias DIESEL y al consumo de GLP, generando emisiones contaminantes y afectando su salud. Además, los RSO contribuyen a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), evaluadas en términos de Huella de Carbono (HC). Esta investigación se centra en aprovechar los RP y RFV mediante la Digestión Anaerobia (DA) para obtener biogás como fuente energética y reducir la HC en el territorio. Se plantean dos sistemas: el sistema actual (sistema 1) que involucra emisiones por la quema de combustibles y disposición inadecuada de residuos, y el sistema propuesto (sistema 2) que emplea la DA para producir biogás a partir de los RSO.

El estudio abarca cinco etapas: (1) contextualización del problema y recolección de información, (2) cálculo de la huella de carbono teórica (HCT), (3) recolección de muestras, (4) evaluación de la producción de biogás, y (5) medición de la huella de carbono directa o "*In Situ*" (HCI). Los resultados destacan que la codigestión anaerobia de RP y RFV en proporción 1:1 de materia orgánica, maximiza la producción de biogás. La investigación también revela una reducción, superior al 95%, en las emisiones de GEI al aprovechar el metano para la cocción de alimentos, comparando los sistemas 1 y 2. Finalmente, se concluye que la DA es eficaz para mitigar la HC y generar energía sostenible, abordando las problemáticas de abastecimiento en la zona rural de Tumaco.

Palabras clave: huella de carbono, digestión anaerobia, biogás, residuos orgánicos, combustibles fósiles, potencial bioquímico de metano.

Abstract

Mitigation of the carbon footprint through anaerobic digestion in a rural municipality in Colombia

Among the environmental challenges faced by the municipality of Tumaco (Colombia) are the energy supply and the disposal of Organic Waste (OW), especially those corresponding to artisanal fishing (FW) and Fruit and Vegetable Waste (FVW). For this reason, the population resorts to stationary DIESEL plants and the consumption of LPG, generating polluting emissions and affecting their health. Furthermore, OW contributes to Greenhouse Gas (GHG) emissions, evaluated in terms of Carbon Footprint (CF). This research focuses on taking advantage of FW and FVW through Anaerobic Digestion (AD) to obtain biogas as an energy source and reduce CF in the territory. Two systems are proposed: the current system (system 1) that involves emissions from fuel burning and inadequate waste disposal, and the proposed system (system 2) that uses the AD to produce biogas from OW.

The study covers five stages: (1) contextualization of the problem and information collection, (2) calculation of the theoretical carbon footprint (TCF), (3) sample collection, (4) evaluation of biogas production, and (5) measurement of the direct or "*In Situ*" carbon footprint (ICF). The results highlight that the co-management of FW and FVW in a 1:1 proportion of organic matter maximizes biogas production. The research also reveals a reduction of more than 95% in GHG emissions when using methane for cooking food, comparing systems 1 and 2. Finally, it is concluded that AD is effective in mitigating CF and generating energy. sustainable, addressing supply problems in the rural area of Tumaco.

Keywords: carbon footprint; anaerobic digestion; biogas, organic waste; fossil fuels; biochemical methane potential.

Contenido

Resumen	IX
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas	XIV
Lista de símbolos y abreviaturas	XVI
Introducción	1
1. Antecedentes y contexto de la investigación.....	3
2. Objetivos.....	6
2.1. Objetivo general.....	6
2.2. Objetivos específicos	6
3. Revisión de literatura	7
3.1. Marco teórico	7
3.1.1. Residuos de pesca (RP).....	7
3.1.2. Residuos de frutas y verduras (RFV).....	7
3.1.3. Pesca artesanal (PA).....	8
3.1.4. Huella de carbono (HC)	8
3.1.5. Factores de emisión (FE)	9
3.1.6. Gases de efecto invernadero (GEI)	9
3.1.7. Fuente de emisión	10
3.1.8. Digestión anaerobia (DA)	11
3.1.9. Biogás	13
3.1.10. Potencial bioquímico de metano (PBM)	13
3.2. Estado del arte.....	14
3.2.1. Avances en la cuantificación de la huella de carbono: Gestión de residuos y uso de combustibles fósiles.....	14
3.2.2. Diferentes métodos para el aprovechamiento de los RSO.....	19
3.2.3. Producción de biogás a partir de residuos orgánicos: Estrategia para disminución de las emisiones.....	21

4. Materiales y métodos	25
4.1. Desarrollo de los objetivos específicos 1 y 2.....	26
4.1.1. Actividad 1: Recolección de la información.....	26
4.1.2. Actividad 2: Organización de la información.....	36
4.1.3. Actividad 3: Sistematización y análisis de datos.....	37
4.2. Desarrollo del objetivo específico 3.....	37
4.2.1. Actividad 1: Compilación de la información obtenida.....	37
4.2.2. Actividad 2: Análisis de potencial energético.....	38
5. Resultados y Discusión	39
5.1. Revisión bibliográfica.....	39
5.2. Compilación de datos.....	39
5.2.1. Sistema 1 (actual).....	39
5.2.2. Sistema 2 (propuesto).....	44
5.3. Cálculo de la huella de carbono para el SISTEMA 1.....	45
5.3.1. Huella de carbono teórica (HCT).....	45
5.4. Cálculo de la huella de carbono para el SISTEMA 2.....	50
5.4.1. Huella de carbono teórica (HCT).....	50
5.4.2. Huella de carbono directa o “ <i>In Situ</i> ” (HCl).....	53
5.4.3. Huella de carbono con aprovechamiento del CH ₄	67
5.4.4. Comparación entre HCT y HCl.....	71
5.5. Resumen de emisiones GEI.....	73
5.5.1. Resumen de emisiones GEI - HCT.....	74
5.5.2. Resumen de emisiones GEI – HCl.....	77
5.6. Análisis de potencial energético.....	81
6. Conclusiones y recomendaciones	85
6.1. Conclusiones.....	85
6.2. Recomendaciones.....	86
Referencias bibliográficas	88
A. Anexo: Encuesta aplicada en distintas entidades en abril del año 2022	98
B. Anexo: Revisión bibliográfica – Datos de interés	100
C. Anexo: Entrevistas a distintos actores	110
D. Anexo: Consumo de DIESEL detallado	114
E. Anexo: Método FOD del IPCC (2006) – Carbono orgánico degradable	124
F. Anexo: Análisis estadístico para la prueba del PBM	129
G. Anexo: Caracterización y composición del digestato	132

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Recurso energético empleado para la cocción de alimentos	4
Figura 3-1: Diagrama de los residuos de pesca (RP).	7
Figura 3-2: Esquema representativo de la HC.	9
Figura 3-3: Alcances de las fuentes de emisión.....	11
Figura 3-4: Etapas de la digestión anaerobia.	12
Figura 4-1: Diagrama metodológico.....	25
Figura 4-2: Puntos de generación de RP y RFV en Tumaco.....	29
Figura 4-3: Preparación de los sustratos.	31
Figura 4-4: Pruebas fisicoquímicas realizadas al inóculo y sustrato.	32
Figura 4-5: Reactores dispuestos en equipo PBM.....	34
Figura 4-6: Medición de la calidad del biogás.	36
Figura 5-1: Consumo DIESEL 2022-2023.	40
Figura 5-2: Caracterización de RS en el Relleno Sanitario de Tumaco.	41
Figura 5-3: Emisiones HCT del sistema 1 VS sistema 2, sin aprovechamiento del CH ₄ . 52	52
Figura 5-4: Remoción DQO inicial y final entre tratamientos.....	55
Figura 5-5: Potencial acumulado de biogás (ml N biogás/ g SV).	58
Figura 5-6: Potencial acumulado de metano (ml N CH ₄ / g SV).....	59
Figura 5-7: Emisiones HCl del sistema 1 VS sistema 2, sin asumir aprovechamiento del CH ₄	67
Figura 5-8: Disminución porcentual de la HC por ambos métodos de medición (Teórico e <i>In Situ</i>) al aplicar distintos tratamientos DA del Sistema 2.	70
Figura 5-9: Resumen de emisiones GEI. Donde: S1 Y S2 = Sistema 1 y 2.	73
Figura 5-10: Resumen de emisiones HCT. En términos de Ton CO _{2eq} /año.	75
Figura 5-11: Resumen de emisiones HCT. En términos de disminución porcentual.	76
Figura 5-12: Resumen de emisiones HCl. En términos de TonCO _{2eq} /año.....	79
Figura 5-13: Resumen de emisiones HCl. En términos de disminución porcentual.	79

Lista de tablas

Tabla 3-1. Ejemplos de factores de emisión.	9
Tabla 4-1. Identificación de fuentes de emisión.	27
Tabla 4-2. Entrevistas realizadas a distintos actores de entidades del municipio.....	28
Tabla 4-3. Pruebas fisicoquímicas realizadas al inóculo y sustrato.....	31
Tabla 4-4: Información base para el diseño de mezclas sistema 2.....	33
Tabla 4-5. Diseño experimental para la evaluación de la producción de biogás	33
Tabla 4-6. Pruebas fisicoquímicas realizadas al digestato	35
Tabla 5-1. Consumo de GLP promedio para Tumaco.....	40
Tabla 5-2. Producción per cápita relleno sanitario BUCHELLI en Tumaco.	41
Tabla 5-3. Producción de RS en la zona urbana y rural de Tumaco.	42
Tabla 5-4. Datos de interés obtenidos en el estudio sociodemográfico de la población de pescadores artesanales.	42
Tabla 5-5. Datos de generación para el Sistema 1.	42
Tabla 5-6. Factores y parámetros de emisión.	42
Tabla 5-7. Incertidumbres atribuibles a los datos.....	43
Tabla 5-8. Factores y parámetros de emisión.	43
Tabla 5-9. Incertidumbres atribuibles a los datos.....	44
Tabla 5-10. Emisiones provenientes del consumo de DIESEL estacionario.	45
Tabla 5-11. Emisiones provenientes del consumo de GLP estacionario.....	46
Tabla 5-12. Resumen de emisiones por sector.....	47
Tabla 5-13. Distribución por alcances.....	49
Tabla 5-14. Aplicación de la incertidumbre Sistema 1.....	48
Tabla 5-15. Emisiones provenientes de los tratamientos 1 y 2.	50
Tabla 5-16. Emisiones provenientes del tratamiento 3.....	51
Tabla 5-17. Emisiones provenientes del tratamiento 4.....	51
Tabla 5-18. Caracterización fisicoquímica inicial y final.	53
Tabla 5-19. Resultados de la caracterización de los digestatos T3 y T4.....	55
Tabla 5-20. Potencial de metano de los tratamientos evaluados.	60
Tabla 5-21. Análisis de GEI – Tratamiento 1.	63
Tabla 5-22. Análisis de GEI – Tratamiento 2.	63
Tabla 5-23. Análisis de GEI – Tratamiento 4.	64
Tabla 5-24. Análisis de GEI – Tratamiento 3.	64

Tabla 5-25. Emisiones provenientes de los tratamientos DA.....	66
Tabla 5-26. Diferencias entre los valores obtenidos por los métodos de medición de la HC con aprovechamiento del CH ₄	71
Tabla 5-27. Resumen de emisiones HCT. sistema 1 VS sistema 2.....	74
Tabla 5-28. Resumen de emisiones HCl. sistema 1 VS sistema 2.....	78
Tabla 5-29. Generación de energía. Tratamientos 1 y 2.	82
Tabla 5-30. Generación de energía. Tratamiento 3.....	82
Tabla 5-31. Generación de energía. Tratamiento 4.....	82
Tabla 5-32. Generación de energía. Combustibles DIESEL.....	83
Tabla 5-33. Generación de energía. Combustible GLP.....	83
Tabla 5-34. Generación de energía. Combustibles DIESEL y GLP.....	83

Lista de símbolos y abreviatura

Abreviatura	Término
AGV	Ácidos grasos volátiles
ANOVA	Análisis de varianza
C/N	Relación carbono nitrógeno
DA	Digestión anaerobia
DQO	Demanda química de oxígeno
FE	Factor de emisión
Gal	Galones
GEI	Gases de efecto invernadero
HC	Huella de carbono
HCI	Huella de carbono “ <i>In Situ</i> ” o directa
HCT	Huella de carbono teórica o indirecta
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
ISO	Organización Internacional para la Normalización
Kg	Kilogramo
L	Litro
NTC	Norma técnica colombiana
PBM	Potencial bioquímico de metano
PCI	Poder calorífico inferior
PH	Potencial de Hidrógeno
RFV	Residuos de pesca
RP	Residuos de frutas y verduras
RIS	Relación inóculo/sustrato
RSO	Residuos sólidos orgánicos
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos volátiles
Ton	Tonelada
TonCO _{2eq}	Tonelada de dióxido de carbono equivalente

Introducción

En la actualidad el planeta tierra experimenta un cambio climático, fenómeno definido por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC, 1992), como una alteración del clima atribuida a la desmedida explotación de los recursos naturales, por el ser humano. Tal cambio está vinculado a emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) provenientes de diversas actividades, incluyendo el uso de combustibles fósiles y la generación de residuos sólidos (RS).

A nivel global, se generan 2.01 billones de toneladas anuales de RS, de los cuales el 33% termina en vertederos y solo el 19% se recicla (Kaza et al., 2018). En Colombia, el 61% de los residuos son orgánicos (RSO), para el año 2019, aproximadamente 7 millones de toneladas de estos se dispusieron en relleno sanitario, contribuyendo con 8,1% de las emisiones de gases de GEI (Banco Mundial & Ministerio de Vivienda, 2021; DNP, 2016).

En particular, en la geografía nacional, en zonas no interconectadas (ZNI), existe una dependencia de fuentes convencionales de energía, en gran medida provenientes de combustibles fósiles. Tumaco, Nariño, municipio costero de vocación rural y agrícola, se destaca por su pesquería artesanal, trayendo consigo la generación de residuos de pesca (RP), representando hasta en un 45% de lo producido (Rodríguez et al., 2011). Asimismo, este municipio, produce más de 1.000 toneladas de pescado al año, lo cual representa el 9% de la producción de la pesca artesanal del país (De la Hoz et al., 2017).

Para abordar esta problemática, la tecnología de digestión anaerobia (DA) surge como una solución, aprovechando la biomasa residual para mitigar emisiones y generar energía limpia, tanto en forma térmica como eléctrica. Este proceso biológico descompone los residuos sólidos mediante microorganismos produciendo biogás, compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). El biogás puede ser utilizado como fuente de energía domiciliar, ofreciendo una alternativa sostenible a los combustibles fósiles convencionales; lo cual repercute significativamente en la reducción

de la huella de carbono asociada al suministro energético. Investigaciones precedentes han evaluado el potencial de los RSO, como frutas y verduras (RFV), para generar biogás mediante DA, buscando reducir emisiones (Vargas Corredor & Pérez Pérez, 2018).

Razón por la cual, la presente investigación se enfoca en la aplicación de la DA al tratar los RP, en codigestión con los RFV en Tumaco. El objetivo es calcular la huella de carbono (HC) generada por este proceso y contrastarla con las emisiones derivadas de una gestión inadecuada de residuos, además de aquellas originadas por la producción convencional de energía.

El presente proyecto de investigación, se estima como una contribución más al conocimiento actual del tema, porque aborda diversas dimensiones ambientales. En su esencia, lleva a cabo una evaluación exhaustiva de las emisiones vinculadas a distintas fuentes, estimando las HC asociadas. Igualmente, presenta estrategias innovadoras en el aprovechamiento de RSO, las cuales van enfocadas en la evaluación de distintas mezclas de codigestión de RSO para potencializar la producción de biogás, al tiempo que se disminuye la HC. Para ello, se utilizan distintos equipos de medición a escala de laboratorio, los cuales permiten cuantificar en el sitio las emisiones GEI. En conjunto, estas acciones buscan establecer mecanismos de toma de decisiones en el ámbito institucional, con la finalidad de fortalecer metas y programas ambientales, dimensionando los impactos ambientales mediante el cálculo preciso de huellas.

El documento incluye 6 capítulos. En el primero se presentan los antecedentes y el contexto de la investigación, donde se expone la situación actual del municipio de Tumaco en cuanto a la problemática socioambiental existente. En el segundo apartado se describen los objetivos bajo los cuáles se busca dar solución a la problemática planteada. El tercer capítulo se encuentra la revisión de literatura, donde se plantean los conceptos básicos para entender el proceso de DA y el cálculo de la HC, relacionando algunas investigaciones realizadas en esta temática. En el cuarto título se describe la metodología realizada para la producción de biogás a partir de los RSO, así como la descripción de los métodos a utilizar para el cálculo de las emisiones provenientes en distintos escenarios de manejo. En el capítulo 5 se muestran los resultados obtenidos y la discusión de estos. Así mismo, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones y recomendaciones.

1. Antecedentes y contexto de la investigación

El crecimiento urbano y el desarrollo industrial generan una cantidad significativa de desperdicios, resultando un impacto ambiental negativo que abarca contaminación, agotamiento de recursos y contribución al cambio climático (Chen et al., 2020). El cambio climático, causado principalmente por los GEI, como metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), ha generado consecuencias como el aumento de la temperatura global, elevación del nivel del mar y alteraciones en las precipitaciones estacionales (Cubasch et al., 2013).

En el Litoral Pacífico colombiano, donde se encuentra el municipio de Tumaco, con una extensión de 3.778 km^2 , de los cuales alrededor de 3.740 km^2 pertenecen al área rural (Cámara de Comercio de Tumaco, 2021), la situación energética presenta desafíos importantes. Según el BID (2020), la cobertura energética en la región es un 10% menor que la cobertura nacional, con alrededor de 55 mil viviendas sin acceso al servicio de energía de la red nacional. Empeorando el panorama nacional, sólo el 12,9% de los residuos orgánicos se aprovecha eficientemente (CEPAL, 2019).

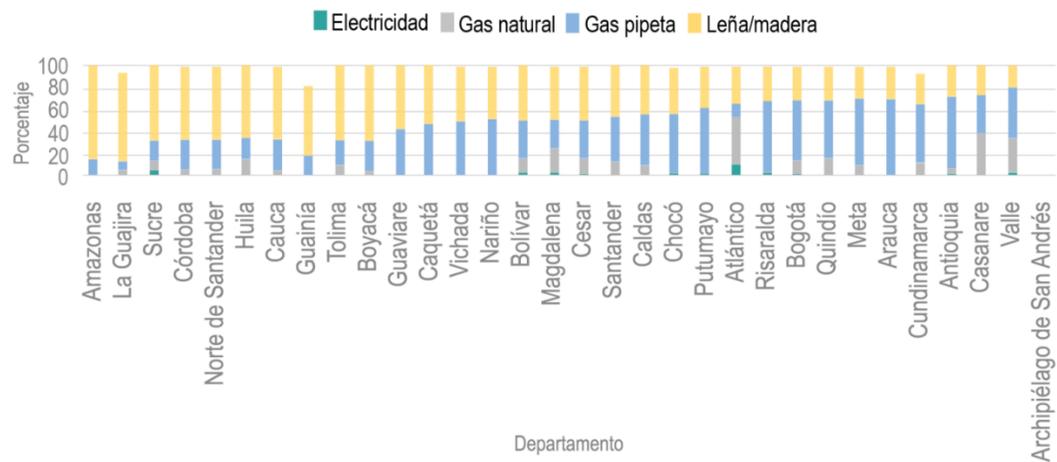
Respecto al servicio de gas natural, la situación es crítica tal municipio, ya que no cuenta con servicio de gas natural domiciliario, ni en la zona rural ni en la urbana (Alcaldía de Tumaco, 2013). Por esto, el combustible utilizado para la generación de energía térmica en los hogares es el gas licuado de petróleo (GLP) (Alarcón, 2017) (Figura 1-1). Esto supone un alto costo en la obtención de dicho combustible y un impacto medio ambiental, debido a las emisiones de GEI liberadas por el uso de este insumo para cocinar.

Al examinar el rendimiento del GLP en la cocción de alimentos, se observa un Poder Calorífico Inferior (PCI) de 99,22 MJ/m^3 , superando al biogás con un PCI de 22 MJ/m^3 (UPME, 2015). No obstante, al optar por el biogás en el consumo domiciliario, se enfrenta directamente la problemática de la generación de RSO y las emisiones de GEI, sin necesidad de recurrir a técnicas extractivas para su obtención.

Aproximadamente el 94,4% de las viviendas en Tumaco son viviendas sin conexión a gas natural, y alrededor de 22.033 habitantes carecen de cobertura del SIN (Alarcón, 2017).

Como resultado, principalmente en la zona rural de Tumaco, algunos **hogares** recurren a plantas eléctricas que funcionan con diesel para satisfacer sus necesidades energéticas, una opción costosa y contaminante.

Figura 1 - 1: Recurso energético empleado para la cocción de alimentos.



Fuente: Tomado de Arboleda et al. (2022).

El uso de sistemas de generación basados en plantas eléctricas con diesel en Tumaco tiene consecuencias adversas para el medio ambiente y la salud humana. La quema de combustibles fósiles produce gases contaminantes, como monóxido de carbono, con emisiones que afectan la calidad del aire (Malagón, 2002). Asimismo, “las emisiones de diésel producen material particulado en una proporción 20 veces superior al de los motores a gasolina” (LORAX, 2005).

A la vez, Tumaco, se enfrenta al desafío de tener un suministro eléctrico mixto, con el área urbana conectada a la red nacional y la zona rural no. Esto afecta a 4.905 viviendas que carecen de un fluido eléctrico continuo o no tienen acceso al servicio (Alarcón, 2017). La dependencia de métodos de generación de energía contaminantes y costosos, combinada con la falta de acceso a servicios básicos, destaca la urgencia de buscar alternativas sostenibles.

En tal contexto, la DA emerge como una opción viable para generar energía y disminuir las emisiones. Puesto que, la creciente biomasa residual y la disminución de los combustibles fósiles originan la necesidad de evaluar los RSO como fuente de energía (Quintero &

Rondón, 2012; UPME et al., 2010). Investigaciones recientes indican que la DA es la mejor opción para reducir la demanda energética y la HC asociada al tratamiento de RSO (Slorach et al., 2019). Este proceso puede ahorrar hasta 40 Kg de CO_{2eq} por tonelada de residuos orgánicos y ofrece una eficiencia de recuperación de energía del 24%.

El enfoque de esta investigación se centra en los RP y los RFV. Debido a que la gestión inadecuada de estos residuos conlleva a emisiones contaminantes (CH₄, CO₂, NH₃, H₂S), afectando la biodiversidad en entornos naturales (Arvanitoyannis et al., 2008).

Por lo expuesto con antelación, para esta investigación, se planteó la siguiente pregunta:

¿En cuánto se logrará mitigar la huella de carbono por la utilización de combustibles fósiles para la generación de energía térmica y eléctrica en el municipio de Tumaco (Colombia), si se realiza el aprovechamiento energético de los residuos de pesca, frutas y verduras mediante digestión anaerobia?

Igualmente, se sistematiza el problema de investigación, a través de las siguientes preguntas:

¿Cómo se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero utilizando el proceso de digestión anaerobia para el aprovechamiento de residuos orgánicos, al comparar el método de medición teórico o indirecto con el *In Situ* o directo?

¿Cuál será la mezcla en la codigestión de los residuos de pescado, frutas y verduras, que permite aumentar la producción del biogás en el proceso de digestión anaerobia, y por tanto aportar en mayor medida a la reducción de la huella de carbono?

¿En qué cantidad podrá la digestión anaerobia aportar en la seguridad energética para los hogares de Tumaco?

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Calcular la reducción de la huella de carbono, cuando se aplica y optimiza la digestión anaerobia de residuos orgánicos para el aprovechamiento energético, con respecto a las emisiones generadas **por la utilización de combustibles fósiles en la generación de energía para uso domiciliario, en el municipio de Tumaco, Nariño.**

2.2. Objetivos específicos

- Comparar las emisiones derivadas del uso de combustibles fósiles en la generación de energía térmica y eléctrica, con las emisiones producidas al aplicar la codigestión anaerobia en residuos de pesca, frutas y verduras.
- Determinar la mezcla de residuos de pescado, frutas y verduras, que permita aumentar la producción del biogás en el proceso de digestión anaerobia.
- Evaluar el potencial energético que brindará el aprovechamiento de los residuos de pescado, frutas y verduras a través de codigestión anaerobia.

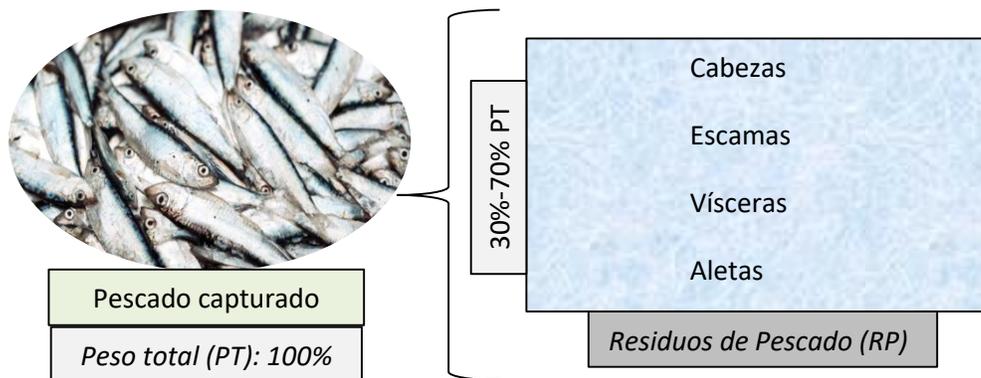
3. Revisión de literatura

3.1. Marco Teórico

3.1.1. Residuos de pesca (RP)

Los RP según Toppe et al. (2018) son subproductos, que no se destinan al consumo humano, suelen tener bajo valor económico y presentan características variadas al componerse de cabezas, escamas, vísceras, aletas, cola y columna vertebral. Estos elementos generalmente representan entre el 30% y el 70% del peso total del pescado (Figura 3-1). También se consideran residuos a las diferentes especies de peces pequeños o productos de capturas no deseadas, que tiene poco valor en el mercado debido a su tamaño o algún tipo de daño.

Figura 3-1: Diagrama de los residuos de pesca (RP).



Fuente: Adaptado de El Portal de la Acuicultura (2020).

3.1.2. Residuos de frutas y verduras (RFV)

Los RFV, son los desechos orgánicos que se derivan del proceso de fabricación, utilización y consumo de alimentos, que son considerados sustratos ricos en materia orgánica, pudiendo ser transformada en biogás, suelen originarse de la preparación y cocción de

alimentos en hogares, logrando niveles elevados de producción de metano durante la digestión anaerobia (Sánchez *et al.*, 2016). También, Los residuos de frutas y verduras representan un porcentaje alto de carbono, oxígeno y nitrógeno, así como “materia orgánica en forma de carbohidratos y proteínas, los cuales son fácilmente biodegradables por microorganismos especializados” (Cadavid y Bolaños, 2015, p. 26).

3.1.3. Pesca artesanal

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2016), entiende la pesca artesanal como un método de pequeña envergadura llevado a cabo por individuos a bordo de embarcaciones pequeñas en ríos, lagos o áreas costeras, este enfoque tiene la capacidad de operar dentro de un límite de hasta tres millas náuticas desde el mar territorial. Esta forma de pesca contrasta con el enfoque industrial de extracción, que emplea embarcaciones más grandes, como bolicheras y barcos de arrastre, con la capacidad de desplegar redes que capturan un mayor volumen de peces (Rodríguez *et al.*, 2011).

3.1.4. Huella de carbono (HC)

Según Núñez-Monroy (2012), el término "Huella de Carbono" fue utilizado sin una definición única, lo que llevó a investigadores a realizar estudios sobre sus usos. Tras una investigación de Wiedmann y Minx en 2007, se propuso “un término académico para la HC, basado en la definición científica aceptada y los principios de modelización. Se define como la medida total exclusiva de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) causadas directa o indirectamente por una actividad o acumuladas a lo largo de las etapas de vida de un producto”.

Es de resaltar que, la HC es más que la medición unitaria del CO₂ emitido, ya que se cuantifican todos los GEI que contribuyen en el calentamiento global (Figura 3-2), para después convertir los resultados individuales de cada gas a equivalentes de CO₂; es por esto, que la HC se expresa en unidades de dióxido de carbono equivalente (CO_{2eq}) (MINAGRICULTURA, 2014, como se citó en Lemus, 2018).

Figura 3-2: Esquema representativo de la HC.



3.1.5. Factores de emisión (FE)

El cálculo de emisiones puede realizarse por el método teórico o de manera indirecta (HCT) mediante FE. Estos factores se obtienen siguiendo metodologías respaldadas por entidades como el IPCC, la Agencia Ambiental de Estados Unidos (EPA), el *GHG PROTOCOL* y normas internacionales como la ISO 14064:2019 y la ISO 14067:2018. Es así como, la elección adecuada de factores de emisión para el cálculo depende del tamaño de la actividad emisora y se rige por las directrices del IPCC (Arroyave, 2017).

Según el Observatorio Ambiental de Cartagena de Indias (2015), los FE se expresan comúnmente como la masa del contaminante dividida por una unidad de peso, volumen, distancia o duración (Tabla 3-1). Además, son constantes que convierten los datos de actividad en emisiones de GEI. Por consiguiente, la elección de valores precisos es crucial para evitar subestimaciones (Bautista et al., 2015).

Tabla 3-1. Ejemplos de factores de emisión.

Factores de emisión por defecto de CH ₄ y N ₂ O de emisiones biológicas para el tratamiento de residuos				
Tipo de tratamiento biológico	Factores de emisión de CH ₄ (g CH ₄ / Kg de residuos tratados)		Factores de emisión de N ₂ O (g N ₂ O / Kg de residuos tratados)	
	En peso seco	En peso húmedo	En peso seco	En peso húmedo
Compostaje	10	4	0,6	0,24
	(0,08-20)	(0,03 – 8)	(0,2-1,6)	(0,06-0,6)
Digestión Anaerobia	2	0,8	Ficticio	Ficticio
	(0-20)	(0-8)	Despreciable	Despreciable

*Nota: La Tabla 3-1 muestra los factores de emisión por defecto para las emisiones de CH₄ y N₂O de tratamientos biológicos.

Adaptado de "Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero", 2006

3.1.6. Gases de efecto invernadero (GEI)

Se trata de sustancias químicas en forma gaseosa, presentes tanto de forma natural como generadas por actividades humanas, que se acumulan en la atmósfera terrestre. Estos

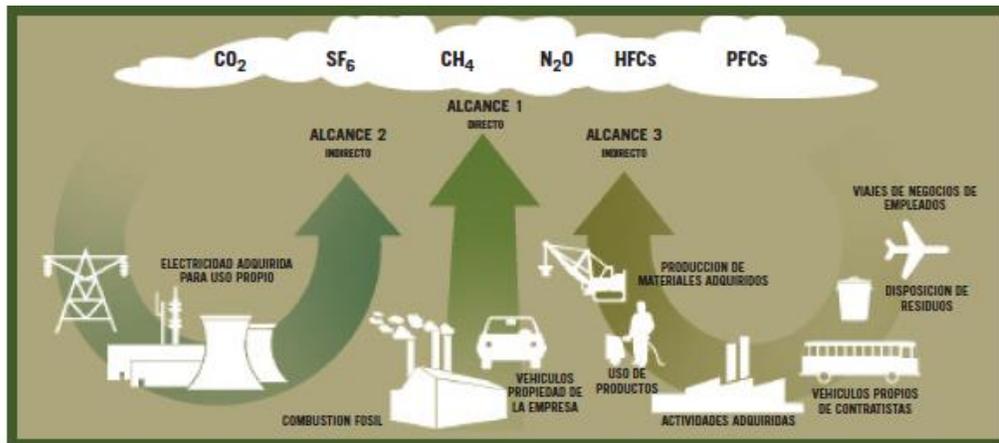
gases tienen la capacidad de absorber la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre, la atmósfera y las nubes, contribuyendo al aumento y retención del calor en el planeta (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2015).

Según la guía del *GHG PROTOCOL* (2014), los GEI son los siguientes siete gases cubiertos por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC) y enumerados en el Protocolo de Kioto: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC), hexafluoruro de azufre (SF_6) y trifluoruro de nitrógeno (NF_3).

3.1.7. Fuente de emisión

La fuente de emisión “es cualquier proceso, actividad, operación o mecanismo que libere un gas de efecto invernadero a la atmósfera” (*GHG PROTOCOL*, 2014, p. 146). Según el IDEAM (2018), la contaminación atmosférica surge de la emisión, acumulación y mezcla de gases contaminantes de fuentes naturales (volcanes, plantas) y antropogénicas (industrias, vehículos, etc.). Las fuentes se clasifican en fijas y móviles. Identificar la fuente es esencial para calcular las emisiones de GEI, ya que permite determinar la magnitud de una emisión específica según distintos alcances (Figura 3-3).

Las emisiones se miden de manera directa (HCI) o indirecta (HCT). La medición directa implica la obtención de datos a través del monitoreo *in situ* de concentración y flujo con un instrumento. En cambio, la medición indirecta estima la emisión recolectando valores a partir de datos relacionados mediante una función matemática, como el uso de balances de masa o fundamentos estequiométricos específicos para un proceso, así como factores de emisión documentados.

Figura 3-3: Alcances de las fuentes de emisión.

Fuente: Tomado de protocolo de Gases de Efecto Invernadero (2005).

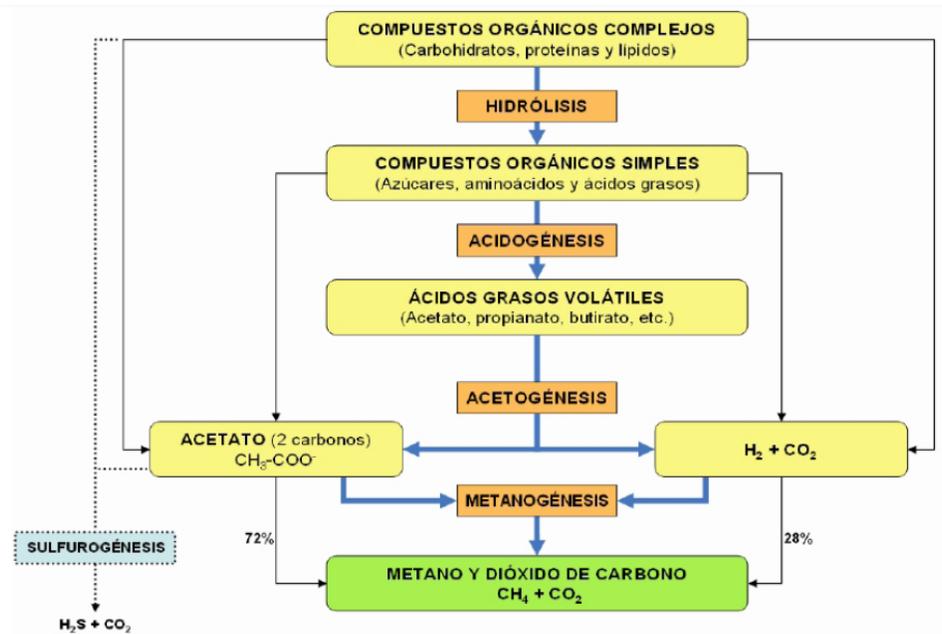
3.1.8. Digestión anaerobia (DA)

La DA, es un proceso bioquímico que involucra una gran variedad de microorganismos, los cuales descomponen el material biodegradable en ausencia de oxígeno, generando diversos gases, entre los cuales el CO₂ y el CH₄ son los más abundantes y puede incluir trazas de H₂S, NH₃, vapor de agua y algunos compuestos orgánicos volátiles (Wang et al., 2018, p. 282). Cuando se combinan diversos tipos de biomasa en la digestión anaerobia surge la codigestión anaerobia, proceso en el que se maximiza la producción de biogás mediante sustratos con altos niveles de nitrógeno y carbono (Sánchez Portilla & Vizcón Toledo, 2017).

Cabe destacar que la DA es una herramienta promisoriosa en la generación de biogás y su aplicación se ha extendido a un número creciente de sistemas de bioenergía (Bücker et al., 2020), puesto que utiliza fuentes de biomasa renovables, además de contribuir a la generación de energía eléctrica.

La DA es un proceso complejo que involucra múltiples reacciones bioquímicas y diversos microorganismos. Se divide en cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Durante estas etapas, se producen transformaciones bioquímicas simultáneas, como fermentación y respiración anaerobia, que forman parte de las rutas metabólicas de los microorganismos involucrados, generando energía en forma de ATP (Giménez, 2014).

Figura 3-4: Etapas de la digestión anaerobia.



Fuente: Adaptado de Pavlostathis y Giraldo (1991).

En cada etapa de la DA diferentes grupos de organismos generan productos intermedios, produciendo finalmente metano y dióxido de carbono (biogás) en la etapa de metanogénesis, el cual se puede utilizar como fuente de energía limpia en diversas aplicaciones.

Además, la DA también “presenta interés desde un punto de vista ecológico, dado que los productos de la metanogénesis (CH₄ y CO₂), son gases de efecto invernadero, que pueden desprenderse de los hábitats anaerobios en los que se generan, alcanzando la atmosfera”. En el ámbito de la generación de energía, “la DA destaca como el método más eficiente a partir de biomasa, superando a otros procesos biológicos y termoquímicos” (Zheng et al., 2014, citado en Aristizábal, 2015, p. 31).

3.1.9. Biogás

El biogás se produce a partir de la descomposición anaeróbica de compuestos orgánicos. Además, “el biogás pertenece al grupo de combustibles de fuentes renovables, dado que puede ser producido a partir de residuos sólidos o líquidos” (Souza & Schaeffer, 2013).

El metano (CH_4) es el principal componente del biogás, representando entre el 50% y el 75%. La proporción restante consiste principalmente en dióxido de carbono (CO_2), aunque pueden existir trazas de otros gases (NH_3 , H_2S). La concentración de estos gases depende de factores como las materias primas, las condiciones de descomposición y el tiempo de retención hidráulica (Varnero et al., 2012).

El potencial energético y económico del biogás es muy grande considerando “que 1 m^3 de biogás equivale a 0,62 litros de queroseno, por lo tanto, el biogás es adecuado para su uso alternativo, como tal, un sustituto ecológico para combustibles y otros materiales de fuentes fósiles” (Hadiyanto et al., 2015, p. 58).

3.1.10. Potencial bioquímico de metano (PBM)

Es una prueba ampliamente utilizada en la comunidad científica, para determinar el metano producido o acumulado por un sistema de biodegradación de materia orgánica bajo la acción de un consorcio microbiano en condiciones anaerobia, una forma rápida y económica para evaluar la degradación de un residuo orgánico y produciendo metano. “El valor experimental está dado en $\text{ml CH}_4/\text{g SV}$ adicionados al reactor, expresando la biodegradabilidad de un sustrato, indicada por el rendimiento de CH_4 por unidad de sólidos orgánicos que se adicionan o destruyen durante la DA” (Sánchez – Reyes et al., 2016).

El método fue propuesto inicialmente por Owen et al. (1979), luego modificado para optimizar su aplicación por Angelidaki et al. (2006). En años recientes, fue mejorado por el Protocolo Alemán VDI4630 (2006) y Holliger et al. (2016).

3.2. Estado del arte

3.2.1. Avances en la cuantificación de la huella de carbono: Gestión de residuos y uso de combustibles fósiles

El desarrollo económico y el aumento poblacional generan cada año más Residuos Sólidos Urbanos (RSU) a nivel global (Duan et al., 2021). Según el Banco Mundial, en 2016 se produjeron 2.010 millones de toneladas de RSU, y las proyecciones hasta 2050 indican que esta cifra podría alcanzar los 3.40 billones de toneladas. Además, se estima que alrededor de un tercio de todos los alimentos destinados al consumo humano se desperdicia, contribuyendo con 6,8% a las emisiones globales de GEI (Slorach et al., 2019). El 30% de estas emisiones se atribuye al metano generado en los vertederos, exacerbando directamente el problema del calentamiento global (Zúñiga, 2013).

El Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), mediante un estudio en el 2013, concluyó que los seres humanos han jugado un papel fundamental en la generación de emisiones de GEI, teniendo como resultado el aumento en 0,85 °C desde 1880 hasta 2012 (IPCC, 2014). De este aporte de emisiones antropogénicas, el sector de residuos contribuye al 5% de las emisiones totales de GEI, únicamente en la etapa de eliminación (Kaza et al., 2018). Además, otras estimaciones indican que los residuos aportan un 11% de las emisiones de GEI a nivel mundial (Lino & Ismail, 2017); dichos porcentajes se traducen según en Johari et al. (2012) en 760,6 millones de toneladas de GEI en 2010 a nivel mundial (USEPA, 2006, como se citó en Devadoss et al., 2021).

Según el IPCC (2006), las emisiones de GEI aumentaron un 70% entre 1970 y 2004, destacando el uso de combustibles fósiles para la generación de energía como una de las principales causas del incremento del CO₂ atmosférico. Cálculos indican que alrededor de dos tercios de las emisiones de CO₂ desde 1750 provienen de la quema de combustibles. Por otro lado, se registra un aumento del 40% en las emisiones de CH₄ desde el 2000, principalmente por la quema de combustibles y la disposición de desechos. Algunas proyecciones sugieren que las emisiones relacionadas con la producción y consumo de energía podrían aumentar entre un 40% y un 110% para 2030 respecto al año 2000.

Con relación a esto, las energías renovables surgen como solución frente a la presión progresiva de los combustibles fósiles. El deterioro ambiental derivado de la utilización de estos contaminantes se hace cada vez más evidente en un país como Colombia, donde según cifras del IDEAM (2012) el porcentaje de “emisiones a nivel nacional derivadas del consumo de energía por quema de combustibles fósiles es del 23,1% del total de emisiones del país” (p. 165). También, la diversificación energética es mínima, ya que cerca del 70% de la capacidad instalada es hidroeléctrica, adicional, las fuentes no convencionales de energía representan sólo el 2%, fuentes no convencionales de energía (CEPAL, 2021).

En Colombia, un país de orientación agrícola, aproximadamente el 65% del total de residuos sólidos municipales producidos corresponde a residuos orgánicos (UPME et al., 2010). Específicamente, los residuos de frutas y verduras poseen un notable potencial para su aprovechamiento energético, dada su alta biodegradabilidad y elevados contenidos de materia orgánica.

Según Ángel et al. (2010), la gestión ambiental se destaca como la principal prioridad en el siglo XXI. En este contexto, han surgido diversas herramientas de gestión de impactos ambientales, y en el marco del cambio climático global, la huella de carbono (HC) se posiciona como un indicador clave para comprender las emisiones de GEI. Por eso, autores como Shi y Yin (2021), describen la huella de carbono como un método eficaz para medir científicamente las emisiones de carbono mediante análisis cuantitativos.

Debido a la progresiva preocupación internacional por las consecuencias adversas del cambio climático, las organizaciones e instituciones se han visto alentadas a profundizar su conocimiento respecto de los GEI y su dinámica utilizando la HC, indicador que ayuda a generar estrategias en los procesos de toma de decisiones individuales de las empresas, regiones o países (Schneider y Samaniego, 2010).

El cálculo de la HC conduce a la adopción de objetivos y acciones unificadas, focalizando propósitos en la reducción de emisiones de carbono y promocionando a su vez, el desarrollo sostenible global. Sin embargo, aunque el uso de desechos de orgánicos para producir biogás se ha tratado en distintas investigaciones revisadas, aún se desconoce el

aporte en la reducción de las emisiones de CO₂ al aplicar el proceso biológico de digestión anaerobia en este tipo de residuos, teniendo como base el reemplazo de un sistema de generación de energía a partir de combustibles fósiles y sus emisiones respectivas.

En el contexto previamente expuesto, es relevante destacar la diversidad de métodos disponibles para cuantificar las emisiones de GEI. Se distinguen métodos directos o *In Situ* (HCI) e indirectos o teóricos (HCT). Al abordar cualquiera de las dos metodologías, se sigue el enfoque delineado por el Protocolo de Gases de Efecto Invernadero de 2005 (*GHG PROTOCOL*). Este protocolo establece que, para llevar a cabo el cálculo preciso de las emisiones de GEI, es fundamental identificar las fuentes de emisión, seleccionar un método de cálculo adecuado para estas emisiones y, posteriormente, recopilar datos sobre actividades y factores de emisión mediante la aplicación de las herramientas de cálculo correspondientes.

Al utilizar factores de emisión, la guía del IPCC (2006) para calcular emisiones de GEI en residuos y energía es una referencia clave. Debido a que ofrece fórmulas aplicables a diversas prácticas de gestión de RS, como la disposición en relleno sanitario, generadora de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), y otros compuestos orgánicos volátiles. En este contexto, es esencial destacar que el CH₄ en rellenos sanitarios contribuye alrededor del 3-4% de las emisiones antropogénicas globales anuales de GEI (IPCC, 2006). Además, la quema de combustibles en fuentes estacionarias de energía puede producir CO₂, CH₄ y N₂O, según el tipo de combustible utilizado.

Del mismo modo, si se requiere calcular la huella de carbono a nivel de organizaciones se pueden usar los protocolos de la Organización Internacional de Normalización (ISO), la cual ha publicado una serie de normas técnicas para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero, tales como: la ISO 14064:2019, que se compone de tres partes y brinda directrices para el cálculo de los inventarios de gases de efecto invernadero, así como la ISO 14040:2007 (ciclo de vida de productos).

Analizados distintos estudios donde se han utilizado métodos indirectos de cálculo de la huella de carbono, se encuentra el realizado por Cabezas y Chavarro (2020), en el cual se implantó la metodología de la ISO 14064 y el *GHG PROTOCOL*, cuantificando la huella de carbono de una universidad colombiana, centrándose en la gestión de los residuos

orgánicos, obteniendo que aquellas emisiones que generan mayor aporte a la producción de GEI son las correspondientes al alcance 3, las cuales incluyen combustión móvil, consumo de material y generación de residuos sólidos obteniendo un valor total de 10.938,77 Ton CO₂/ año.

Otro aporte, es la perspectiva de análisis de ciclo de vida (ACV), aplicada por Fernández et al. (2020) para una ciudad de Europa, en la cual se evaluaron distintas pruebas que permitieron comprobar que, para alcanzar una neutralidad de emisiones de GEI es necesario aumentar la capacidad de separación en la fuente de residuos y recuperación de energía a través de la producción de biogás. Aquí el sistema del tratamiento biológico contribuyó a reducir casi 8 veces las emisiones de GEI.

Respecto a los RP y su HC asociada, varios estudios se centran en la aplicación del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en la cadena de suministro del pescado, principalmente en la pesca industrial o de arrastre. En apoyo a esto, Sala et al. (2022) indicaron que el consumo de combustible en los buques pesqueros impacta directamente en la HC por cada kilogramo de pescado (7,6 kg CO₂/kg). Además, al analizar la pesca artesanal y su HC, una investigación reveló que la HC de la pesca artesanal es menor que la industrial, con una HC anual de 1,49 toneladas CO₂ por tonelada de pescado, utilizando el método de factores de emisión (Bravo & Chávez, 2020).

Dicha perspectiva de ciclo de vida, teniendo en cuenta lo expresado por el *GHG PROTOCOL* y la ISO 14044, también se aplicó en una investigación donde se evaluó la huella de carbono de distintas opciones de manejo de residuos sólidos: vertedero o relleno sanitario, incineración, compostaje y digestión anaerobia, concluyendo que esta última es la mejor opción para reducir la huella de carbono de los residuos de alimentos domésticos, debido a que tiene una huella de carbono tendiente a la neutralidad (Slorach et al., 2019).

En una investigación realizada por Malakahmad et al. (2017) se propuso tres sistemas para el tratamiento de residuos, evaluándolos conforme el cálculo de huella de carbono utilizando la metodología del IPCC del 2006, el primer sistema el vertido de residuos en rellenos sanitarios, el segundo la digestión anaerobia de residuos orgánicos y reciclaje de residuos plásticos, vidrio y textiles, y el tercer sistema la incineración de residuos. La

conclusión de este estudio indica que el segundo sistema contemplado fue el que provocó el CO₂ evitado más alto: -0,489 TonCO_{2eq} /Ton de residuos sólidos urbanos (RSU) debido a la recuperación de energía del biogás y a los residuos de plástico, vidrio y textiles reciclados que podrían reemplazar el uso de materia prima.

Siguiendo con el anterior planteamiento, se ha demostrado que, en comparación con otras opciones de gestión de residuos como el vertedero y la incineración, la digestión anaerobia de residuos orgánicos implica menores emisiones de GEI (Vosooghnia et al., 2021).

Al contrario, aunque no son de aplicación común, se ha realizado una recopilación de investigaciones que han aplicado mediciones directas o “*in situ*” (HCI) de GEI. De acuerdo con esto, en una investigación realizada por Huang et al. (2022), en la que se calcularon las emisiones netas de GEI de un embalse, se utilizó el método de cámara flotante para medir los flujos de gases, siendo este un método que se ha aplicado ampliamente durante las últimas décadas. Así mismo, Ryals et al. (2019) evaluaron los flujos de gases de desechos humanos utilizando cámaras de flujo estáticas en estanques de estabilización de residuos, recolectando muestras de gases que posteriormente se transfirieron a viales de vidrio para ser transportados a un laboratorio y realizar su respectivo análisis en un cromatógrafo de gases.

Otro estudio que analizó la medición directa de GEI fue llevado a cabo por Jiang et al. (2019), allí se evaluó las emisiones de CO₂, N₂O y CH₄, utilizando una cámara estática desde la primera fertilización en cada parcela para recolectar las emisiones de GEI. En cada muestreo, se extrajeron cinco muestras de gas de la cámara utilizando una jeringa de plástico en diferentes intervalos de tiempo, y se transfirieron a una bolsa de muestreo de gas de 100 ml para luego analizar el contenido con un cromatógrafo de gases.

La recolección de GEI y su análisis por cromatografía también se estudió por Santillan y Ramírez (2018), los cuales recolectaron muestras de gases de rumiantes (CO₂, N₂O y CH₄) del interior de cámaras dinámicas, extrayendo las muestras de aire mediante jeringas que son inyectadas en viales sellados para, posteriormente, ser analizadas mediante cromatografía de gases, concluyendo cromatografía es una herramienta útil para cuantificar las emisiones de GEI. Así mismo, Arenas (2015) evaluó las emisiones GEI

provenientes del suelo en un laboratorio. Las muestras de campo, previamente liofilizadas y almacenadas en viales, se llevaron a cromatografía para medir las concentraciones de CO₂, CH₄ y N₂O en partes por millón (ppm). Se emplearon reactores Batch y la técnica de muestreo "Gas Pooling" para extraer las muestras de biogás.

Con el propósito de comparar las emisiones de GEI entre un sistema sin tratamiento de residuos y otro mejorado mediante la DA, se requiere recopilar información secundaria relacionada con diversas variables como: actividades, factores de emisión, generación de energía, cantidad de viviendas, y combustibles utilizados. Esta recopilación será fundamental para establecer una línea base de emisiones. Posteriormente, se llevarán a cabo análisis cuantitativos mediante la implementación de la DA a escala de laboratorio, con el objetivo de generar y analizar el biogás resultante.

3.2.2. Diferentes métodos para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos

En el mundo, los residuos orgánicos, como las 46,5 megatoneladas de alimentos desperdiciados en la Unión Europea (Parlamento Europeo, 2017), representan la principal fuente de desechos. Por tanto, es esencial promover una gestión eficiente que evalúe desde la cuantificación de emisiones GEI, distintas opciones de aprovechamiento, como la digestión anaerobia y el compostaje.

Teniendo en cuenta lo relacionado, se reconoce la importancia de implementar otro enfoque en la gestión de residuos. De ahí que, en el contexto de la investigación del IPCC, se ha desarrollado la estimación de emisiones en tratamientos biológicos de residuos sólidos. Estas alternativas, como la digestión anaerobia y el compostaje de desechos orgánicos, ofrecen ventajas y desventajas.

La digestión anaerobia es un proceso biológico que, al actuar sin oxígeno, estabiliza y degrada la materia orgánica para generar biogás como subproducto, un biocombustible versátil. Sus ventajas incluyen la obtención de un gas con potencial energético, la reducción del volumen de residuos, bajos requerimientos hídricos, control de olores en ambientes controlados, eliminación de elementos patógenos y contaminantes, uso del

biosólido como abono orgánico, y la disminución de emisiones no controladas de gases de efecto invernadero (Pozuelo et al., 2004).

No obstante, la digestión anaerobia presenta algunas desventajas, tales como: el alto costo inicial de instalación de equipos y la susceptibilidad de los microorganismos degradadores a cambios en variables internas del digestor (acidez, temperatura, humedad y pH). Por tanto, se requiere una medición constante de estos parámetros para prevenir la inhibición de los microorganismos productores de biogás.

Este tratamiento, suele estar relacionado con la recuperación de metano y su combustión para obtener energía, por esto, se generan emisiones que deben calcularse en este proceso, siguiendo una serie de pasos propuestos por el IPCC, los cuales van desde la recopilación de datos sobre la cantidad y tipo de residuos, hasta la estimación de las emisiones de GEI dentro del tratamiento biológico.

El compostaje, logra eliminar con eficiencia contaminantes orgánicos (Lü et al., 2021), además, mejora la fertilidad del suelo y valora los residuos, requiere una inversión económica baja, reduce la necesidad de fertilizantes y acelera la degradación de desechos (Vaverková, 2020). Al mismo tiempo, potencia la actividad biológica del suelo, ahorra costos en la gestión de residuos, y demanda poco espacio a pequeña escala. No obstante, tiene desventajas, como la necesidad de espacio para almacenar materiales y ejecutar el proceso, la prolongación en climas fríos, exceso de humedad en periodos lluviosos y en ocasiones, bajo contenido de nitrógeno debido a controles deficientes.

Otro elemento importante en los tratamientos biológicos es la relación carbono – nitrógeno (C:N) de los sustratos a utilizar. En el caso de los residuos de pesca, esta relación es baja debido a su alto contenido de nitrógeno y bajo contenido de carbono, lo que disminuye la relación C:N del sistema. Esto resulta beneficioso al mezclarlos con materiales ricos en carbono, como los residuos de frutas y verduras, que tienen una relación C:N considerable, indicando alta disponibilidad de carbono y baja disponibilidad de nitrógeno. Por ejemplo, un proceso exitoso de compostaje implica la pérdida significativa de nutrientes valiosos para las plantas, especialmente de nitrógeno y azufre, debido a las emisiones de gases (Ahuja et al., 2020).

Varios estudios han evaluado el compostaje de residuos de pesca, frutas y verduras mediante métodos de pilas con aireación mecánica, generando compost de alta calidad comparable a fertilizantes orgánicos comerciales, con una relación carbono-nitrógeno (C/N) superior (Vega, 2015). Aunque métodos comunes incluyen la fabricación de harina y aceite de pescado, así como la producción de ensilaje para alimentación animal (Arvanitoyannis y Kassaveti, 2008), este estudio se enfoca en la codigestión de Residuos de Pesca (RP) con Residuos de Frutas y Verduras (RFV) para generar biogás. El objetivo es aprovechar su potencial energético y reducir su huella de carbono mediante la producción de energía renovable.

3.2.3. Producción de biogás a partir de residuos orgánicos: Estrategia para disminución de las emisiones

Existen diversos métodos para la disposición residuos orgánicos, el relleno sanitario es el más común para los países en vía de desarrollo, con alrededor del 70% de los residuos sólidos urbanos (RSU) destinados en vertederos (Kaza et al., 2018; Fishedick et al., 2014). Esta práctica genera preocupación debido a su contribución directa de gases de efecto invernadero (GEI), con consecuencias potenciales para la salud humana y el medio ambiente. Adicional, “la biomasa residual urbana causa un impacto negativo sobre los ecosistemas, cuando no se dispone de una forma ambientalmente segura y no se realiza ningún tipo de aprovechamiento”.

En Colombia, se producen alrededor de 230.000 toneladas de pescado anualmente, de las cuales 150.000 toneladas provienen de la pesca industrial y artesanal (Medina, 2018), mientras que el resto proviene de actividades productivas o acuícolas. La pesca artesanal, que representa el 75% de la producción total de pescado en el país, desempeña un papel significativo. En contraste, las frutas y verduras son los productos más desechados en Colombia, alcanzando 6.1 millones de toneladas al año, y el 36% de este desperdicio ocurre durante la distribución, venta y en los hogares, según el DNP (2016). Este escenario es preocupante, puesto que la mayoría de los residuos de frutas y verduras terminan en rellenos sanitarios o vertederos incontrolados, generando problemas ambientales significativos como la contaminación del agua, el suelo y el aire.

Sumado a ello, según el Ministerio de Minas y Energía (2011), en el país cerca del 65% de los residuos sólidos urbanos generados corresponde a residuos orgánicos, que pueden tener un potencial energético de hasta 91,72 TJ/año sólo teniendo en cuenta la biomasa residual urbana de los centros de acopio y las plazas de mercado.

La digestión anaerobia se postula como una tecnología para reducir las emisiones de GEI derivadas de la descomposición de residuos sólidos orgánicos (RSO), al mismo tiempo que produce energía limpia, según Cadavid et al. (2019). Estos investigadores destacaron el potencial energético de aprovechar los desechos de la pesca artesanal, y así proveer de energía a 200 hogares de pescadores en Tumaco, con una producción anual estimada de 489 MWh. Así, Morales (2019) demostró que, al aplicar co-digestión anaerobia a los residuos de frutas y verduras, se incrementaron las concentraciones de biogás y se mejoró la velocidad del proceso.

De igual modo, en un estudio reciente (Kreidensweis et al., 2021) sobre las emisiones de GEI relacionadas con el estiércol de pollos de engorde, se destacó que el tratamiento anaerobio para la producción de biogás generó las emisiones más bajas. Este método aprovecha el potencial energético del sustrato para producir calor y electricidad, reduciendo las emisiones de óxido nitroso durante el proceso y generando un digestato estable con alto contenido de nitrógeno, un valioso fertilizante. Pese a ello, una gestión cuidadosa es crucial para mantener bajas las emisiones de metano, lo que implica almacenar el digestato en un tanque cerrado y controlar posibles fugas en la unidad de almacenamiento del biogás.

Otra investigación muestra la ventaja en reducción de emisiones de GEI de la digestión anaerobia es el realizado por Aristizabal et al. (2015). Este proceso biológico se aplicó a residuos de poda en codigestión con residuos de frutas y verduras, evidenciando emisiones significativamente más bajas en comparación con un relleno sanitario. La implementación de esta tecnología podría evitar la emisión diaria de alrededor de 138 Kg de metano.

Con la intención de mitigar las emisiones, la codigestión de residuos resulta ser eficiente, implica aprovechar mayor cantidad de residuos orgánicos, disminuyendo de forma considerable la cantidad de desechos que van a sitios de disposición final sin ningún uso

energético, obteniendo mejoras en el rendimiento de biogás. Esto se visualiza en investigaciones como la de Bücken et al. (2020), donde se plantea que la viabilidad técnica y económica de lograr aplicar la codigestión con los residuos de pesca es alta, ya que trae consigo altos rendimientos de metano. Lo cual corrobora que este tipo de desechos son una alternativa prometedora para la producción de biogás en estos procesos.

En distintos lugares del mundo, los residuos de pescado han sido evaluados a través de digestión anaerobia para la generación de biogás. Se han utilizado reactores anaeróbicos de flujo ascendente, obteniendo rendimientos altos de metano, para producir energía térmica (Arvanitoyannis & Kassaveti, 2008). En otro estudio, realizado por Wu y Song (2021) se llevó a cabo una prueba de potencial bioquímico de metano (PBM) para evaluar el desempeño de la codigestión anaerobia, utilizando residuos de pescado como sustrato principal, y residuos de frutas como cosustrato; esto generó aumentos en la producción acumulada de metano de 212,3 ml CH₄/gSV (100% lodo) a 410,1 ml CH₄/gSV y 683,8 ml CH₄/gSV, respectivamente.

Asimismo, Peralta y Serrano (2019), en una investigación demostraron que la codigestión de desechos es un proceso que puede mejorar la concentración porcentual de sustratos ricos en carbono y nitrógeno, los cuales proporcionan un aumento en el potencial de metano, Dicha afirmación la respalda el estudio de García et al. (2015), en donde se logró incrementar en un 70% la producción de biogás al establecer mezclas eficientes en la codigestión de los residuos.

Cuando se estudia la DA, la “cantidad de inóculo es un factor clave para la puesta en marcha del proceso, debido a que una cantidad adecuada de inóculo mejora la etapa de la hidrólisis, acelerando la producción de biogás” y evitando la acidificación del reactor (Kawai et al., 2014), además según la literatura se recomiendan diferentes valores de relación inóculo-sustrato (RIS), los cuales varían dependiendo de las características de ambos (Raposo et al., 2011).

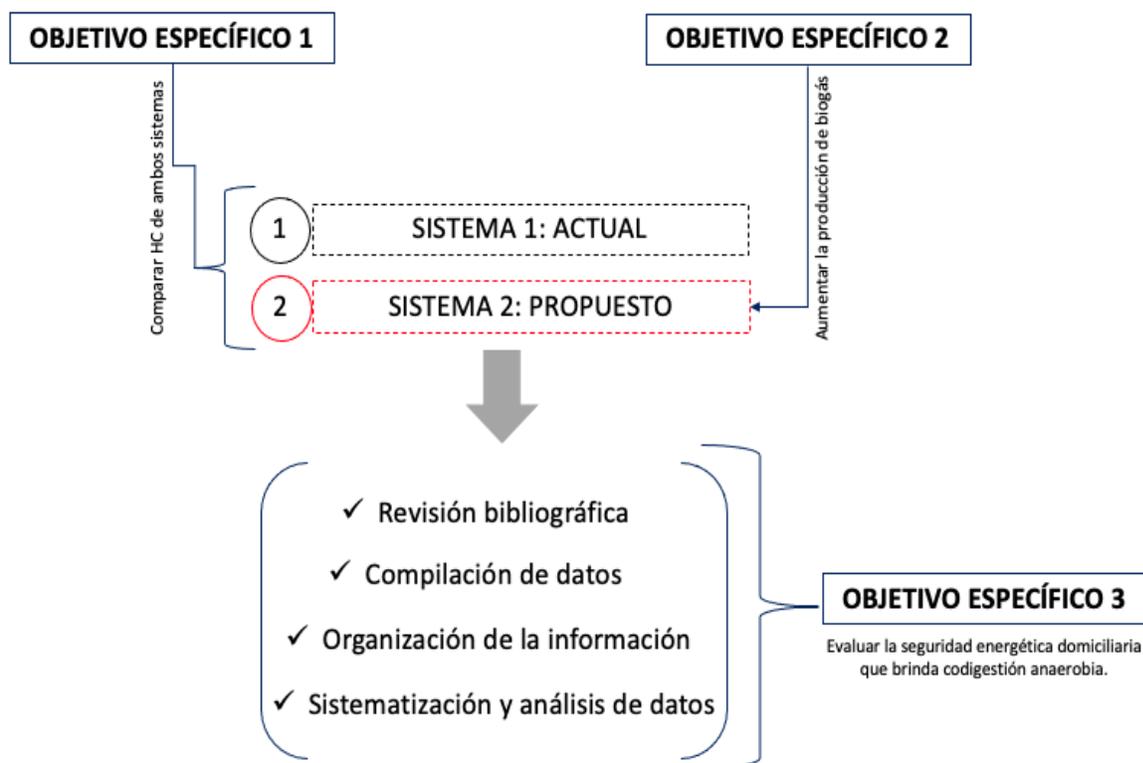
En Tumaco, Nariño, Cadavid et al. (2019) investigaron la viabilidad de generar metano a partir de desechos de pescado como fuente de energía renovable para las comunidades pesqueras locales. El estudio evaluó

cuatro concentraciones de desechos de pescado durante 28 días en condiciones mesófilas, proyectando la producción de energía para estimar el beneficio potencial para las familias. Los resultados indicaron que la concentración al 1% de ST tuvo el mayor potencial (464,5 ml CH₄/gSV), mientras que el 2,5% ST mostró la menor producción de metano (206,86 ml CH₄/gSV), planteando para la proyección energética una producción de pescado aproximada de 1.131 Ton/año de las cuales se estimaron que 509 Ton/año correspondían a RP. Además, se obtuvo la generación de residuos orgánicos en Tumaco mediante un estudio de caracterización realizado por el Relleno Sanitario del municipio y la empresa AGUAS DE TUMACO S.A.S (Jonathan, J., comunicación personal, 20 de abril de 2022), en el cual se registró un total de 33.700,18 Toneladas/año de residuos sólidos, de los cuales el 71% son correspondientes a la fracción orgánica equivalen a 21.827,13 Toneladas/año.

4. Materiales y métodos

La presente metodología se desarrolló con base en los objetivos específicos propuestos. En ella se describieron las técnicas, diseños, simulaciones, pruebas, ensayos y otras actividades que permitieron alcanzar de manera eficaz dichos objetivos (Figura 4-1).

Figura 4-1: Diagrama metodológico.



Para el desarrollo de los objetivos, se establecieron los sistemas descritos a continuación:

SISTEMA 1 (actual): Ausencia en la gestión integral de los residuos de pesca artesanal, frutas y verduras, y generación de emisiones de gases de efecto invernadero por la quema

de combustibles fósiles (Diésel y GLP) para la producción de energía térmica y eléctrica en los hogares de Tumaco, Nariño.

SISTEMA 2 (propuesto): Aprovechamiento de los residuos de pesca artesanal, frutas y verduras a través de digestión anaerobia, para la generación de energía térmica y eléctrica en los hogares de Tumaco, Nariño.

4.1. Desarrollo de los objetivos específicos 1 y 2

4.1.1. Actividad 1: Recolección de la información

- **Revisión Bibliográfica.**

Se realizó recolección de la información relevante para el cálculo indirecto o “teórico” (HCT) de la HC para el **SISTEMA 1 (actual)**. De igual forma se recolectó la información pertinente para el cálculo de la HCT, así como para el cálculo directo o “*in situ*” de la HC (HCI) para el **SISTEMA 2 (propuesto)**.

Esta revisión sistemática de la literatura se realizó principalmente en un periodo de búsqueda entre 2005 – 2024, a través de fuentes oficiales indexadas, principalmente la base de datos de la UNAL (SINAB) y plataformas como Google Académico, Mendeley, entre otros. La revisión de bibliografía se focalizó en los siguientes tipos de documentos: artículos científicos, normativa internacional y nacional, guías de entes oficiales para el cálculo de la HC y documentos de entidades gubernamentales nacionales e internacionales.

Posteriormente, en la fase de compilación de datos, se ejecutó la fase experimental de la codigestión anaerobia en el laboratorio, utilizando los RP, así como los RFV, con el objetivo de aumentar la producción de biogás.

- **Compilación de datos.**

A partir de la revisión bibliográfica, se realizó una recolección de los datos con el fin de tener una base científica al ejecutar las mediciones indirectas producidas por el SISTEMA 1 y las mediciones, tanto directas como indirectas, producidas por el SISTEMA 2. Toda ésta información se constituyó en la base para el cálculo de las emisiones teóricas en términos de $\text{CO}_{2\text{eq}}$, que produce la quema de combustibles fósiles para la generación de

energía térmica y eléctrica, así como aquellas producidas por los RP y RFV, al ser tratados con DA. También se investigaron diversas fuentes de información, con el fin de llevar a cabo la codigestión de RSO a escala de laboratorio, para lograr aumentar la producción y calidad del biogás.

Cabe resaltar, que para establecer los datos en el SISTEMA 2, principalmente aquellos relacionados con la HCI, se aplicaron técnicas experimentales, con el fin de realizar el proceso de DA con varios sustratos.

Obtener datos de ambos sistemas involucró llevar a cabo una serie de actividades, las cuales se describen a continuación:

Sistema 1 (actual): Se utilizó el método de cálculo indirecto o teórico para estimar la HCT, por medio de factores de emisión. Para ello fue necesario:

- ✓ Identificación de fuentes de emisión: La fuente de emisión se determinó con base en las directrices del IPCC de 2006 para el cálculo de los inventarios nacionales de GEI en sus Capítulos: Combustión estacionaria, y eliminación de desechos sólidos, adoptando la metodología del *GHG PROTOCOL* y estableciendo la información que se requiere para calcular las TonCO_{2eq} en el sistema actual (Tabla 4-1).

Tabla 4-1. Identificación de fuentes de emisión.

Fuente de emisión (IPCC)	Nombre de la fuente	GEI generados	Fuente
Eliminación de desechos sólidos	Relleno sanitario de Tumaco	CH ₄ – CO ₂ (biogénico)	IPCC, 2006 (Vol.5)
Combustión estacionaria	Plantas generadoras DIESEL	CO ₂ – CH ₄ – N ₂ O	IPCC, 2006 (Vol.2)
Combustión estacionaria	Consumo de GLP	CO ₂ – CH ₄ – N ₂ O	IPCC, 2006 (Vol.2)

- ✓ Selección del método de cálculo: Las emisiones fueron calculadas utilizando las fórmulas, parámetros y FE descritos en el protocolo del IPCC (2006).

- ✓ Elección de datos de actividad: Esta información se recolectó a través de un trabajo en campo realizado del 19 – 22 de abril del 2022, en el cual se aplicó una encuesta (Anexo A) en diversas entrevistas a distintos funcionarios de organizaciones territoriales centralizadas y descentralizadas del municipio de Tumaco (Tabla 4-2). Esto con el fin de obtener información veraz y actualizada, con la que cuentan estas entidades por medio de diferentes herramientas tales como: entrevistas, censos, estudios técnicos, etc.

Tabla 4-2. Entrevistas realizadas a distintos actores de entidades del municipio.

Entidad	Nombre funcionario	Cargo	Fecha
Alcaldía de Tumaco	María Elva Landázuri	Directora oficina de Hidrocarburos	19 de abril de 2022
Secretaría de Planeación	Nilo Humberto Narváez	Secretaría de Planeación	19 de abril de 2022
Aguas de Tumaco E.S.P	Jonathan Jiménez	Inspector técnico área de acueducto	20 de abril de 2022
CEDENAR	David Montaña	Gerente zona pacífico	21 de abril de 2022
Universidad Nacional de Colombia Sede Tumaco.	Oscar Yépez	Ingeniero Químico, planta piloto de biogás	22 de abril de 2022

*Nota. La Tabla 4-1 muestra las visitas realizadas y sus fechas correspondientes, de las cuales se obtuvo información secundaria para el proyecto.

Durante estos días, se realizaron recorridos en los principales puntos de acopio de Tumaco, lugares en donde se hace el beneficio del pescado (Figura 4-2), aprovechando lo útil y desechando lo que no se utiliza para venta, es decir los RP. Principalmente se evidenció que las mayores cantidades de pescado arriban a la zona urbana de Tumaco a través del Puerto ubicado en la galería.

De este punto, en un perímetro a la redonda de aproximadamente 0,5 kilómetros se encuentran los diversos puntos de venta de pescado, así como de frutas y verduras. Por lo cual, esta zona es de especial interés para la recolección de muestras de RP y RFV.

Figura 4-2: Puntos de generación de RP y RFV en Tumaco



De igual forma entre los años 2022 y 2023 se continuó recolectando información secundaria a través de diversas fuentes académicas y municipales, con el fin de contar con información actualizada en el tiempo.

- ✓ Elección de factores y parámetros de emisión: para la elección del factor de emisión se tuvo en cuenta lo dispuesto por el IPCC en los capítulos antes mencionados, eligiendo factores de emisión específicos a nivel país cuando fue necesario, o factores de emisión referentes al tipo de tecnología de generación.
- ✓ Incertidumbre atribuible a los datos: conforme a lo publicado por el IPCC, se tuvo en cuenta la incertidumbre atribuible a cada una de las entradas, clasificándose en datos de actividad y parámetros.
- ✓ Aplicar herramientas de cálculo: a través de métodos de cálculo en Excel, y con base en distintas herramientas disponibles tanto intersectoriales como sectoriales, se realizó el cálculo de la huella de carbono de la generación de energía por medio del uso de combustibles fósiles y por una disposición inadecuada de los RSO.

Sistema 2 (propuesto): Se utilizaron los dos métodos de cálculo de la HC: La medición teórica o indirecta a través de factores de emisión (HCT) y la medición directa o “*In Situ*” (HCI) utilizando metodologías experimentales en laboratorio.

Cabe resaltar, que la HCT para el Sistema 2, se calculó siguiendo la misma metodología propuesta para el Sistema 1.

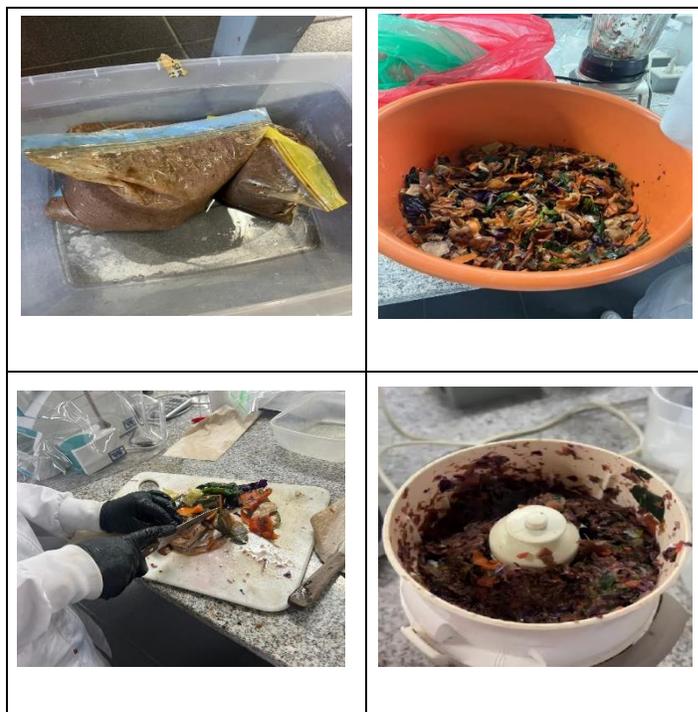
Medición directa o “*In Situ*” (HCI) mediante recolección de gases en laboratorio

- Recolección del inóculo y el sustrato: Para aplicar la DA a escala de laboratorio, se recolectó lodo metanogénico floculento de un reactor UASB, procedente de una industria de beneficio de reses en el municipio de Candelaria, Valle del Cauca, mezclándolo con un lodo granular proveniente de una PTAR de un ingenio, con el fin de obtener un inóculo mixto, en una proporción 70:30 lodo floculento:lodo granular. Al combinar estos inóculos se busca que el lodo floculento aporte una comunidad microbiana adaptada a condiciones específicas, lo que facilita la degradación de compuestos orgánicos. Por otro lado, el lodo granular puede

contribuir con una mayor diversidad microbiana, con las capacidades de degradar compuestos específicos.

En cuanto a los sustratos, los RP se recolectaron en el Puerto de Tumaco y los RFV, se obtuvieron en un restaurante típico de la gastronomía del pacífico. Los sustratos se trituraron con una procesadora de alimentos, para reducir el tamaño y homogenizarlos hasta un tamaño aproximado de 4-6 mm. El inóculo fue sometido a un proceso de desgasificación en la incubadora a 37 °C por 8 días (Figura 4-3).

Figura 4-3: Preparación de los sustratos.



- Análisis iniciales de caracterización y seguimiento: Al sustrato e inóculo se les realizaron pruebas físico químicas al inicio del experimento (Tabla 4-3), siguiendo los métodos estándar (APHA y ASTM, 1999) (Figura 4-4). Lo anterior, para analizar la estabilidad del proceso a través de parámetros de control.

Tabla 4-3. Pruebas fisicoquímicas realizadas al inóculo y sustrato.

Parámetro	Método APHA
Demanda química de oxígeno (DQO)	1030 D.

Sólidos totales (ST)	2540 B.
Sólidos volátiles (SV)	2540 E.
Humedad	9020 B.
pH	9020 B.
Nitrógeno amoniacal (NH ₃ – NH ₄)	4500 C.
Alcalinidad	2320 B.
Ácidos grasos volátiles (AGV's)	5560 D.

Figura 4-4: Pruebas fisicoquímicas realizadas al inóculo y sustrato.



- **Diseño experimental:** En la configuración experimental, se tuvo en cuenta la información secundaria (generación de RS), suministrada por diversas organizaciones y/o entidades del municipio. Con el objetivo de sustentar el diseño de mezclas en los tratamientos de DA, se buscó en la literatura distintas cifras de aprovechamiento de RSO en Colombia.

De esta manera, se establecieron escenarios por las lecciones aprendidas de varios autores que han estudiado casos exitosos de aprovechamiento de RS en el país, los cuales han planteado que se pueden aprovechar de un 17% – 65 % de la

fracción orgánica de RS que llegan a disposición final en rellenos sanitarios (Rojas Avendaño, 2022; DNP, 2016; Jaramillo & Zapata, 2008).

Una vez realizado esto, se establecieron las distintas mezclas de RSO en la DA, teniendo en cuenta la generación real de RS en el municipio de Tumaco y el porcentaje másico correspondiente (Tabla 4-4). De allí, que el número de tratamientos a evaluar fueron cuatro: T1 (RP 100), T2 (RFV 100), T3 (15:85) (%peso/peso) y T4 (50:50) (%peso/peso). Los tratamientos en codigestión están en términos de RP:RFV. De igual forma, por efectos de síntesis y facilidad en el cálculo de emisiones, los potenciales acumulados de biogás de los tratamientos en monodigestión (RP y RFV) se sumaron (100:100), proyectándose así mismo la cantidad real generada de ambos RS en el municipio.

Tabla 4-4. Información base para el diseño de mezclas sistema 2.

Escenarios de aprovechamiento RSO	Cantidad RP (Ton/año)	Cantidad RFV (Ton/año)	Generación total RSO (Ton/año)	% másico tratamiento DA
100%RP + 100%RFV	2.100,00	21.827,13	23.927,13	100:100
100%RP + 65% RFV	2.100,00	15.552,63	17.652,63	15:85
100% RP + 17% RFV	2.100,00	4.067,61	6.167,61	50:50

*Nota. La Tabla 4-4 muestra las cantidades de RSO que se disponen en el Relleno Sanitario de Bucheli y sus proporciones conforme distintos escenarios de aprovechamiento. Información extraída de (Aguas de Tumaco, 2022; Galeano,2022).

Empleando un diseño experimental completamente al azar, siendo el sustrato el único factor considerado, se definieron cuatro niveles, identificados como RP, RFV, y las combinaciones de RP y RFV en diversas concentraciones, dando lugar a un total de cuatro tratamientos distintos (ver Tabla 4-5). Asimismo, se aclara que, aunque se consideró la caracterización del Relleno Sanitario del municipio de Tumaco, no se estimó la cantidad de RSO que, por diversas razones, no llega al vertedero debido a la falta de datos de generación en el territorio.

Tabla 4-5. Diseño experimental para la evaluación de la producción de biogás.

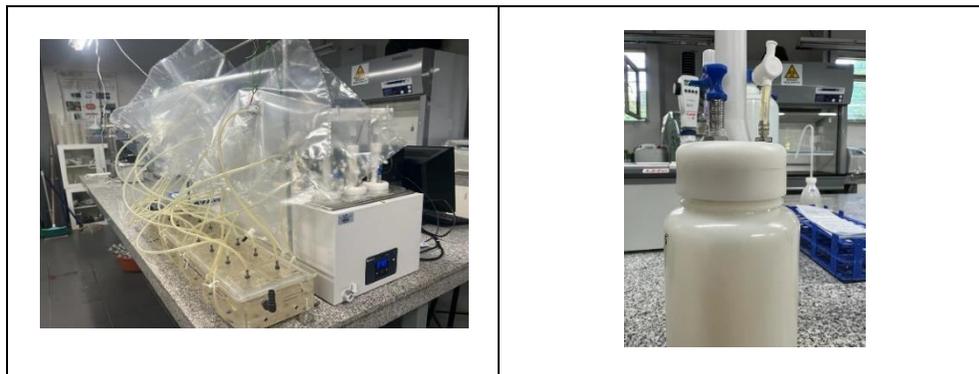
	Factor: sustrato			
	RP	RFV	RP + RFV	RP + RFV
Tratamientos	T1 (100)	T2 (100)	T3 (15:85)	T4 (50:50)

- Evaluación del potencial de metano (PBM): La DA de los RSO se evaluó en una prueba de PBM, teniendo en cuenta un diseño experimental completamente aleatorio. En la monodigestión se establecieron 2 tratamientos: El tratamiento 1 (T1) únicamente RP y el tratamiento 2 (T2) conformado solo por RFV; de igual forma para la codigestión se evaluó la misma cantidad de tratamientos con diferentes proporciones: El tratamiento 3 (T3) conformado por RP 15% y RFV 85% en peso (15:85) y el tratamiento 4 (T4) constituido por RP 50% y RFV 50% en peso (50:50). Lo anterior en términos de RP:RFV (%peso/peso) (Tabla 4-5).

Como unidades experimentales se utilizaron reactores de 1L, con un volumen efectivo de 700 ml y una concentración total (inóculo + sustrato) de 40 g/L para cada tratamiento. Luego, con una relación inóculo: sustrato (I:S) [g SV inóculo/ g SV sustrato] de 2:1 se calculó la masa de S.V. totales correspondientes al inóculo y sustrato, teniendo en cuenta el volumen total a construir. Todos los tratamientos se realizaron por triplicado, utilizando una relación inóculo/sustrato de 1/2, siguiendo el protocolo VDI4630. Los espacios de cabeza de todos los reactores se purgaron con nitrógeno para garantizar un ambiente anaerobio en el medio. Las unidades experimentales se incubaron a 37°C con agitación constante de 60 rpm en un equipo especializado (Figura 4-5). Asimismo, cada reactor contaba con un caudalímetro de biogás, el cual se almacenaba en bolsas para medir su calidad.

El experimento duró 37 días. El final de la prueba se determinó “cuando la producción diaria de metano durante tres días consecutivos fue menor a 1,0% del volumen acumulado” (Holliger et al., 2016).

Figura 4-5: Reactores dispuestos en equipo PBM.



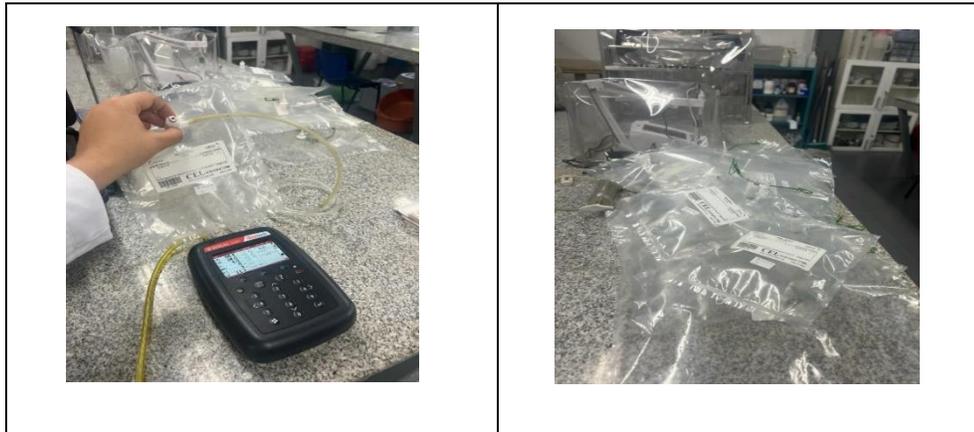
- Análisis finales de caracterización y seguimiento: Una vez el experimento finalizó, se realizaron pruebas físico químicas al digestato proveniente de cada tratamiento (Tabla 4-6), siguiendo los métodos estándar (APHA y ASTM, 1999). Toda vez que era importante analizar la remoción de carga orgánica, sumado a otros parámetros inhibitorios del proceso.

Tabla 4-6: Pruebas fisicoquímicas realizadas al digestato.

Parámetro	Método APHA
Demanda química de oxígeno (DQO)	1030 D.
pH	9020 B.
Nitrógeno amoniacal (NH ₃ -NH ₄)	4500 C.
Alcalinidad	2320 B.
Ácidos grasos volátiles (AGV's)	5560 D.

- Análisis de muestras gaseosas: A través del equipo Biogás 5000, se logró determinar la cantidad de cada uno de los gases (GEI), los cuales componían el biogás que provenía de los reactores. Para esto se conectaban las Bolsas Tedlar al equipo y se anotaban los valores correspondientes en términos de concentración (Figura 4-6).
- Análisis de GEI: Con las medidas de las concentraciones de GEI, se realizaron los cálculos pertinentes para convertir las unidades de volumen que proporcionó el equipo (% y ppm) a unidades másicas (Kg). En general, las mediciones con el Biogas 5000 arrojaban valores altos de concentración en los siguientes gases: CH₄, CO₂, y N₂O. Esto es congruente con lo planteado por Campos et al. (2016), quienes aseveran que dichos gases son representativos a la hora de evaluar la DA, ya que sus flujos se producen biológicamente de manera mayoritaria.

Figura 4-6: Medición de la calidad del biogás.



- Aplicar herramientas de cálculo: Una vez obtenidas las concentraciones de los GEI de forma directa para el sistema de tratamiento, se calculó la huella de carbono, sumando los valores en términos de concentraciones para cada uno de los gases evaluados. Lo anterior, se realizó a través de métodos de cálculo en Excel, y con base en distintas herramientas disponibles.
- Determinación de la mejor mezcla: Se llevó a cabo el análisis de los datos de producción acumulada de biogás y metano para cada tratamiento. Esta evaluación permitió la comparación entre los tratamientos en monodigestión y los de codigestión, culminando el experimento con la identificación de la mejor mezcla. Esta última se definió como aquella que mostró el rendimiento más alto en la producción de biogás.

4.1.2. Actividad 2: Organización de la información

- **Organización y Depuración de los Datos.**

La información recolectada para el cálculo de la HC y la determinación de la mejor mezcla en codigestión de los RSO, se organizó en un documento técnico y para los datos recolectados se crearon bases de datos en Excel.

4.1.3. Actividad 3: Sistematización y análisis de datos

- **Interpretación y sistematización de datos.**

Para los datos obtenidos de producción acumulada de biogás y metano, se ejecutó un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia α de 0.05, para determinar si existían diferencias significativas en las medias de los valores obtenidos. En particular, se llevó a cabo ANOVA de un solo factor (sustrato). Los valores de producción se seleccionaron para el análisis, ya que son datos acumulativos y el último punto de datos engloba toda la información recopilada durante el experimento.

Posteriormente, se realizó un análisis post-ANOVA mediante la prueba de Tukey, con el fin de agrupar los tratamientos que presentan diferencias significativas entre sí. Este análisis estadístico se llevó a cabo utilizando dos programas informáticos distintos: R y SPSS.

También se interpretaron los resultados conseguidos con el método de la HCT, así como los obtenidos por el método de la HCI a través de distintos softwares de análisis de datos, para establecer análisis de los resultados obtenidos; y de esta forma, analizar con mayor objetividad los datos y sus tendencias en el proceso de investigación, con el fin de lograr los objetivos propuestos. Así pues, con los datos teóricos recolectados a través de la metodología de factores de emisión, se buscó analizar si la técnica de DA es efectiva a la hora de reducir las emisiones, tomando como base el sistema actual en donde se utilizan combustibles para la generación de energía.

4.2. Desarrollo del objetivo específico 3

4.2.1. Actividad 1: Compilación de la información obtenida

Se organizó toda la información obtenida al ejecutar los objetivos específicos 1 y 2, con el fin de tener claros los resultados de la investigación, sus aciertos, aspectos por mejorar y desviaciones. Esto se realizó a través de una base de datos con tablas de resultados y análisis de gráficos, con el fin de conocer los datos a utilizar para evaluar la seguridad energética domiciliar que brinda el aprovechamiento de los RP y RFV a través de codigestión anaerobia.

4.2.2. Actividad 2: Análisis de potencial energético

Se realizó un cálculo de eficiencia energética, utilizando el poder calorífico del biogás, así como su eficiencia en un generador eléctrico, propendiendo obtener su potencial de generación de energía. Esto, para de determinar el impacto energético que tendría el implementar un sistema de codigestión de RP y RFV en Tumaco, en términos de hogares beneficiados y/o abastecidos energéticamente.

5. Resultados y Discusión

5.1. Revisión Bibliográfica

Los datos de interés obtenidos en la revisión bibliográfica tanto para el SISTEMA 1 como para el SISTEMA 2 se detallan en el Anexo B.

5.2. Compilación de datos

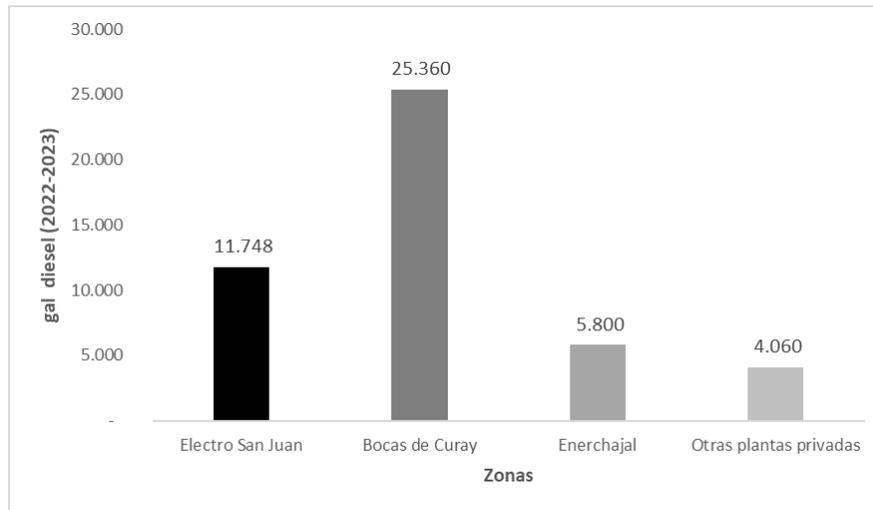
5.2.1. Sistema 1 (actual)

Medición indirecta o teórica (HCT) mediante la aplicación de factores de emisión.

Una vez se realizó la visita de campo en Tumaco, se procedió a sintetizar la información secundaria, obtenida por medio de entrevistas a distintos actores locales (Anexo C). Esto fue la base para determinar los datos de actividad (consumo de combustibles y generación de RSO).

Entre los años 2022-2023 para el consumo de DIESEL (Figura 5-1), se tuvieron en cuenta tres ZNI rurales (Electro San Juan, Bocas de Curay y Enerchajal), en donde se utilizan plantas eléctricas (21 plantas) para abastecer de energía a las distintas veredas de cada una de las zonas, a las cuales llega el DIESEL en carro tanque cada 3 meses para su posterior transporte (Anexo D). Asimismo, se cuantificó la cantidad de combustible consumida de otras plantas privadas, las cuales reportaron 4.060 gal/año. De igual forma, los consumos trimestrales para Electro San Juan, Bocas de Curay y Enerchajal fueron de 2.937 gal, 6.340 gal y 2900 gal, respectivamente. Los resultados mostraron que para este periodo se utilizó un total de 46.968 gal de DIESEL.

Figura 5-1: Consumo DIESEL 2022-2023



Respecto al consumo del GLP, la empresa Gas Tumaco Del Pacifico S.A.S E.S.P, en el año 2021 realizó un informe llamado: “ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MASIFICACIÓN DE GAS DOMICILIARIO POR REDES PARA EL MUNICIPIO DE TUMACO” DEL DEPARTAMENTO DE NARIÑO”. En dicho estudio se realizó un estimativo del consumo del GLP en el municipio (Tabla 5-1).

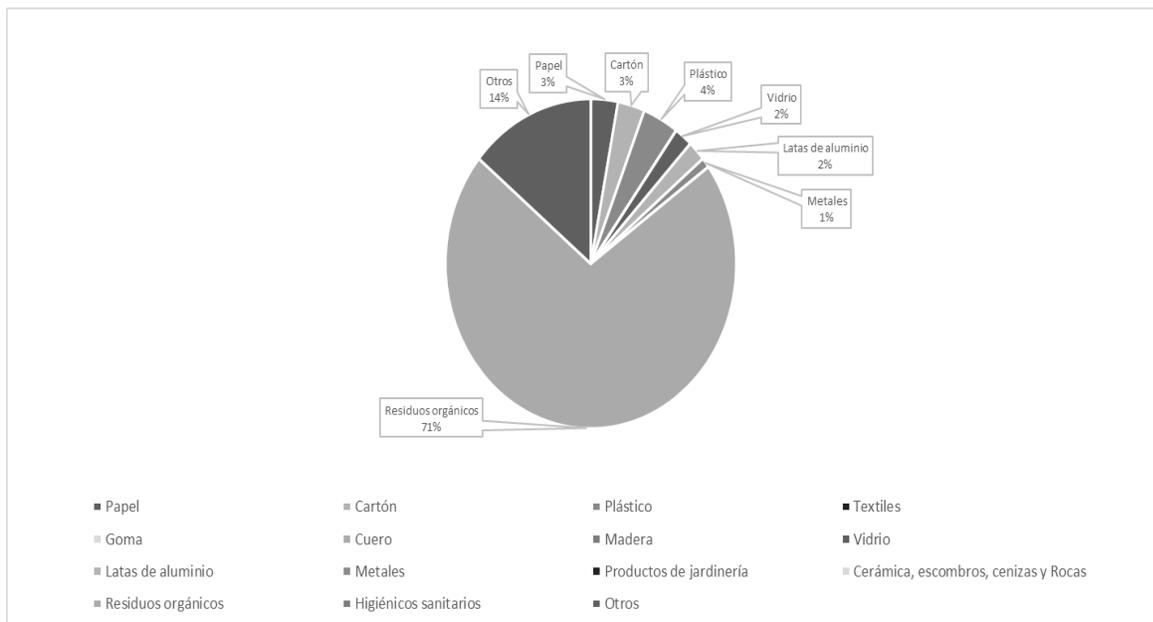
Tabla 5-1. Consumo de GLP promedio para Tumaco.

Descripción	Dato	Unidad ¹
Utilización de GLP en el casco urbano de Tumaco.	91	%
Utilización de GLP en las veredas de Tumaco.	92	%
Utilización alterna entre GLP y leña.	2,7	%
Usuarios que consumen GLP	232	Nº
Consumo promedio de GLP	10,22	gal por usuario/mes
Consumo promedio de GLP	1,15	Cilindros de GLP de 40 Lb/mes
Consumo total de galones al mes de GLP	2.374,7	gal/mes

Nota: La Tabla 5-1 muestra los datos que sirven de apoyo para el proyecto, y los cuáles fueron extraídos de “Gas Tumaco Del Pacifico S.A.S. E.S.P., 2021”. ¹Descripción unidades: % = Porcentaje; Nº = Número; gal = Galón.

Por otro lado, se analizó la generación de RSO en el municipio y su disposición final en el relleno sanitario. Para esto, se tomó como base una caracterización por cuarteo, realizada por la empresa Aguas de Tumaco E.S.P (Figura 5-2). La cuál, tuvo como resultado que la mayor cantidad porcentual de residuos que llega al relleno es de origen orgánico.

Figura 5-2: Caracterización de RS en el Relleno Sanitario de Tumaco



Igualmente, para el año 2019, la empresa de servicios públicos de Tumaco proyectó una producción per cápita de RS (Ppc) de 0,63 Kg Hab /día. Teniendo en una población de 163.158 habitantes, se estimó una producción de RS diaria y anual de 103 Ton/día y 32.070.34 Ton/año respectivamente (Tabla 5-2).

Tabla 5-2. Producción per cápita relleno sanitario BUCHELLI en Tumaco.

Año	Población	Ppc (Kg/hab-día)	Ton/día	Ton/año	Ton acumuladas
2012	126.350	0,63	80	24.835,36	24.835,36
2013	130.141	0,63	82	25.280,42	50.415,77
2014	134.045	0,63	84	26.347,83	76.763,60
2015	138.066	0,63	87	27.138,26	103.901,87
2016	142.208	0,63	90	27.138,26	103.901,87
2017	146.408	0,63	92	28.777,96	160.632,24
2018	150.608	0,63	95	29.603,51	190.235,74
2019	154,758	0,63	97	30.419,23	220.654,98
2020	158.958	0,63	100	31.244,78	251.899,76
2021	163.158	0,63	103	32.070,34	283.970,10

Nota: Esta tabla ha sido adaptada de: "Jonathan, J., comunicación personal, 20 de abril de 2022".

También, se obtuvo información de un informe técnico proveído por la empresa Aguas de Tumaco E.S.P. Allí se describía la producción de RS generados tanto en la zona urbana o

cabecera, así como en la zona rural del municipio para el año 2014 (Tabla 5-3), de los cuales aproximadamente el 71% son de origen orgánico. Por consiguiente, para dicho año en Tumaco se generaron al mes un aproximado de 1.351.421 toneladas de RSO.

Tabla 5-3. Producción de RS en la zona urbana y rural de Tumaco.

PROVEEDOR	Kg/mes	Ton/mes
TUMACO	1.767.590	1.767,59
LLORENTE	83.600	83,60
IBILI	17.820	17,82
CANDELILLA	16.660	16,66
ESPRIELLA	8.940	8,94
TANGA REAL	8.800	8,80
TOTAL	1.903.410	1.903,41

Nota: Esta tabla ha sido adaptada de: "Jonathan, J., comunicación personal, 20 de abril de 2022".

De igual forma, se obtuvo información secundaria por medio de un estudio sociodemográfico realizado por un investigador de la Universidad de Nariño, el profesor Ricardo Oviedo en el año 2022, aplicando encuestas a los pescaderos artesanales en Tumaco (Tabla 5-4).

Tabla 5-4. Datos de interés obtenidos en el estudio sociodemográfico de la población de pescadores artesanales.

Descripción	Dato	Unidad ¹
Acceso a servicios sociales: La vivienda en la que reside no dispone de energía eléctrica.	4	%
Acceso a servicios sociales: La vivienda en la que reside no dispone de gas propano.	9	%
Acceso a servicios sociales: El tipo de fuente de energía que usa para cocinar es energía eléctrica.	7	%
Acceso a servicios sociales: El tipo de fuente de energía que usa para cocinar es pipeta de gas.	67	%
Acceso a servicios sociales: El tipo de fuente de energía que usa para cocinar es carbón.	8	%
Métodos de disposición de los desechos: Se entierran.	17	%
Métodos de disposición de los desechos: Depositán en los puntos de basura.	9	%
Métodos de disposición de los desechos: Dan alimento a animales.	1	%
Métodos de disposición de los desechos: Se tiran al mar o estero.	57	%
Métodos de disposición de los desechos: Se queman.	3	%

Nota. La Tabla 5-4 muestra los datos que sirven de apoyo para el proyecto, y los cuales fueron extraídos un estudio sociodemográfico llevado a cabo en el año 2022 por el Investigador Ricardo Oviedo, en el cuál se aplicaron encuestas a un

grupo población de pescadores artesanales, ponderando los resultados o las respuestas de los mismos en porcentaje.
¹Descripción unidades: % = Porcentaje.

En resumen, para el sistema 1 se obtuvieron distintos valores de consumo de combustibles y generación de RSO, también llamados datos de actividad, provenientes de todas las fuentes mencionadas con anterioridad (Tabla 5-5).

Tabla 5-5. Datos de generación para el Sistema 1.

Descripción	Generación real Tumaco	Unidad
Combustible DIESEL	46.968,00	Gal/año
Combustible GLP	107,87	m ³ /año
RS Relleno Sanitario	23.927,13	Ton/año

- Elección de factores y parámetros de emisión: Se tomaron como base distintos parámetros con el objetivo de poder calcular la HCT del sistema 1 (Tabla 5-6).

Tabla 5-6. Factores y parámetros de emisión.

Fuente emisión	Parámetro	Dato	Unidad ¹
Combustión estacionaria ACPM	Densidad DIESEL B9 Estacionaria	0,860	Kg/l
	Poder calorífico neto DIESEL	0,0000421	TJ/Kg
	FE CO ₂	74831,8	Kg/TJ
	FE CH ₄	5,5	Kg/TJ
	FE N ₂ O	1,1	Kg/TJ
Combustión estacionaria GLP	Poder calorífico neto GLP	0,00009922	TJ/m ³
	FE CO ₂	47289,338	Kg/TJ
	FE CH ₄	1,7	Kg/TJ
	FE N ₂ O	1,5	Kg/TJ
Disposición de RS orgánicos en relleno sanitario.	DOC	0,084	GgC/Gg
	MCF	1	N/A
	DOCf	0,5	N/A
	K	0,19	N/A
	F	0,5	N/A
	R	0,45	N/A
Incineración de RS	1-OX	0,9	N/A
	FE CO ₂	1,38	Kg/Kg RS
	FE CH ₄	0,0065	Kg/Kg RS
	FE N ₂ O	0,00015	Kg/Kg RS

Nota: La Tabla 5-6 muestra los datos que sirven de apoyo para el proyecto, y los cuáles fueron extraídos de diversas fuentes bibliográficas.¹Descripción unidades: Kg/l = kilogramo/litro; TJ/Kg = terajulio/kilogramo; Kg/TJ = kilogramo/terajulio; TJ/m³ = terajulio / metro cubico; GgC/Gg = Gigagramo de carbono / Gigagramo

- Incertidumbre atribuible a los datos: Los resultados de la incertidumbre para el sistema 1 se ilustran en la Tabla 5-7.

Tabla 5-7. Incertidumbres atribuibles a los datos.

Fuente emisión	Gas	Incertidumbre de los datos de actividad (-)/(+) %	Incertidumbre del factor de emisión (-) / (+) %	Incertidumbre combinada*
Combustión estacionaria ACPM	CO ₂	3,0%	0,205%	3,0%
	CH ₄	3,0%	81,8%	81,9%
	N ₂ O	3,0%	81,8%	81,9%
Combustión estacionaria GLP	CO ₂	3,0%	0,208%	3,0%
	CH ₄	3,0%	81,8%	81,9%
	N ₂ O	3,0%	81,8%	81,9%
Disposición y eliminación de RS.	CH ₄	5,0%	28,7%	29,1%

Nota: La Tabla 5-6 muestra los datos que sirven de apoyo para el proyecto, y los cuáles fueron extraídos de diversas fuentes bibliográficas.¹ Descripción unidades: % = Porcentaje. *Incertidumbre combinada = se calculó tomando como base la formula establecida por el IPCC (2006) de incertidumbre total.

5.2.2. Sistema 2 (propuesto)

Medición indirecta o teórica (HCT) mediante la aplicación de factores de emisión.

- Elección de factores y parámetros de emisión: Se investigaron distintos parámetros para calcular la HCT del sistema 2 (Tabla 5-8).

Tabla 5-8. Factores y parámetros de emisión.

Fuente emisión	Parámetro	Dato	Unidad ¹	Fuente
Tratamiento biológico de los desechos sólidos.	FE CO ₂ en unidades IPCC	84364,418	Kg/TJ	FECOC, 2015
	FE CO ₂ en unidades comunes	1,856	KgCO ₂ /m ³ STD	FECOC, 2015
	FE CO ₂ IPCC	Insignificante* ¹	Insignificante	IPCC, 2006
	FE CH ₄ en unidades IPCC	1,00	Kg/TJ	FECOC, 2015
	FE CH ₄ en unidades comunes	0,022	gCH ₄ /m ³ STD	FECOC, 2015
	FE CH ₄ IPCC peso seco	(0-20)	gCH ₄ /Kg RS Tratados	IPCC, 2006
	FE CH ₄ IPCC peso húmedo	(0-8)	gCH ₄ /Kg RS Tratados	IPCC, 2006
	FE N ₂ O en unidades IPCC	0,100	Kg/TJ	FECOC, 2015

	FE N ₂ O en unidades comunes	0,002	gN ₂ O/m ³ STD	FECOC, 2015
	FE N ₂ O IPCC peso seco	Insignificante* ²	Insignificante	IPCC, 2006
	FE N ₂ O IPCC peso húmedo	Insignificante*	Insignificante	IPCC, 2006

Nota: La Tabla 5-28 muestra los datos que sirven de apoyo para el proyecto, y los cuáles fueron extraídos de distintas fuentes bibliográficas.¹Descripción unidades: MJ/m³ = megajulio/metro cubico; Kg/TJ = kilogramo/terajulio; KgCO₂/m³ STD = kilogramo de dióxido de carbono/metro cubico de solidos totales disueltos; Kg/TJ = kilogramo/terajulio; gCH₄/m³ STD = gramo de metano/metro cubico de solidos totales disueltos; gCH₄/Kg RS Tratados = gramo de metano/kilogramo de residuos sólidos tratados; gN₂O/m³ STD = gramo de óxido nitroso /metro cubico de solidos totales disueltos. *¹Insignificante (FE CO₂ IPCC) = las emisiones de CO₂ se consideran insignificantes según el capítulo 4 del IPCC por ser de origen biogénico; *²Insignificante (FE N₂O IPCC) = las emisiones de N₂O se consideran insignificantes según el capítulo 4 del IPCC por escases de los datos respecto a estas emisiones;

- Elección de datos de actividad: Para este ítem, se tuvo en cuenta la información secundaria descrita en el apartado 5.2.1.
- Evaluación de incertidumbre: Los resultados de la incertidumbre combinada para el sistema 2 se ilustran en la Tabla 5-9.

Tabla 5-9. Incertidumbres atribuibles a los datos.

Fuente emisión	Gas	Incertidumbre de los datos de actividad (-)/(+) %	Incertidumbre del factor de emisión (-) / (+) %	Incertidumbre combinada*
Disposición y eliminación de RS con DA.	CH ₄	5,0% - 10%	28,7%	29,1%

Nota: La Tabla 5-9 muestra los datos que sirven de apoyo para el proyecto, y los cuáles fueron extraídos de diversas fuentes bibliográficas.¹Descripción unidades: % = Porcentaje. *Incertidumbre combinada = se calculó tomando como base la fórmula establecida por el IPCC (2006) de incertidumbre total.

5.3. Cálculo de la Huella de Carbono para el SISTEMA 1

5.3.1. Huella de Carbono Teórica (HCT)

- Aplicar herramientas de cálculo: Para el caso de estudio (Sistema 1) se evaluaron dos tipos de combustibles fósiles, los cuales se utilizan para abastecer distintas zonas de Tumaco en cuanto energía eléctrica y térmica: DIESEL corriente o ACPM y Gas licuado de petróleo (GLP). De esta fuente de emisión se derivan emisiones de GEI, las cuales se calcularon para establecer la HCT.

Consumo DIESEL estacionario

Se consolidaron los datos de consumo del combustible DIESEL, referentes a las zonas donde se utilizan plantas generadoras en un rango de tiempo de 1 año, tomando como base el periodo comprendido entre marzo del 2022 y marzo del 2023, toda vez que en la zona rural de Tumaco predomina la generación de energía por medio del uso estacionario de plantas que funcionan con combustibles fósiles.

Todo esto, conforme la metodología del IPCC (2006): combustión estacionaria. Los resultados están dados en términos de TonCO_{2eq}, siguiendo una serie de cálculos predeterminados, utilizando los parámetros de la **Tabla 5-6**, arrojando que para un consumo de 46.968 gal de DIESEL en las plantas estacionarias con el fin de generar abastecimiento de energía eléctrica se emiten 479,18 TonCO_{2eq}. (Tabla 5-10).

Tabla 5-10. Emisiones provenientes del consumo de DIESEL estacionario.

Consumo (gal DIESEL)	Combustible (TJ)	Kg CO₂	Kg CH₄	Kg N₂O	Kg CO_{2eq}	TonCO_{2eq}
46.968	6,44	477.550,09	19,33	3,87	479.181,88	479,18

Nota: La Tabla 5-10 muestra los resultados al aplicar la metodología del IPCC (2006), utilizando distintos parámetros y factores de emisión con el fin de obtener las TonCO_{2eq}.

Consumo gas licuado de petróleo (GLP)

En el municipio de Tumaco, se utiliza tanto en la zona urbana como en la rural el GLP con el objetivo de abastecer de energía térmica a la población del municipio, lo cual tiene un uso principalmente doméstico (actividades de cocción de los alimentos). Se recolectaron los datos del consumo del combustible GLP, en un rango de tiempo de 1 año, conforme el informe suministrado por Gas Tumaco del Pacífico S.A.S. E.S.P (2021).

Los cálculos se realizaron conforme la metodología del IPCC (2006): combustión estacionaria. Así mismo, los resultados están dados en términos de TonCO_{2eq}, siguiendo una serie de cálculos predeterminados, utilizando los factores y parámetros de emisión, arrojando que para un consumo de 28.496,40 gal/año es decir 107,87 m³/año de GLP con el fin de generar abastecimiento de energía térmica se emiten 0,72 TonCO_{2eq} (Tabla 5-11).

Tabla 5-11. Emisiones provenientes del consumo de GLP estacionario.

Consumo Combustible (m ³ GLP)	Combustible (TJ)	Kg CO ₂	Kg CH ₄	Kg N ₂ O	Kg CO _{2eq}	TonCO _{2eq}
107,87	0,01	719,08	0,01	0,00	719,687	0,72

Nota: La Tabla 5-11 muestra los resultados al aplicar la metodología del IPCC (2006), utilizando distintos parámetros y factores de emisión con el fin de obtener las TonCO_{2eq}.

Así mismo, para el sistema 1, se estudió la generación de residuos sólidos orgánicos (Residuos de frutas y verduras + Residuos de pesca) en Tumaco, los cuales principalmente llegan al relleno sanitario del municipio para ser dispuestos sin tratamiento alguno y/o aprovechamiento. De esta fuente de emisión se derivan emisiones de GEI, las cuales se calcularon para efectos de la presente investigación.

Generación de RS orgánicos (RP + RFV)

En Tumaco aproximadamente el 71% de los residuos sólidos que llegan al relleno sanitario de Buchelli son de carácter orgánico, según el estudio de caracterización suministrado por la Empresa Aguas de Tumaco E.S.P del año 2021. La producción de RS total tanto en la zona urbana como rural es de 33.700,18 Ton/año, de allí que la fracción orgánica estimada que llega a disposición final en el sitio de eliminación de desecho sólidos (SEDS) es de 23.927,13 Ton/año, además a esta cantidad se le adicionan los RP que según fuentes bibliográficas en Tumaco se producen cerca de 3.000 toneladas de pescado por año (Galeano, 2022), del cual aproximadamente 2.100 Ton/año son RP.

Es así, como se aplicó el método de descomposición de primer orden (FOD) (Anexo F), consignado dentro del Capítulo 5 (Eliminación de desechos sólidos) del IPCC (2006), el cual plantea una serie de reacciones bioquímicas en las cuales el carbono orgánico degradable (DOC) sufre una serie de transformaciones a lo largo de los años siguientes a la disposición de los residuos orgánicos, lo cual genera emisiones de GEI. Siguiendo esta premisa, la cantidad de RP y RFV (Ton/año) que entran al sitio de disposición debe expresarse en Gg de desechos para efectos de los cálculos posteriores.

Además, el CH₄ potencial que se genera a través de los años puede estimarse sobre la base de las cantidades y la composición de los desechos eliminados en el SEDS, que para

el cálculo es la cantidad de carbono orgánico degradable disuelto (DDOC_m) como se define en la Ecuación 3.2 descrita en el Capítulo 5 del IPCC (2006).

Lo anterior, teniendo en cuenta que estos RSO “se eliminan en un año determinado, sin embargo, decrecen gradualmente en las décadas siguientes, donde la liberación de CH₄ a partir de esta cantidad de residuos decrece gradualmente conforme el modelo FOD” (IPCC, 2006).

Estos RFV y RP generan emisiones en un horizonte de 100 años al ser dispuestos en un sitio gestionado anaeróbico. Así mismo, los resultados se expresaron en términos de TonCO_{2eq}, siguiendo una serie de cálculos predeterminados, utilizando los factores y parámetros de emisión. Se obtuvo una generación de 23.927,13 Ton/año de RP y RFV en el municipio, causantes de emitir 443,61 TonCH₄/año conforme el método FOD, lo cual equivale a 13.219,50 TonCO_{2eq}/año (Anexo F)

Cuadros ISO

Los resultados de emisión se consolidaron según la norma ISO 14064 del 2018, siguiendo un esquema de categorías y alcances con el fin de ponderar el porcentaje de emisiones que cada aspecto tiene respecto al total de ellas, proyectando un total de emisiones de 13.392,86 TonCO_{2eq} / año, para el espectro de tiempo comprendido entre marzo del 2022 y marzo del 2023 del Sistema 1 (Tablas 5-12-13).

Tabla 5-12. Resumen de emisiones por sector.

Categoría	Emisiones CO₂	Emisiones CO₂(b)	Emisiones CH₄	Emisiones N₂O	Ton CO_{2eq}	%
Total de emisiones	430,51	47,76	471,44	0,004	13.651,64	100
ENERGÍA						
Plantas generadoras de energía	430,51	47,8	0,02	0,00	432,15	3,17
DESECHOS						
Eliminación de desechos sólidos	0,00	0,00	443,61	0,00	13.219,50	96,83

Nota: La Tabla 5-12 muestra los resultados al aplicar es esquema de alcances de la ISO 14064 del 2018.

Tabla 5-13. Distribución por alcances.

Distribución de emisiones	Ton CO _{2eq}	%
Alcance 1 - Emisiones Directas	0,00	0,00
Alcance 2 – Emisiones Indirectas	0,00	0,00
Alcance 3 – Otras emisiones indirectas	13.651,64	100

Nota: La Tabla 5-13 muestra los resultados al aplicar es esquema de alcances de la ISO 14064 del 2018.

Incertidumbre atribuible a los datos

La metodología para el cálculo de emisiones del IPCC (2006) establece la necesidad de calcular la incertidumbre de los datos, tanto de la actividad cómo del factor de emisión, toda vez que ello permite obtener estimaciones más exactas de las emisiones anuales. Se evaluó la incertidumbre de ambos parámetros: actividad y FE, teniendo en cuenta el método de la incertidumbre total (t) propuesta por el IPCC (2006). Los resultados al aplicar dicho método establecen que para el sistema 1 objeto de estudio, el total de emisiones generadas en el municipio de Tumaco entre marzo del 2022 y marzo del 2023 fue de 17.550,57 TonCO_{2eq}/año, aplicando un porcentaje de incertidumbre del 28,11% al total de emisiones inicialmente calculado (Tabla 5-14).

Tabla 5-14. Aplicación de la incertidumbre Sistema 1.

Categoría	GEI	Emisiones del año TonCO _{2eq}	Incertidumbre de la actividad	Incertidumbre del FE	Incertidumbre combinada	Incertidumbre del inventario TonCO _{2eq}
GLP	CO ₂	0,72	3,0%	0,208%	3,0%	0,000
	CH ₄	0,00	3,0%	81,8%	81,9%	0,000
	N ₂ O	0,00	3,0%	81,8%	81,9%	0,000
DIESEL	CO ₂	477,55	3,0%	0,205%	3,0%	206,207
	CH ₄	0,58	3,0%	81,8%	81,9%	0,222
	N ₂ O	1,06	3,0%	81,8%	81,9%	0,747
RSO	CH ₄	13.219,50	5,0%	28,7%	29,1%	14.831.291,29
					Sumatoria	14.831.291,29
					Incertidumbre Total (t)	3851,17
					Emisiones*	17.550,57

*Nota: La Tabla 5-14 muestra los resultados al aplicar la incertidumbre (-) / (+) en el inventario inicial de emisiones.

5.4. Cálculo de la Huella de Carbono para el SISTEMA 2

5.4.1. Huella de Carbono Teórica (HCT)

- Aplicar herramientas de cálculo: Los resultados de la HCT para el sistema 2 se describen a continuación, tomando como referencia cada fuente de emisión.

Digestión anaerobia de RS orgánicos (RP + RFV)

Para el cálculo de la HCT del sistema 2 se llevaron a cabo evaluaciones de las emisiones correspondientes a los tratamientos de DA planteados anteriormente en la Tabla 4-2, relacionados con la gestión de los RSO en el municipio de Tumaco. Todos los cálculos se llevaron a cabo considerando un sistema de DA nuevo o en fase piloto, el cual produciría biogás, sin utilizar el metano (CH₄) resultante para la cocción de alimentos. Como consecuencia, se originarían emisiones no deseadas desde las instalaciones de biodigestión (IPCC, 2006).

Tratamientos 1 y 2 (100:100) – sin utilizar el CH₄: se tomó como base la cantidad de RP y RFV que inicialmente van al relleno sanitario del municipio de Tumaco, asumiendo que el total de ellos pudiesen llegar a un sistema de tratamiento biológico de DA. Por ende, en este tratamiento, entrarían al sistema 23.927,13 Ton/año de RS orgánicos (RP+RFV), los cuales al aplicar un FE de 0,008 Kg/Kg y una incertidumbre del inventario del 29,13%, generarían 6.682,32 TonCO_{2eq}/año (Tabla 5-15).

Tabla 5-15. Emisiones provenientes de los tratamientos 1 y 2.

Kg RP+RFV	FE CH ₄ (Kg/Kg RS)	Kg CO ₂	Kg CH ₄	Kg CO _{2eq}	TonCO _{2eq}	TonCO _{2eq} *
21.706.331	0,008	N/A	173.650,65	5.174.789,41	5174,78	6.682,32

Nota: *TonCO_{2eq} con incertidumbre del inventario equivalente a +- 1.507,53 TonCO_{2eq}. Cálculos realizados por el método teórico.

Tratamiento 3 (15:85) – sin utilizar el CH₄: Se consideró la posibilidad de dirigir el 100% de los RP y el 65% de los RFV a un sistema de DA, con el objetivo de producir biogás. En el T3 se plantea una mezcla en codigestión 15:85, por ello se estimó que ingresarían al sistema un total de 17.652.63 Ton/año de residuos RSO (la suma de RP y RFV). Aplicando un factor de emisión de 0.008 Kg de CO₂ equivalente por cada Kg de RS y teniendo en

cuenta una incertidumbre en el inventario del 29,13%, se proyecta que este proceso generaría 4.429,99 TonCO_{2eq}/año (Tabla 5-16).

Tabla 5-16. Emisiones provenientes del tratamiento 3.

Kg RP+RFV	FE CH ₄ (Kg/Kg RS)	Kg CO ₂	Kg CH ₄	Kg CO _{2eq}	TonCO _{2eq}	TonCO _{2eq} *
16.014.204	0,008	N/A	128.113,63	3.817.786,22	3.817,78	4.429,99

Tratamiento 4 (50:50) – sin utilizar el CH₄: Se evaluó la posibilidad de llevar el 100% de los RP y el 17% de los RFV a un sistema de tratamiento biológico de DA. En el T4, se propuso una mezcla en codigestión de 50:50, lo que resultaría en un ingreso total de 6.167,61 Ton/año de RSO al sistema. Al aplicar un factor de emisión de 0.008 Kg de CO₂ equivalente por cada Kg de RS, y considerando una incertidumbre en el inventario del 29,13%, se estima que este proceso sería el causante de 1,722.48 TonCO_{2eq}/año (Tabla 5-17; Tabla 5-18).

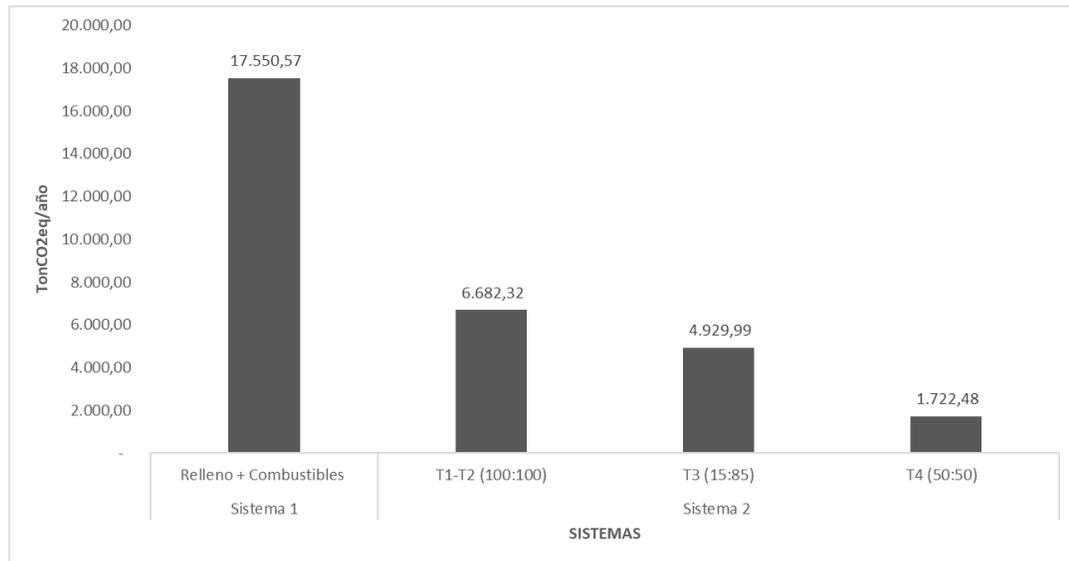
Tabla 5-17. Emisiones provenientes del tratamiento 4.

Kg RP+RFV	FE CH ₄ (Kg/Kg RS)	Kg CO ₂	Kg CH ₄	Kg CO _{2eq}	TonCO _{2eq}	TonCO _{2eq} *
5.595.165	0,008	N/A	44.761,32	1.333.887,30	1.333,89	1.777,48

Nota: *TonCO_{2eq} con incertidumbre del inventario equivalente a +- 388,59 TonCO_{2eq}. Cálculos realizados por el método teórico.

Después de calcular la HCT, bajo la premisa de que el metano (CH₄) generado no se utilizaría en la cocción de alimentos, se observa una reducción significativa de la HC al comparar el Sistema 1 con los diversos tratamientos planteados en el Sistema 2 (Figura 5-3).

Figura 5-3: Emisiones HCT del sistema 1 VS sistema 2, sin aprovechamiento del CH₄.



Al analizar los tratamientos de DA en comparación con el sistema 1, que involucra la combinación de combustibles y relleno sanitario, se destacan los siguientes resultados: en los T1 y T2, se registra una disminución del 61,93% en las emisiones GEI; en el T3 se obtuvo una reducción del 71,91% en las emisiones; y en el T4 se logra una disminución del 90,91% en las emisiones de GEI. Este fenómeno se atribuye a una mayor generación de RFV en los T1, T2 y T3, lo que se traduce en aumentos de la actividad o producción de RSO y, en consecuencia, cantidades de GEI más elevadas en comparación con el T4.

No obstante, implementar un proceso de DA en el contexto del municipio de Tumaco, que actualmente carece de un sistema eficiente de recolección selectiva de RSO, presentaría desafíos adicionales para alcanzar un nivel de aprovechamiento de RFV superior al 50%. Incluso aprovechar este porcentaje representa un reto significativo que tanto las autoridades gubernamentales como los sectores científicos y académicos deben afrontar. Esto cobra especial relevancia al considerar el éxito palpable en aproximadamente 113 municipios que han implementado estrategias de aprovechamiento de residuos, donde se alcanzan tasas de aprovechamiento del 80% en RSO, 91% en residuos inorgánicos y 12% en residuos combinados (Contraloría de Cundinamarca, 2019, como se citó en Díaz & Cardozo, 2022).

5.4.2. Huella de carbono directa o “In Situ” (HCI)

- Ejecución de pruebas fisicoquímicas: Los resultados de las pruebas de caracterización iniciales y finales se muestran en la Tabla 5-18. Estas se realizaron en los sustratos, inóculo y digestato, con base en los tratamientos planteados.

Tabla 5-18. Caracterización fisicoquímica inicial y final.

Iniciales					
Parámetros	Inóculo	T1	T2	T3	T4
*ST (%)	6,16 ± 0,25	27,62 ± 0,25	11,54 ± 0,36	-	-
*SV (%)	82,97 ± 0,08	77,11 ± 3,05	91,09 ± 0,35	-	-
*Humedad (%)	93,83 ± 0,25	72,37 ± 0,25	88,45 ± 0,36	-	-
**DQO (mg/L)	-	12.143,57 ± 404,48	6.866,23 ± 11,88	7.817,98 ± 61,52	9.006,06 ± 46,14
*pH	8,17 ± 0,13	7,46 ± 0,02	7,72 ± 0,11	7,97 ± 0,31	7,76 ± 0,24
**Alcalinidad (mgCaCO3/L)	-	3.466,19 ± 11,08	2.944,46 ± 12,53	3.174,25 ± 5,30	3.387,18 ± 6,26
**AGVs (mg CH3COOH/L)	-	1.739,92 ± 27,33	1.011,16 ± 27,33	1.639,71 ± 18,22	1.958,55 ± 9,11
**N-NH ₃ (mg NH ₃ /L)	-	1.052,24 ± 9,24	494,62 ± 5,74	723,38 ± 0,70	712,60 ± 1,68
Finales					
Parámetros	Inóculo	T1	T2	T3	T4
**DQO (mg/L)	-	10.370,30 ± 16,68	2.550,99 ± 37,39	3.363,27 ± 696,06	7.232,27 ± 59,58
*pH	7,59 ± 0,00	7,89 ± 0,03	7,71 ± 0,03	7,80 ± 0,06	7,87 ± 0,04
**Alcalinidad (mgCaCO3/L)	-	9.442,14 ± 69,85	5.270,67 ± 90,57	6.208,15 ± 474,04	8.024,35 ± 4,82
**AGVs (mg CH3COOH/L)	-	5.897,04 ± 193,51	152,77 ± 152,77	1.405,51 ± 20,37	2.098,08 ± 61,11
**N-NH ₃ (mg NH ₃ /L)	-	3.546,67 ± 101,92	1.272,41 ± 10,64	1.554,09 ± 6,16	2.425,55 ± 14,00

Nota: *ST – SV – Humedad - pH = Análisis realizados por triplicado. **DQO – Alcalinidad – AGV'S – N-NH₃ = Análisis realizados por duplicado.

Analizando los valores obtenidos en la caracterización físico-química del inóculo, sustrato y cosustrato, se obtiene la relación AGVS/Alcalinidad de todos los tratamientos, los cuales arrojaron valores entre un rango de 0,2 – 0,6. Por lo cual se considera óptima para el proceso de digestión anaerobia, teniendo en cuenta lo descrito por Ruiz Bastidas (2017)

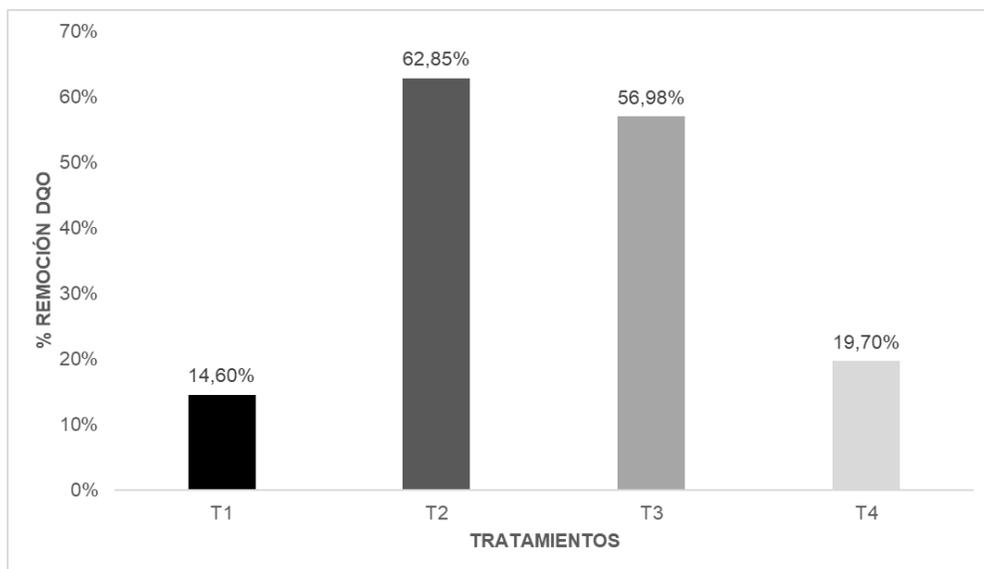
en donde valores menores a 0,4 representan un digestor estable, cuando se presentan “valores entre 0,4-0,8 se puede presentar inestabilidad y con valores superiores a 0,8 se presentará inestabilidad significativa”.

Así mismo, el pH estuvo entre el rango de 6,5-8,0 sin presentarse acidificación en ninguno de los reactores del experimento, cabe resaltar, que los valores de pH favorables para la digestión anaerobia se encuentran entre el rango de 6,5-7,2 (Zhang et al., 2014), sin embargo, ningún reactor alcanzó a desviarse significativamente de dicho parámetro, por lo cual no hubo necesidad de realizar ajustes de pH en ningún tratamiento.

Por otro lado, el nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3 - \text{NH}_4$) presentó concentraciones por debajo de los 1500 mg NH_3/L antes de iniciar el proceso de digestión anaerobia, por lo cual, el tratamiento biológico no presentó inhibiciones en la producción de biogás, toda vez que Hashimoto (1986) encontró que, en reactores sin aclimatar, existían signos de inhibición a una concentración de nitrógeno amoniacal por encima de los 2.500 mg NH_3/L . Arrechea Fajardo (2021) expresa que en la literatura se encuentran que concentraciones de amoníaco inferiores a 200 mg/L son beneficiosas para el proceso y concentraciones entre 1700-14000 mg/L de nitrógeno amoniacal son inhibitorias.

Además, al evaluar el comportamiento de la DQO inicial y final, se observó una remoción de la materia orgánica en todos los tratamientos (Figura 5-4), de los cuales el que mayor disminución tuvo fue el RFV seguido del RP15:RFV85 con porcentajes de 62,85% y 56,98% respectivamente. Lo cual es cercano a experimentos con sustratos similares donde se encontraron remociones de DQO entre 65-78% (Arrechea Fajardo, 2021), de igual forma observa una estrecha relación en los tratamientos que contenían más porcentaje de RFV con mayores remociones de la materia orgánica, toda vez que el inoculo adicionado provenía de una planta de beneficio animal (reses) en el cual los microorganismos presentes pudiesen estar más adaptados a sustratos lignocelulósicos.

Figura 5-4: Remoción DQO inicial y final entre tratamientos.



Es importante resaltar que los digestatos obtenidos de los tratamientos con la mayor producción acumulada de CH_4 (T3 y T4) fueron sometidos a un análisis exhaustivo de caracterización y composición de materiales orgánicos líquidos realizado por un laboratorio externo certificado (ANEXO H). Tras examinar detalladamente los resultados de los parámetros evaluados (Tabla 5-19), se evidenció que los digestatos no cumplen con todas las variables especificadas por la norma NTC 5167:2022. En consecuencia, no pueden ser clasificados como abonos o fertilizantes orgánico-minerales líquidos según lo establecido en la Tabla 3 de la norma. Este hallazgo implica la necesidad de realizar ajustes adicionales en este residuo del proceso de DA para poder cerrar el ciclo del tratamiento biológico de manera efectiva. De esta manera, se facilitaría un aprovechamiento más integral del digestato en actividades agrícolas, lo que contribuiría a una gestión más sostenible de los recursos y al fortalecimiento de la agricultura comunitaria.

Tabla 5-19. Resultados de la caracterización y composición de materiales orgánicos de los digestatos T3 y T4 comparados con la NTC 5167

Variable	Unidades	Técnica	Resultado T3	Resultado T4	NTC 5167
pH	Unidades de pH	Directo / Potenciométrico	7,59	7,74	Mínimo 2,0* Máximo 8,5

Solidos insolubles	g/L	Directo / Gravimétrico	24,2	23,1	Máximo 40 g/L*
Carbono orgánico total	g/L	Sln. Dicromato de Potasio / Colorimétrico	12,8	11,3	Mínimo 20 g/L
Nitrógeno total	g/L	Sumatoria de Especies de Nitrógeno.	3,32	4,11	Mínimo 15 g/L
Fósforo total	g/L	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / Colorimétrico	0,831	0,898	
Potasio total	g/L	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / EEA	0,710	0,594	
Calcio total	g/L	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / EAA / EPA7000B	0,676	2,71	Mínimo 10 g/L
Magnesio total	g/L	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167 EPA7000B	0,192	0,180	

Nota: *pH y solidos insolubles, son las únicas variables que cumplen con la NTC 5167.

- Evaluación del potencial de metano (PBM):

Para el Sistema 2, se evaluó el biogás producido bajo un escenario ideal en el cual los RSO (RP y RFV) se aprovechan en un sistema de DA, con el fin de reemplazar el uso de combustibles fósiles en el abastecimiento energético al tiempo que se reducen las emisiones de GEI. Luego, se calculó la HCl producida en un proceso de DA, ya que de este tratamiento biológico también se derivan emisiones de GEI.

La producción de biogás (Figura 5-5) en los primeros cinco días experimento tuvo un crecimiento exponencial en tres tratamientos específicos: T2, T3 y T4. Se observó que la producción era más significativa en aquellos tratamientos que contenían una concentración más elevada RFV, es decir, en los tratamientos 2 y 3. Sin embargo, a partir del sexto día, se notó un cambio en la tendencia, ya que el T4 superó en la producción de biogás al T2 y T3. Mientras tanto, el T1 mantuvo una producción de biogás con una significancia menor en comparación con los demás tratamientos. Esta producción constante o en fase de latencia del T1 se mantuvo hasta el día 17 del experimento, momento en el cual se produjo

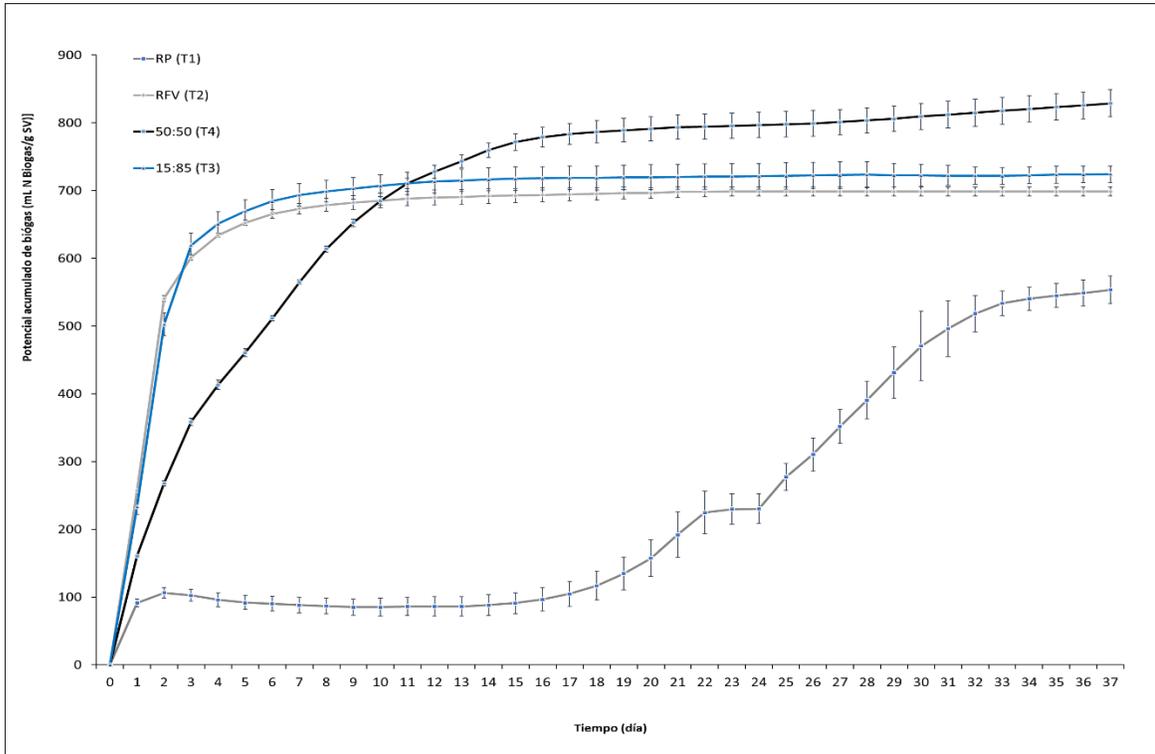
un aumento exponencial en la producción de biogás, que continuó hasta el final de la prueba.

Este cambio en la dinámica de producción de biogás revela la influencia de las concentraciones de frutas y verduras en el proceso y resalta la importancia de evaluar a largo plazo los efectos de los diferentes sustratos en la digestión anaerobia. Así mismo, esta fase de latencia del T1 puede deberse a un inóculo poco adaptado para degradar el RP, el cual es un sustrato rico en proteínas, con complejas cadenas. Esto impide que sea degradado rápidamente en los primeros días del experimento, ya que según Guerrero (2016), una de las variables más importantes que influyen en el potencial de biometanización es la adaptación de las poblaciones bacterianas al sustrato.

El incremento en la producción de biogás, al contrastar las mezclas en codigestión con los sustratos en monodigestión, está en línea con los hallazgos de estudios previos que han demostrado de manera consistente que la codigestión de RP con otros sustratos resulta en un notorio aumento tanto en la producción total de biogás como en el potencial bioquímico de metano. En este sentido, se ha registrado en la literatura un incremento significativo en la producción acumulada, que puede variar entre 212,3 y 638,8 ml de CH₄ por gramo de Sólidos Volátiles (SV) (Wu & Song, 2021).

A los 37 días del experimento, se observó que los tratamientos en codigestión lograron la producción acumulada de biogás más elevada, con valores de 828,94 ml N Biogás/g SV y 724,26 ml N Biogás/g SV para los T4 y T3, respectivamente. Estos resultados representaron un incremento del 15,72% y 3,53% en comparación con el T2, y un incremento del 33,23% y 23,58% en comparación con el T1. Estos porcentajes de aumento en la producción acumulada de biogás van en sintonía con lo hallado en otras investigaciones, en las cuales reportan aumentos del 12,3% - 36,5% en el biogás al tratar RS de frutas y verduras en codigestión con residuos cárnicos (Morales, 2019).

Figura 5-5: Potencial acumulado de biogás (ml N biogás/ g SV).



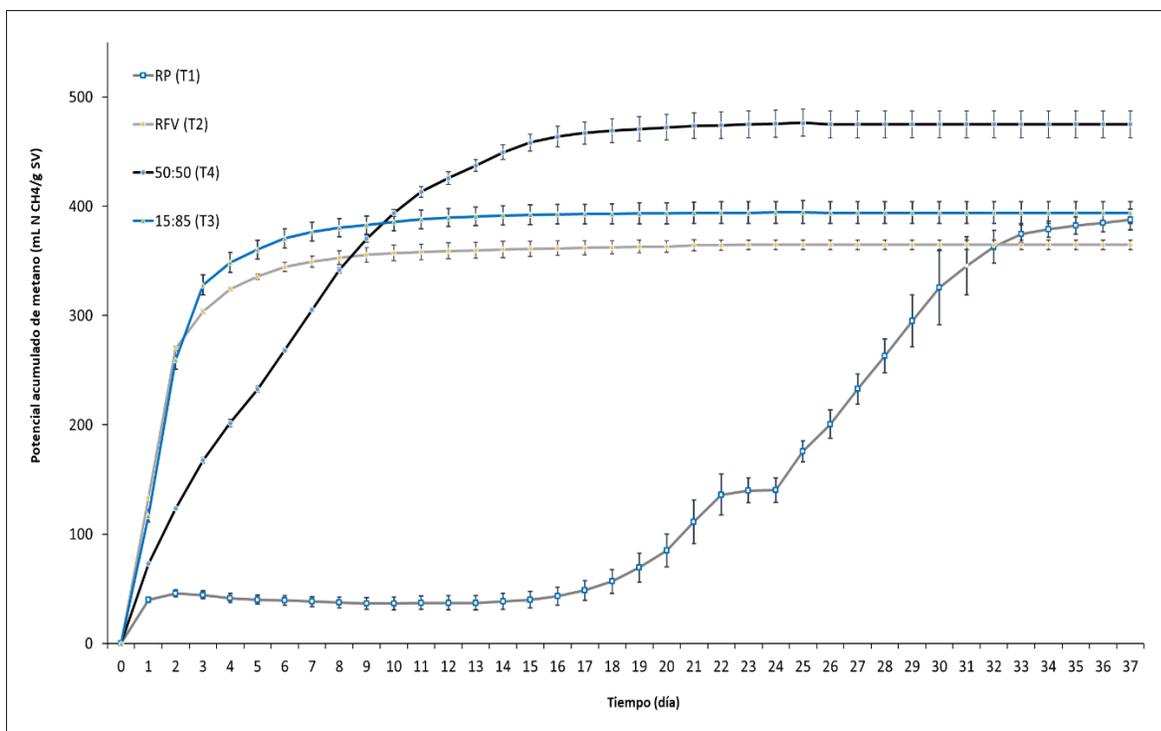
En cuanto a la calidad del biogás o producción acumulada de metano generado (Figura 5-6), se observó un patrón similar al del biogás producido en términos de acumulación. Sin embargo, hubo una distinción significativa en el contenido de metano del biogás a lo largo del experimento. Este hallazgo resultó particularmente interesante, ya que arrojó luz sobre las diferencias sustanciales en la composición del biogás producido a partir de diferentes sustratos. Fue así, como en el transcurso del experimento, se observó un cambio significativo en la calidad del biogás generado a partir de los RP. Este cambio fue más evidente entre los días 32 y 37 del experimento, cuando se produjo un aumento notorio en el contenido de metano del biogás.

Este aumento en el contenido de metano fue tan significativo que, en un punto determinado, el biogás generado a partir de RP superó en calidad al producido a partir de RFV en condiciones de monodigestión. Esto es especialmente relevante, ya que tradicionalmente se consideraba que los residuos de alimentos vegetales eran una fuente más eficiente de CH_4 en la DA por su alto contenido de materia orgánica (Campos Montiel

et al., 2018). Sin embargo, estos resultados cuestionan esa premisa y subrayan la dinámica compleja y variable de la producción de biogás.

Luego, analizando el comportamiento del potencial bioquímico de metano finalizando el experimento, se evidencia que el T1 logró equiparar su calidad al biogás obtenido en el T3, lo que sugiere la posibilidad de optimizar la producción de metano al ajustar las proporciones de diferentes sustratos. Estos resultados tienen implicaciones significativas en la gestión de residuos y la generación de biogás, ya que podrían indicar estrategias más efectivas para obtener biocombustibles de alta calidad a partir de residuos de alimentos, reduciendo al mismo tiempo la cantidad de estos que terminan en vertederos.

Figura 5-6: Potencial acumulado de metano (ml N CH₄/g SV)



En línea con estos hallazgos, los tratamientos que exhibieron el mayor potencial bioquímico de metano fueron el T4 y T3, con valores de producción acumulada de metano de 474,93 ml N CH₄/g SV y 394,17 ml N CH₄/g SV, respectivamente (Tabla 5-20).

Estos valores representaron incrementos del 23,20% y 7,47% en comparación con el T2, y también se observaron incrementos del 18,33% y 1,60% en comparación con el T1. El aumento en la producción acumulada de metano al llevar a cabo la codigestión de distintos RSO ha sido documentado por otros investigadores y, en algunos casos, ha alcanzado hasta un aumento hasta del 70%. Por ejemplo, García et al. (2015) han registrado aumentos significativos en la producción de metano al emplear mezclas de aserrín, orina de conejo y vísceras en un proceso de codigestión.

Tabla 5-20. Potencial de metano de los tratamientos evaluados.

Tratamiento	ml N CH ₄ /g SV	Desviación estándar
RP	387,87	9,68
RFV	364,74	4,43
RP50:RFV50	474,93	12,20
RP15:RFV85	394,17	10,07

En cuanto a los tratamientos de monodigestión, se notó que el T2 logró la producción acumulada de biogás más alta, con un valor de 698,67 ml N Biogás/g SV, en comparación con el T1 que alcanzó 553,48 ml N Biogás/g SV. Sin embargo, en lo que respecta a la producción de metano, el T1 mostró un mejor rendimiento que el T2, con un potencial de 387,87 ml N CH₄/g SV, mientras que el T2 obtuvo un valor de 364,04 ml N CH₄/g SV. Estos resultados resaltan la importancia de la codigestión en la mejora de la producción de biogás y metano, ya que indican la influencia de los sustratos utilizados en el proceso de DA. Esto lo demuestra la literatura en donde se han encontrado incrementos del hasta del 50% al utilizar sustratos en codigestión (Castro Rivera et al. 2020).

Igualmente, se destaca el rendimiento superior observado el T4, tanto en términos de producción de biogás como en el potencial acumulado de metano. Este fenómeno puede atribuirse a un equilibrio adecuado en la relación C/N dentro de los reactores que contenían estas mezclas en codigestión, con una proporción igual de RP y RFV. Esta proporción equilibrada resulta de gran relevancia, ya que el RP se caracteriza por tener una relación C/N baja, menor a 6,5, debido a su alto contenido de proteínas (Bücker et al., 2020). En contraste, el RFV presenta una relación C/N alta, que supera los 34,8 (Luna Geller & Bolaños Benavides, 2007; Ambientum, 2022).

Este equilibrio pudo haber propiciado una estabilización en los reactores, lo que, a su vez, generó una degradación más rápida de los sustratos por parte de los microorganismos. Se considera que la relación C/N óptima para la digestión anaerobia se encuentra en el rango de 20-30 (Mao et al., 2015), y esta investigación ha demostrado cómo lograr ese equilibrio puede tener un impacto significativo en la eficiencia del proceso.

Datos similares se han obtenido en otros estudios, como el realizado por Callaghan et al. en 2002 (citado en Briseño Arciniega, 2017), donde se llevó a cabo la codigestión de frutas y verduras con estiércol de pollo, con contenidos de C/N similares a los de esta investigación. En este caso, se logró un aumento del 20% al 50% en el rendimiento de metano, lo que respalda la importancia de alcanzar un equilibrio en la relación C/N para mejorar la producción de biogás y metano.

Análisis estadístico

Al realizar el ANOVA en la variable respuesta producción acumulada de biogás en el día 37 (Anexo G), existen diferencias significativas entre los tratamientos evaluados (p -valor de 0.00947 α 0.05). Luego, al aplicar el post ANOVA con la prueba de Tukey se obtuvo como resultado tres subconjuntos de datos con diferencias significativas entre sí. El T1 (RP) (subconjunto 1) tuvo diferencias significativas con el T2 (RFV) y T3 (15:85) (subconjunto 2), y a su vez los T2 y T3 tuvieron diferencia significativa con el T4 (50:50) (subconjunto 3). Por otro lado, T2 y T3 no tuvieron diferencias significativas entre sí para la variable de producción acumulada de biogás.

Luego, se aplicó el ANOVA analizando la variable respuesta producción acumulada de metano en el día 37 (Anexo G), arrojando diferencias significativas entre los tratamientos evaluados (p -valor de 0.0000578 α 0.05). Posteriormente, al realizar el post ANOVA tuvo como resultado dos subconjuntos de datos con diferencias significativas entre sí, por ende, los T1, T2 y T3 (subconjunto 1) tuvieron diferencias significativas con T4 (subconjunto 2).

Estos resultados estadísticos permitieron contrarrestar los tratamientos, ayudando en la identificación de la mejor mezcla, ya que el ANOVA compara las medias de los grupos

para determinar cuál es la más efectiva. Además, la validación estadística de los datos es importante, ya que respalda conclusiones experimentales.

- Análisis de GEI:

Se llevaron a cabo análisis de las muestras gaseosas, contenidas en bolsas Tedlar, empleando el equipo Biogás 5000. Este enfoque permitió realizar una cuantificación directa de las concentraciones de cada uno de los gases presentes en el biogás en cada uno de los tratamientos con DA propuestos, incluyendo CH₄, CO₂, H₂S, NH₃ y O₂, expresadas por el equipo de medición en porcentaje (%) y partes por millón (ppm).

Por consiguiente, se realizaron cálculos para la conversión de las unidades de concentración en % y ppm a medidas másicas, expresadas en kilogramos (Kg) y toneladas (Ton), con el propósito final de representar las emisiones en términos de toneladas de CO₂ equivalente (TonCO_{2eq}). Este proceso incluyó la consideración del %ST-SV de cada sustrato, así como la generación anual de cada tipo de residuo sólido en Tumaco. Además, se aplicó la teoría de los gases ideales para transformar las cantidades de cada gas de efecto invernadero de volumen a masa.

Conforme a las directrices establecidas por el IPCC en 2006, específicamente en el capítulo 5.4 que se refiere a los tratamientos biológicos de residuos sólidos, solo se considera representativo para la cuantificación de la huella de carbono de la digestión anaeróbica en base húmeda el CH₄. Por otro lado, en el contexto de esta investigación, se observaron valores significativos de CO₂ en las mediciones del biogás.

Esta observación concuerda con la composición preponderante del biogás, que está compuesto principalmente por CH₄ y CO₂. Por lo tanto, los demás gases, como H₂S, NH₃ y O₂, se consideran trazas y se presentan en cantidades insignificantes en términos de su contribución a las emisiones (Tabla 5-21– Tabla 5-24).

Tabla 5-21. Análisis de GEI – Tratamiento 1.

Tratamiento RP					
CH₄	Producción acumulada (ml N CH ₄ /g SV)	LCH ₄ /año	Kg CH ₄ /año	Ton CO _{2eq} /año	Ton CO _{2eq} /año (5% IPCC)*
	387,87	173.490.989,98	124.090,04	3.697,88	184,89
CO₂	Producción acumulada (ml N CO ₂ /g SV)	LCO ₂ /año	Kg CO ₂ /año	Ton CO _{2eq} /año	Ton CO _{2eq} /año (5% IPCC)**
	108,92	48.718.186,58	95.608,86	95,61	4,78
				TOTAL	189,67

Nota: *5% IPCC = El IPCC (2006) establece que “Las emisiones de CH₄ causadas por fugas no intencionales, durante las perturbaciones del proceso u otros incidentes imprevistos, suelen situarse entre 0-10% de la cantidad de biogás CH₄ generado, sin embargo, ante la ausencia de información adicional, se puede utilizar un valor por defecto del 5% para emisiones de CH₄”. **Para el caso de las emisiones de CO₂ se asume el mismo 5% toda vez que el IPCC no establece cuantificar el CO₂, sin embargo, para el caso de estudio el contenido de CO₂ es significativo en el biogás estudiado.

Tabla 5-22. Análisis de GEI – Tratamiento 2.

Tratamiento RFV					
CH₄	Producción acumulada (ml N CH ₄ /g SV)	LCH ₄ /año	Kg CH ₄ /año	Ton CO _{2eq} /año	Ton CO _{2eq} /año (5% IPCC)*
	364,74	917.628.381,12	656.336,93	19.558,84	977,94
CO₂	Producción acumulada (ml N CO ₂ /g SV)	LCO ₂ /año	Kg CO ₂ /año	Ton CO _{2eq} /año	Ton CO _{2eq} /año (5% IPCC)**
	291,42	733.164.224,60	1.438.825,98	1.438,83	71,94
				TOTAL	1.049,88

Tabla 5-23. Análisis de GEI – Tratamiento 4.

Tratamiento 50:50					
CH₄	Producción acumulada (ml N CH ₄ /g SV)	LCH ₄ /año	Kg CH ₄ /año	Ton CO _{2eq} /año	Ton CO _{2eq} /año (5% IPCC)*
	474,93	931.900.196,75	666.544,89	19.863,04	933,15
CO₂	Producción acumulada (ml N CO ₂ /g SV)	LCO ₂ /año	Kg CO ₂ /año	Ton CO _{2eq} /año	Ton CO _{2eq} /año (5% IPCC)**
	261,04	512.202.544,10	1.005.191,34	1.005,19	50,26
				TOTAL	1.043,41

Tabla 5-24. Análisis de GEI – Tratamiento 3.

Tratamiento 15:85					
CH₄	Producción acumulada (ml N CH ₄ /g SV)	LCH ₄ /año	Kg CH ₄ /año	Ton CO _{2eq} /año	Ton CO _{2eq} /año (5% IPCC)*
	394,17	2.213.708.139,21	1.583.362,33	47.184,20	2.359,21
CO₂	Producción acumulada (ml N CO ₂ /g SV)	LCO ₂ /año	Kg CO ₂ /año	Ton CO _{2eq} /año	Ton CO _{2eq} /año (5% IPCC)**
	227,94	1.280.150.806,18	2.512.280,58	2.512,28	125,61
				TOTAL	2.484,82

- Aplicar herramientas de cálculo: Los resultados de la HCl se muestran a continuación, tomando en cuenta cada fuente de emisión.

Digestión anaerobia de RS orgánicos (RP + RFV)

En la evaluación de la HCl del sistema 2, se realizó un análisis exhaustivo de las emisiones de GEI, como se muestra en el índice anterior. Esto se llevó a cabo después de obtener el potencial acumulado de biogás y metano a partir de los resultados del experimento. En este proceso, se evaluaron las emisiones provenientes de los tratamientos de DA propuestos (Tabla 5-25). Los cálculos se realizaron asumiendo un sistema de DA a escala real, que efectivamente generaría biogás, pero que no aprovecharía el metano (CH₄) resultante.

Tratamientos 1 y 2 (100:100) – sin utilizar el CH₄: En este escenario se parte de la premisa de que la cantidad total de RP y RFV que originalmente se destinaba al relleno sanitario de Tumaco podría ser redirigida hacia un sistema de tratamiento biológico basado en la DA. En este contexto, se generaría biogás que podría ser empleado como biocombustible para la producción de energía. Bajo esta concepción, se integrarían al sistema aproximadamente 23.927,13 Ton/año de residuos sólidos orgánicos (RP+RFV). A partir de la producción acumulada de CH₄ y CO₂ tanto en RP como en RFV, el porcentaje de sólidos volátiles (SV) y sólidos totales (ST) presentes en los sustratos, así como los pesos moleculares de los gases involucrados, se obtiene como resultado la generación de 1.239,56 TonCO_{2eq}/año.

Tratamiento 3 (15:85) – sin utilizar el CH₄: Utilizando la cantidad inicial de RP y RFV que solían ser destinados al vertedero municipal de Tumaco, se exploró la viabilidad de redirigir el 100% de los RP junto con el 65% de los RFV hacia un sistema de tratamiento biológico, con el propósito de generar biogás. Se planteó una mezcla de codigestión con un 15% de RP y un 85% de RFV, lo que implicaría la incorporación de un total de 17.652,63 Ton/año de RSO en el sistema. De acuerdo con los resultados obtenidos sobre la producción acumulada de CH₄ y CO₂ en el tratamiento 15:85, el porcentaje de sólidos volátiles (SV) y sólidos totales (ST) presentes en los sustratos, así como los pesos moleculares de los gases, se estimó la generación de 4.429,99 TonCO_{2eq}/año.

Tratamiento 4 (50:50) – sin utilizar el CH₄: Se inició con la cantidad de RP y RFV destinados al relleno sanitario de Tumaco. Se examinó la viabilidad de dirigir el 100% de los RP junto

con el 17% de los RFV hacia un sistema de DA, para producir biogás. Aquí, se propuso una combinación en la codigestión con un 50% de RP y un 50% de RFV, lo que resultaría en la incorporación total de 6.167,61 Ton/año de RSO en el proceso. De acuerdo con los resultados obtenidos acerca de la producción acumulada de CH₄ y CO₂ en el tratamiento 50:50, el porcentaje de sólidos volátiles (SV) y sólidos totales (ST) de los sustratos, así como los pesos moleculares de los gases, se estimó que se estimó un total de 1.722,48 TonCO_{2eq}/año

Tabla 5-25. Emisiones provenientes de los tratamientos DA.

Escenarios de Aprovechamiento de RSO	Descripción tratamiento DA	Generación total RS (Ton/año)	HCI (TonCO _{2eq} /año)
100% RP + 100% RFV	100:100	23.927,13	1.239,56
100% RP + 65% RFV	15:85	17.652,63	2.484,82
100% RP + 17% RFV	50:50	6.167,61	1.043,41

Nota: *TonCO_{2eq} con incertidumbre del inventario equivalente a +/- 388,59 TonCO_{2eq}. Cálculos realizados por el método *In Situ* o directo.

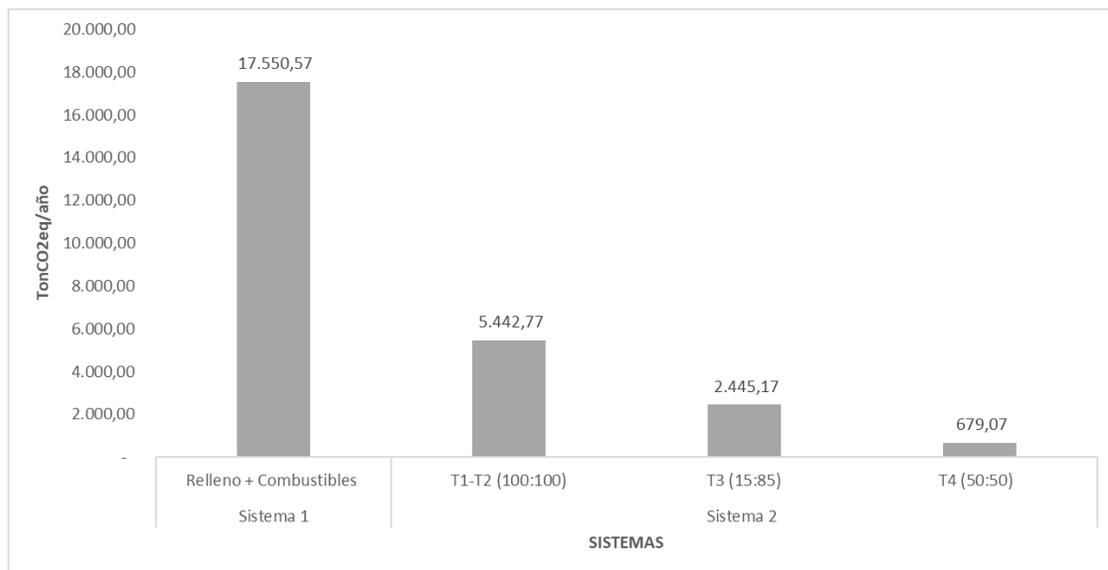
Tras realizar el cálculo de la HCI considerando que el metano (CH₄) generado no se aprovecha en la cocción de alimentos en las instalaciones de una la planta de biodigestión anaerobia, se aprecia una reducción sustancial al contrastar el sistema 1 con los variados escenarios propuestos en el sistema 2 (Figura 5-7).

En cuanto a la comparación de los tratamientos de DA con el sistema 1, se destacan los siguientes resultados notables: en los T1 y T2, se evidencia una disminución del 92,94% en las emisiones de GEI; luego en el T3, se logra una reducción del 85,84% en las emisiones, y finalmente, en el T4, se alcanza una disminución del 94,05% en las emisiones de GEI.

Dicha variación en los resultados se atribuye a las particularidades de cada tratamiento. En el caso del T1, los datos de actividad se basan en el potencial acumulado de biogás a partir de los sustratos en monodigestión (RP+RFV), que demostraron un rendimiento inferior en comparación con las mezclas en codigestión. Por lo tanto, al comparar la HCI generada por el T3 con la del T1, se observa que en T3 es mayor, dado que la mezcla en codigestión resultó en una mayor producción de biogás y metano.

Por otro lado, al analizar el comportamiento del T4 en comparación con el T1, se observa una disminución en la HCI, debido a que el T4 está proyectado en un escenario real de generación de RSO donde se aprovecha una cantidad mucho menor de estos (100% RP + 17% RFV), lo que resulta en emisiones menores, a pesar de tener rendimientos superiores en la producción de biogás.

Figura 5-7: Emisiones HCI del sistema 1 VS sistema 2, sin asumir aprovechamiento del CH₄.



5.4.3. Huella de carbono con aprovechamiento del CH₄

El municipio de Tumaco enfrenta una acuciante necesidad de suministro de energía, particularmente en sus zonas rurales. Dado este contexto, los habitantes de la región se ven obligados a depender de fuentes de energía altamente contaminantes. Es en este escenario que la digestión anaerobia se presenta como una tecnología viable para atender esta creciente demanda energética. Por esto, se llevó a cabo el cálculo de la HC, asumiendo la utilización del metano (CH₄) para la cocción de alimentos.

Esto conlleva a que las emisiones de GEI se restrinjan exclusivamente a las emisiones no deliberadas de dióxido de carbono (CO₂) que resultan de la reacción de combustión del CH₄. De esta manera, se obtuvo la HC que se deriva del aprovechamiento de este gas, tanto en el método de cálculo teórico (HCT) como en el cálculo *in situ* (HCI).

• Huella de Carbono Teórica (HCT)

Tratamientos 1 y 2 (100:100) - utilizando el CH₄: En el escenario de aprovechamiento del 100% de RSO con la utilización del metano (CH₄), se procedió al cálculo de emisiones considerando la cantidad de CH₄ en kilogramos producida a partir de la totalidad de los RSO que actualmente son depositados en el vertedero de Tumaco.

Así mismo, se determinaron las moles de CH₄ que entrarían en una reacción de combustión con oxígeno, generando moles de CO₂ como subproducto. Estos datos se convirtieron en equivalentes de dióxido de carbono. En consecuencia, estos cálculos dieron como resultado una HCT de 476,40 TonCO_{2eq}/año, lo cual significa una reducción del 97,29% en este tratamiento en comparación con las emisiones producidas por el Sistema 1.

Tratamiento 3 (15:85) - utilizando el CH₄: Las emisiones tomando en cuenta la cantidad de metano (CH₄) en kilogramos generada, se estimaron bajo la premisa de un aprovechamiento a escala real del 65% de los RFV y el 100% de los RP, en el marco del tratamiento propuesto de DA (15:85). Luego, se determinaron las moles de CH₄ que entrarían en una reacción de combustión con el oxígeno, dando lugar a moles de CO₂ como subproducto.

Estos datos se convirtieron en equivalentes de CO₂. En este contexto, se produjeron 351,47 TonCO_{2eq}/año, lo cual se traduce en una reducción del 98,00% en la HCT bajo este escenario, al compararla con las emisiones generadas por el sistema 1.

Tratamiento 4 (50:50) - utilizando el CH₄: Se llevó a cabo el cálculo de emisiones considerando la cantidad de metano (CH₄) generada en virtud de un aprovechamiento del 17% de RFV y el 100% de RP, según lo propuesto en el tratamiento de DA (50:50).

Posteriormente se determinaron las moles de CH₄ que entrarían en reacción con el oxígeno en un proceso de combustión, generando así moles de CO₂. Estos datos se transformaron en TonCO_{2eq}/año. En este contexto, se obtuvo 122,80 TonCO_{2eq}/año, generando una reducción del 99,30% en la HCT en este tratamiento, al compararla con las emisiones generadas por el sistema 1.

• Huella de carbono directa o “*In Situ*” (HCl)

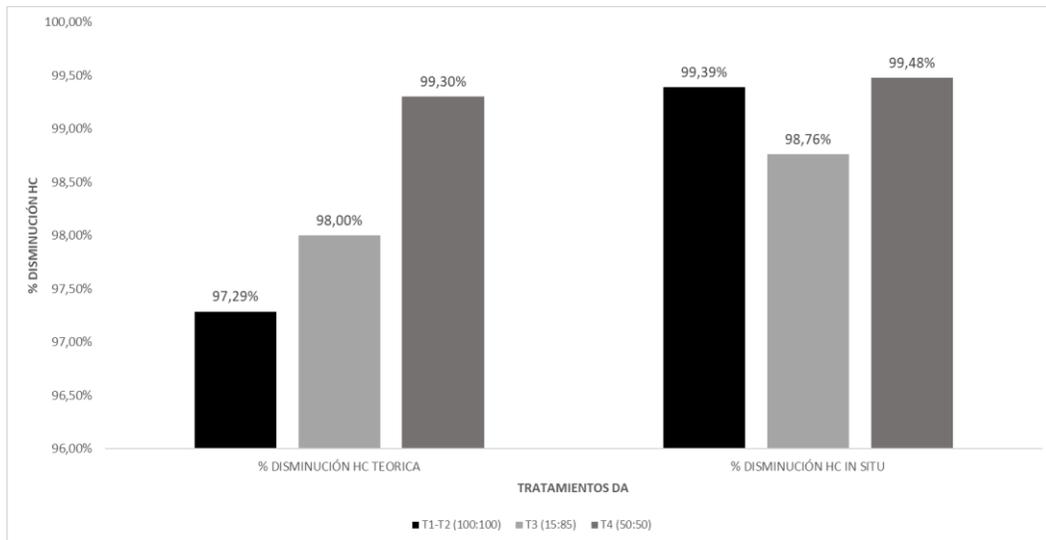
Tratamientos 1 y 2 (100:100) - utilizando el CH₄: El cálculo de emisiones mediante la medición de la HCl, tomó en consideración la cantidad de CH₄ producida bajo el precepto de un aprovechamiento del 100% de los RSO actualmente destinados al relleno sanitario de Tumaco. Se usaron los datos de producción de biogás y metano disponibles, junto con las moles de CH₄ que se involucrarían en una reacción de combustión con oxígeno, destinada para aprovechar este gas en la cocción de alimentos.

Como resultado de esta transformación, se calcularon los equivalentes de dióxido de carbono expresados en unidades másicas, es decir una HCl de 107,05 TonCO_{2eq}/año. En este contexto, se observa una notable reducción del 99,39% en la HCl al compararla con las emisiones del sistema 1.

Tratamiento 3 (15:85) - utilizando el CH₄: Las emisiones "*In Situ*" teniendo en cuenta la cantidad de metano (CH₄) generada para el T3, se basaron en el aprovechamiento del 65% de los RFV y el 100% de los RP en el tratamiento 15:85. Se usaron los datos de producción de metano del T3, y se determinaron las moles de CH₄ que reaccionarían con el oxígeno en un proceso de combustión. Esto generó moles de CO₂, que se transformaron en toneladas equivalentes de CO₂. El T3 tuvo una HCl de 217,19 TonCO_{2eq}/año, logrando una disminución del 98,76% en comparación con las emisiones del sistema 1.

Tratamiento 4 (50:50) - utilizando el CH₄: Para el T4, basado un escenario que contempló un aprovechamiento del 17% de los RFV y el 100% de los RP, se calculó la HCl. Ya que, al contar con los datos obtenidos de producción de biogás y metano en dicho tratamiento, se determinaron las moles de CH₄ que se combinarían con el oxígeno en una reacción de combustión destinada a su utilización en la cocción de alimentos. Esto dio lugar a la generación de moles de CO₂, los cuales se transformaron en equivalentes de unidades másicas. Así, se obtuvo una HCl de 91,43 TonCO_{2eq}/año, logrando una reducción del 99,48% en las emisiones respecto al sistema 1 (Figura 5-8).

Figura 5-8: Disminución porcentual de la HC por ambos métodos de medición (Teórico e *In Situ*) al aplicar distintos tratamientos DA del Sistema 2.



La combustión del CH₄ con el propósito de utilizarlo en la cocción de alimentos es una estrategia altamente efectiva para reducir la HC resultante del proceso biológico de DA. Este efecto positivo se observa tanto en el enfoque teórico como en la medición "*In Situ*", y al compararlo con la no utilización del CH₄ con este fin, se revela como una disminución notable de la HC. La razón se basa en la práctica eliminación de las emisiones fugitivas de CH₄, de modo que el único aporte significativo se deriva de las emisiones CO₂ generadas durante la reacción química de combustión. En todos los escenarios de aprovechamiento considerados, esta tendencia de reducción se aproxima al 100%, lo que equivale a un estado cercano al carbono neutral.

Un caso ejemplar de esta tendencia se encuentra en el tratamiento 50:50, en el cual, según el método directo, se alcanza una considerable disminución del 99,48% en la HCT. Este resultado se alinea con investigaciones previas en el campo de los RSO y su contribución a la mitigación de la HC. Estudios anteriores han demostrado emisiones neutras e incluso huellas negativas de hasta -40 KgCO_{2eq}/TonRS a -60 KgCO_{2eq}/TonRS, al utilizar el biogás remanente en actividades como el abastecimiento energético y otros usos en plantas de codigestión (Slorach et al., 2019). Estas investigaciones resaltan la efectividad de la estrategia y respaldan la idea de que la captura y el aprovechamiento del CH₄ tienen un impacto positivo en la reducción de las emisiones de GEI.

Adicionalmente, este enfoque se respalda mediante el trabajo de Campos Pozuelo et al. (2004), que subrayan una de las ventajas claves de la DA, siendo la disminución significativa de las emisiones incontroladas de GEI. Asimismo, el Ministerio de Hacienda (2021) respalda la noción de que la DA de RSO, al ser un método que captura y utiliza el metano, resulta en una reducción sustancial de las emisiones de GEI. En resumen, la estrategia de aprovechamiento del metano para la cocción de alimentos no solo es altamente efectiva para reducir la HC, sino que también es respaldada por múltiples investigaciones y fuentes confiables en el campo de la gestión sostenible de residuos.

5.4.4. Comparación entre HCT y HCI

Cuando se efectúa la comparación de los métodos de medición de la HC en el marco de esta investigación, tanto en términos de TonCO_{2eq}/año como en porcentuales (%), se observan similitudes entre ellos. Se destaca que la mayor discrepancia entre los métodos se encuentra en los T1 y T2, que muestra una diferencia del 2,10% en la reducción de la HC al comparar los métodos de cálculo de huellas. Sin embargo, es importante señalar que todos los valores obtenidos están bastante próximos entre sí en términos de magnitud. Esto se traduce en diferencias de menos del 5% entre los métodos utilizados (Tabla 5-26)

Tabla 5-26. Diferencias entre los valores obtenidos por los métodos de medición de la HC con aprovechamiento del CH₄.

Tratamiento	Diferencia entre métodos (TonCO _{2eq} /año)	Diferencia entre métodos (%)*
100:100	369,35	2,10
15:85	134,28	0,77
50:50	31,37	0,18

Nota: *% = Estos valores porcentuales hacen referencia a la resta entre el % de disminución de la HCI – el % de disminución con la HCT teórica.

La diferencia porcentual observada en el escenario de aprovechamiento al 100% podría explicarse por las discrepancias en los valores de emisiones expresados en TonCO_{2eq} al calcularlos "in situ" o mediante el uso de metodologías directas de medición de GEI, en contraste con las metodologías teóricas basadas en factores de emisión. Estas diferencias se atribuyen a la precisión y representatividad inherentes de los métodos utilizados. En particular, la medición directa implica la captura de gases de efecto invernadero reales en el lugar donde se originan, lo que proporciona datos precisos y específicos para la fuente en consideración. Este enfoque realista permite una comprensión detallada de las

emisiones, lo cual puede justificar las discrepancias observadas en la reducción de la HC entre los diferentes métodos.

Así mismo, las mediciones "*in situ*" consideran las condiciones ambientales específicas, como la temperatura, la humedad, la presión atmosférica y la composición precisa de los gases en el lugar de interés, lo que conduce a estimaciones más precisas de las emisiones. En este orden de ideas, los métodos directos emplean instrumentación especializada para la medición directa de los GEI, como el CH₄ y el dióxido de carbono CO₂, en el mismo sitio de origen. De ahí que permiten una caracterización detallada y contextualizada de las emisiones, conllevando a una evaluación más realista. Razón por la cual Pérez Cedeño et al. (2022) establecen que las mediciones directas de GEI sirven para “mejorar los resultados que se pueden obtener en las estimaciones ya que consideran variables adicionales”.

Lo anterior, posibilita una evaluación precisa de las emisiones de GEI vinculadas a la producción de biogás o las emisiones reales asociadas a una instalación y/o proceso determinado. En contraste, las metodologías teóricas, como aquellas basadas en FE, dependen de promedios o estimaciones para calcular las emisiones de GEI. Estos factores, derivados de investigaciones y datos previos, no siempre capturan con precisión las condiciones específicas de una ubicación determinada. Como resultado, podrían conducir a estimaciones exageradas o subestimadas de las emisiones reales.

La disparidad en los valores de emisiones entre estos enfoques surge de la falta de representatividad y precisión de los factores de emisión en contextos específicos. Estos factores pueden exagerar las emisiones reales en algunos casos y minimizarlas en otros. La medición "*in situ*" y las metodologías directas de medición ofrecen una evaluación más adaptada a las condiciones reales. Este hecho ha sido corroborado por una investigación que empleó cámaras de flujo abiertas y cerradas para cuantificar las emisiones de GEI en un sistema biológico de compostaje, demostrando una mayor exactitud en las mediciones en comparación con los métodos convencionales (Yasmin et al., 2022).

5.5. Resumen de emisiones GEI

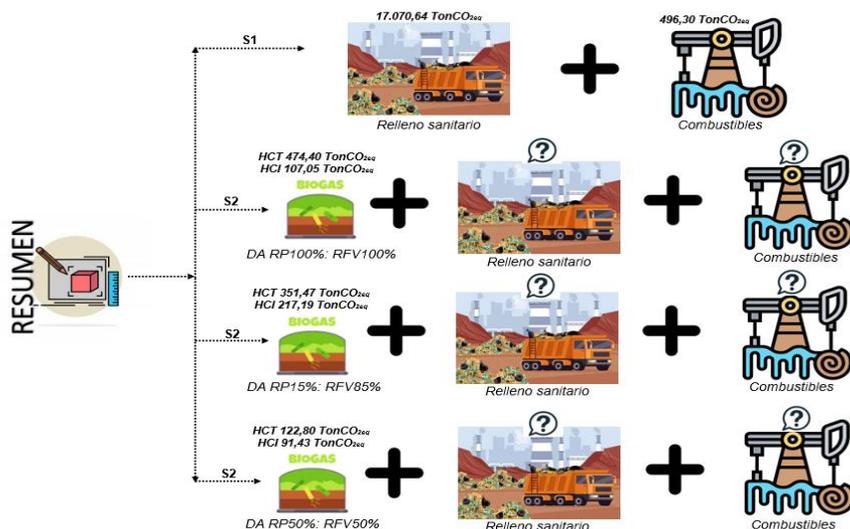
Los resultados expuestos en los apartados anteriores ponen de manifiesto la disminución de la HC al aplicar el DA (sistema 2) en distintos escenarios de aprovechamiento de RSO, al compararlos con el sistema 1. Sin embargo, en aquellos tratamientos donde no se aprovechan el 100% de los RSO, no se incluyeron las emisiones derivadas de los desechos que no son dirigidos a los tratamientos de DA, persistiendo su disposición final en el relleno sanitario.

De allí la importancia de comparar de manera global las emisiones, precisando aquellas derivadas de una disposición total de los RSO en Relleno Sanitario con las generadas al desviarse una fracción importante de los RSO para su aprovechamiento mediante DA.

Adicionalmente, no se abordaron las emisiones relacionadas con una eventual quema de combustibles fósiles, en caso de que la producción de biogás en los tratamientos propuestos no satisfaga la demanda energética de la población rural de Tumaco.

Como se ha mencionado, esta comunidad recurre al uso de plantas estacionarias de DIESEL para su suministro energético. Ante este panorama, resulta imperativo elaborar un resumen integral de las posibles emisiones al asumirse el uso del CH₄ para cocción de alimentos. Para ello es necesario analizar cada escenario de aprovechamiento, considerando ambas metodologías de cálculo de la HC (Teórica e *In Situ*) (Figura 5-9).

Figura 5-9: Resumen de emisiones GEI. Donde: S1 Y S2 = Sistema 1 y 2.



5.5.1. Resumen de emisiones GEI - HCT

Bajo la premisa de aprovechar el CH₄ con fines energéticos, la variación de la HCT entre los sistemas propuestos reveló que las menores emisiones de GEI se registraron en el T4 (50:50), con un total de 122,80 TonCO_{2eq}/año, seguido por el T3 con la cifra de 351,47 TonCO_{2eq}/año. En contraste, los T1 y T2 mostraron emisiones más elevadas, alcanzando los 476,40 TonCO_{2eq}/año.

Esta disparidad era previsible, considerando que la cantidad RSO dirigidos al tratamiento de aprovechamiento del 50% es considerablemente menor (6.167,61 Ton/año) en comparación con los RSO destinados a los otros dos tratamientos. Por ejemplo, el tratamiento 100:100 (T1 Y T2) recibiría la totalidad de los RSO actualmente depositados en el relleno sanitario, ascendiendo a 23.927,13 Ton/año.

No obstante, una evaluación más detallada revela que en los T1 y T2 no se generarían excedentes de RSO destinados al relleno sanitario. En contraste, los otros dos escenarios podrían experimentar un aumento en su HCT, ya que no aprovechan en su totalidad la cantidad anual generada de desechos. En consecuencia, una considerable parte de estos residuos que no ingresan al tratamiento contribuiría a las emisiones durante su disposición en el relleno sanitario (Tabla 5-27).

Un escenario similar podría presentarse con los combustibles estudiados (DIESEL y GLP) en caso de que la producción de biogás no fuera suficiente para satisfacer las necesidades energéticas de la población rural de Tumaco. Sin embargo, en el análisis energético del presente estudio (ver numeral 5.6) para cada combustible, incluido el biogás, se concluye que, logrando las eficiencias de aprovechamiento planteadas, la cantidad de RSO aprovechados en cada tratamiento de DA podría abastecer la demanda energética de la zona rural de Tumaco, ya que actualmente, la ruralidad del municipio depende de plantas estacionarias de DIESEL y se utiliza GLP para las actividades de cocción de alimentos.

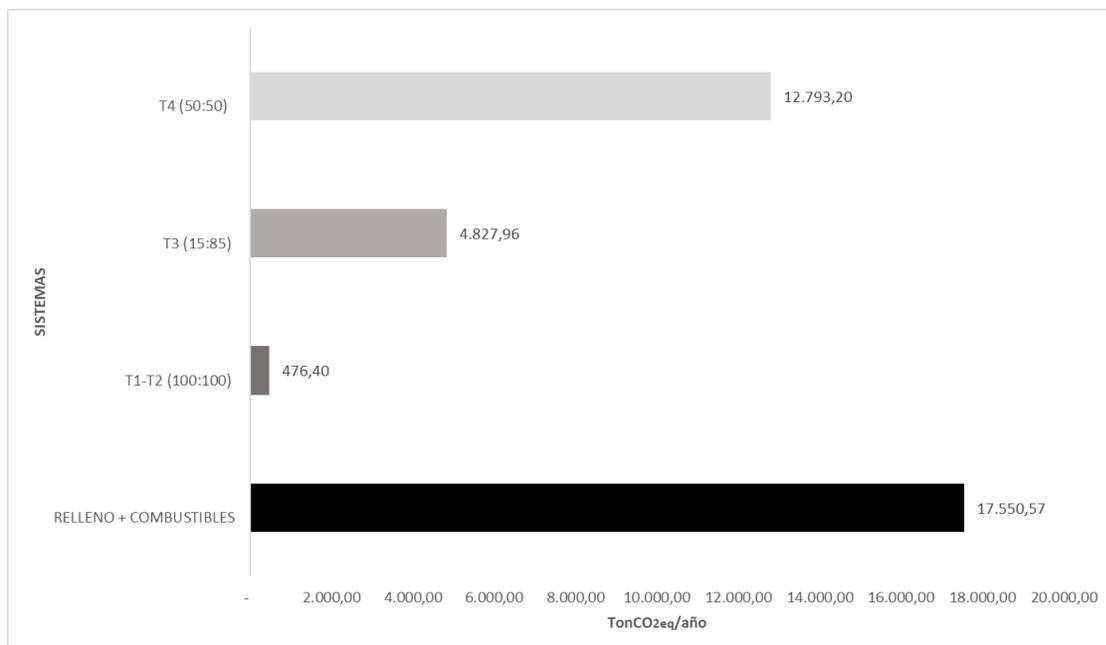
Tabla 5-27. Resumen de emisiones HCT. sistema 1 VS sistema 2.

Sistemas	DA HC (Ton CO _{2eq})	Relleno (Ton CO _{2eq})	Combustibles (Ton CO _{2eq})	Total (Ton CO _{2eq})	HCT (% Disminución)
Relleno y Combustibles	- *	17.070,64	494,30	17.550,57	-****
100:100	476,40	-**	- ***	476,40	97,29
15:85	351,47	4.476,49	- ***	4.827,96	72,49
50:50	122,80	12.670,40	- ***	12.793,20	27,11

Nota: Las TonCO_{2eq} son anuales; *- = Para el S1 no se contemplan emisiones DA ya que Tumaco carece de este tipo de tratamiento para sus RSO. **- = En el S2 100:100 no llegan RSO al relleno sanitario ya que se prevé un aprovechamiento en DA del 100%.***- = En el área rural de Tumaco si se aprovechan los RSO planteados en los tratamientos con DA, no se necesitaría quemar combustibles en las zonas que actualmente recurren a esto como fuente de abastecimiento energético.

Los cambios en los porcentajes de reducción de la HCT al contrastar el sistema 1 y el sistema 2 también experimentaron modificaciones. Inicialmente, las emisiones subestimadas al analizar únicamente los sistemas de DA en este estudio ahora contribuyen a la suma de emisiones totales al contemplarse dentro del análisis la fuente de emisión del relleno sanitario. De modo que la HCT estimada en el resumen de emisiones de GEI bajo todos los tratamientos se distribuye de la siguiente manera: 12.793,20 TonCO_{2eq}/año para el 50:50, seguido por 4.827,96 TonCO_{2eq}/año para 15:85, y finalmente, 476,40 TonCO_{2eq}/año para 100:100 (Figura 5-10).

Figura 5-10: Resumen de emisiones HCT. En términos de Ton CO_{2eq}/año.

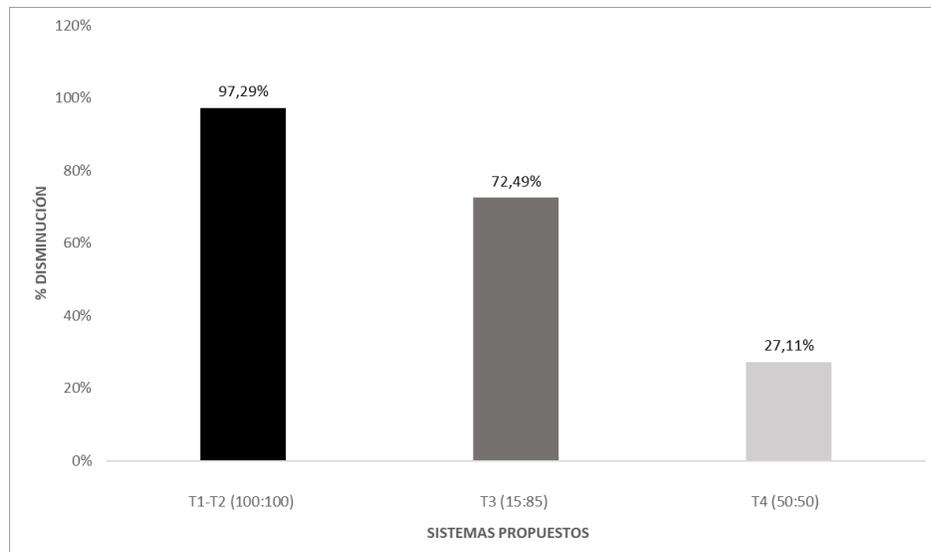


El aumento de GEI para los dos tratamientos que inicialmente tenían menores emisiones (T3 y T4) se atribuye a la subestimación inicial de las emisiones provenientes del relleno sanitario, en contraste con los T1 y T2. Estos últimos, considerar el del 100% de los RSO, no generan emisiones por disposición en el vertedero, y tampoco se recurre a la quema

de combustibles. Cabe destacar que en los T3 y T4 tampoco sería necesario quemar combustibles para abastecer energéticamente a la zona rural de Tumaco.

Como resultado, se logra una disminución más significativa de la HCT en los T1 y T2 al compararlos con el sistema 1 (Figura 5-11), con un 97,29%. Sigue el T3, con una reducción del 72,49%, y finalmente, el escenario T4 presenta una disminución del 27,11%. En este último, al aprovecharse menos RSO, la fracción no aprovechada contribuye en mayor proporción a las emisiones GEI.

Figura 5-11: Resumen de emisiones HCT. En términos de disminución porcentual.



Es previsible que la HCT sea más elevada en los tratamientos donde no se logra aprovechar la totalidad de los RSO, dado que se consideran otras fuentes de emisión en los cálculos. Mientras que, al centrarse exclusivamente en el proceso de DA sin incorporar las demás fuentes de emisión, los tratamientos 50:50 y 15:85 destacan al exhibir menores emisiones de GEI y, simultáneamente, un rendimiento superior en la producción acumulada de biogás, según los resultados de la PBM. En particular, el tratamiento 50:50 sobresale al lograr la mayor producción acumulada de metano en comparación con la obtenida solo con RP y RFV en monodigestión.

5.5.2. Resumen de emisiones GEI – HCl

En la evaluación de las Emisiones GEI, considerando la utilización del CH₄ en la cocción de alimentos, se destacó que las emisiones más bajas fueron observadas T4, totalizando 91,43 TonCO_{2eq}/año. A continuación, los T1 y T2 presentaron 107,05 TonCO_{2eq}/año, mientras que el T3 exhibió emisiones más elevadas, alcanzando la cifra de 217,19 TonCO_{2eq}/año. Este análisis pone de manifiesto la influencia directa del porcentaje de aprovechamiento de metano en el comportamiento de las emisiones, destacando la importancia de optimizar la eficiencia en la utilización de RSO para reducir significativamente la HC asociada al tratamiento de estos desechos.

Estos resultados pueden explicarse en el caso del T4 por la cantidad de RSO dirigidos al sistema DA, la cual es notablemente inferior (6.167,61 Ton/año) al compararla con la cantidad de desechos que se aprovecharían en los otros tratamientos (T1, T2 y T3). No obstante, los T1 y T2 presentaron emisiones menores al compararse con el T3.

Lo anterior se atribuye a una mayor cantidad de RSO llegando al proceso de DA en los T1 y T2 (100% de aprovechamiento). Además, el PBM es menor en los tratamientos de monodigestión de RP y RFV. Por ello, la suma de producción de biometano de estos no logra superar la producción generada por las mezclas en codigestión (T3 y T4), lo que implica menores emisiones en T1 y T2.

También, al profundizar en la evaluación sobre el remanente de RSO que no acceden a los tratamientos de DA y, por tanto, son destinados a la disposición final en el relleno sanitario, se constata que en los T1 y T2 no se generan excedentes de RS dirigidos al relleno sanitario. Esto se basa en la premisa de que el 100% de estos desechos se canalizaría hacia el tratamiento de DA. A pesar de esto, los otros dos tratamientos podrían experimentar un aumento en su HCl, ya que no aprovechan completamente la cantidad anual generada de desechos. Como consecuencia, una parte de estos, al no ser dirigidos al tratamiento, contribuiría a las emisiones durante su disposición en el relleno sanitario (Tabla 5-28).

Ahora, en el escenario en el que la producción de biogás no fuese suficiente para cubrir las necesidades energéticas de la población rural de Tumaco, dichas zonas tendrían que recurrir a los combustibles estudiados (DIESEL y GLP) para garantizar el suministro

energético. De ahí que, al realizar el análisis energético en este estudio (ver numeral 5.6) para cada combustible, se llega a la conclusión de que, al lograr las eficiencias de aprovechamiento planteadas, la cantidad de RSO aprovechados en cada tratamiento podría satisfacer plenamente la demanda energética de la zona rural de Tumaco. Esto es especialmente relevante dado que, en la situación actual, la ruralidad del municipio depende en gran medida de plantas estacionarias de estas fuentes contaminantes para abastecerse.

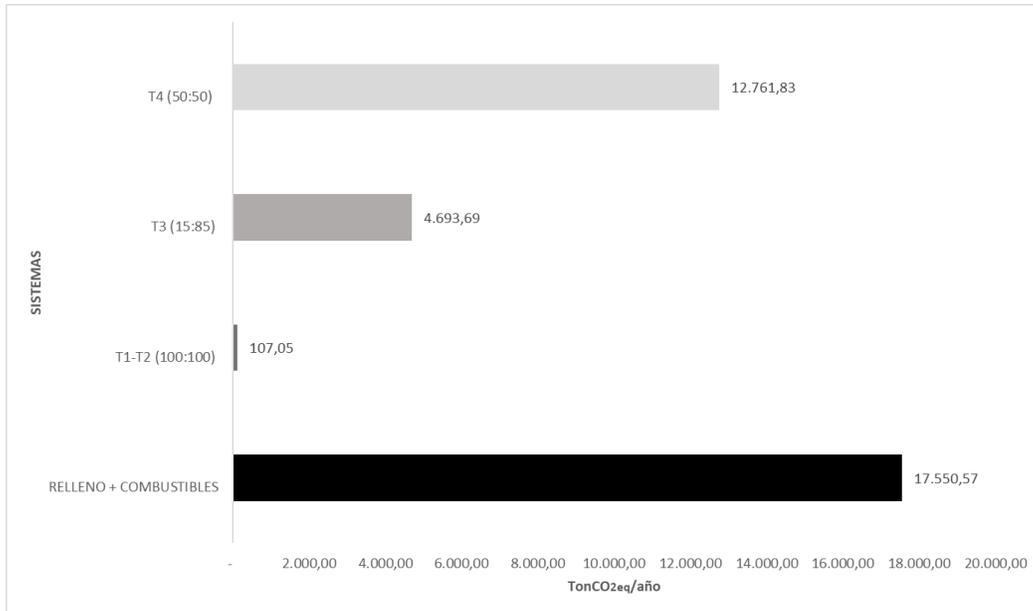
Tabla 5-28. Resumen de emisiones HCl. sistema 1 VS sistema 2.

Sistemas	DA HC (Ton CO _{2eq})	Relleno (Ton CO _{2eq})	Combustibles (Ton CO _{2eq})	Total (Ton CO _{2eq})	HCT (% Disminución)
Relleno y combustibles	- *	17.070,64	494,30	17.550,57	-****
100:100	107,05	-**	- ***	107,05	99,39
15:85	217,19	4.476,49	- ***	4.693,69	73,26
50:50	91,43	12.670,40	- ***	12.761,83	27,29

Nota: Las TonCO_{2eq} son anuales; *- = Para el S1 no se contemplan emisiones DA ya que Tumaco carece de este tipo de tratamiento para sus RSO. **- = En el S2 100:100 no llegan RSO al relleno sanitario ya que se prevé un aprovechamiento en DA del 100%.***- = En el área rural de Tumaco si se aprovechan los RSO planteados en los tratamientos con DA, no se necesitaría quemar combustibles en las zonas que actualmente recurren a esto como fuente de abastecimiento energético.

De igual manera, las variaciones en los porcentajes de disminución de la Huella de HCl al comparar el sistema 1 con el sistema 2 también experimentaron ajustes. En un principio, las emisiones subestimadas al analizar exclusivamente los sistemas de DA en esta investigación, ahora contribuyen al total de emisiones, al incluirse en el análisis la fuente de emisión proveniente del relleno sanitario. En consecuencia, la HCl estimada en el resumen de emisiones de GEI bajo todos los tratamientos se distribuye de la siguiente manera: 12.761,83 TonCO_{2eq}/año para el T4, seguido por 4.693,69 TonCO_{2eq}/año para el escenario T3, y finalmente, 107,05 TonCO_{2eq}/año para los T1 y T2 (Figura 5-12).

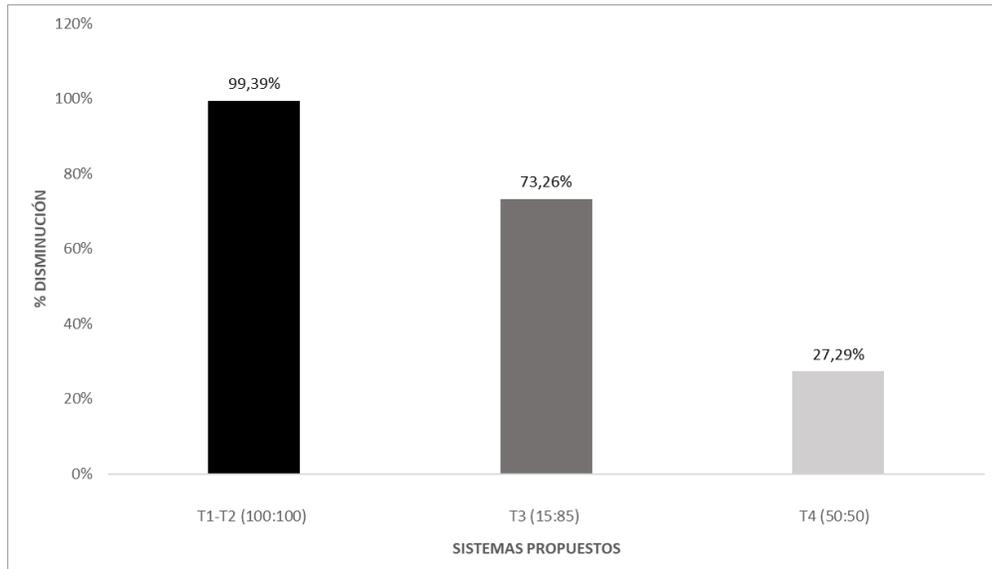
Figura 5-12: Resumen de emisiones HCl. En términos de TonCO_{2eq}/año.



En este mismo sentido, el incremento de las emisiones GEI para los dos tratamientos que inicialmente presentaban menores emisiones (T3 y T4) se atribuye a que un inicio las emisiones procedentes del relleno sanitario no se contabilizaron para el cálculo total, al contrario de lo que ocurre en los T1 y T2 (100:100). En este último, al aprovechar la totalidad RSO, no se generan emisiones por disposición en el vertedero, ni se recurre a la quema de combustibles. Esto también ocurre en los T3 y T4, en los cuales tampoco sería necesario el uso de combustibles para satisfacer las necesidades energéticas de la zona rural de Tumaco.

Como consecuencia, se alcanza una disminución más notable de la HCl en los T1 y T2 al contrastarlos con el sistema 1 (Figura 5-13), registrando una reducción del 99,39%. A continuación, el T3 exhibe una disminución del 73,26%, y finalmente, el escenario T4 presenta una reducción del 27,29%. Ya que, en este último, al aprovecharse una cantidad menor de RSO, la fracción no aprovechada contribuye en mayor medida a las emisiones GEI por el aporte en el relleno.

Figura 5-13: Resumen de emisiones HCl. En términos de disminución porcentual.



A su vez, la conducta de la HCl refleja similitudes con la observada en la HCT. Dado que, en el resumen de emisiones, la HCl fue más elevada en los tratamientos donde no se logra aprovechar la totalidad de los desechos, al considerar otras fuentes de emisión en los cálculos. Mientras que, al focalizarse únicamente en el proceso de DA sin incorporar las demás fuentes de emisión, se destacan los tratamientos 3 y 4, mostrando emisiones menores y, al mismo tiempo, un rendimiento superior en la producción acumulada de biogás, según los resultados del PBM. En particular, el T4 sobresale al alcanzar la mayor producción acumulada de metano en comparación con la obtenida solo con RP y RFV en monodigestión.

En resumen, el biogás producido exhibe un poder calorífico adecuado para atender las demandas energéticas de las Zonas No Interconectadas (ZNI) en la región rural del municipio, según los diferentes escenarios de aprovechamiento propuestos. Finalmente, bajo el análisis global de emisiones, incluyendo la fuente de emisión del relleno sanitario y los residuos que llegarían a este sitio de disposición final bajo cada tratamiento, se concluye que el proceso más limpio en términos de generación de GEI es el 100:100 (T1 y T2), seguido del 15:85; sin embargo, el 50:50 presenta mayores rendimientos de producción acumulada de metano. Razón por la cuál si se desea incluir los dos factores: reducción de emisiones y producción de metano, el tratamiento ideal para el caso de

Tumaco es el 15:85 (T3), ya que reduce en más de un 70% la HC, al tiempo que tiene un potencial acumulado de biogás de 724,26 ml N Biogas/g SV.

5.6. Análisis de potencial energético

La tecnología de DA ha demostrado ser un método altamente eficiente en la generación de energía. Esto se debe a que el biogás resultante contiene un notable porcentaje de metano, permitiendo su aplicación en la producción de energía a través de la combustión en motores, turbinas o calderas. Esta utilización puede darse de manera autónoma o combinada con otros tipos de combustibles. Un aspecto relevante es su contribución a la reducción de las emisiones de GEI, al controlar las emisiones incontroladas de CH₄ y disminuir las emisiones de CO₂ al sustituir energía fósil (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2007).

En este contexto, se hace imperativo evaluar la capacidad de generación de energía en cada uno de los tratamientos de DA. Además, resulta crucial analizar el potencial energético de los combustibles actualmente utilizados en la zona rural de Tumaco, con el fin de compararlos con las producciones de biogás generadas en cada uno de los tratamientos.

Tratamientos 1 y 2 (100:100): Al aprovechar el total de los RSO que actualmente se depositan en el relleno sanitario, cifrado en 23.927,13 Ton/año, y considerando el potencial acumulado de biogás de 553,49 ml Biogás /g SV, junto con el poder calorífico (PC) de este (6 kWh/m³) (Molano Diaz, 2002), y su eficiencia de conversión a energía eléctrica (35%) (Cadavid et al., 2019), se lograría una generación mensual de 801.240,84 kWh/mes (Tabla 5-29).

En términos de consumo, tomando como referencia el promedio por hogar de 157 kWh/mes (UPME, 2019), estos tratamientos beneficiarían cerca de 5.103 hogares en la zona rural de Tumaco.

Tabla 5-29. Generación de energía. Tratamientos 1 y 2.

Tratamiento	Producción acumulada biogás (ml N Biogás/g SV)	Producción biogás (M ³ Biogás/mes)	PC (kWh/m ³)	Energía generada (MWh/año)	Energía generada (MWh/mes)
100:100	553,49	381.543,26	6	9.614,89	801,24

Tratamiento 3 (15:85): Aprovechando el total de los RP y el 65% de los RFV, se estimaron 17.652,63 Toneladas por año. Considerando el potencial acumulado de biogás de 724,26 ml Biogás /g SV, junto con el PC de este y su eficiencia de conversión a energía eléctrica, se obtendría una generación mensual de 711.807,43 kWh/mes. En términos de consumo, tomando como referencia el promedio por hogar en el país, el T3 beneficiaría a 4.534 hogares en la zona rural de Tumaco (Tabla 5-30).

Tabla 5-30. Generación de energía. Tratamiento 3.

Tratamiento	Producción acumulada biogás (ml N biogás/g SV)	Producción biogás (M ³ Biogás/mes)	Eficiencia Biogás (kWh/m ³)	Energía generada (MWh/año)	Energía generada (MWh/mes)
15:85	724,26	338.955,92	6	8.541,69	711,81

Tratamiento 4 (50:50): Al lograr un aprovechamiento total de los RP y del 17% de los RFV en el tratamiento propuesto de DA, se calcularon a 6.167,61 Ton/año de RSO. El T4 tuvo un potencial acumulado de biogás de 828,94 ml Biogás /g SV. Considerando el PC del biogás y la eficiencia de conversión a energía eléctrica, se alcanzarían los 284.644,23 kWh/mes. Si se tiene en cuenta el consumo promedio por hogar, el T4 beneficiaría a 1.813 hogares en la zona rural de Tumaco (Tabla 5-31).

Tabla 5-31. Generación de energía. Tratamiento 4.

Tratamiento	Producción acumulada biogás (ml N Biogas/g SV)	Producción biogás (M ³ Biogás/mes)	Eficiencia Biogás (kWh/m ³)	Energía generada (MWh/año)	Energía generada (MWh/mes)
50:50	828,94	135.544,87	6	3.415,73	283,64

Combustibles fósiles (DIESEL y GLP) – sistema 1: Para analizar el potencial energético del DIESEL actualmente utilizado en la zona rural de Tumaco, se consideró el consumo registrado por las diversas plantas estacionarias investigadas en estas áreas, estableciéndose en 46.968 galones por año. También se tomó en cuenta la eficiencia de los motores DIESEL disponibles en el mercado, que suelen consumir típicamente 0,4 litros de combustible por cada kWh generado (PETROSCOL SAS, 2010). Este cálculo arrojó una producción energética anual de 444.482,84 kWh (Tabla 5-32).

Tabla 5-32. Generación de energía. Combustibles DIESEL.

Consumo DIESEL (gal)	Eficiencia DIESEL (Lt/kWh)	Eficiencia DIESEL (gal/kWh)	Producción energía (kWh/año)	Producción energía (kWh/mes)	Energía generada (MWh/año)
48.968	0,4	0,1057	444.482,84	37.040,24	444,48

Posteriormente, se evaluó el potencial energético del GLP, con datos de consumo de combustible obtenidos de fuentes secundarias (Gas Tumaco Del Pacífico S.A.S. E.S.P., 2021), que se sitúa en 28.496,40 galones por año, equivalentes a 107,87 m³ anuales. Asimismo, se consideró la eficiencia del mencionado combustible, establecida en 26,20 kWh/m³ (PRIMAGAS, 2019), resultando en una producción anual de energía de 2.826,21 kWh (Tabla 5-33). Luego, se sumaron las cantidades de energía generada por ambos combustibles objeto de estudio, alcanzando un total de 447,31 MWh por año (Tabla 5-34).

Tabla 5-33. Generación de energía. Combustible GLP.

Consumo GLP (m ³)	Eficiencia GLP (kWh/m ³)	Producción energía (kWh/año)	Producción energía (kWh/mes)	Energía generada (MWh/año)
107,87	26,20	2.826,21	235,52	2,826

Tabla 5-34. Generación de energía. Combustibles DIESEL y GLP.

Generación DIESEL (kWh/año)	Generación GLP (kWh/año)	Generación DIESEL (MWh/año)	Generación GLP (MWh/año)	TOTAL combustibles (MWh/año)
444.482,84	2.826,21	444,48	2,826	447,31

Al llevar a cabo el análisis energético de cada tratamiento, se determina que los T1 y T2 (100:100) arrojaría la mayor producción de energía para satisfacer las necesidades de la población rural de Tumaco, alcanzando hasta 9.614,89 MWh/año. Sigue el T3, con una producción estimada de 8.541,69 MWh/año, y finalmente, el T4, que generaría 3.415,73 MWh/año. Esta observación indica la relación directa entre la cantidad de biomasa alimentada en la planta de biodigestión y la producción de energía. Sin embargo, es crucial

destacar que la calidad de dicho biogás depende de una mezcla apropiada para maximizar su rendimiento. Es por esto que, el T4 demostró un rendimiento superior en la producción acumulada de biogás y metano a escala de laboratorio, subrayando la importancia de la composición adecuada de los residuos en el proceso de DA.

Asimismo, al expandir esta producción acumulada considerando los residuos frescos involucrados en cada escenario, era previsible que los tratamientos de mayor producción de energía fueran el T1 y T2 (100:100), dado que se estaría utilizando la totalidad de los residuos que actualmente llegan al relleno sanitario. Por consiguiente, el potencial energético derivado de la utilización integral de esta biomasa es significativamente superior en comparación con los otros tratamientos.

Por esto, en investigaciones anteriores, se ha demostrado que, al aprovechar únicamente 509 Ton/año de RP para suplir las necesidades energéticas de hogares de pescadores en Tumaco, se puede alcanzar un potencial energético de hasta 489 MWh anuales (Cadavid et al., 2019). Esto indica la relevancia de llevar a cabo mezclas eficientes en la codigestión de RSO con el propósito de ampliar dicho potencial energético. Este enfoque busca no solo abastecer a más hogares mediante la DA sino también incrementar la cantidad de RSO que podría ser dirigida a una planta de biodigestión a escala real. Al mismo tiempo, esta práctica contribuiría a reducir la presión ejercida por estos desechos en el relleno sanitario local. Es relevante señalar que, esta investigación se centra exclusivamente en el análisis de las zonas donde se obtuvieron los datos más recientes sobre el consumo de dichos combustibles.

La implementación exitosa de las eficiencias de aprovechamiento previstas para los RSO en Tumaco, podría resultar en la total eliminación de la dependencia de la quema de combustibles fósiles para cubrir las necesidades energéticas. No obstante, esto dependerá de una gestión integral de RSO en el municipio, fortaleciendo los hábitos de separación en la fuente e implementando rutas selectivas de RS eficientes. Además, se requiere un estudio más exhaustivo que abarque las zonas rurales más remotas, examinando detalladamente el consumo de estos combustibles contaminantes en los hogares.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

Los resultados de la presente investigación revelan una marcada reducción, tanto en la HCT, como en la HCI, al aprovechar el CH₄, entre los años 2022-2023 para la cocción de alimentos. En los tratamientos 1 y 2 (100:100), se observa una disminución de la HCT del 97,29% y de la HCI en un 99,39%. Asimismo, en el caso del T3, se registra una disminución de la HCT del 98% y de la HCI en un 98,76%. De manera similar, para el T4, se evidencia una reducción del 99,30% en la HCT y del 99,48% en la HCI. Al considerar exclusivamente las emisiones de GEI provenientes del Sistema 2, el tratamiento más amigable en términos de equivalentes de CO₂ es T4 presentando una HCT de 122,80 TonCO_{2eq}/año y una HCI de 91,43 TonCO_{2eq}/año.

Por otra parte, al examinar de manera integral las emisiones en cada tratamiento, teniendo en cuenta la fracción de los RSO que terminarían en el vertedero al no ser aprovechados, se constató que los T1 y T2 exhibieron las menores emisiones. La HCT se situó en 476,40 TonCO_{2eq}/año, mientras que la HCI alcanzó los 107,05 TonCO_{2eq}/año. En comparación, el tratamiento T3 registró una HCT de 4.827,96 TonCO_{2eq}/año y una HCI de 4.693,69 TonCO_{2eq}/año, seguido por el T4, que presentó una HCT de 12.793,20 TonCO_{2eq}/año y una HCI de 12.761,83 TonCO_{2eq}/año. Este análisis pone de manifiesto la significativa influencia de las emisiones provenientes del relleno sanitario al considerar integralmente cada tratamiento de DA propuesto.

En esta investigación, se logró definir las mejores condiciones para la producción de biogás y metano, sentando así las bases para la futura implementación del proceso a escala real. El T4 se destacó como el de mayor potencial de metano, alcanzando un valor de 474,93 ml N CH₄/g SV, seguido por el T3 con 394,17 ml N CH₄/g SV. En comparación, los sustratos en monodigestión, T1 y T2 mostraron valores de 387,87 ml N CH₄/g SV y 364,87 ml N

CH₄/g SV, respectivamente. Estos resultados revelan la viabilidad y eficiencia de las mezclas propuestas, ofreciendo perspectivas prometedoras para la implementación a mayor escala del proceso de DA.

Respecto al análisis energético de cada tratamiento y los combustibles fósiles actualmente utilizados en Tumaco, se deduce que los T1 y T2 producen la mayor cantidad de energía, logrando un valor de 9.641,89 MWh/año. Seguido del T3 con 8.541,69 MWh/año, y finalmente, el T4 con 3.415,73 MWh/año. Considerando la producción acumulada de metano, la capacidad de generación de energía y las emisiones de GEI, se destaca que el mejor tratamiento para la implementación a escala real de la DA sería el T3. Puesto que exhibió producciones de biogás más elevadas en comparación con el aprovechamiento exclusivo de RP y RFV, logrando así utilizar una mayor cantidad de residuos en comparación con el T4.

Finalmente, al realizar las comparaciones pertinentes, se evidenció la eficacia de la DA como una tecnología capaz de reducir las emisiones de GEI, al mismo tiempo que genera energía limpia y no contaminante para comunidades como la de Tumaco, quienes actualmente enfrentan necesidades energéticas palpables. No obstante, el logro exitoso de este proceso biológico requerirá de la colaboración coordinada por parte de diversos actores en el ámbito social, político, académico y científico en el territorio de estudio para la formulación de políticas públicas entorno al cambio climático. Esto se vuelve esencial para la eventual operación de una planta de biodigestión a escala real, abordando así los desafíos que Colombia enfrenta en su búsqueda por reducir las emisiones contaminantes.

6.2. Recomendaciones

Tras obtener los resultados de la presente investigación, se recomienda lo siguiente:

- Mejorar la producción acumulada de biogás y metano mediante la exploración de mezclas alternativas con diversos sustratos y variadas proporciones entre ellos.
- Integrar en el análisis de huella de carbono las zonas más remotas y menos consideradas en la realidad del municipio de Tumaco. Estos lugares apartados no

fueron abordados en el estudio actual debido a la falta de información secundaria que proporcionara datos de consumo en dichas áreas periféricas.

- Realizar un análisis energético más exhaustivo, abarcando las otras zonas distantes del municipio que no fueron contempladas en esta investigación. Esto implica considerar la quema de leña, una práctica común en la ruralidad, para obtener una evaluación más completa.
- Implementar una alternativa de medición *in situ* de la HC, ampliando el estudio para incluir la medición de emisiones de gases de efecto invernadero en cuerpos de agua utilizados como sitios de disposición final inadecuada de los residuos sólidos orgánicos.
- Medir la producción de biogás de la Planta piloto con la que actualmente cuenta la UNAL (Sede Tumaco), con el objetivo de determinar *in situ* la HC en dicha Planta, teniendo en cuenta aspectos ambientales como temperatura, características del sustrato, etc; los cuales son importantes para evitar sobredimensionar la producción real de metano.

Referencias bibliográficas

- Ahuja, I., Dauksas, E., Remme, J., Richardsen, R., & Loes, A. K. (2020). *Fish-based fertilizers and fish waste in organic agriculture - With status in Norway: A review. Waste Management. 115*(1), 95–112.
- Alarcón, A. M. (2017). Plan de suministro energético en San Andrés de Tumaco. [Tesis de Maestría, Universidad de los Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/>
- Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2015). *Guía para el cálculo y reporte de Huella de Carbono Corporativa*. <https://Bogota.Gov.Co>.
- Alcaldía Municipal de Tumaco-Nariño. (2018). *Informe de rendición de cuentas a la ciudadanía*. <http://www.Tumaco-Nariño.Gov.Co>.
- Alcaldía Municipal de Tumaco-Nariño. (2013). *Ficha municipal datos generales*. <https://Colaboracion.Dnp.Gov.Co/>.
- Ambientum. (2022, November 28). Relación Carbono – Nitrógeno. Enciclopedia Medioambiental. https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/suelos/relacion_carbono_nitrogeno.asp
- Angel, E., Carmona, S. I., & Villegas, L. C. (2010). Gestión ambiental en proyectos de desarrollo. *Modelo Analítico Por Dimensiones En La Evaluación de Impactos Ambientales*.
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J., Guwy, A., & Van Lier, J. (2006). Anaerobic Biodegradation, Activity, and Inhibition (ABAI). *Institute of Environment & Resources Technical University of Denmark Bygningstorvet, 115*.
- Arboleda, E., España, L., & Gómez, L. (2022). Energía social y transición energética en Colombia. De las prácticas sociales a la gobernanza energética (Primera edición). Universidad Nacional de Colombia - Sección de Publicaciones Sede Medellín.
- Arenas, L. N. (2015). Diseño de cámara estática cerrada y medición de flujos de gases de efecto invernadero (GEI) en suelos. *Universidad Nacional de Colombia*.
- Aristizabal, B. H., Vanegas, E., Mariscal, J. P., & Camargo, M. A. (2015). Digestión anaerobia de residuos de poda como alternativa para disminuir emisiones de gases de efecto invernadero en rellenos sanitarios. *Energética, 46*, 29–36.
- Arrechea Fajardo, L. (2021). Aprovechamiento integral de residuos de pesca artesanal a través de tratamientos anaerobios en Tumaco-Nariño [Tesis de Maestría, Universidad Nacional]. <https://repositorio.unal.edu.co/>

- Arroyave, L. J. (2017). *Huella de carbono en el Valle de Aburrá* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/>
- APHA-American Public Health Association, AWWA-American Water Works Association, & WEF-Water Environment Federation. (1999). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (L. S. Ciesceri, A. E. Greenberg, & A. D. Eaton (eds.); 20th ed.)
- Arvanitoyannis, L. S., & Kassaveti, A. (2008). Fish industry waste: treatments, environmental impacts, current and potential uses. *International Journal of Food Science & Technology*, 43(4), 726–745.
- AUNAP. (2013). *Plan Estratégico Institucional-PEI, 2013-2014*.
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2020). *Cómo llevar electricidad al Litoral Pacífico Colombiano*.
- Banco Mundial, & Ministerio de Vivienda, C. y T. (2021). Tratamiento de residuos sólidos en el marco del servicio público de aseo.
- Bautista, R., Villamizar, D., & Vallejo, R. (2015). *Guía para el cálculo de huella de carbono y sus implicaciones en la industria colombiana*. Universidad Sergio Arboleda.
- BERNAL-MARTINEZ, A. (2020). Codigestión anaerobia como alternativa para el tratamiento de aguas residuales lácteas y la generación de biogás y biosólidos. In *Mujeres en la Ciencia Ciencias ambientales, uso de recursos*. <https://doi.org/10.35429/h.2020.8.115.141>
- Bravo Olivas, M. L., & Chávez Dagostino, R. M. (2020). Sustainable Fishing? Ecological Footprint Analysis of an Artisanal Fishing Organization. *The Open Environmental Research Journal*, 13, 1–10. DOI: 10.2174/1874213002013010001, 2020, 13, 1-10
- Briseño Arciniega, L. A. (2017). Producción de biogás a través de la codigestión de residuos sólidos y semisólidos: hacia una planta centralizada de biogás para la generación de energía [Tesis de Maestría, Centro de Investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica cideteq]. <https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/>
- Bücker, F., Marder, M., Peiter, M. R., Lehn, D. N., Esquerdo, V. M., Antonio de Almeida Pinto, L., & Konrad, O. (2020). Fish waste: An efficient alternative to biogas and methane production in an anaerobic mono-digestion system. *Renewable Energy*, 147. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.140>
- Cabezas, J. D., & Chavarro, M. A. (2020). *Cálculo de huella de carbono en la Universidad de La Salle sede Norte para la formulación de propuestas de prevención y mitigación de gases de efecto invernadero*. Universidad de La Salle.
- Cadavid-Rodríguez, L.S, & Bolaños-Valencia, V. (2015). Aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de energía renovable en una ciudad colombiana Use

- of organic waste for renewable energy production in a Colombian city. *Energética*, 46.
- Cadavid-Rodríguez, L. S., Vargas-Muñoz, M. A., & Plácido, J. (2019). Biomethane from fish waste as a source of renewable energy for artisanal fishing communities. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 34. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.05.006>
- Cámara de Comercio de Tumaco. (2021). Anuario Estadístico 2021. <https://www.cctumaco.org/>
- Campos Montiel, R. G., del Razo Rodríguez, Ó. E., Almaraz Buendía, I., Ramírez Bribiesca, E., Soriano Robles, R., Salinas Matínez, J. A., Arías Margarito, L., & González Muñoz, S. S. (2018). BIOCONVERSIÓN DE DESPERDICIOS VEGETALES A BIOGÁS A PARTIR DE MICROORGANISMOS RUMINALES. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(1), 149–155. <https://doi.org/10.20937/rica.2018.34.01.13>
- Campos Pozuelo, E., Palatsi Civit, J., Albés, J., Solé Mauri, F., Margrí Aloy, A., & Flotats Ripoll, X. (2004). Guía de los tratamiento de las deyecciones ganaderas.
- Campos, J. L., Valenzuela-Heredia, D., Pedrouso, A., Val Del Río, A., Belmonte, M., & Mosquera-Corral, A. (2016). Greenhouse Gases Emissions from Wastewater Treatment Plants: Minimization, Treatment, and Prevention. In *Journal of Chemistry* (Vol. 2016). <https://doi.org/10.1155/2016/3796352>
- Castro Rivera, R., Solís Oba, M. M., Chicatto Gasperín, V., & Solís Oba, A. (2020). PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE CODIGESTIÓN DE ESTIÉRCOL BOVINO Y RESIDUOS DE COSECHA DE TOMATE *Solanum lycopersicum* L. *Contaminación y Ambiente*, 36(3), 529–539.
- Chen, S., Yang, D., Dong, B., Li, N., & Dai, X. (2020). Sludge age impacted the distribution, occurrence state and structure of organic compounds in activated sludge and affected the anaerobic degradability. *Chemical Engineering Journal*, 384. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123261>
- CMNUCC. (1992). Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2021). *Economía circular en América Latina y el Caribe*. <https://Repositorio.Cepal.Org>.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2019). Encuesta a municipios sobre gestión de residuos sólidos domiciliarios.
- De la Hoz, M. J., Duarte, L. O., & Manjarrés, L. (2017). *Estadísticas de desembarco y esfuerzo de las pesquerías artesanales e industriales de Colombia entre marzo y diciembre de 2017*.

- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2016). *Informe Nacional de aprovechamiento*. [Http://Www.Andi.Com.Co](http://www.andi.com.co).
- Devadoss, P. S., Agamuthu, P., Mehran, S. B., Santha, C., & Fauziah, S. H. (2021). Implications of municipal solid waste management on greenhouse gas emissions in Malaysia and the way forward. *Waste Management*, 119. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.038>
- Díaz, A. L., & Cardozo, A. del P. (2022). Analisis de la gestión de los residuos orgánicos en Colombia a través de la visualización del marco legal vigente representado por medio de un dashboard.
- Duan, Z., Scheutz, C., & Kjeldsen, P. (2021). Trace gas emissions from municipal solid waste landfills: A review. *Waste Management*, 119. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.015>
- El Portal de la Acuicultura. (2020). *Empresa marroquí busca socio español para liderar una propuesta de valorización de residuos de pescado para alimentación animal*. [Https://Www.Mispecies.Com/](https://www.mispecies.com/).
- El TIEMPO. (2021, Septiembre 11). Los residuos orgánicos no son basura; puede darles un nuevo uso. [Https://Www.Eltiempo.Com/Bogota/Los-Residuos-Organicos-No-Son-Basura-Puede-Darles-Un-Nuevo-Uso-617397](https://www.eltiempo.com/Bogota/Los-Residuos-Organicos-No-Son-Basura-Puede-Darles-Un-Nuevo-Uso-617397).
- Fernández-Braña, A., Feijoo, G., & Dias-Ferreira, C. (2020). Turning waste management into a carbon neutral activity: Practical demonstration in a medium-sized European city. *Science of the Total Environment*, 728. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138843>
- Galeano, S. (2022). Estructuración de un modelo de emprendimiento empresarial en el marco de economía circular a partir de subproductos de pesca. Universidad Nacional de Colombia.
- Gas Tumaco del Pacífico SAS ESP. (2021). Estudio de factibilidad técnico para la implementación de un sistema de masificación de gas domiciliario por redes para el municipio de "Tumaco" del Departamento de Nariño.
- Ghaly, A. E., Ramakrishnan, V. V., Brooks, M. S., Budge, S. M., & Dave, D. (2013). Fish processing wastes as a potential source of proteins, amino acids and oils: A critical review. *Journal of Microbial and Biochemical Technology*, 5(4). <https://doi.org/10.4172/1948-5948.1000110>
- García, O., Solís-Oba, M. M., Pérez-López, M. E., González-Prieto, J. M., & Valencia-Vázquez, R. (2015). Producción de metano utilizando residuos cunícolas TT - Methane production using rabbit residues. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 14(2).
- GHG PROTOCOL. (2005). *Protocolo de Gases de Efecto Invernadero, Estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte*. [Https://Ghgprotocol.Org/](https://ghgprotocol.org/).

- GHG PROTOCOL. (2014). *Estándar de objetivos de mitigación, un estándar de contabilización y generación de reportes para objetivos de reducción de gases de efecto invernadero nacionales y regionales*. <https://Ghgprotocol.Org/>.
- Giménez, J. B. (2014). *Estudio del tratamiento anaerobia de aguas residuales urbanas en biorreactores de membranas* [Tesis de Doctorado, Universidad de Valencia]. <https://roderic.uv.es/>
- Gobernación de Nariño. (2019). *Plan Departamental de extensión agropecuaria del Departamento de Nariño*. <https://Www.Minagricultura.Gov.Co/>.
- Guerrero, J. (2016). Evaluación del potencial de biometanización de la co-digestión de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales municipales mezclados con residuos de alimentos [Tesis de Maestría, Universidad de Antioquia]. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/>
- Hadiyanto, A., Budiyo, B., Djohari, S., Hutama, I., & Hasyim, W. (2015). THE EFFECT OF F/M RATIO TO THE ANAEROBIC DECOMPOSITION OF BIOGAS PRODUCTION FROM FISH OFFAL WASTE. *Waste Technology*, 3(2). <https://doi.org/10.12777/wastech.3.2.58-61>
- Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., Bougrier, C., Buffière, P., Carballa, M., de Wilde, V., Ebertseder, F., Fernández, B., Ficarra, E., Fotidis, I., Frigon, J. C., de Lacroix, H. F., Ghasimi, D. S. M., Hack, G., Hartel, M., ... Wierinck, I. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology*, 74(11). <https://doi.org/10.2166/wst.2016.336>
- Hoorweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). A Global Review of Solid Waste Management - Review, Global Management, Solid Waste. *World Bank Urban Development Series Knowledge Papers*, 1(11).
- Huang, J., Zhao, W., Li, Z., Ou, Y., & Lin, L. (2022). Estimation of CO2 emission in reservoir coupling floating chamber and thin boundary layer methods. *Science of The Total Environment*, 811. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151438>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2007). *Biomasa, digestores anaerobios*.
- IPCC. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (Capítulo 4, Volumen 5)*. <https://Www.Ipcc.Ch>.
- IPCC. (2007). *Mitigación del cambio climático (Informe 4)*. <https://Www.Ipcc.Ch/>.
- IPCC. (2013). Working Group 1, Summary for Policymakers. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In *Ipcc*.

- Jaramillo, G., & Zapata, L. (2008). APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS EN COLOMBIA. Universidad de Antioquia.
- Jiang, Z., Zhong, Y., Yang, J., Wu, Y., Li, H., & Zheng, L. (2019). Effect of nitrogen fertilizer rates on carbon footprint and ecosystem service of carbon sequestration in rice production. *Science of the Total Environment*, 670. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.188>
- Johari, A., Ahmed, S. I., Hashim, H., Alkali, H., & Ramli, M. (2012). Economic and environmental benefits of landfill gas from municipal solid waste in Malaysia. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 16, Issue 5). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.005>
- Kawai, M., Nagao, N., Tajima, N., Niwa, C., Matsuyama, T., & Toda, T. (2014). The effect of the labile organic fraction in food waste and the substrate/inoculum ratio on anaerobic digestion for a reliable methane yield. *Bioresource Technology*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.018>
- Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. In *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- Lemus, L. X. (2018). *Evaluación de la huella de carbono para el aprovechamiento de residuos orgánicos* [Tesis de Pregrado, Universidad de La Salle]. <https://ciencia.lasalle.edu.co/>
- Lino, F. A. M., & Ismail, K. A. R. (2017). Incineration and recycling for MSW treatment: Case study of Campinas, Brazil. *Sustainable Cities and Society*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.09.028>
- LORAX. (2005). *Manifestación de Impacto Ambiental*. <Http://Sinat.Semarnat.Gob.Mx/>.
- Lü, H., Chen, X. H., Mo, C. H., Huang, Y. H., He, M. Y., Li, Y. W., Feng, N. X., Katsoyiannis, A., & Cai, Q. Y. (2021). Occurrence and dissipation mechanism of organic pollutants during the composting of sewage sludge: A critical review. In *Bioresource Technology* (Vol. 328). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124847>
- Luna Geller, L. A., & Bolaños Benavides, M. M. (2007). Producción de abonos orgánicos de buena calidad.
- Malagón, G. (2022). Control a contaminación por plantas eléctricas. *El Tiempo*.
- Malakahmad, A., Abualqumboz, M. S., Kutty, S. R. M., & Abunama, T. J. (2017). Assessment of carbon footprint emissions and environmental concerns of solid waste treatment and disposal techniques; case study of Malaysia. *Waste Management*, 70. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.044>

- Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 540–555.
- Medina, M. (2018). Entrevista con Otto Polanco: colombianos consumen 10 kilos de pescado al año. *El Espectador*.
- Ministerio de Hacienda. (2021). *Gestión de residuos y captura de emisiones*. <https://www.minhacienda.gov.co>.
- Molano Diaz, I. A. (2002). Generación de potencia eléctrica con biogás construcción [Tesis de Pregrado, Universidad de Los Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co>
- Morales, C. (2019). *Co-digestión anaerobia y pretratamientos de residuos agroalimentarios con fangos UASB de depuradora*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Madrid.
- Muñoz, I. D. (2019). *Estrategias de diseño bioclimático para el mejoramiento del confort térmico de una plaza de mercado existente, caso de estudio: plaza de mercado municipal, Tumaco, Nariño*. Universidad Católica.
- Nuñez - Monroy, J. (2012). Huella de Carbono: más allá de un instrumento de medición. Necesidad de conocer su impacto verdadero. *Actas IV Congreso Internacional*
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2016). *La pesca artesanal, el caso de Costa Rica*. <http://www.fao.org>.
- Owen, W. F., Stuckey, D. C., Healy, J. B., Young, L. Y., & McCarty, P. L. (1979). Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. *Water Research*, 13(6). (79) 90043-5 <https://doi.org/10.1016/0043-1354>
- Parlamento Europeo. (2017, Mayo 12). Infografía: las cifras del desperdicio de alimentos en la Unión Europea. <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20170505STO73528/Infografia-Las-Cifras-Del-Desperdicio-de-Alimentos-En-La-Union-Europea>.
- Pavlostathis, S. G., & Giraldo-Gomez, E. (1991). Kinetics of Anaerobic Treatment. *Water Science and Technology*, 24(8), 35–59. <https://doi.org/10.2166/wst.1991.0217>
- Peralta, M. J., & Serrano, P. A. (2019). Co-digestión anaerobia de los residuos de alimentos crudos generados en cafeterías de instituciones universitarias. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Pérez Cedeño, R., Vázquez Stanescu, C., Torres, M., & Ramírez Pisco, R. (2022). Métodos aplicados a la estimación de gases de efecto invernadero en los embalses de hidroeléctricas. *Suma de Negocios*, 13(28), 50–56. <https://doi.org/10.14349/sumneg/2022.V13.N28.A6>

- PETROSCOL SAS. (2010). Plantas eléctricas DIESEL. <https://www.Petroscol.Com/Plantas-Electricas-DIESEL.Html>.
- PRIMAGAS. (2019). Gas propano y gas natural: comparativa, precios y mucho más. <https://www.Primagas.Es/Blog/Gas-Propano-y-Gas-Natural>.
- Quintanilla, V., & Ruiz, R. (2021). *El aumento del uso de combustibles fósiles en la generación eléctrica eleva el riesgo social, ambiental y en derechos humanos*. <https://Aida-Americas.Org/>.
- Quintero, V., & Rondón, C. (2012). *Estudio preliminar para la producción de biogás a partir de la digestión anaerobia de mucílago de café*. Universidad Industrial de Santander.
- Raposo, F., De La Rubia, M. A., Fernández-Cegrí, V., & Borja, R. (2012). Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 16, Issue 1). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.008>
- Rivas Castillo, J. M. (2020). Elección del gas natural como combustible para cocinar en Lima Metropolitana. *Revista de Análisis Económico y Financiero*, 3(2), 17–27. <https://doi.org/10.24265/raef.2020.v3n2.25>
- Rodríguez Salcedo, J., Hleap Zapata, J., Estrada, F., Clavijo Salinas, J., & Perea Velasco, N. (2011). *Agroindustria pesquera en el pacífico colombiano*. Universidad Nacional de Colombia sede Palmira.
- Rojas Avendaño, M. C. (2022). Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos para la generación energía en Bogotá. Universidad de América.
- Ryals, R., McNicol, G., Porder, S., & Kramer, S. (2019). Greenhouse gas fluxes from human waste management pathways in Haiti. *Journal of Cleaner Production*, 226. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.079>
- Ruiz Bastidas, R. C. (2017). Aprovechamiento del estiércol bovino generado en el municipio de Cumbal-Nariño para obtener energía renovable mediante digestión anaerobia [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/>
- Sala, A., Damalas, D., Labanchi, L., Martinsohn, J., Moro, F., Sabatella, R., & Notti, E. (2022). Energy audit and carbon footprint in trawl fisheries. *Scientific Data*, 9(428). <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01478-0>
- Sánchez-Portilla, F., & Vizcón Toledo, R. (2017). La Codigestión de Residuos Orgánicos: una contribución energética, ambiental y de salud humana TT - The Organic Waste Codigestion: an energy, environmental and human health contribution. *Ingeniería Energética*, 38(3).
- Sánchez-Reyes, C., Patiño-Iglesias, M. E., Alcántara-Flores, J. L., Reyes-Ortega, Y., Pérez-Cruz, M. A., & Ortiz-Muñoz, E. (2016). Determinación del potencial

- bioquímico de metano (PBM) de residuos de frutas y verduras en hogares. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 32(2).
<https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.02.05>
- Santillan, V., & Ramírez, E. (2018). El Uso De La Cromatografía De Gases En Investigaciones De Emisiones De Gases De Efecto Invernadero Del Sector Pecuario. *Agro Productividad*, 11(2).
- Schneider, H., & Samaniego, J. (2010). La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios, documentos de proyectos. *Cepal*.
- Shi, S., & Yin, J. (2021). Global research on carbon footprint: A scientometric review. *Environmental Impact Assessment Review*, 89.
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106571>
- Slorach, P. C., Jeswani, H. K., Cuéllar-Franca, R., & Azapagic, A. (2019). Energy demand and carbon footprint of treating household food waste compared to its prevention. *Energy Procedia*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.053>
- Souza, J., & Schaeffer, L. (2013). Sistema de compresión de biogás y biometano. *Informacion Tecnologica*, 24(6). <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000600002>
- Toppe, J., Olsen, R., Peñarubia, O., & James, D. G. (2018). Producción y utilización del ensilado de pescado. *Organizaciones de Las Naciones Unidas Para La Alimentación y La Agricultura*, 1.
- Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2014). *Tendencias de eficiencia energética en el uso de combustibles fósiles*. <https://www1.upme.gov.co/>.
- Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2015). *Manual Calculadora Fecoc*. <http://www.upme.gov.co/>.
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2019). Primer balance de Energía Útil para Colombia y Cuantificación de las Perdidas energéticas relacionadas y la brecha de eficiencia energética.
- UPME, IDEAM, COLCIENCIAS, U. (2010). Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. In *Universidad Industrial de Santander*.
- Vargas Corredor, Y. A., & Pérez Pérez, L. I. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 14(1), 59–72.
- Varnero, M. T., Carú, M., Galleguillos, K., & Achondo, P. (2012). Tecnologías disponibles para la purificación de biogás usado en la generación eléctrica. *Informacion Tecnologica*, 23(2). <https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000200005>

- Vaverková, M. D., Adamcová, D., Winkler, J., Koda, E., Petrželová, L., & Maxianová, A. (2020). Alternative method of composting on a reclaimed municipal waste landfill in accordance with the circular economy: Benefits and risks. *Science of the Total Environment*, 723. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137971>
- VDI 4630. (2006). Fermentation of organic materials. Characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4630-fermentation-of-organic-materials-characterization-of-the-substrate-sampling-collection-of-material-data-fermentation-tests>
- Vega, K. B. (2015). *Elaboración de composta a partir de residuos de pescado, utilizando el método de pilas con aireación mecánica*. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C, Guaymas.
- Vosooghnia, A., Poletini, A., Rossi, A., Vázquez-Rowe, I., & Francini, G. (2021). Carbon footprint of anaerobic digestion combined with ultrasonic post-treatment of agro-industrial organic residues. *Journal of Environmental Management*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111459>
- Wang, D., Liu, X., Zeng, G., Zhao, J., Liu, Y., Wang, Q., Chen, F., Li, X., & Yang, Q. (2018). Understanding the impact of cationic polyacrylamide on anaerobic digestion of waste activated sludge. *Water Research*, 130. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.007>
- Wiedmann, T. and Minx, J. (2008). A Definition of 'Carbon Footprint'. In: C. C. Pertsova, Ecological Economics Research Trends: Chapter 1, pp. 1-11, Nova Science Publishers, Hauppauge NY, USA. https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=5999
- Wu, Y., & Song, K. (2021). Anaerobic co-digestion of waste activated sludge and fish waste: Methane production performance and mechanism analysis. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123678. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123678>
- Yasmin, N., Jamuda, M., Panda, A. K., Samal, K., & Kumar Nayak, J. (2022). Emission of greenhouse gases (GHGs) during composting and vermicomposting: Measurement, mitigation, and perspectives. *Energy Nexus*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100092>
- Zamri, M. F. M. A., Hasmady, S., Akhilar, A., Ideris, F., Shamsuddin, A. H., Mofijur, M., Fattah, I. M. R., & Mahlia, T. M. I. (2021). A comprehensive review on anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 137). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110637>
- Zhang, C., Su, H., & Tan, T. (2014). Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 383–392.
- Zúñiga, D. G. (2013). *Estimación de la huella de carbono del proceso de compostaje y lombricultura de la dirección de gestión ambiental de la ilustre municipalidad de La Pintana*. Universidad de Chile

A. ANEXO: Encuesta aplicada en distintas entidades en abril del año 2022

TÍTULO PROYECTO: MITIGACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA, MEDIANTE DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS ORGÁNICOS, EN EL MUNICIPIO DE TUMACO, NARIÑO.

NOMBRE: VALENTINA OSORIO GÓMEZ – ESTUDIANTE DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL (SEDE PALMIRA)

FORMULACIÓN DE PREGUNTAS PARA EL CUESTIONARIO

Datos del encuestado:

Nombre y apellido:

Entidad:

Cargo:

1. Cuál es la cantidad de combustible fósil (diésel o gasolina) usado para la generación de energía eléctrica a través de planta auxiliar?

R/ Puede ser 1 o varias unidades en términos de: m³/año, gal/año, l/año m³/mes, gal/mes, l/mes, m³/familia, gal/familia, l/familia, número de plantas en el municipio aproximado, número de población que cuenta con este tipo de plantas en el municipio aproximado, número de familias que usan plantas en el municipio aproximado, número de hogares-viviendas-familias conectados al Sistema Interconectado nacional (SIN).

2. Cuál es la cantidad de combustible fósil (GLP) usado para la generación de energía térmica a través de su uso intradomiciliario?

R/ Puede ser 1 o varias unidades en términos de: m³, gal, l, m³/año, gal/año, l/año m³/mes, gal/mes, l/mes, m³/familia, gal/familia, l/familia, numero de pipas de GLP consumidas en el municipio aproximado, número de familias que usan GLP en el municipio aproximado.

3. ¿Cuál es la cantidad de RS orgánicos dispuestos en relleno o botadero incontrolado?

R/ Puede ser 1 o varias unidades en términos de: ton, m³ , Kg, m³/mes, ton/mes, Kg/mes, ton/año, m³/año, Kg/año, ton/familia, m³/familia, Kg/familia.

B. ANEXO: Revisión bibliográfica – Datos de interés

Datos de interés obtenidos en la revisión bibliográfica para el SISTEMA 1:

Autor	País	Tecnología	Descripción de Parámetros	Usos	Resultados de los parámetros
Hoornweg & Bhada, 2012	Colombia	Digestión anaerobia.	Composición porcentual de los residuos orgánicos en Colombia.	Aprovechamiento RS para generación de energía, abono u otro.	65%
UPME et al., 2010	Colombia	RS orgánicos llevados a DF en relleno sanitario	Porcentaje de residuos orgánicos llevados a disposición final en relleno sanitario en Colombia.	Aprovechamiento RS para generación de energía, abono u otro.	89,4%
DNP, 2016	Colombia	Inventario nacional de GEI	Aporte de los residuos sólidos en las emisiones atmosféricas nacionales en Colombia.	Aprovechamiento RS para generación de energía, abono u otro.	8,1%
Ghaly et al., 2013 Toppe et al., 2018	Canadá	Extracción química de las proteínas de los RP.	Porcentaje del peso total del pescado que se considera desecho (cabezas, vísceras, piel y aletas).	Ingrediente funcional en alimentos.	30-75%

Alarcón, 2017	Colombia	Censo del DANE	Porcentaje de viviendas en Tumaco, Nariño que cuentan con conexión de gas natural.	Energía térmica.	0,0%
	Número de habitantes que no cuentan con cobertura de energía eléctrica del Sistema Interconectado Nacional (SIN).	Energía eléctrica.	22.033 Habitantes	Número de habitantes que no cuentan con cobertura de energía eléctrica del Sistema Interconectado Nacional (SIN).	Energía eléctrica.
	Número de viviendas en Tumaco que no cuentan con servicio de energía eléctrica.	Energía eléctrica.	4.905 Viviendas	Número de viviendas en Tumaco que no cuentan con servicio de energía eléctrica.	Energía eléctrica.
IDEAM, 2012	Colombia	Inventario nacional de GEI	Porcentaje de emisiones a nivel nacional derivadas del consumo de energía por quema de combustibles fósiles.	Abastecimiento energético.	23,1%
CEPAL, 2021	Colombia	Hidroeléctricas	Porcentaje de hidroeléctricas para capacidad instalada respecto al abastecimiento de energía eléctrica en Colombia.	Consumo de energía eléctrica.	70%
	Colombia	Energías alternativas	Porcentaje de fuentes no	Abastecimiento de energía.	2%

			convencionales de energía en Colombia.		
UPME et al., 2010	Colombia	Relleno sanitario	Porcentaje de residuos orgánicos que se desecha del total de residuos sólidos municipales producidos en Colombia.	Disposición final.	65%
De la Hoz et al., 2017	Colombia	N/A	Porcentaje de producción de pescado en Tumaco, Nariño, respecto a la producción pesquera del país.	Consumo alimenticio.	9%
Johari et al., 2012	México	Software Modelo Mexicano de Biogás	Contenido de humedad de los residuos sólidos orgánicos.	Energía eléctrica producida.	55-65%
Slorach et al., 2019 Lino & Zúñiga, 2013	Reino Unido	Análisis de ciclo de vida	Contribución en emisiones de GEI de los residuos orgánicos a nivel global.	Aprovechamiento RS para generación de energía, abono u otro.	6-11%
Zúñiga, 2013	Chile	Factores de emisión.	Aporte porcentual del metano en las emisiones totales de GEI a nivel global, provenientes de los rellenos sanitarios.	Compostaje.	30%

Arboleda et al., 2022	Colombia	Encuesta	Porcentaje de viviendas sin servicio de energía en el Departamento de Nariño.	Energía eléctrica.	1,9%
			Cobertura eléctrica en el Departamento de Nariño (ámbito urbano)	Energía eléctrica.	100%
			Cobertura eléctrica en el Departamento de Nariño (ámbito rural)	Energía eléctrica.	93%
			Cobertura del suministro de gas natural departamento de Nariño ámbito rural	Energía térmica.	0,1 – 0,4%
			Hogares en Nariño que utilizan gas propano GLP (cilindro o pipeta) para cocinar	Energía térmica.	30,1 – 50%
			Gas en pipeta GLP utilizado para la cocción de alimentos en ámbito urbano	Energía térmica.	80 – 90%
Alcaldía Municipal de Tumaco, 2018	Colombia	Encuesta	Cantidad de habitantes en Tumaco, Nariño.	Diversos usos.	208.000.000 Habitantes
Cadavid et al. (2019)	Colombia	Digestión anaerobia	Cantidad de hogares de pescadores artesanales en Tumaco, Nariño.	Generación de energía.	200 Hogares
			Cantidad de RP artesanal en Tumaco.	Generación de RP.	509 ton/año

Galeano, 2022	Colombia	Economía circular	Software economía circular	Producción de pescado artesanal	3000 ton/año
BID, 2020.	Colombia	Encuesta	Viviendas en el Litoral Pacífico Colombiano que no cuentan con servicio de energía eléctrica.	Diversos usos.	55.000 Viviendas
AUNAP, 2013	Colombia	Encuesta	Número de pescadores artesanales en la región pacífica.	Diversos usos.	13.000 Pescadores
Rodríguez et al., 2011	Colombia	Encuesta	Número de asociaciones pesqueras en Tumaco.	Manejo de residuos pecuarios para sistemas eficientes de energía limpia.	34 Asociaciones
			Número de pescadores artesanales pertenecientes a las asociaciones en Tumaco.	Manejo de residuos pecuarios para sistemas eficientes de energía limpia.	3.500 Pescadores artesanales.
Muñoz, 2019	Colombia	Encuesta	Número de negocios en la plaza de mercado de Tumaco de venta de frutas y verduras.	Estrategia de diseño bioclimático.	29 Negocios.
Duan et al., 2021	Dinamarca	Mediciones <i>in situ</i> de GEI en vertederos utilizando cámaras de flujo de superficie, en particular cámaras estáticas.	Generación de RSU en todo el mundo.	Cuantificación de GEI proveniente de los vertederos de RSU.	2.010.000 Ton

Medina, 2018	Colombia	Entrevista	Producción de pescado en Colombia correspondiente a pesca artesanal.	Diversos usos.	112.500 Ton
AUNAP, 2013	Colombia	Encuesta	Productividad media aparente por pescador artesanal en la región pacífica.	Diversos usos	0,4 Ton
DNP, 2016	Colombia	Encuesta	Cantidad de residuos de frutas y verduras producidos en Colombia.	Aprovechamiento energético.	6.100.000 Ton/año
De la Hoz et al., 2017	Colombia	Encuesta	Producción de pescado en Tumaco, Nariño.	Diversos usos	1000 Ton/año
Devadoss et al., 2021	Malasia	Modelo FOD del IPCC 2006 y directrices del IPCC en el Volumen 5.	Cantidad de GEI provenientes de los residuos sólidos eliminados en rellenos sanitarios a nivel mundial.	Estudio de emisiones GEI en vertederos de RS.	760.600.000 TonCO _{2eq}
Slorach et al., 2019	Reino Unido.	Cálculo de huella de carbono utilizado ACV metodología ISO 14040/14044. Digestión anaerobia para reducir la huella de carbono del tratamiento de RS orgánicos.	Huella de carbono de disposición en Relleno Sanitario de los residuos sólidos orgánicos.	Cálculo de emisiones provenientes de rellenos sanitarios y su disminución.	193 Kg TonCO _{2eq} /Ton RS
UPME, 2015	Colombia	Calculadora HC de la UPME	Poder calorífico inferior (PCI) del GLP.	Cálculo de emisiones GEI	99,22 MJ/m ³

			Poder calorífico inferior (PCI) del Biogás.	22 MJ/m ³
			Poder calorífico inferior (PCI) del DIESEL.	42.149,66 kJ/Kg

Nota. La tabla muestra los datos que sirven de apoyo para el proyecto, y los cuales fueron extraídos de diversas fuentes por medio de una revisión bibliográfica. ¹Descripción unidades: % = Porcentaje; N° = Número; Ton = Tonelada; Ton/año = Tonelada / año; TonCO_{2eq} = Tonelada de dióxido de carbono equivalente; Kg CO_{2eq}/Ton RS = Kilogramo de dióxido de carbono equivalente / tonelada de residuos sólidos; MJ/m³ = Megajulio / metro cubico; kJ/Kg = Kilojulio / metro cubico

Datos de interés obtenidos en la revisión bibliográfica para el SISTEMA 2:

Autor	País	Tecnología	Descripción de Parámetros	Usos	Resultados de los parámetros
Varnero et al., 2012	Chile	Purificación de biogás por el método de adsorción.	Composición porcentual del CH ₄ en el biogás.	Biogás en la generación de electricidad.	50-75%
			Composición porcentual del CO ₂ en el biogás.		25-50%
Slorach et al., 2019	Reino Unido.	Cálculo de huella de carbono utilizado ACV metodología ISO 14040/14044.	Reducción de emisiones de GEI al utilizar digestión anaerobia en el tratamiento de residuos orgánicos.	Cálculo de emisiones provenientes de rellenos sanitarios y su disminución.	40 KgCO _{2eq} /Ton RS

		Digestión anaerobia para reducir la huella de carbono.	Huella de carbono de la digestión anaerobia residuos sólidos orgánicos.		-40 KgCO _{2eq} /Ton RS
Aristizabal et al., 2015	Colombia	Digestión anaerobia de RS orgánicos de poda. Cálculo de las emisiones por factores de emisión. Potencial bioquímico de metano.	Reducción de emisiones de GEI al utilizar codigestión anaerobia en el tratamiento de residuos orgánicos.	Generación de electricidad.	138,4 Kg CH ₄ / día mitigados por biodigestión
Ministerio de Minas y Energía, 2011	Colombia	Estudio técnico.	Potencial energético de los residuos orgánicos en Colombia.	Generación de electricidad.	91,72 TJ/año
Cadavid et al. (2019)	Colombia	Digestión anaerobia.	Generación de energía en Tumaco, Nariño al utilizar desechos de pesca artesanal.	Generación de electricidad.	489 MWh/ año
			BPM de desechos de pescado con una		464,5 ml CH ₄ /gSV

			concentración del 1% de ST.		
IPCC, 2006	Estados unidos	Factores de emisión.	Factor de emisión de CH ₄ de la Digestión Anaerobia (En peso seco).	Cálculo de huella de carbono.	0-20 g CH ₄ / Kg
			Factor de emisión de CH ₄ de la Digestión Anaerobia (peso húmedo).		0-8 g CH ₄ / Kg

Nota. La tabla muestra los datos que sirven de apoyo para el proyecto, y los cuales fueron extraídos de diversas fuentes por medio de una revisión bibliográfica. ¹Descripción unidades: % = Porcentaje; Kg CO_{2eq}/Ton RS = Kilogramo de dióxido de carbono equivalente / tonelada de residuos sólidos; Kg CH₄/día = Kilogramo de metano / día; ml CH₄/gSV = Mililitro de metano / gramo de solido volátil; TJ/año = Terajulio / año; MWh/año = Megavatio hora / año; ml CH₄/gSV = Mililitro de metano por gramo de solido volátil; mg/L = Miligramo / Litro; g CH₄/ Kg = Gramo de metano / kilogramo.

Datos de interés obtenidos en la revisión bibliográfica al realizar codigestión de residuos orgánicos:

Autor	País	Tecnología	Descripción de Parámetros	Usos	Resultados de los parámetros
Morales, 2019	España	Codigestión anaerobia de RS orgánicos de frutas, verduras y carne.	Aumento en el potencial bioquímico de metano.	Generación de energía.	12,2% - 36,5% aumento de biogás generado.

Bücker et al., 2020	Brasil	Codigestión anaerobia de RS orgánicos de pescado y estiércol.	Aumento en el potencial bioquímico de metano.	Generación de energía.	5% aumento de biogás generado.
Wu y Song, 2021	China	Codigestión anaeróbica de lodos activados y desechos de pescado.	Aumento en la producción acumulada de metano al realizar codigestión anaerobia de residuos orgánicos.	Generación de electricidad.	212,3 – 638,8 ml CH ₄ /gSV aumento de producción acumulada de metano.
García et al., 2015	México	Digestión anaerobia de codigestión de RS orgánicos: aserrín, orina de conejo y víceras.	Aumento en el contenido de metano al establecer mezclas eficientes en la codigestión de los residuos.	Generación de energía.	60-70 %

Nota. La tabla muestra los datos que sirven de apoyo para el proyecto, y los cuales fueron extraídos de diversas fuentes por medio de una revisión bibliográfica. ¹Descripción unidades:
 % = Porcentaje; ml CH₄/gSV = Mililitro de metano / gramo de solido volátil

C. ANEXO: Entrevistas a distintos actores

Entrevista 1: 19 de abril de 2022

María Elva Landázuri

Alcaldía de Tumaco

Directora oficina de Hidrocarburos

Al llevar a cabo esta entrevista, se identifica que actualmente casi la totalidad de toda la zona urbana de Tumaco cuenta con la energía del Sistema Interconectado Nacional (SIN), por lo cual, en la zona urbana son pocas las plantas de energía a base diésel (ACPM) existentes. Sin embargo, la funcionaria indica que: “Si se trata de consumo de combustible, dichas plantas pueden consumir de 2 - 3 gal/día para una familia en la zona urbana y por su parte en la zona rural entre 5 a 6 galones/días” (María, L., comunicación personal, 19 de abril de 2022).

En cuanto al cupo que se tiene para el municipio en galones de gasolina al mes es de 1.101.949 gal/mes y aproximadamente se estima que el 75% es gasolina y el 25% es ACPM. El cupo anterior es bajo Subsidios de Combustibles en Zonas de Frontera y Zonas no Interconectadas, ya que Tumaco se encuentra en zona fronteriza. Sin embargo, este cupo no es suficiente y se tiene una compra adicional de 250.000 a 300.000 galones/mes a precio nacional. Finalmente, los principales prestadores de servicio son PETRODECOL, BIOGÁS, TEXACO; TERPEL y PRIMAX.

Entrevista 2: 19 de abril de 2022

Nilo Humberto Narváez

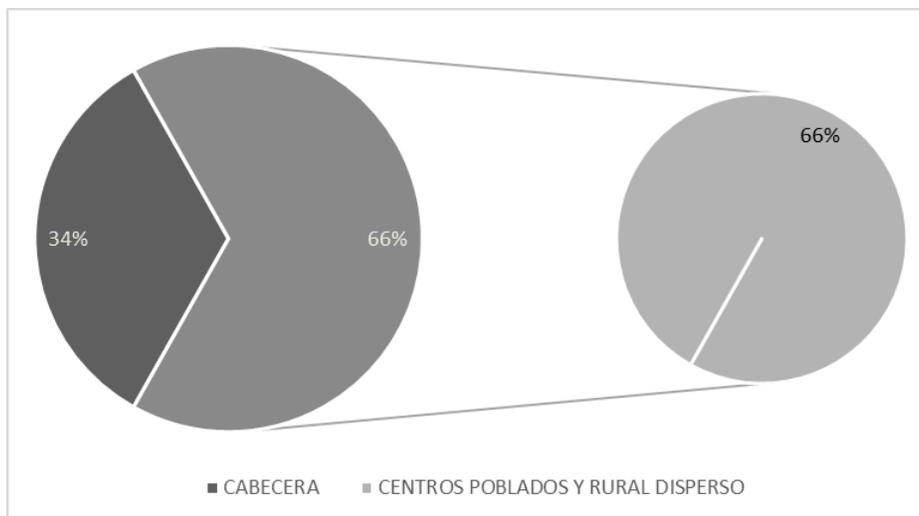
Secretaría de Planeación

En el plan de desarrollo municipal “ENAMÓRATE DE TUMACO 2020-2023”, se encuentran los resultados del último censo llevado a cabo en el año 2020 por el DANE (Nilo. H, N., comunicación personal, 19 de abril de 2022) (Tabla 5-8) (Figura 5-4).

Población censada en Tumaco para el año 2020:

AÑO 2020						
IDENTIFICACIÓN	POBLACIÓN AJUSTADA POR COBERTURA			OMISIÓN CENSAL		
NOMBRE MUNICIPIO	TOTAL	CABECERA	CENTROS POBLADOS Y RURAL DISPERSO	TOTAL	CABECERA	CENTROS POBLADOS Y RURAL DISPERSO
San Andrés de Tumaco	257.052	86.614	170.438	45,6%	11,9%	62,9%

Nota: Esta tabla ha sido adaptada de: "Plan de desarrollo ENAMÓRATE DE TUMACO 2020-2023".



Entrevista 3: 20 de abril de 2022

Jonathan Jiménez

Aguas de Tumaco E.S.P

Inspector técnico área de acueducto

El manejo de residuos en Tumaco se lleva a cabo en el relleno sanitario Buchelli, licenciado en el año 2013. Dicho sitio de disposición final cuenta con celdas transitorias, pero no hay tratamiento ni aprovechamiento de residuos. Así mismo, se realizan estudios de caracterización a los lixiviados, gases y residuos. Además, el funcionario indica que: "No existe una separación en la fuente en el municipio lo que complica el manejo de los residuos, y sólo existen dos fundaciones en Tumaco las cuales hacen rutas selectivas en pequeña escala Funsocial y Promac" (Jonathan, J., comunicación personal, 20 de abril de 2022).

Con respecto a los datos de generación de residuos, según la gobernación de Nariño en el 2019 se generan 110 toneladas al día en la zona urbana, pero la empresa de servicios públicos Aguas de Tumaco se tiene un valor cuantificado de 103 toneladas al día. Así mismo, la producción per cápita de RS por habitante Tumaco es de 0,63 Kg Hab /día, el promedio de personas por familia es de 4.5

y la generación de residuos en zonas palafíticas es de 200 – 400 Kg/día (Jonathan, J., comunicación personal, 20 de abril de 2022).

Entrevista 4: 21 de abril de 2022

David Montaña

Centrales Eléctricas de Nariño S.A. E.S.P (CEDENAR)

Gerente zona pacífico

El funcionario refiere que, para los indicadores de pérdida respecto al consumo de energía, se cuentan con datos estimados por la Sede principal de la región Pacífica, los cuales evidencian la demanda y el consumo de energía, así como los usuarios activos en el servicio a la fecha de la entrevista (Tabla 5-12) (David, M., comunicación personal, 21 de abril de 2022).

Datos de indicadores de pérdida del municipio de Tumaco:

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
Demanda energía	KWh/mes	10.410.023
Consumo energía	KWh/mes	8.403.017
Usuarios	NºViviendas	51.814
Población	NºPersonas	233.163

Nota: Esta tabla ha sido adaptada de: "David, M., comunicación personal, 21 de abril de 2022".

Entrevista 5: 22 de abril de 2022

Oscar Yépes

Universidad Nacional de Colombia Sede Tumaco

Ingeniero Químico, encargado planta piloto de biogás

Actualmente, la Universidad Nacional de Colombia (Sede Tumaco), cuenta con una planta piloto de biogás, en la cual se tratan 16 L/día de RP (agallas y vísceras).

La alimentación de la planta se realiza de la siguiente manera: los RP tienen 22% de SV con 88% de ST, con esto se calcula la carga orgánica es decir cuántos SV se van a ingresar diariamente por cada litro del reactor, el reactor tiene 400 litros, por lo cual se están manejando inicialmente una carga de 0.5 gSV/L día (800 g/día de RP molido en 16 litros de agua), después de 1 gSV/L día (1600 g/día de RP en 16 litros de agua) y lo a que se quiere llegar es a una carga de 2 gSV/L día (3200 g/día de RP en 16 litros de agua).

En el arranque o inicio del biorreactor, este se llenó con 80 litros de inóculo provenientes del beneficio del ganado, después de los cálculos se obtuvo que en 25 días se llena todo el biorreactor,

de allí que todos los días se debe alimentar el biorreactor con 16 litros y dependiendo la carga (0.5, 1 o 2), se alimentan dos veces al día: 8 litros en la mañana y 8 litros en la tarde, por ello todos los días descongela una bolsa de RP (800 gramos) y en 16 litros se mezcla el contenido de la bolsa.

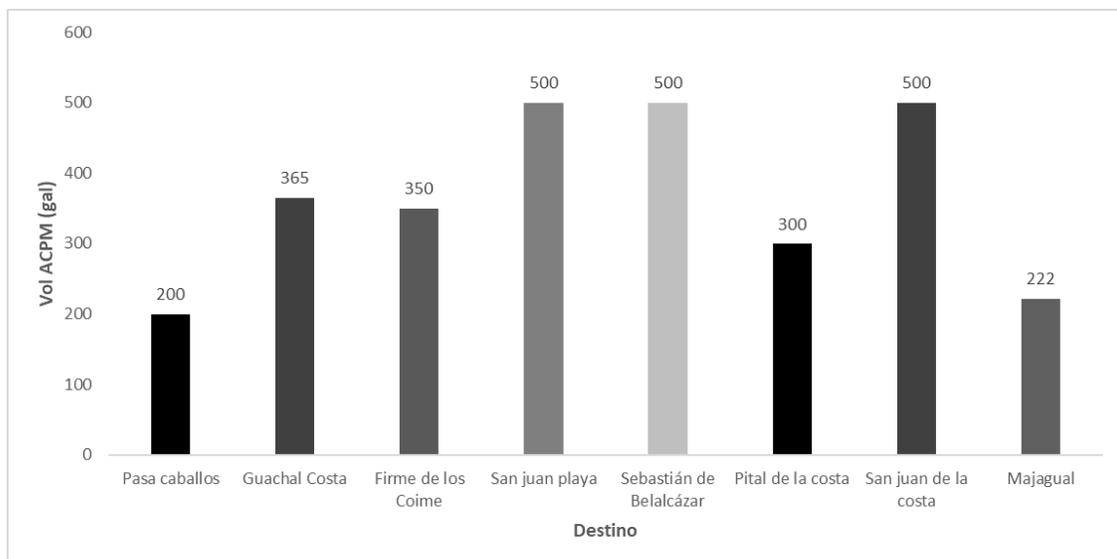
El reactor es de fibra de vidrio totalmente hermético para garantizar proceso anaerobio, consta con agitador con doble hélice y motor de 0.7 caballos. Así mismo, funciona durante 45 minutos y posteriormente se pausa por 20 minutos. Cuenta con varias válvulas para la toma de muestras donde se controlan las variables de pH (6.8 a 7.6), en la actualidad se está trabajando con un pH de 7.3. Afortunadamente los RP tienen una capacidad buffer muy buena que hace que no se desestabilice tanto el pH con otros residuos como el estiércol de cerdo, el cuál provee nitrógeno haciendo subir el pH, y otros como frutas y verduras, los cuales contienen más carbono haciendo que baje pH, así mismo también se monitorea la relación AGV's y alcalinidad, y finalmente se monitorea la temperatura (27 °C mesófilo).

Una vez producido el biogás dependiendo de la carga, diariamente se hace la contabilización por medio de contadores de gas, en total acumulado desde que se inició el experimento se han producido 20 m³.

D. ANEXO: Consumo de DIESEL detallado

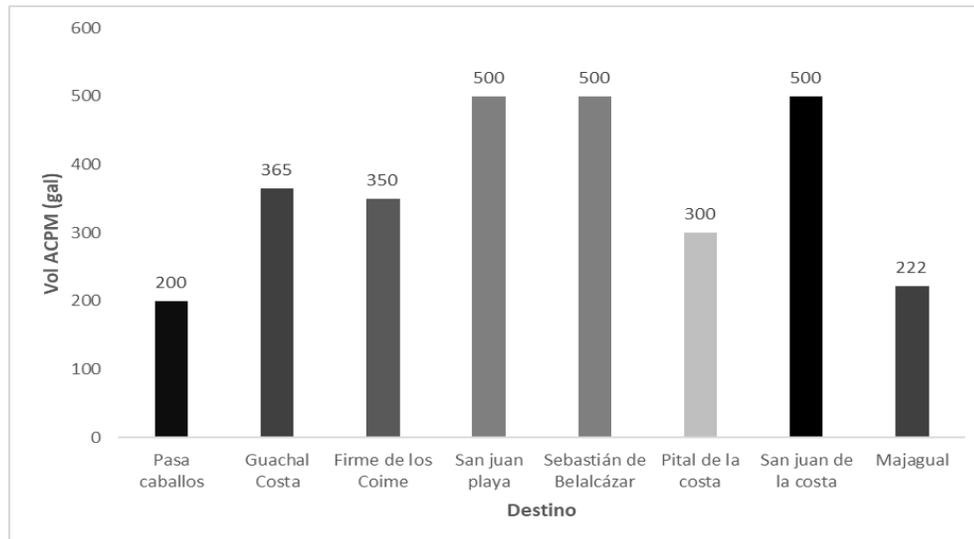
Consumo de ACPM en la Zona electro San Juan (Marzo-Mayo 2022):

DESTINO	VOLUMEN (gal)	TIPO DE COMBUSTIBLE	MEDIO DE TRANSPORTE	MOTIVO DE USO
Pasa caballos	200	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Guachal Costa	365	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Firme de los Coime	350	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
San juan playa	500	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Sebastián de Belalcázar	500	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Pital de la costa	300	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
San juan de la costa	500	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Majagual	222	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
TOTAL	2.937			



Consumo de ACPM en la Zona electro San Juan (Junio-Agosto 2022):

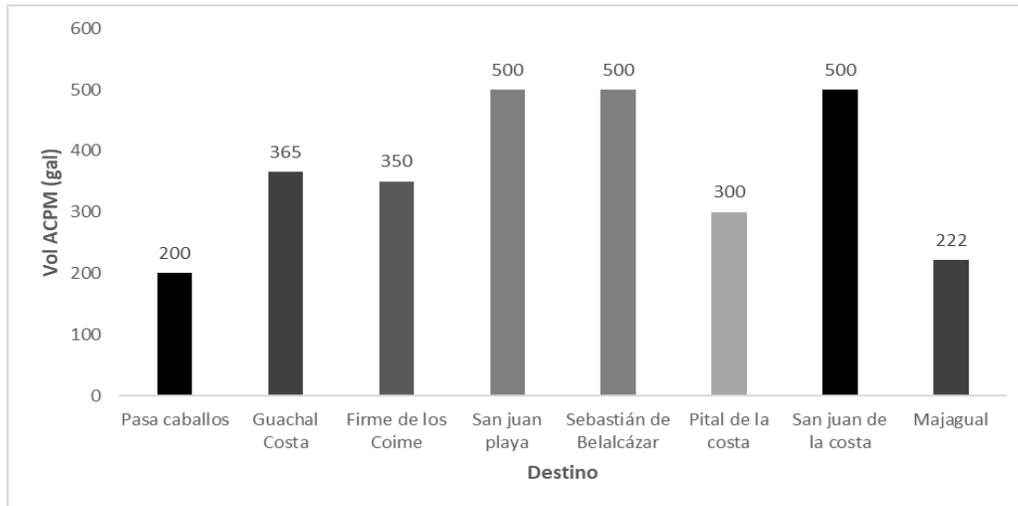
DESTINO	VOLUMEN (gal)	TIPO DE COMBUSTIBLE	MEDIO DE TRANSPORTE	MOTIVO DE USO
Pasa caballos	200	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Guachal Costa	365	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Firme de los Coime	350	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
San Juan Playa	500	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Sebastián de Belalcazar	500	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Pital de la Costa	300	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
San Juan de la costa	500	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Majagual	222	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
TOTAL	2.937			



Consumo de ACPM en la Zona electro San Juan (Septiembre-Noviembre 2022):

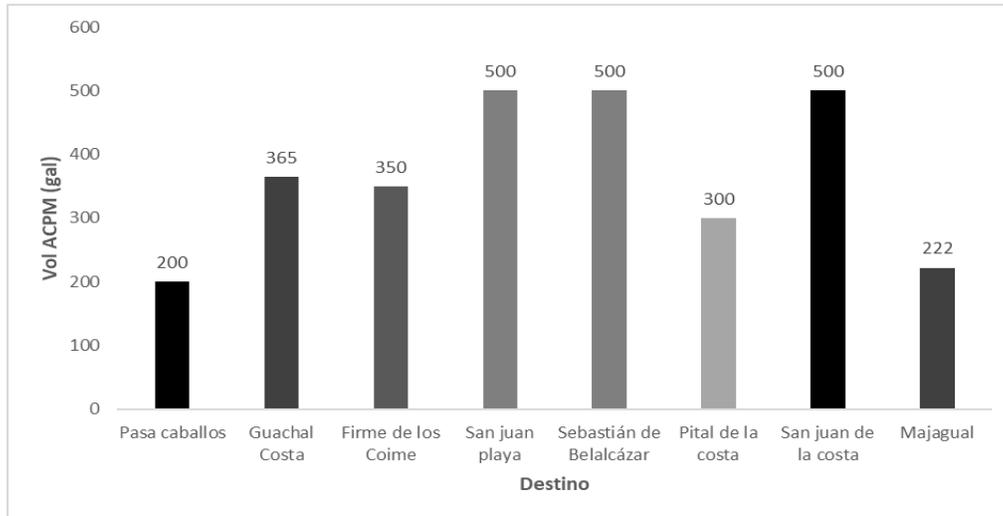
DESTINO	VOLUMEN (gal)	TIPO DE COMBUSTIBLE	MEDIO DE TRANSPORTE	MOTIVO DE USO
Pasa caballos	200	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Guachal Costa	365	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Firme de los Coime	350	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
San Juan Playa	500	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Sebastián de Belalcazar	500	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel

Pital de la Costa	300	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
San Juan de la costa	500	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Majagual	222	ACPM	Marítimo fluvial	
TOTAL	2.937			



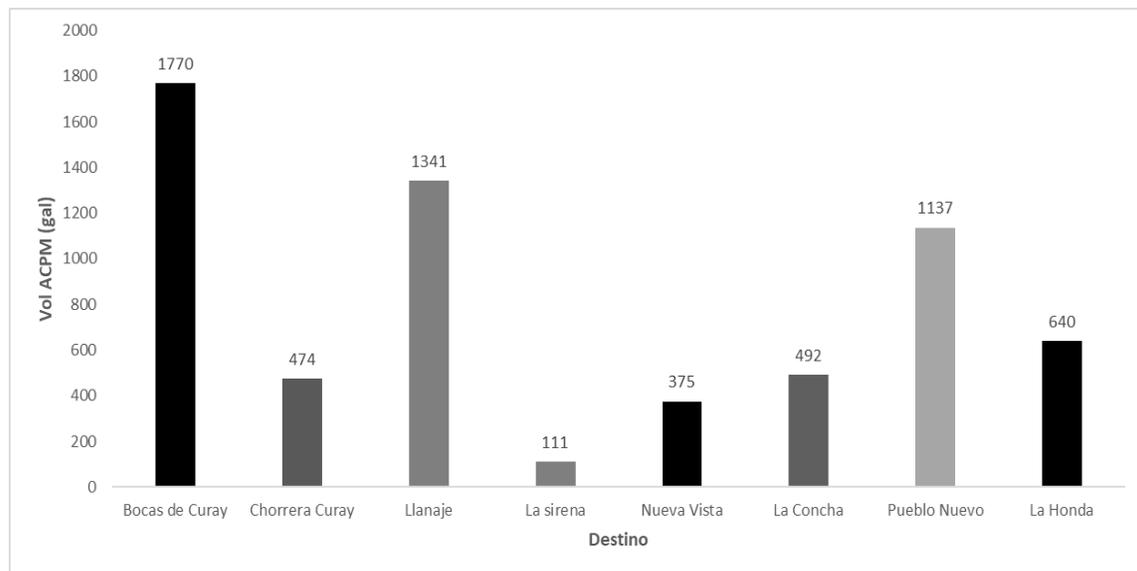
Consumo de ACPM en la Zona electro San Juan (Enero-Marzo 2023):

DESTINO	VOLUMEN (Gal)	TIPO DE COMBUSTIBLE	MEDIO DE TRANSPORTE	MOTIVO DE USO
Pasa caballos	200	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Guachal Costa	365	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Firme de los Coime	350	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
San Juan Playa	500	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Sebastián de Belalcazar	500	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Pital de la Costa	300	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
San Juan de la costa	500	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Majagual	222	ACPM	Marítimo fluvial	
TOTAL	2.937			



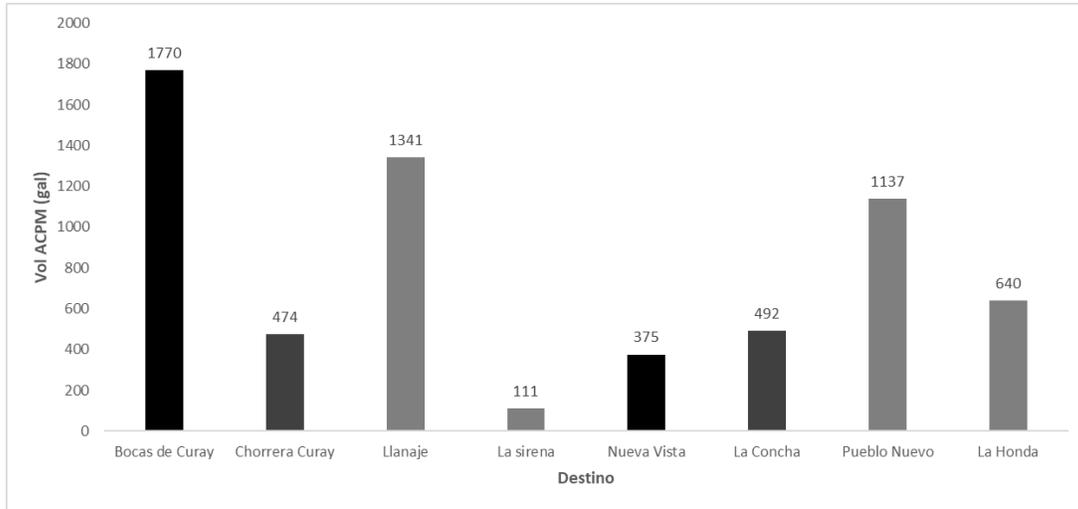
Consumo de ACPM en la Zona Bocas de Curay (Marzo-Mayo 2022):

DESTINO	VOLUMEN (gal)	TIPO DE COMBUSTIBLE	MEDIO DE TRANSPORTE	MOTIVO DE USO
Bocas de Curay	1.770	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Chorrera Curay	474	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Llanaje	1.341	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
La sirena	111	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Nueva Vista	375	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
La Concha	492	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Pueblo Nuevo	1.137	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
La Honda	640	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
TOTAL	6.340			



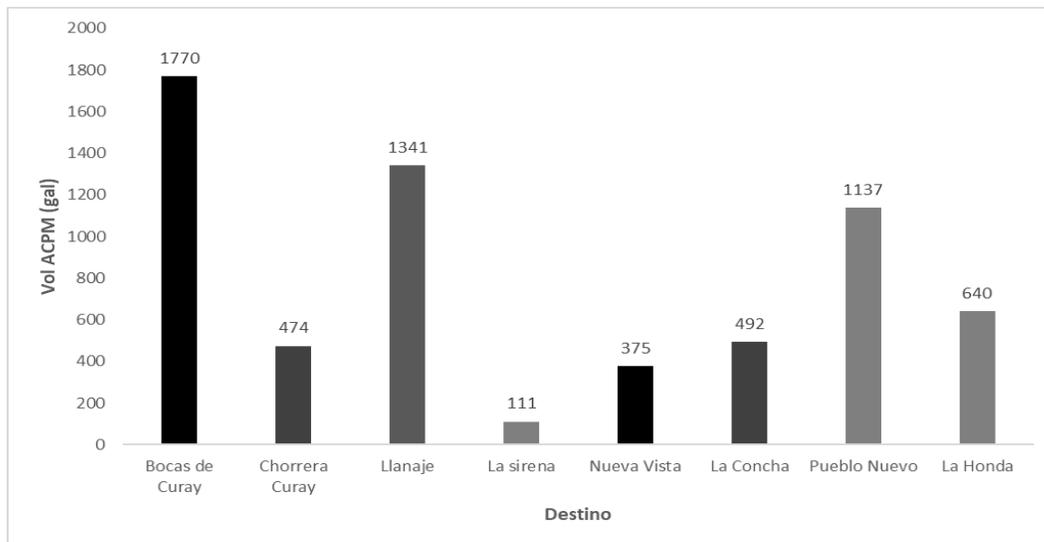
Consumo de ACPM en la Zona Bocas de Curay (Junio-Agosto 2022):

DESTINO	VOLUMEN (Gal)	TIPO DE COMBUSTIBLE	MEDIO DE TRANSPORTE	MOTIVO DE USO
Bocas de Curay	1.770	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Chorrera Curay	474	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Llanaje	1.341	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
La Sirena	111	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Nueva vista	375	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
La Concha	492	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Pueblo nuevo	1.137	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
La honda	640	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
TOTAL	6.340			



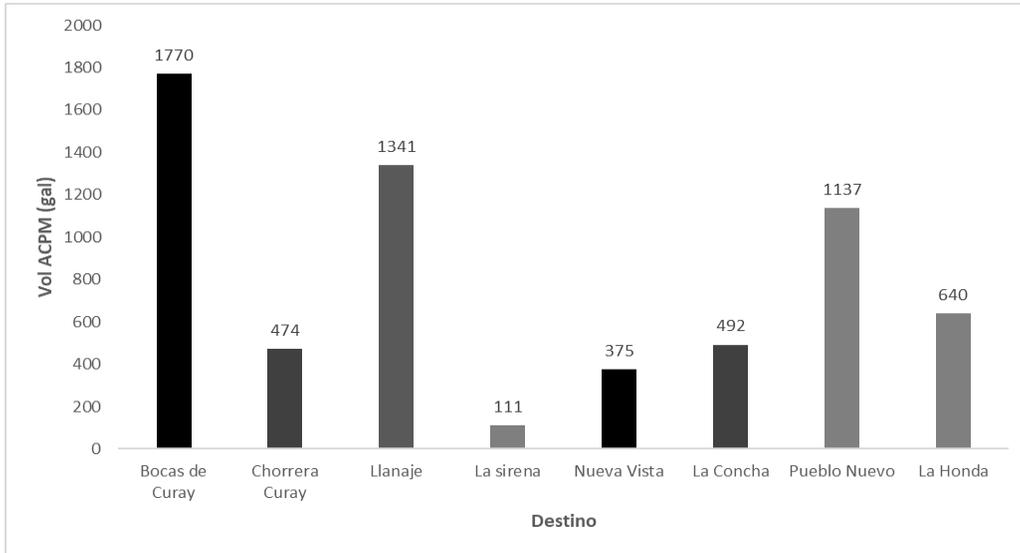
Consumo de ACPM en la Zona Bocas de Curay (Septiembre-Noviembre 2022):

DESTINO	VOLUMEN (gal)	TIPO DE COMBUSTIBLE	MEDIO DE TRANSPORTE	MOTIVO DE USO
Bocas de Curay	1.770	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Chorrera Curay	474	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Llanaje	1.341	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
La Sirena	111	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Nueva vista	375	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
La Concha	492	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Pueblo nuevo	1.137	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
La Honda	640	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
TOTAL	6.340			



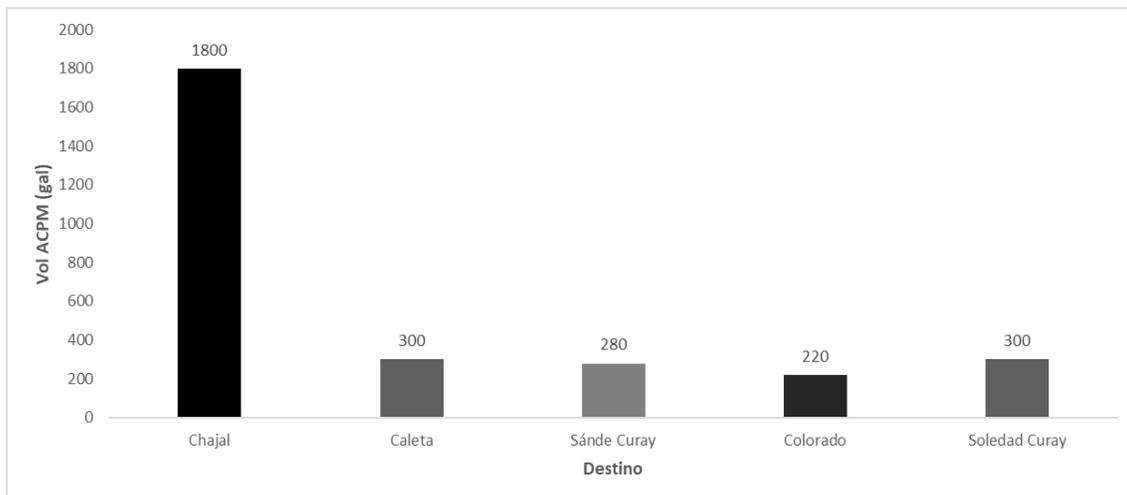
Consumo de ACPM en la Zona Bocas de Curay (Enero-Marzo 2023):

DESTINO	VOLUMEN (Gal)	TIPO DE COMBUSTIBLE	MEDIO DE TRANSPORTE	MOTIVO DE USO
Bocas de Curay	1.770	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Chorrera Curay	474	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Llanaje	1.341	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
La Sirena	111	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Nueva vista	375	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
La Concha	492	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Pueblo nuevo	1.137	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
La Honda	640	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
TOTAL	6.340			



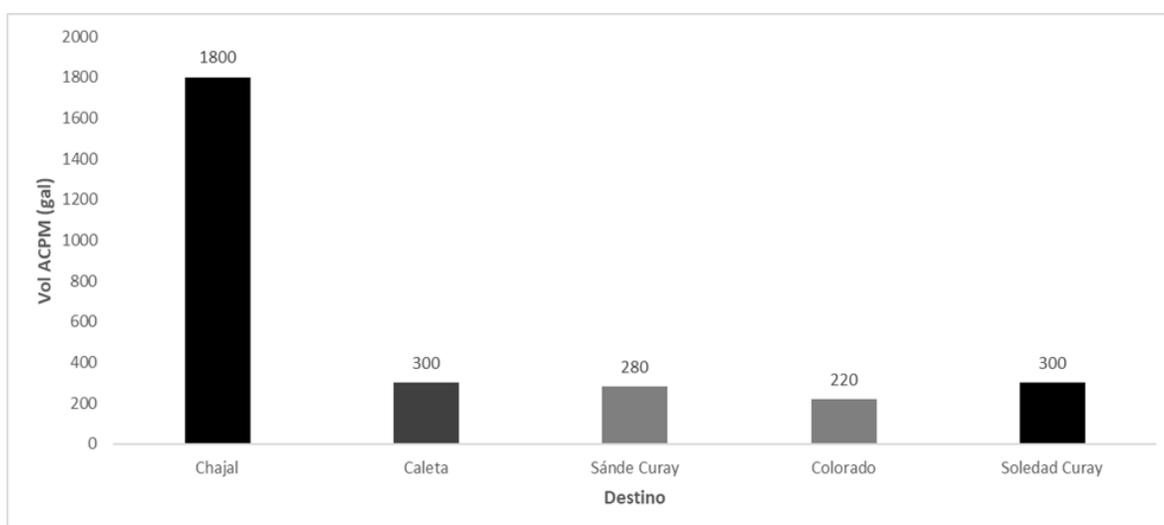
Consumo de ACPM en la Zona Enerchajal (Marzo-Mayo 2022):

DESTINO	VOLUMEN (Gal)	TIPO DE COMBUSTIBLE	MEDIO DE TRANSPORTE	MOTIVO DE USO
Chajal	1.800	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Caleta	300	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Sánde Curay	280	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Colorado	220	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Soledad Curay	300	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
TOTAL	2.900			



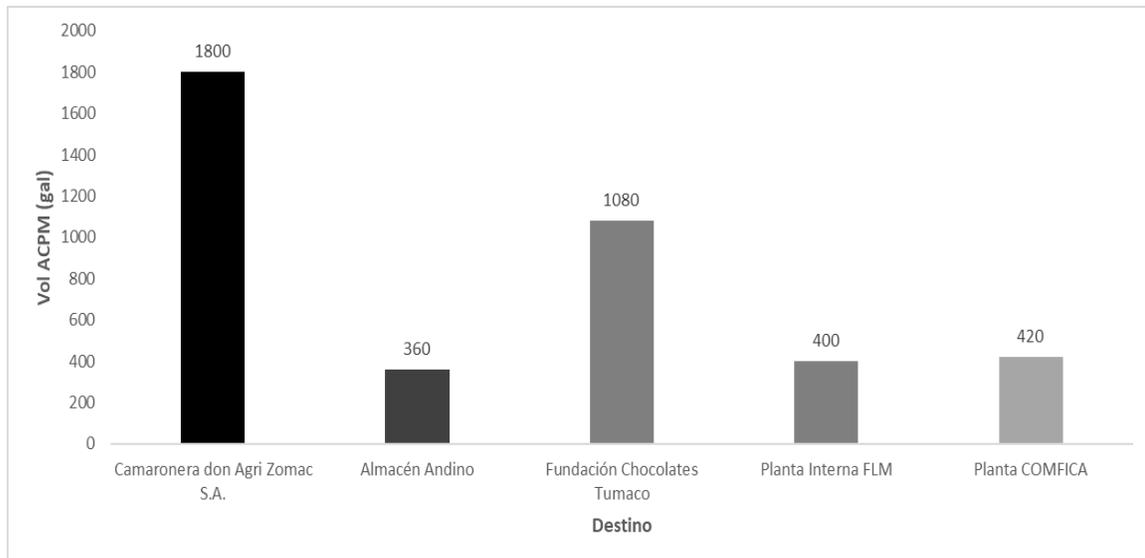
Consumo de ACPM en la Zona Enerchajal (Junio-Agosto 2022):

DESTINO	VOLUMEN (Gal)	TIPO DE COMBUSTIBLE	MEDIO DE TRANSPORTE	MOTIVO DE USO
Chajal	1.800	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Caleta	300	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Sánde Curay	280	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Colorado	220	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Soledad Curay	300	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
TOTAL	2.900			



Consumo de ACPM en otras plantas privadas (2022-2023):

DESTINO	VOLUMEN (Gal)	TIPO DE COMBUSTIBLE	MEDIO DE TRANSPORTE	MOTIVO DE USO
Chajal	1.800	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Caleta	300	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Sánde Curay	280	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Colorado	220	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
Soledad Curay	300	ACPM	Marítimo fluvial	Accionar planta diésel
TOTAL	2.900			



E. Anexo: Método FOD del IPCC (2006) – Carbono orgánico degradable

Emisiones provenientes de la generación de RP + RFV, método FOD del IPCC (2006).

Carbono orgánico degradable depositado (DDOC) (Años)	CH ₄ generado (Gg)	R (CH ₄ recuperado)	Factor de oxidación (1-OX)	Emisiones CH ₄ (Gg)
Año 1	0,074923372	0,45	0,9	0,074923372
Año 2	0,062269135	0,45	0,9	0,062269135
Año 3	0,051752145	0,45	0,9	0,051752145
Año 4	0,043011429	0,45	0,9	0,043011429
Año 5	0,035746983	0,45	0,9	0,035746983
Año 6	0,029709471	0,45	0,9	0,029709471
Año 7	0,024691669	0,45	0,9	0,024691669
Año 8	0,020521352	0,45	0,9	0,020521352
Año 9	0,017055383	0,45	0,9	0,017055383
Año 10	0,014174802	0,45	0,9	0,014174802
Año 11	0,011780739	0,45	0,9	0,011780739
Año 12	0,009791022	0,45	0,9	0,009791022
Año 13	0,008137361	0,45	0,9	0,008137361
Año 14	0,006762995	0,45	0,9	0,006762995

Año 15	0,005620754	0,45	0,9	0,005620754
Año 16	0,004671433	0,45	0,9	0,004671433
Año 17	0,003882448	0,45	0,9	0,003882448
Año 18	0,003226719	0,45	0,9	0,003226719
Año 19	0,00268174	0,45	0,9	0,00268174
Año 20	0,002228806	0,45	0,9	0,002228806
Año 21	0,00185237	0,45	0,9	0,00185237
Año 22	0,001539513	0,45	0,9	0,001539513
Año 23	0,001279496	0,45	0,9	0,001279496
Año 24	0,001063394	0,45	0,9	0,001063394
Año 25	0,000883791	0,45	0,9	0,000883791
Año 26	0,000734523	0,45	0,9	0,000734523
Año 27	0,000610465	0,45	0,9	0,000610465
Año 28	0,00050736	0,45	0,9	0,00050736
Año 29	0,000421669	0,45	0,9	0,000421669
Año 30	0,000350451	0,45	0,9	0,000350451
Año 31	0,000291261	0,45	0,9	0,000291261
Año 32	0,000242069	0,45	0,9	0,000242069
Año 33	0,000201184	0,45	0,9	0,000201184
Año 34	0,000167205	0,45	0,9	0,000167205
Año 35	0,000138965	0,45	0,9	0,000138965
Año 36	0,000115494	0,45	0,9	0,000115494
Año 37	9,59878E-05	0,45	0,9	9,59878E-05
Año 38	7,97759E-05	0,45	0,9	7,97759E-05
Año 39	6,63021E-05	0,45	0,9	6,63021E-05
Año 40	5,51039E-05	0,45	0,9	5,51039E-05

Año 41	4,57971E-05	0,45	0,9	4,57971E-05
Año 42	3,80622E-05	0,45	0,9	3,80622E-05
Año 43	3,16336E-05	0,45	0,9	3,16336E-05
Año 44	2,62909E-05	0,45	0,9	2,62909E-05
Año 45	2,18504E-05	0,45	0,9	2,18504E-05
Año 46	1,816E-05	0,45	0,9	1,816E-05
Año 47	1,50929E-05	0,45	0,9	1,50929E-05
Año 48	1,25437E-05	0,45	0,9	1,25437E-05
Año 49	1,04252E-05	0,45	0,9	1,04252E-05
Año 50	8,66439E-06	0,45	0,9	8,66439E-06
Año 51	7,20101E-06	0,45	0,9	7,20101E-06
Año 52	5,98479E-06	0,45	0,9	5,98479E-06
Año 53	4,97398E-06	0,45	0,9	4,97398E-06
Año 54	4,1339E-06	0,45	0,9	4,1339E-06
Año 55	3,4357E-06	0,45	0,9	3,4357E-06
Año 56	2,85543E-06	0,45	0,9	2,85543E-06
Año 57	2,37316E-06	0,45	0,9	2,37316E-06
Año 58	1,97234E-06	0,45	0,9	1,97234E-06
Año 59	1,63922E-06	0,45	0,9	1,63922E-06
Año 60	1,36236E-06	0,45	0,9	1,36236E-06
Año 61	1,13227E-06	0,45	0,9	1,13227E-06
Año 62	9,41031E-07	0,45	0,9	9,41031E-07
Año 63	7,82095E-07	0,45	0,9	7,82095E-07
Año 64	6,50003E-07	0,45	0,9	6,50003E-07
Año 65	5,4022E-07	0,45	0,9	5,4022E-07
Año 66	4,48979E-07	0,45	0,9	4,48979E-07
Año 67	3,73148E-07	0,45	0,9	3,73148E-07
Año 68	3,10125E-07	0,45	0,9	3,10125E-07

Año 69	2,57746E-07	0,45	0,9	2,57746E-07
Año 70	2,14214E-07	0,45	0,9	2,14214E-07
Año 71	1,78034E-07	0,45	0,9	1,78034E-07
Año 72	1,47965E-07	0,45	0,9	1,47965E-07
Año 73	1,22974E-07	0,45	0,9	1,22974E-07
Año 74	1,02205E-07	0,45	0,9	1,02205E-07
Año 75	8,49427E-08	0,45	0,9	8,49427E-08
Año 76	7,05962E-08	0,45	0,9	7,05962E-08
Año 77	5,86728E-08	0,45	0,9	5,86728E-08
Año 78	4,87632E-08	0,45	0,9	4,87632E-08
Año 79	4,05273E-08	0,45	0,9	4,05273E-08
Año 80	3,36824E-08	0,45	0,9	3,36824E-08
Año 81	2,79936E-08	0,45	0,9	2,79936E-08
Año 82	2,32656E-08	0,45	0,9	2,32656E-08
Año 83	1,93362E-08	0,45	0,9	1,93362E-08
Año 84	1,60704E-08	0,45	0,9	1,60704E-08
Año 85	1,33561E-08	0,45	0,9	1,33561E-08
Año 86	1,11003E-08	0,45	0,9	1,11003E-08
Año 87	9,22555E-09	0,45	0,9	9,22555E-09
Año 88	7,66739E-09	0,45	0,9	7,66739E-09
Año 89	6,3724E-09	0,45	0,9	6,3724E-09
Año 90	5,29613E-09	0,45	0,9	5,29613E-09
Año 91	4,40164E-09	0,45	0,9	4,40164E-09
Año 92	3,65822E-09	0,45	0,9	3,65822E-09
Año 93	3,04036E-09	0,45	0,9	3,04036E-09
Año 94	2,52686E-09	0,45	0,9	2,52686E-09
Año 95	2,10008E-09	0,45	0,9	2,10008E-09
Año 96	1,74539E-09	0,45	0,9	1,74539E-09

Año 97	1,4506E-09	0,45	0,9	1,4506E-09
Año 98	1,2056E-09	0,45	0,9	1,2056E-09
Año 99	1,00198E-09	0,45	0,9	1,00198E-09
Año 100	8,32749E-10	0,45	0,9	8,32749E-10
			TonCH₄/100 años	443,61
			TonCO_{2eq}/100 años	13.219,50

F. Anexo: Análisis estadístico para la prueba del potencial bioquímico de metano

ANOVA – Software R

Producción acumulada de Biogás

	Tratamiento	Biogas
1	RP	573.92
2	RP	533.05
3	RF	701.60
4	RF	693.10
5	RF	714.04
6	RP50:RF50	805.57
7	RP50:RF50	826.50
8	RP50:RF50	854.76
9	RP15:RF85	712.76
10	RP15:RF85	741.42

Showing 1 to 11 of 11 entries. 2 total columns

```
> library(readxl)
> ANOVA <- read_excel("Valen ANOVA R/ANOVA 18-10-23/Biogas/ANOVA.xlsx")
> View(ANOVA)
> modelo <- aov (Biogas~Tratamiento, data = ANOVA)
> summary(modelo)
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
Tratamiento  3  91809   30603   78.34 9.47e-06 ***
Residuals    7   2735     391
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> |
```

Producción acumulada de Metano

	Tratamiento	Metano
2	RP	378.1850
3	RF	364.7111
4	RF	362.4484
5	RF	374.0434
6	RP50:RF50	460.2373
7	RP50:RF50	474.4395
8	RP50:RF50	490.1142
9	RP15:RF85	385.9696
10	RP15:RF85	408.3542
11	RP15:RF85	388.1993

```
> library(readxl)
> ANOVA <- read_excel("Valen ANOVA R/ANOVA 18-10-23/Metano/ANOVA.xlsx")
> View(ANOVA)
> modelo <- aov (Metano~Tratamiento, data = ANOVA)
> summary(modelo)
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
Tratamiento  3  19848     6616   45.68 5.78e-05 ***
Residuals    7   1014     145
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> |
```

POST-ANOVA – Software SPSS

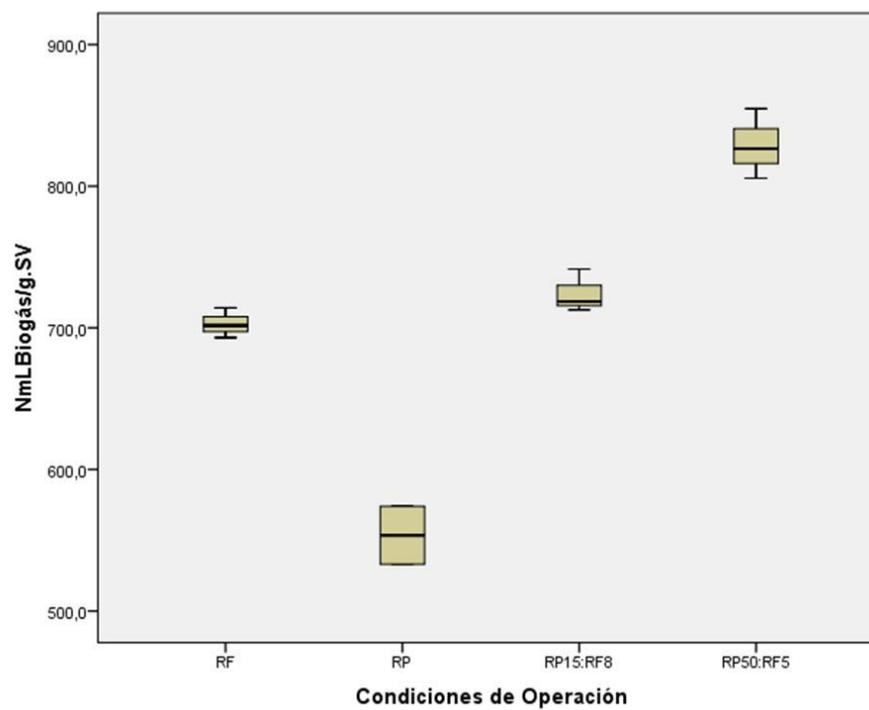
Prueba post hoc
Subconjuntos homogéneos

Producción acumulada de Biogás

NmL Biogás/g.SV

Tukey B^{a,b,c}

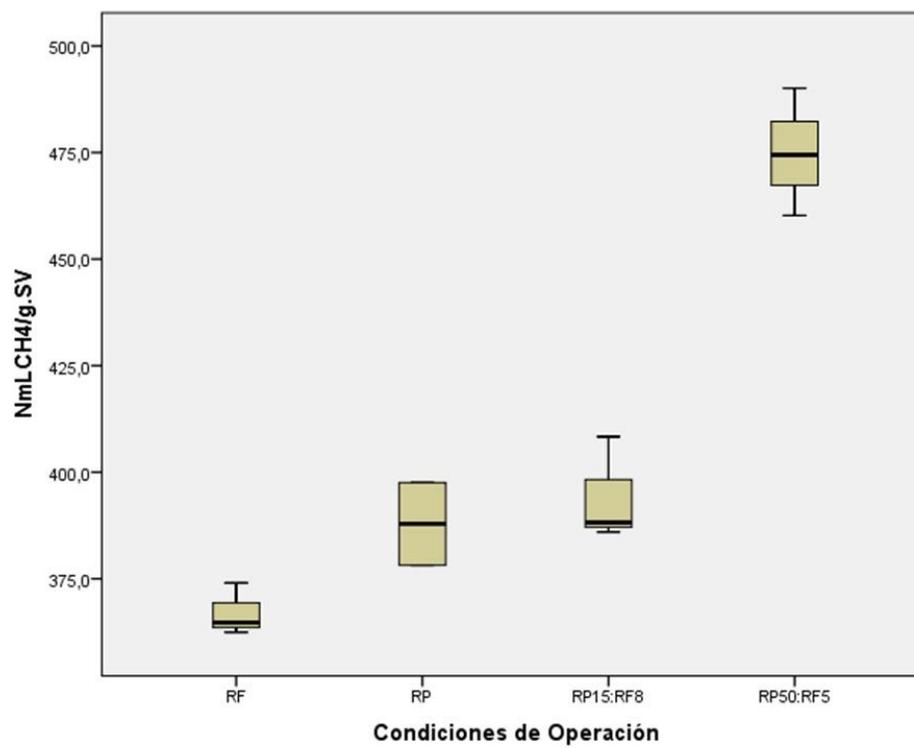
Condiciones de Operación	N	Subconjunto		
		1	2	3
RP	2	553,485		
RF	3		702,913	
RP15:RF85	3		724,257	
RP50:RF50	3			828,943



Producción acumulada de Metano

NmLCH4/g.SVTukey B^{a,b,c}

Condiciones de Operación	N	Subconjunto	
		1	2
RF	3	367,067	
RP	2	387,865	
RP15:RF85	3	394,173	
RP50:RF50	3		474,930



G. Anexo: Caracterización y composición del digestato

 INFORME DE RESULTADOS AREA DE ANÁLISIS DE MATERIALES ORGÁNICOS		Registro IEA LB0000542021 <small>Centro de control de calidad, laboratorio de control y mejoramiento genético</small> Bogotá 17 de Nov. de 2011		
Informe N°	48190-V1-2023	N° de Laboratorio	AMO-02613-2023	
Información del Cliente				
Remitente	UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	Responsable	ING. VALENTINA OSORIO	
Propietario	UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	Email contacto	lscadavidr@unal.edu.co; valosoriogom@unal.edu.co	
Fecha Ingreso	23-11-2023	Fecha Emisión	14-12-2023	
Información de la Muestra Suministrada por el cliente				
Identificación Suministrada	AP 15: AF85	Lote / Bloque	9-10-2023	
Punto del material / ref. adicional	SEDE PALMIRA	Contrato N°		
Descripción Física	LÍQUIDO NEGRO	Condiciones recepción	CONFORME	
CARACTERIZACIÓN Y COMPOSICIÓN DE MATERIALES ORGÁNICOS LÍQUIDOS				
Variable	Expresión / Sigla	Resultados	Unidades	Extractante/Técnica/Documento Normativo
pH	pH	7.50	Unidades de pH	Directo / Potenciométrico / NTC 5527 (r)
Densidad	N.A.	1.01	g/cm ³	Directo / Gravimétrico / NTC 5167 (r)
Conductividad Eléctrica 1:100	CE 1:100	0.182	dS/m	Conductimétrico / NTC 5527 (r)
Carbono Orgánico Oxidable Total	COOx	12.8	g/L	Slm. Dicromato de Potasio / Colorimétrico / NTC 5167 (r)
Sólidos Insolubles	N.A.	24.2	g/L	Directo / Gravimétrico / NTC 5167 (r)
CARACTERIZACIÓN DE LA FRACCIÓN MINERAL				
Nitrógeno Total	NT	3.32	g/L	Sumatoria de Especies de Nitrógeno requeridas por el cliente
Nitrógeno Amónico	N-NH ₄ ⁺	1.65	g/L	NaOH conc. / Volumetría / NTC 5167-NTC 211 (r)
Nitrógeno Orgánico	N Orgánico	1.67	g/L	Mico-Kjeldahl / Volumetría / NTC 5167-NTC 370 (r)
Fósforo total	P ₂ O ₅	0.631	g/L	MVH Ácido Nítrico/Ácido Perclórico / Colorimétrico / NTC 5167-NTC 234 (r)
Potasio Total	K ₂ O	0.710	g/L	MVH Ácido Nítrico/Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167-NTC 262 (r)
Potasio Soluble	K ₂ O	0.688	g/L	Agua / EAA / NTC 202 (r)
Calcio total	CaO	0.676	g/L	MVH Ácido Nítrico/Ácido Perclórico / EAA / EPA7000B (r)
Magnesio total	MgO	0.192	g/L	MVH Ácido Nítrico/Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167 - EPA7000B (r)
Azufre total	S	0.591	g/L	MVH Ácido Nítrico/Ácido Perclórico / Turbidimetría / NTC 5167 - IGAQ1862) - NTC 1156 (r)
Hierro total	Fe	793	mg/L	MVH Ácido Nítrico/Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167 - EPA7000B (r)
Manganeso total	Mn	6.38	mg/L	MVH Ácido Nítrico/Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167 - EPA7000B (r)
Cobre total	Cu	5.20	mg/L	MVH Ácido Nítrico/Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167 - EPA7000B (r)
Zinc Total	Zn	15.2	mg/L	MVH Ac. Nítrico/Ac. Perclórico / EAA / NTC 5167 - EPA7000B (r)
Boro total	B	12.1	mg/L	MVH Ácido Nítrico/Ácido Perclórico / Colorimétrico / NTC 5167 - NTC 1860 (r)



INFORME DE RESULTADOS

Registro ICA 480808040021

 ÁREA DE ANÁLISIS DE MATERIALES
 ORGÁNICOS

 Centro Nacional de Estudios
 Ambientales y Recursos
 Naturales
 Bogotá, D.C.
 República de Colombia

Informe N°	48191-V1-2023	N° de Laboratorio	AMO-02614-2023
------------	---------------	-------------------	----------------

Información del Cliente

Remitente	UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	Responsable	ING. VALENTINA OSORIO
Propietario	UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	Email contacto	lscadavide@unal.edu.co; valosoriotgom@unal.edu.co
Fecha Ingreso	23-11-2023	Fecha Emisión	14-12-2023

Información de la Muestra Suministrada por el cliente

Identificación Suministrada	AP-50-AF50	Lote / Bloque	9-10-2023
Fuente del Material / ref. adicional	SEDE PALMIRA	Contrato N°	
Descripción Física	LÍQUIDO NEGRO	Condiciones recepción	CONFORME

CARACTERIZACIÓN Y COMPOSICIÓN DE MATERIALES ORGÁNICOS LÍQUIDOS

Variable	Expresión / Sigla	Resultados	Unidades	Extractante/Técnica/Documento Normativo
pH	pH	7.74	Unidades de pH	Directo / Potenciométrico / NTC 5527 (r)
Densidad	N.A.	1.01	g/cm ³	Directo / Gravimétrico / NTC 5167 (r)
Conductividad Eléctrica 1:100	CE 1:100	0.249	dS/m	Conductimétrico / NTC 5527 (r)
Carbono Orgánico Oxidable Total	COO _o	11.3	g/L	Sln. Dicromato de Potasio / Colorimétrico / NTC 5167 (r)
Sólidos Insolubles	N.A.	23.1	g/L	Directo / Gravimétrico / NTC 5167 (r)

CARACTERIZACIÓN DE LA FRACCIÓN MINERAL

Nitrógeno Total	NT	4.11	g/L	Sumatoria de Especies de Nitrógeno requeridas por el cliente
Nitrógeno Amónico	N-NH ₄ ⁺	2.16	g/L	NaOH conc. / Volumétrica / NTC 5167-NTC 211 (r)
Nitrógeno Orgánico	N Orgánico	1.95	g/L	Micro-Kjeldahl / Volumétrica / NTC 5167-NTC 370 (r)
Fósforo total	P ₂ O ₅	0.898	g/L	MVN Ácido Nítrico/Ácido Perclórico / Colorimétrico / NTC 5167-NTC 234 (r)
Potasio Total	K ₂ O	0.594	g/L	MVN Ácido Nítrico/Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167-NTC 262 (r)
Potasio Soluble	K ₂ O	0.552	g/L	Agua / EAA / NTC 262 (r)
Calcio total	CaO	2.71	g/L	MVN Ácido Nítrico/Ácido Perclórico / EAA / EPA7000B (r)
Magnesio total	MgO	0.180	g/L	MVN Ácido Nítrico/Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167 - EPA7000B (r)
Azufre total	S	0.797	g/L	MVN Ácido Nítrico/Ácido Perclórico / Turbidimetría / NTC 5167 - IGAD/1982 -NTC 1154 (r)
Hierro total	Fe	860	mg/L	MVN Ácido Nítrico/Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167 - EPA7000B (r)
Manganeso total	Mn	6.41	mg/L	MVN Ácido Nítrico/Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167 - EPA7000B (r)
Cobre total	Cu	5.06	mg/L	MVN Ácido Nítrico/Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167 - EPA7000B (r)
Zinc Total	Zn	17.3	mg/L	MVN Ac. Nítrico/Ac. Perclórico / EAA / NTC 5167 - EPA7000B (r)
Boro total	B	13.9	mg/L	MVN Ácido Nítrico/Ácido Perclórico / Colorimétrico / NTC 5167 - NTC 1890 (r)