

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES**

CARRERA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES



**“EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS UTILIZANDO LOS
RESIDUOS ORGÁNICOS DEL MERCADO AMAZONAS DE IBARRA MEDIANTE
DIGESTIÓN ANAEROBIA”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO
EN ENERGÍAS RENOVABLES**

AUTOR:

GUALLE BERMEO GEOVANNY MIGUEL

DIRECTOR

JUAN CARLOS GARCÍA MONTOYA, PhD

DICIEMBRE – 2021

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

**“EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS UTILIZANDO LOS RESIDUOS
ORGÁNICOS DEL MERCADO AMAZONAS DE IBARRA MEDIANTE DIGESTIÓN
ANAEROBIA”**

Trabajo de titulación revisado por el Comité Asesor, previo a la obtención del Título de:

INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES**APROBADO:**

Juan Carlos García PhD

DIRECTOR

Ing. Jorge Granja Ruales

FIRMA
ASESOR

Jorge Luis Cue PhD

FIRMA
ASESOR**FIRMA**

IBARRA – ECUADOR

DICIEMBRE, 2021



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO		
CÉDULA	DE	1721179669
IDENTIDAD		
APELLIDOS	Y	Gualle Bermeo Geovanny Miguel
NOMBRES		
DIRECCIÓN:		La Victoria – Ibarra - Imbabura
EMAIL:		fyq1geovanny@gmail.com
TELÉFONO FIJO:	TELÉFONO	0984718178
	MÓVIL:	
DATOS DE LA OBRA		

	DE IBARRA MEDIANTE DIGESTIÓN ANAEROBIA
AUTOR:	Gualle Bermeo Geovanny Miguel
FECHA:	02-12-2021
PROGRAMA:	PREGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Energías Renovables
DIRECTOR:	Juan Carlos García PhD

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de esta y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, al 02 día del mes de diciembre del 2021

EL AUTOR



Geovanny Miguel Gualle Bermeo

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a mi madre Ana Bermeo y mi padre Jorge Gualle que son quienes me dieron la vida y la oportunidad de formarme como profesional. Agradezco a mi hermano mayor Jairo Gualle que siempre estuvo pendiente de mí y de mi bienestar y me ayudo con herramientas fundamentales en el estudio, también a Mario Veliz que me apoyo moral y económicamente en la culminación de la universidad.

Un agradecimiento especial al Dr. Juan Carlos García, quien fue tutor y mentor, a quién considero un amigo, que supo transmitirme el conocimiento para seleccionar un tema de estudio, además, me motivó a no rendirme pese a la dura situación que vivimos en pandemia.

También quiero agradecer a los ingenieros asesores Jorge Granja, Diego Villagómez, Jorge Cue, que con sus aportes pude despejar muchas dudas convirtiéndome en un mejor profesional y persona.

Además, agradezco al Ing. Juan Guamán e Ing. Gabriel Chimbo que gracias a sus conocimientos y su tiempo pude avanzar gran parte de la investigación y fueron fuente de inspiración para crecer profesionalmente.

Gracias a todos.

Geovanny Miguel Gualle Bermeo

DEDICATORIA

El presente proyecto primeramente se lo dedico a Dios, quien nos dio la vida y la oportunidad de vivir en este mundo.

Se lo dedico a mi abuelita Selina Bermeo, una gran mujer que me enseñó lo que es amar de verdad y siempre me pidió que continúe con mis estudios. A mi abuelita Rosa Gutiérrez quién siempre fue un soporte. A mi tío Segundo Bermeo, que me enseñó a perdonar y no guardar rencor a las personas. A mi tío Ricardo Erazo, que me apoyó desinteresadamente y siempre estuvo pendiente de que no me falte nada en mi estancia en Ibarra. Hoy los extraño mucho y desde el cielo espero que me estén viendo.

Se lo dedico a mi madre Ana Bermeo, que nunca dudó de mí y no me abandonó ante ninguna adversidad, se lo dedico a mi padre Jorge Gualle quién me ha apoyado en toda mi vida académica y siempre ha estado para mí cuando lo he necesitado, se lo dedico a mis hermanas Sindy y Sandy y que les sirva de ejemplo que si se desea algo se puede conseguir, se lo dedico a mi hermano Jairo que a pesar de la gran distancia en la que vivimos no me dejó solo y me apoyo en toda mi vida académica.

Geovanny Miguel Gualle Bermeo

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	XIII
ABSTRACT.....	XIV
1. Capítulo I Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema y justificación	2
1.3. Pregunta directriz	4
1.4. Objetivos	4
1.4.1. Objetivo general	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
1.5. Hipótesis.....	4
2. Capítulo II Marco Teórico.....	5
2.1. Revisión literaria	5
2.1.1. Residuos sólidos municipales.....	5
2.1.2. Residuo orgánico como biomasa.....	5
2.1.3. Digestión anaerobia.....	6
2.1.4. Biodigestor	7
2.1.5. Tipos de biodigestores.....	7
2.1.6. Modos de operación de los biorreactores	8
2.1.7. Parámetros de operación	9
2.1.8. Parámetros de la materia orgánica	10
2.2. Análisis de Varianza (ANOVA)	11
2.2.1. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk	11
2.2.2. Método de la diferencia menos significativa LSD de Fisher	11
2.3. Marco legal.....	12

2.3.1.	Protocolo de Kyoto.....	12
2.3.2.	Acuerdo de París	12
3.	CAPÍTULO III Marco metodológico.....	13
3.1.	Descripción del área de estudio.....	13
3.2.	Caracterización de residuos orgánicos de diferente procedencia del Mercado Amazonas	14
3.2.1.	Acercamiento al Mercado Amazonas	14
3.2.2.	Elaboración de la encuesta	14
3.2.3.	Cuantificación de los residuos orgánicos	15
3.2.4.	Caracterización de los residuos orgánicos	17
3.2.5.	Análisis elemental	17
3.2.6.	Relación carbono-nitrógeno (C/N).....	18
3.2.7.	Contenido de humedad.....	18
3.2.8.	Sólidos totales (TS)	19
3.2.9.	Sólidos volátiles (TSV).....	20
3.3.	Evaluación del rendimiento del biogás proveniente de diferentes mezclas	20
3.3.1.	Preparación de las mezclas.....	20
3.3.2.	Elaboración de los biorreactores y puesta en marcha	21
3.4.	Estimación del potencial energético del biogás a partir de diferentes mezclas	23
3.4.1.	Medición de volumen de biogás por desplazamiento	23
3.4.2.	Rendimiento de mezclas y potencial energético CH ₄	24
3.5.	Análisis de varianza (ANOVA)	25
3.5.1.	Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk	25
3.5.2.	Prueba de homocedasticidad de Levene.....	25
3.5.3.	Método de comparación LSD de Fisher.....	26

3.6. Materiales utilizados	26
3.6.1. Caracterización de residuos orgánicos	26
3.6.2. Análisis elemental	26
3.6.3. Digestión anaerobia.....	27
4. Capítulo IV Resultados y Discusión	28
4.1. Caracterización de los residuos orgánicos de diferente procedencia para su aplicación energética.....	28
4.1.1. Población total.....	28
4.1.2. Encuesta	28
4.1.3. Muestreo aleatorio estratificado	31
4.1.4. Cuantificación de los residuos orgánicos	32
4.1.5. Caracterización de los residuos orgánicos	33
4.2. Análisis elemental	36
4.3. Relación carbono-nitrógeno (C/N).....	36
4.4. Formulación de mezclas.....	36
4.5. Contenido de humedad, sólidos totales y sólidos volátiles	38
4.6. Rendimiento de biogás por mezclas.....	38
4.6.1. Volumen de biogás diario y acumulado generado por M1	39
4.6.2. Volumen de biogás diario y acumulado generado por M2	40
4.6.3. Volumen de biogás diario y acumulado generado por M3	41
4.7. Volumen de biogás diario acumulado para las 9 unidades experimentales	42
4.8. Diferencia de pH	43
4.9. Análisis de varianza ANOVA.....	44
4.10. Porcentaje de CH ₄	46
4.11. Potencial energético eléctrico.....	46

4.12.	Evaluación de las mezclas de acuerdo con sus resultados	46
5.	CAPÍTULO V Conclusiones y recomendaciones	48
5.1.	Conclusiones	48
5.2.	Recomendaciones.....	49
6.	Bibliografía.....	50
7.	ANEXOS.....	54
7.1.	Anexo 1: Solicitud de pesaje.....	54
7.2.	Anexo 2: Encuesta.....	55
7.3.	Anexo 3: Pretest de la encuesta	56
7.4.	Anexo 4: Aplicación de encuesta en el mercado Amazonas.....	57
7.5.	Anexo 5: Pesaje en la fuente generadora	57
7.6.	Anexo 6: Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk	57
7.7.	Anexo 7: Prueba de homogeneidad de Levene	57
7.8.	Anexo 8: Comparación LSD-Fisher.....	58

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Composición del biogás</i>	7
Tabla 2 <i>Materiales para la cuantificación</i>	26
Tabla 3 <i>Materiales para el análisis elemental</i>	27
Tabla 4 <i>Materiales para la digestión anaerobia</i>	27
Tabla 5 <i>Estratos de puestos comerciales del mercado</i>	28
Tabla 6 <i>Puestos comerciales por estrato</i>	31
Tabla 7 <i>Tamaño de muestra por estrato</i>	32
Tabla 8 <i>Pesaje medio diario y total por estratos</i>	33
Tabla 9 <i>Resultados del análisis elemental</i>	36
Tabla 10 <i>Relación C/N de los estratos</i>	36
Tabla 11 <i>Formulación de mezclas potenciales para biogás</i>	37
Tabla 12 <i>Mezclas seleccionadas debido a su relación C/N</i>	37
Tabla 13 <i>Resultados de humedad, TS, TSV</i>	38
Tabla 14 <i>Media del volumen de biogás generado</i>	38
Tabla 15 <i>Tabulación de datos para ingresar a INFOSTAT</i>	44
Tabla 16 <i>Comparación LSD de Fisher</i>	45
Tabla 17 <i>Resumen estadístico de cada una de las mezclas</i>	45
Tabla 18 <i>Porcentaje de metano</i>	46
Tabla 19 <i>Energía y electricidad producida</i>	46
Tabla 20 <i>Resultados para evaluar la mezcla con mejor rendimiento</i>	47

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Mapa de la zona de estudio</i>	13
Figura 2 <i>Muestreo aleatorio estratificado para el pesaje de residuos orgánicos.</i>	16
Figura 3 <i>Método de cuarteo</i>	17
Figura 4 <i>A) Peso de muestra a secar B) Horno para secado</i>	19
Figura 5 <i>Muestras homogenizadas</i>	21
Figura 6 <i>Pesaje de la muestra con y sin agua.</i>	22
Figura 7 <i>Medición de pH</i>	22
Figura 8 <i>Inicio de proceso de biodigestión</i>	23
Figura 9 <i>Desplazamiento de biogás</i>	24
Figura 10 <i>Resultados obtenidos de la pregunta 1</i>	29
Figura 11 <i>Resultados de la pregunta 2</i>	30
Figura 12 <i>Días de mayor y menor venta</i>	31
Figura 13 <i>Caracterización de vegetales y hortalizas</i>	33
Figura 14 <i>Caracterización de residuos de comida</i>	34
Figura 15 <i>Caracterización de puestos de juguería</i>	35
Figura 16 <i>Caracterización de puestos de frutas</i>	35
Figura 17 <i>Volumen diario de biogás producido para la muestra M1</i>	39
Figura 18 <i>Volumen de biogás acumulado en ml</i>	40
Figura 19 <i>Producción diaria de Biogás para M2</i>	40
Figura 20 <i>Producción acumulada de biogás para M2</i>	41
Figura 21 <i>Producción diaria de biogás para M3</i>	42
Figura 22 <i>Producción acumulada de biogás para M3</i>	42
Figura 23 <i>Biogás acumulado para todas las repeticiones</i>	43
Figura 24 <i>Diferencia de pH por cada Mezcla</i>	44

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES**

CARRERA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

**EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS UTILIZANDO LOS
RESIDUOS ORGÁNICOS DEL MERCADO AMAZONAS DE IBARRA MEDIANTE
DIGESTIÓN ANAEROBIA**

Anteproyecto del trabajo de titulación

Nombre del estudiante: Gualle Bermeo Geovanny Miguel

RESUMEN

La dependencia hacia los combustibles fósiles y el agotamiento de las reservas de petróleo han provocado buscar alternativas renovables para suplir la demanda energética. Una de estas alternativas es el biogás, esta se produce mediante la digestión anaerobia de residuos orgánicos en un recipiente hermético conocido como biodigestor, que debe cumplir con ciertos parámetros para un adecuado proceso. En la ciudad de Ibarra, el nicho de los residuos orgánicos es el Mercado Amazonas, quienes son trasladados al relleno sanitario de la ciudad sin ninguna utilización energética. Para aprovechar estos residuos orgánicos de manera energética se evaluó la producción de biogás de tres mezclas diferentes formuladas a partir de la relación carbono-nitrógeno de cada uno de los estratos, estos se introdujeron en biorreactores controlando su pH, su temperatura, en un periodo de 14 días. La mezcla que tuvo mejor rendimiento de producción de biogás fue la mezcla compuesta por 50% de fruta y 50% de residuos de juguería, con $30.2 \text{ mlCH}_4/\text{gST}$, ocupando el 10% de la materia prima total que se colecta al día, estimando que produciría 19 000 kWh/año.

Palabras Clave: Digestión anaerobia, residuos orgánicos, biogás, biodigestor, metano.

ABSTRACT

The dependence on fossil fuels and the depletion of oil reserves have led to the search for renewable alternatives to cover the energy demand. One of these alternatives is biogas, which is produced by anaerobic digestion of organic waste in an airtight container known as a biodigester, which must meet certain parameters for an adequate process. In the city of Ibarra, the niche for organic waste is the Mercado Amazonas, which is taken to the city's sanitary landfill without any energy use. To take advantage of this organic waste in an energetic way, the biogas production of three different mixtures formulated from the carbon-nitrogen ratio of each of the strata was evaluated. The mixture that had the best biogas production performance was the mixture composed of 50% fruit and 50% juice waste, with 30.2 mlCH₄/gST, occupying 10% of the total raw material collected per day, estimated to produce 19,000 kWh/year.

KEYWORDS: Anaerobic digestion, organic waste, biogas, biodigester, methane.

Capítulo I

Introducción

1.1. Antecedentes

El consumo de energía primaria global para el 2018 fue de 13864.9 millones de toneladas equivalentes de petróleo, el 89.1% del consumo energético pertenece a los combustibles fósiles (petróleo, gas, carbón, energía nuclear) y el 10.9% representa las energías renovables (hidráulica, solar, eólica, biomasa) reflejando así, una exorbitante dependencia energética hacia las energías no renovables. El consumo de energía primaria creció un 2.9% a nivel mundial, este aumento ha sido el más rápido desde el año 2010; y provocó un crecimiento en las emisiones de CO₂ del 2% a nivel mundial (BP, 2019).

La demanda de energía eléctrica en el Ecuador cada año aumenta según el Plan Maestro de Electrificación 2013-2022 (PME), requiriendo nuevas fuentes de energía con el menor impacto ambiental posible, sobre todo al efecto invernadero, causado por los combustibles fósiles (IPCC, 2014). Según el Balance Nacional de Energía Eléctrica (BNEE) la potencia nominal instalada de energía no renovable es de 3'393.73 MW con una participación cerca del 40% del total, representada por el 23% por la térmica MCI, 11% por la térmica turbo gas y 6% por la térmica turbo vapor (ARCONEL, 2019).

Las energías renovables tales como la eólica, fotovoltaica, biomasa, geotérmica y la minihidráulica correspondientes al tipo no convencional, deberán desarrollarse e incentivar su aplicación para reducir la contaminación y abaratar costos de inversión (Amin, 2015).

El objetivo del Plan Nacional de Eficiencia Energética (PLANEE) para el periodo 2016-2035 es incrementar el uso eficiente de los recursos energéticos mediante la ejecución de programas y proyectos de eficiencia energética en los sectores relacionados con la oferta y demanda de energía, a fin de reducir la importación de derivados del petróleo, contribuir a la mitigación del cambio climático con base a la meta de reducir 65 MtCO₂ mediante la reducción mínima de energía 543 Mbep (MEER, 2017)

Los residuos orgánicos en forma de sólidos, las aguas fecales o el estiércol de los animales, son un problema para el entorno social. Para la solución de este problema existe el modo natural

de obtención de energía desde hace varios años a través de la producción de biogás, es una mezcla de gases generados a partir de la descomposición de la materia orgánica por microorganismos anaerobios (Fernández J. , 2009).

Ecuador cuenta con un alto potencial energético en fuentes renovables, uno de los principales es la biomasa, tiene un futuro prometedor según el estudio de la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA, acrónimo en inglés) según la proyección mundial de la bioenergía para el año 2030 propone alcanzar el 20% del suministro total de energía primaria y el 60% del uso final de energía renovable (IRENA, 2014).

En el país existen dos ciudades con electricidad generada a partir de RSU, en Quito se colectan 2000 toneladas de residuos al día y para Cuenca 490, con una potencia de 5 MW y 2 MW respectivamente (Holguín, 2017).

1.2. Planteamiento del problema y justificación

La dependencia hacia los combustibles fósiles refleja el poco desarrollo de las energías renovables que aún existe en el mundo, apenas se cubre el 10.1% del consumo de la energía primaria global con este tipo de alternativa (BP, 2019). De igual forma sucede en Ecuador, aproximadamente el 12% de la energía primaria es cubierta por energías renovables (BEN, 2016).

En la última década en el medio urbano, los RSU han crecido de 0.68 a 1.3 billones de toneladas al año y se estima que para el año 2025 sea de 2.2 billones de toneladas (Hoornweg & Bhada-Tata, 2012). En Ecuador, la cantidad de RSU generados ha crecido de 2.71 millones de toneladas al año en 2002 a 4.06 millones de toneladas al año en 2014 (OPS & OMS, 2002).

El ser humano en su interacción con el ambiente siempre se ha visto enfrentado al problema del manejo de sus residuos; este problema aumentó cuando las personas se concentraron en centros urbanos, incrementando la cantidad de desechos generados y haciendo cada vez más difícil la disposición de estos (MINAM, 2016). El mal manejo de los residuos orgánicos generados en las ciudades, provocan un impacto ambiental y social, el cual requiere que se tomen medidas urgentes y buscar alternativas antes de que estas se sigan multiplicando a lo largo de los años y sea irremediable (Kaza, 2018).

En la ciudad de Ibarra se producen cerca de 135 toneladas de residuos sólidos urbanos (RSU) al día, de los cuales, alrededor del 30% provienen del Mercado Amazonas. Sin embargo, una inspección realizada por los técnicos de la Coordinación Provincial del Ministerio del

Ambiente (MAE) confirmó que el presente relleno no cumple con el plan de manejo ambiental estipulado, los RSU pasan hasta 12 horas sin cubrir por lo que se presenta la llegada de roedores, moscas y animales aéreos, después son cubiertos por una capa de tierra para su descomposición, el cual refleja que no tiene ningún fin energético (Bravo, 2018).

En el Mercado Amazonas se generan residuos orgánicos de los diferentes puestos que emplean su labor diaria como vendedores de alimentos; estos residuos son recolectados en carretas y trasladados a un relleno ubicado a un lado del mercado, son mezclados con diferentes tipos de residuos como botellas de plásticos, fundas plásticas, cartones, latas; como se pudo observar *in situ*, no existe un correcto reciclaje de los residuos por lo que se propagan olores, debido a eso, la municipalidad de Ibarra constantemente traslada la basura al relleno sanitario en los respectivos camiones de basura.

El presente proyecto propone una alternativa para el uso de los residuos orgánicos vertidos en el mercado Amazonas de Ibarra mediante el proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás, además, se obtiene un abono orgánico dándole un valor agregado al proceso. Este biocombustible, puede cubrir total o parcialmente la demanda energética del establecimiento, proporcionando un ahorro económico a los comerciantes y cumpliendo con lo estipulado en la Constitución al ser un tipo de energía no convencional y una tecnología limpia, se adhiere al Protocolo de Kyoto reduciendo las emisiones de metano que se producen por la mala gestión de desechos y también colaboraría con el Acuerdo de París sobre reducir las emisiones de dióxido de carbono.

Además, la utilización de estos residuos orgánicos proporcionaría un ambiente sano en el mercado Amazonas, los residuos orgánicos irían directamente a los biodigestores evitando mal olor por la descomposición que se produce en los contenedores a cielo abierto y los lixiviados que se forman por el tiempo que permanecen en descomposición, mejoraría la imagen del mercado Amazonas, reduciendo el impacto social, obtendría un ahorro económico por medio del combustible del transporte en el que se traslada estos residuos orgánicos al Relleno Sanitario San Alfonso que se realiza tres veces al día en horario de 11:00, 16:00 y 19:00 horas.

1.3. Pregunta directriz

¿Son los residuos orgánicos del mercado Amazonas de Ibarra materia prima para producir biogás y generar electricidad en función de sus características y rendimientos?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar la producción de biogás a partir de los residuos orgánicos del Mercado Amazonas de Ibarra mediante digestión anaerobia.

1.4.2. Objetivos específicos

Caracterizar residuos orgánicos de diferente procedencia para su aplicación energética.

Evaluar el rendimiento del biogás proveniente de diferentes mezclas.

Estimar el potencial energético del biogás a partir de diferentes mezclas.

1.5. Hipótesis

Ho: Los residuos orgánicos tienen diferente rendimiento de producción de biogás para las diferentes mezclas.

Ha: Los residuos orgánicos tienen similar rendimiento de producción de biogás con las diferentes mezclas.

Capítulo II

Marco Teórico

En el siguiente capítulo se recopiló toda la información necesaria que se requiere para la investigación, para esto se utilizó libros académicos, artículos científicos, conferencias internacionales, investigaciones gubernamentales. Relacionado a la biomasa y biodigestión.

2.1. Revisión literaria

2.1.1. Residuos sólidos municipales

Los residuos sólidos municipales están conformados por cualquier sustancia u objeto desechados por una población en una región, estos ya no tienen ningún valor porque están rotos, descompuestos o han concluido su uso inicial. Se clasifica de la siguiente manera (INSHT, 2015):

- Residuos comerciales: generados por la actividad del comercio como restaurantes, bares, oficinas, mercados.
- Residuos industriales: generados por las industrias como pueden ser residuos de procesos de fabricación, de mantenimiento, de limpieza.
- Residuos domésticos: generados en los hogares debido a las actividades domésticas.

2.1.2. Residuo orgánico como biomasa

El residuo orgánico se refiere a toda materia proveniente de especies de flora y fauna que es susceptible a descomponerse por microorganismos, consiste en los restos, sobras o productos de desecho de cualquier espécimen (CCA, 2017).

Las moléculas orgánicas de la biomasa contienen energía acumulada en sus enlaces, que pueden ser liberadas mediante la combustión. La materia orgánica de esta biomasa puede proporcionar su energía de forma directa, por combustión o a través de procesos originando alcoholes o hidrocarburos (De Juana, 2007).

Para que la biomasa tenga una utilidad real en el área energética es necesario que ella y/o su fuente de origen posean una serie de propiedades que le hagan ser económica, con disponibilidad en todas las estaciones del año y en todas las localidades geográficas (Costa, 2013).

2.1.3. Digestión anaerobia

La digestión anaerobia también llamada biometanización es un proceso biológico, natural y espontáneo, por medio del cual la biomasa es degradada por microorganismos en ausencia de oxígeno para producir una mezcla gaseosa conocida como biogás y un efluente estabilizado rico en nutrientes conocido como biol que puede ser empleado como fertilizante orgánico (Arrieta, 2016).

Este proceso biológico se lleva a cabo por medio de bacterias específicas: acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas (Camps et al., 2008). Este proceso se distingue de forma general en cuatro etapas:

- En la primera etapa de biodigestión se ven involucradas las enzimas, que son las que permiten la transformación de los compuestos orgánicos como lípidos, hidratos de carbono y proteína en productos solubles y degradables como azúcares y alcoholes. En esta etapa actúa las bacterias hidrolíticas acidogénicas y pueden ser una limitante en el proceso (Verma, 2002).
- Las mismas bacterias hidrolíticas degradan los productos en ácidos grasos volátiles (ácidos butíricos, propiónicos y valéricos), dióxido de carbono (CO_2), hidrógeno (H_2) y ácido acético ($\text{CH}_3\text{-COOH}$ ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$)) (Botero, 1987).
- Las bacterias acetogénicas se encargan de convertir los ácidos grasos volátiles en compuestos más simples como el ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. La descomposición de los ácidos propiónico y butírico no son termodinámicamente posibles para presiones parciales del hidrógeno relativamente elevadas (Elías et al, 2012), por lo que es necesario la presencia de poblaciones de bacterias capaces de eliminar el hidrógeno que se genera en esta etapa (Bouallagui, 2003).

- En esta última etapa, las bacterias metanogénicas transforman el ácido acético y el hidrógeno en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Se distinguen dos tipos de bacterias, las metanogénicas hidrogenófilas que convierten el CO_2 y el H_2 en CH_4 y las metanogénicas acetoclásticas (que producen cerca del 70% del metano) que transforman al acetato (Díaz de Basurto, 2013). Normalmente, las bacterias metanogénicas tienen un crecimiento más lento que las bacterias del resto de etapas, por lo que su crecimiento tiende a ser la etapa limitante del proceso (Rittman & McCarty, 2001).

2.1.4. Biodigestor

Es un recurso de simple resolución técnica compuesto por un recipiente digestor que tiene una tapa superior de ingreso de la primera carga y una serie de conexiones de líquidos de carga diaria, de efluente diario y de vaciado, al igual, que cuenta con conexiones de salida de gas y de control de presión (Pizarro, 2005).

Tabla 1

Composición del biogás

Gas	Fórmula	Contenido (%)
Metano	CH_4	60 – 80
Dióxido de carbono	CO_2	30 - 40
Nitrógeno	N_2	1 - 2
Hidrógeno	H_2	0 - 1
Monóxido de Carbono	CO	0 – 1.5
Oxígeno	O_2	0.1
Sulfuro de hidrógeno	H_2S	0 - 1

Nota: Composición del biogás según (Creus, 2009).

2.1.5. Tipos de biodigestores

Existen diferentes diseños que se utilizan para la digestión anaerobia, se pueden clasificar según la capacidad (Fernández J. , 2009).

2.1.5.1. Biodigestores de expansión continua

Es un biorreactor de operación semicontinua que se carga diariamente, el volumen del biorreactor se expande a lo largo de 90 a 180 días. Una vez finalizado el ciclo de digestión anaerobia, toda la carga es removida en un solo efluente y se coloca en la tierra. Su principal ventaja es que no es necesario manejar un efluente diario y su desventaja es que necesita biorreactores de gran tamaño para abarcar un mayor volumen (Karaj et al., 2009).

2.1.5.2. Reactor anaerobio de lecho de fango de flujo ascendente

En este biorreactor la materia orgánica se introduce por la parte inferior, mientras que las partículas formadas biológicamente se encuentran en un lecho de fango de flujo ascendente. La digestión sucede cuando entra en contacto la materia orgánica con las partículas. El metano (CH_4) producido en el lecho de fango ocasiona un flujo interior que ayuda al mantenimiento y a la formación de estas partículas biológicas (Metcalf, 1998).

2.1.5.3. Digestor multietapa

Se trata de digestores conectados en serie, suelen ser dos o tres, la funcionalidad principal es que en una parte de los biorreactores se produzca el crecimiento de las bacterias acetogénicas y en la otra parte el crecimiento de las bacterias metanogénicas, esto permite operar de manera óptima respecto al crecimiento de las bacterias obteniendo una gran ventaja. En el primer biorreactor se opera con un pH ácido y temperatura de 55°C que favorece el crecimiento de bacterias acetogénicas y para el segundo reactor en condiciones de pH neutro y a 35°C que favorece al crecimiento de las metanogénicas (Ferrer & Seco, 2008).

2.1.6. Modos de operación de los biorreactores

2.1.6.1. Biorreactor de operación discontinua

Los biorreactores tipo Batch, son un claro ejemplo de operación discontinua, estos son cargados al máximo nivel de operación y son cerrados durante todo el proceso de biodigestión, por lo que no existe ningún tipo de transferencia de masa durante el proceso, no tiene ni entrada ni salida de materia. El proceso se lleva a cabo herméticamente, las bacterias no pueden tener ningún contacto con oxígeno y se debe mantener la temperatura de manera estable, consta de dos procesos,

en la primera etapa se desarrollan los microorganismos y después viene la etapa de producción de biogás (Atkinson, 1974).

2.1.6.2. Biorreactor de flujo continuo

Un biorreactor de flujo continuo es aquel en el que el proceso que se lleva a cabo, una cantidad de materia prima es adicionada al biorreactor al mismo tiempo que la misma cantidad es extraída, siendo así el volumen del biorreactor constante. En este biorreactor se busca alcanzar el estado estacionario, esto se logra controlando las condiciones de operación, tales como el pH, la temperatura y la concentración de sustrato (Winkler, 1994).

2.1.7. *Parámetros de operación*

Los biorreactores sometidos a digestión anaerobia deben cumplir con una serie de condiciones para su correcta operación, los principales parámetros a considerar es el pH de la mezcla, la temperatura del biorreactor y la carga de alimentación.

2.1.7.1. Carga de alimentación

El tiempo de retención y la actividad de los microorganismos en el proceso de digestión anaerobia son las principales características para determinar una carga orgánica máxima en un biorreactor. La velocidad de crecimiento de las bacterias metanogénicas es baja, a comparación de las bacterias fermentativas puede llegar a ser de 10 a 60 veces menor (Zegers, 1990). Por lo tanto, la cantidad de bacterias metanogénicas determina la capacidad de carga de alimentación para un biorreactor. Encontrar una carga óptima de alimentación, evitaría que las bacterias acetogénicas produzcan más ácidos de los que las bacterias metanogénicas puedan procesar para obtener biogás; si sucede esto, se alteraría el proceso, disminuyendo hasta el punto más bajo la producción de metano debido a la acidificación del sustrato (Ferrer & Seco, 2008).

2.1.7.2. pH

Los cambios de pH en el biorreactor alterarían considerablemente el proceso de metanogénesis. Durante la etapa de fermentación, se mantiene en pH neutro 7 naturalmente, por el bicarbonato que se produce debido al dióxido de carbono (Atkinson, 1974). Sin embargo, puede suceder una acidificación del sistema por múltiples razones como la carga excesiva de sustrato o

también por el suministro apresurado en un sistema continuo. El ácido neutralizaría las bacterias metanogénicas pudiendo detener completamente la producción de biogás, se perdería el equilibrio de pH pudiendo caer por debajo de los 6.6 llegando a morir las bacterias de metan, por lo que un rango óptimo se encuentra entre 7 y 7.2 (Hiler & Stout, 1985).

2.1.7.3. Temperatura

La temperatura es uno de los factores principales para el crecimiento de las bacterias metanogénicas. Existen tres zonas de actividad microbiana: el rango psicrófilico, que se encuentra por debajo de los 28° C, el rango mesófilico que se encuentra entre 30 y 37° C y el rango termófilico que está entre 50 y 57° C (Fernández J. , 2010).

2.1.7.4. Velocidad de carga orgánica y Tiempo de retención

La velocidad de carga orgánica es la cantidad de residuo orgánico que contiene el biorreactor por unidad de volumen, mientras que el Tiempo de retención hidráulica (TRH) es el tiempo promedio que permanece el sustrato en el biorreactor. El TRH es inversamente proporcional a la temperatura del proceso, a mayor temperatura se obtienen menos TRH y sucede lo contrario cuando la temperatura es menor (Varnero, 2011).

2.1.8. *Parámetros de la materia orgánica*

2.1.8.1. Humedad

La humedad es la relación que hay entre la masa húmeda y la masa seca de una materia orgánica, si ésta supera el 50% puede ser aprovechada energéticamente para el proceso de digestión anaerobia (Manzanilla & Marbán, 2012).

2.1.8.2. Relación Carbono – nitrógeno (C/N)

Los principales componentes que requieren los microorganismos para el proceso de digestión son el carbono y el nitrógeno, ya que su base estructural está compuesto por ellos. El carbono es útil para hidrolizar los microorganismos convirtiendo a compuestos más sencillos o estructuras más complejas, mientras que el nitrógeno, es reducido y luego utilizado para la síntesis de aminoácidos (Varnero et al. , 2014). Según varios autores, las bacterias consumen alrededor de

30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que un rango óptimo que se determina para la digestión anaerobia es de 30:1 hasta 20:1.

2.1.8.3. Sólidos totales (TS) y sólidos volátiles (TSV)

Los sólidos totales es el material restante que queda en un recipiente después del secado de una muestra en un horno con temperatura controlada. Mientras que los sólidos volátiles es el material restante de una muestra que es sometida a un proceso de calcinación en un tiempo específico y a una temperatura determinada (Eaton et al., 1995).

2.2. Análisis de Varianza (ANOVA)

El análisis de varianza se basa en un conjunto de técnicas estadísticas con la finalidad de analizar simultáneamente diferentes datos de las variables asignadas en el área de estudio. Esto sirve para agrupar las observaciones en subconjuntos homogéneos, conocer cómo se comportan los datos de estudio y describir los datos de manera resumida (Ordán et al., 2010).

2.2.1. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk

La prueba de normalidad de Shapiro-Wilk se utiliza cuando la cantidad de datos observados es menor a 50. Este método plantea que una muestra proviene de una distribución normal si la hipótesis nula (H_0), mientras que, si no es así, la hipótesis alternativa (H_1) es que los datos observados no tienen una distribución normal. Esto se determina mediante el valor estadístico p y el nivel de significancia. Si este es mayor, no se rechaza la H_0 mientras que, si es menor el valor de p , se rechaza la hipótesis nula y los datos no tienen una distribución normal (Echeverri et al., 2015).

2.2.2. Método de la diferencia menos significativa LSD de Fisher

Este método permite comparar múltiples medias de los diferentes t niveles de un factor, una vez rechazada la igualdad de varianzas mediante la ANOVA. La comparación se basa en un valor en común, aquellos que se encuentren por encima de dicho valor, tendrán una diferencia significativa, mientras que las que se encuentren debajo no tendrán ninguna diferencia significativa (Atil, 2001).

2.3. Marco legal

La presente investigación se adhiere a lo escrito en la Constitución de la República del Ecuador en el Artículo 15, donde se menciona que el Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto. La biomasa es fácil de acceder ya que se distribuye en todo el territorio mundial y se puede utilizar para generación eléctrica o térmica (Blanco et al., 2021).

Además, en el Artículo 413 se menciona que se promoverá la eficiencia energética y el uso de prácticas ambientalmente limpias y sanas, tales como las energías renovables, que sean de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria ni el equilibrio ecológico. La bioenergía actualmente es la principal fuente de energía renovable con un aporte del 12% del suministro de la energía primaria (IEA, 2020).

Por último, el Artículo 195 en el literal 1, se menciona que el estado garantizará un modelo sustentable de desarrollo, ambientalmente equilibrado y respetuoso de la diversidad cultural que asegure las necesidades de las generaciones presentes y futuras.

2.3.1. Protocolo de Kyoto

En el Protocolo de Kyoto, en el Artículo 2, menciona que se debe limitar y reducir las emisiones de metano mediante la recuperación y utilización en la gestión de desechos, siendo justificado el proyecto, ya que el biogás es un combustible que se produce de residuos orgánicos, como puede ser los residuos sólidos municipales (FCCC, 1998).

2.3.2. Acuerdo de París

Ecuador en la primera Contribución Determinada a Nivel Nacional para el Acuerdo de París plantea reducir un 9% las emisiones en comparación al escenario tendencial para el 2025 buscando cumplir con las obligaciones del Acuerdo de París para coadyuvar al logro de su objetivo general y sus objetivos específicos como están estipulados el artículo 2 (UNFCCC, 2015).

CAPÍTULO III

Marco metodológico

En este capítulo se describe cada uno de los métodos utilizados para llevar a cabo la investigación, además de la normativa y las herramientas empleadas según el caso, todo esto basándose en investigaciones realizadas por otros investigadores.

3.1. Descripción del área de estudio

El estudio se realizó en el Mercado Amazonas, se encuentra ubicado en el cantón Ibarra de la provincia de Imbabura. Las coordenadas geográficas son UTMX: 820447.3 y UTMY: 38304.3 WGS 84 Zona 17 Sur a una altitud de 2212 msnm. En la figura 1 se puede apreciar la ubicación local del área de estudio.

Figura 1

Mapa de la zona de estudio



El estudio se centró en los locales que en su venta diaria produce residuos orgánicos, se clasificó en categorías tales como puestos de comida, puestos de verduras y hortalizas, puesto de frutas, puestos de jugos y puestos de carnes.

3.2. Caracterización de residuos orgánicos de diferente procedencia del Mercado Amazonas

3.2.1. Acercamiento al Mercado Amazonas

Primero se visitó el lugar, para conocer de qué manera se organiza el Mercado Amazonas, cuál es su hora de apertura y de cierre, quién es el administrador del sitio, cuál es el *modus operandi* de la recolección de basura en los puestos del mercado y cuál es la costumbre que tienen los comerciantes respecto a reciclar la basura de su negocio. Todo esto se hizo con la finalidad de crear una metodología que no interrumpa su labor diaria, debido a que detrás de cada puesto existe una familia que depende de ese trabajo para solventarse económicamente. Además, se solicitó una cita con el Administrador del Mercado Amazonas, para conocer acerca del número de puestos en total, en caso de que exista, el total de puestos por categoría y por supuesto que autorice el permiso para llevar a cabo la investigación (Ver anexo 1).

3.2.2. Elaboración de la encuesta

Se planificó una encuesta (ver anexo 2) dirigida a todos los propietarios o encargados de los puestos del Mercado Amazonas de Ibarra previamente divididos en: vegetales y hortalizas, frutas, jugos, servicio de comida y cárnicos.

La elaboración de la encuesta se planteó de acuerdo con la siguiente metodología (Chirino, J. et. al., 2016) (Scheaffer, R. et. al., 2006):

- 1) Objetivo del estudio, definición del marco y delimitación de la población objetivo.
- 2) Selección de las unidades muestrales: mediante estratos se clasificó la población en puestos de verduras y hortalizas, frutas, jugos, comida y cárnicos.
- 3) Diseño de muestreo: es la población total anteriormente contada.
- 4) Método de medición: se aplicó entrevista directa con el propietario o encargado del puesto.
- 5) Instrumento de medición: para evitar sesgo por respuesta incorrecta, las preguntas son cerradas escritas en un cuestionario, uno por cada puesto.

- 6) Pretest: se realizó la encuesta a 20 puestos escogidos al azar para corregir errores de diseño del cuestionario (ver anexo 3).
- 7) Recogida de información: mediante la ayuda de 2 encuestadores se da inicio la encuesta, ellos son previamente capacitados con el fin de obtener la mayor cantidad de información posible (ver anexo 4).
- 8) Tabulación: fueron depuradas las respuestas de los cuestionarios y se codificaron para el análisis. Los resultados: se presenta en gráficas, planos, tablas.

3.2.3. *Cuantificación de los residuos orgánicos*

La cuantificación de los residuos orgánicos se realizó con el método de muestreo directo, que consiste en el pesaje de los residuos en la fuente generadora, para lo que es necesario determinar una muestra que sea representativa mediante un análisis estadístico y que tenga una confiabilidad adecuada (Castillo, 2012). En la figura 2 se puede observar el proceso que se llevó a cabo.

Se calculó el porcentaje de proporción de tamaño de la población en cada uno de los estratos (OPS/CEPIS, 2002) para asignar de manera proporcional los tamaños de muestra del muestreo aleatorio simple en toda la población mediante la siguiente fórmula (Chirino, J. et. al., 2016):

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 * N * p * q}{p * q * Z_{\alpha}^2 + (N - 1)e^2} \quad (1)$$

n = Tamaño de la muestra.

Z = Nivel de confianza (95%).

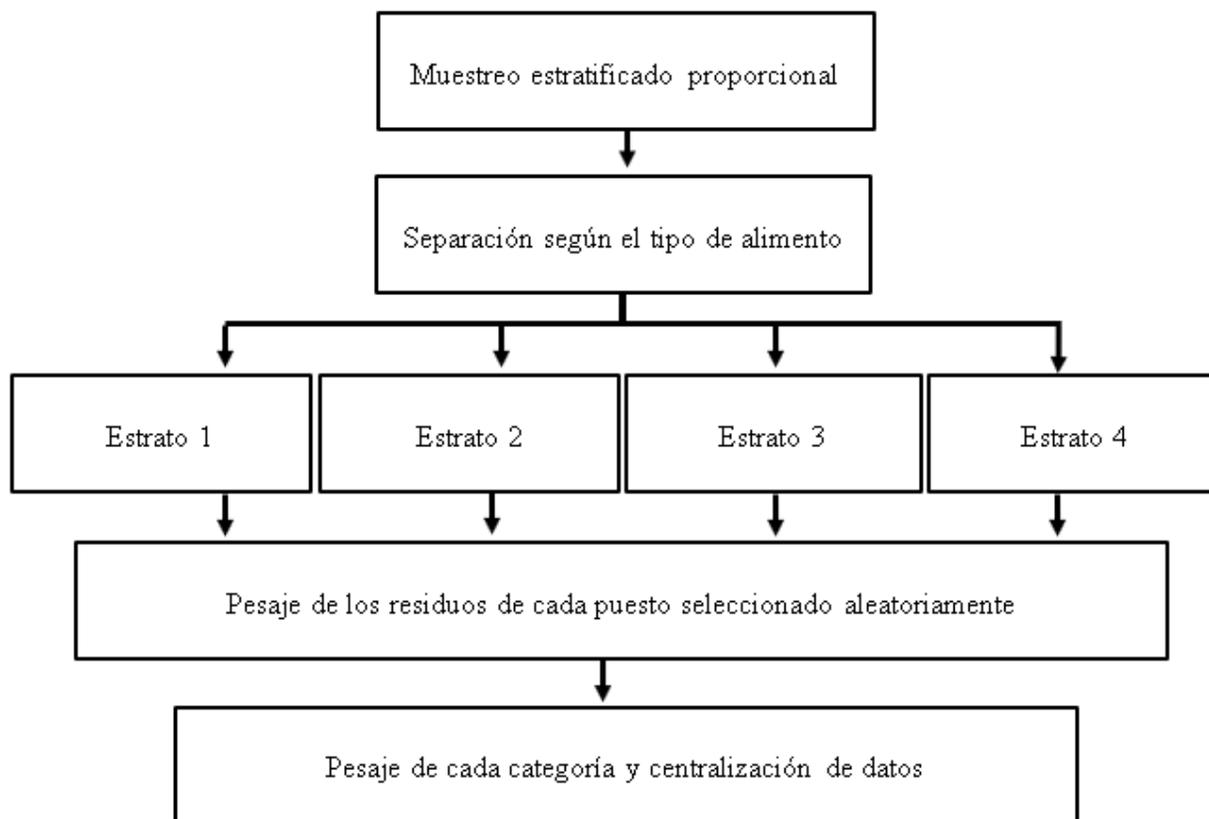
N = Población objeto de estudio.

p y q = Porcentajes de ocurrencia de un suceso, en este caso, p y q son 50%.

e = Error del muestreo (5%).

Figura 2

Muestreo aleatorio estratificado para el pesaje de residuos orgánicos.



Se asignó un código a cada puesto comercial que podía formar parte de la investigación y respondió que sí en la encuesta. Se enumeraron los códigos y mediante un generador de números aleatorio (EXCEL) se sortearon los puestos de acuerdo con el tamaño de muestra (Scheaffer, R. et. al., 2006).

Se procedió a realizar el pesaje a cada uno de los puestos sorteados (ver anexo 5), esto se hizo en dos días diferentes, el día que más venden y el día que menos venden, tomando en cuenta que el día que más venden es el día que más generan basura, esta información se obtuvo gracias a la encuesta, para esto, se conversó directamente con el propietario y se llegó a un acuerdo personal para realizar el pesaje.

Nota: En la figura de la izquierda se puede apreciar el pesaje en un puesto de juguería mientras que a la derecha un puesto de comida.

El pesaje se registró en una ficha que incluía el código del puesto, el peso de residuos orgánicos en ventas altas y el peso en ventas bajas, una vez concluido los pesajes se tabuló los resultados. Se calculó un promedio de los dos días, para tener un promedio diario de cada puesto y un promedio general de cada estrato en kilogramos y toneladas.

3.2.4. Caracterización de los residuos orgánicos

Para la caracterización, se tomó una muestra de 20 kg de residuo orgánico fresco por cada estrato, esto se vertió en un plástico y se picó las proporciones de mayor tamaño, se mezcló toda la muestra hasta homogenizar y se aplicó el método del cuarteo (ver figura 3), que consiste en dividir toda la muestra en 4 lotes (a, b, c, d) esto de acuerdo con la norma Mexicana NOM-AA-15-1985. De los 4 lotes, se eliminan dos a elección propia, con la condición de que deben cruzarse entre sí, luego, de los dos lotes restantes uno se caracterizó y el otro se llevó al laboratorio (Cantanhede, 2005).

Figura 3

Método de cuarteo



3.2.5. Análisis elemental

Se tomaron 3 muestras por cada estrato de 1200g, se le asignó un código a cada uno, fueron secadas a 120° C en una estufa Memmert, se fue registrando el peso cada 2 horas hasta que este sea constante, es decir, que no varíe en 50 mg o 4% (EPA, 2001). Las muestras secas fueron trituradas con una malla de 0.5 mm, luego se ubicó cada muestra en una bolsa de plástico con cierre ZIP, etiquetando su código y el peso de muestra seca, estas 12 muestras fueron enviadas a la Universidad Central del Ecuador para su análisis.

Las muestras fueron sometidas a una temperatura superior a 1000° C, esto se realiza en el analizador Elementar Vario Macro Cube, que se basa en el método de combustión de Dumas. Dando como resultado el porcentaje de nitrógeno, carbono, hidrógeno y azufre además de la desviación estándar de cada uno de los datos.

3.2.6. *Relación carbono-nitrógeno (C/N)*

Una vez obtenido los resultados del análisis elemental, se calcula la relación C/N de acuerdo con el porcentaje de incidencia que tiene cada estrato en la generación total diaria del Mercado Amazonas mediante el uso de la siguiente fórmula (Varnero, 2011):

$$R \frac{C}{N} = \frac{\%C_1 * Q_1 + \%C_2 * Q_2 + \dots \%C_n * Q_n}{\%N_1 * Q_1 + \%N_2 * Q_2 + \dots \%N_n * Q_n} \quad (2)$$

Donde:

$R \frac{C}{N}$ = Relación carbono-nitrógeno.

$\%C$ = Porcentaje de carbono contenido en la materia prima.

$\%N$ = Porcentaje de nitrógeno contenido en la materia prima.

Q = Peso fresco de la materia prima.

3.2.7. *Contenido de humedad*

Para obtener el contenido de humedad, se tomó una muestra de 300 g de la mezcla, se colocó en un crisol, se pesó en una balanza de precisión con error de 0.01 g, esto se registró como *peso muestra fresca* (W_1), se dejó secar en una estufa a 105° C durante 24 horas, se volvió a pesar el crisol con la muestra y se registró con la terminación *peso muestra seca* (W_2) (Collaguazo, G. et. al., 2016).

Obtenido estos datos, se calculó el porcentaje de humedad de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$\%H = \frac{W_1 - W_2}{W_2} * 100 \quad (3)$$

$\%H$ = Porcentaje de humedad

W_1 = Peso de la muestra fresca en el crisol

W_2 = Peso de la muestra seca en el crisol

3.2.8. Sólidos totales (TS)

Se tomó una muestra de 50 g, se introdujo en un crisol y se pesó, esto se registró como *peso total* (W_{total}), luego se llevó a la estufa y se dejó secar a 105° C durante 12 horas en una mufla, como se puede ver en la figura 4, se retiró dejando enfriar y se pesó, luego, se volvió a secar durante una hora y se dejó a enfriar, repitiendo el proceso hasta que el peso fue constante, es decir, que no varíe en más de 50 mg o en 4%, esto se registró como *peso seco* (W_{seco}) (EPA, 2001).

Figura 4

A) *Peso de muestra a secar* B) *Horno para secado*



Luego se utilizó la siguiente fórmula:

$$\%TS = \frac{W_{total} - W_{crisol}}{W_{seco} - W_{crisol}} \quad (4)$$

En donde:

$\%TS$ = Porcentaje de sólidos totales.

W_{total} = Peso de la muestra antes de secar más el crisol.

W_{crisol} = Peso del crisol.

W_{seco} = Peso de la muestra seca más el crisol.

3.2.9. Sólidos volátiles (TSV)

La misma muestra sobrante de los sólidos totales, se pesó y se registró como *peso total* (W_{total}), se llevó a secar a una mufla a 550° C por 2 horas. Luego, se dejó enfriar y se pesó el crisol con la muestra, para después volver a introducir en la mufla durante 30 minutos repitiendo el proceso hasta obtener un peso constante, es decir, que no varíe en 50 mg o 4%, esto se registró como *peso volátil* ($W_{volatil}$) (EPA, 2001).

Después del proceso se empleó la siguiente fórmula:

$$\%TSV = \frac{W_{volatil} - W_{crisol}}{W_{total} - W_{crisol}} \quad (5)$$

$\%TSV$ = Porcentaje de sólidos totales volátiles.

$W_{volatil}$ = Peso de la muestra seca más el crisol.

W_{crisol} = Peso del crisol.

W_{total} = Peso de la muestra antes de secar más el crisol.

3.3. Evaluación del rendimiento del biogás proveniente de diferentes mezclas

3.3.1. Preparación de las mezclas

Antes de entrar al proceso de digestión anaerobia, las mezclas fueron tratadas de manera que cumplan los parámetros físicos y químicos, primero se tomó una muestra de cada uno de los estratos en los diferentes puestos que se encuentran en el Mercado Amazonas. Luego, los residuos orgánicos fueron triturados y mezclados hasta obtener una homogeneidad en las muestras como se aprecia en la figura 5 (Varnero, 2011).

Figura 5*Muestras homogenizadas*

Nota: Muestras homogenizadas de los tres tipos de mezclas: M1, M2, M3.

3.3.2. Elaboración de los biorreactores y puesta en marcha

El biorreactor está compuesto por un frasco de vidrio de 1000 ml, manguera de suero por el cual se pueda extraer el gas formado en el interior y una tapa de caucho que no permite la salida de gas debido a sus propiedades elásticas. Primero, se esterilizó las botellas de vidrio en agua hirviendo a 100° C y después una mezcla de alcohol con agua para eliminar cualquier bacteria faltante, se dejó enfriar y se le etiquetó al azar asignando códigos para cada mezcla. Después, se agregó la muestra de cada uno de los biorreactores esterilizados, respetando la proporción para materia vegetal que es 1:3 (figura 6); es decir, para una parte de muestra tres partes de agua. En este caso se utilizó 200 ml de muestra y 600 ml de agua (Hernandez, 2012).

Figura 6

Pesaje de la muestra con y sin agua.



Se procedió a medir el pH de cada una de las muestras completas, esto con el fin de cumplir lo que nos dice (Botero, 1987), que debe estar entre un pH de 6.5 a 7.5 para un óptimo funcionamiento (figura 7). Luego, se insertó los tapones de caucho en los biorreactores, estos tapones tienen introducida una manguera de suero que servirá como conducto para el biogás y una válvula para abrir y cerrar el paso de esta. Una vez preparado todos los biorreactores se introdujeron en la termo espuma.

Figura 7

Medición de pH



Los biorreactores realizaron la digestión anaerobia en un área hermética como se puede apreciar en la figura 8. Para poder mantenerlos a una misma temperatura sin pérdida por diferencia de temperatura del ambiente, se utilizó un contenedor de termo espuma, en este se introdujo la

suficiente cantidad de agua para que abrace a los biorreactores, luego, se realizaron orificios para la salida de los conductos por dónde se extraerá el biogás y cada conducto cuenta con una válvula para poder abrir y cerrar en cualquier momento.

Figura 8

Inicio de proceso de biodigestión



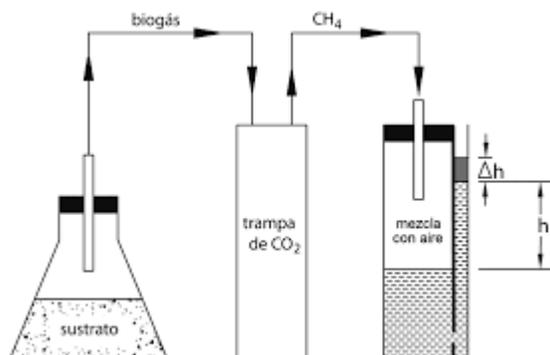
Nota: Los biorreactores se encuentran sumergidos en el agua mientras que el calentador sumergible lo mantiene a una temperatura de 31° C.

La temperatura se reguló con dos calentadores sumergibles de 100 W de potencia, a 31° C, esto durante un rango de 14 días (Díaz de Basurto, 2013). La agitación de los biorreactores se realizó de manera mecánica en una ocasión al día en el momento que se medía el volumen de biogás producido diariamente. Para la medición de temperatura y del pH, se utilizó el instrumento electroquímico OAKTON PC450, el pH se midió al inicio y al final del proceso.

3.4. Estimación del potencial energético del biogás a partir de diferentes mezclas

3.4.1. Medición de volumen de biogás por desplazamiento

El biogás que se produce en el biorreactor es desplazado hacia las probetas, las cuales contienen hidróxido de potasio (KOH), esta solución es capaz de eliminar el CO₂ del biogás y permitir el paso del CH₄ obteniendo el volumen del metano en mililitros como se observa en la figura 9; esta metodología fue desarrollada por la compañía MacMillan en Nueva York (Dennis, 1913).

Figura 9*Desplazamiento de biogás*

Nota: La trampa se compone de una solución de hidróxido de potasio (KOH).

3.4.2. Rendimiento de mezclas y potencial energético CH_4

El volumen de biogás producido en cada uno de los tratamientos se midió mediante el uso de una jeringa, que se fue extrayendo poco a poco desde la manguera flexible, esto conociendo primeramente la cantidad de volumen que posee la jeringa y asegurándose que no existan fugas o ingreso de aire en el reactor (Ramírez, 2016). Esto permitió conocer el porcentaje de metano de cada una de las mezclas para así calcular un rango de cada una de las muestras.

Para cálculo del potencial energética se empleará la siguiente fórmula.

$$Mw = \frac{M_i * RSO_d}{RSO_i} \quad (6)$$

Donde:

$Mw(m^3)$: m^3 de biogás

$M_i(m^3)$: m^3 de biogás

$RSO_d(kg)$: Materia orgánica disponible

$RSO_i(kg)$: Materia orgánica inicial

Una vez obtenido la producción de biogás, se calcula la cantidad energética que esta tiene en unidades de MJ .

$$Ew = \frac{Mw * CE}{1m^3 \text{ de biogás}} \quad (7)$$

Donde:

E_w (MJ): Cantidad de energía

M_w (m³): m³ de biogás

C_e : Contenido energético $\left(38 * \frac{V}{100}\right)$

V : Porcentaje de metano

Entonces la energía eléctrica (EEw) que puede producir el biogás se calcularía de la siguiente manera:

$$EE_w(kwh) = E_w(MJ) * \frac{0.2778kwh}{1MJ} \quad (8)$$

3.5. Análisis de varianza (ANOVA)

Se tabuló los datos recogidos en la medición de biogás y se procedió a analizar la varianza en el programa INFOSTAT. Se dividió en dos secciones, Mezcla: M1, M2, M3; Biogás: resultado obtenido de cada una de las repeticiones. De las nueve unidades experimentales, se obtuvo nueve resultados de biogás acumulado en los 14 días que duró el proceso.

En el INFOSTAT se agregan estos datos y se realiza el análisis de varianza, siendo la variable dependiente: Biogás y la variable independiente: Mezcla.

3.5.1. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk

La prueba de normalidad que se aplicó fue la de Shapiro-Wilk, debido a que la cantidad de datos que se tiene es menor a 50 (Pedrosa, 2015). Para realizar esta prueba, se necesita los residuos de la variable dependiente, en este caso, del biogás, una vez obtenido el resultado de la prueba, se debe comprobar que el valor de significación (p-valor) sea mayor al valor de significancia (α), que en este caso es 5%, por lo tanto, debe ser mayor a 0.05 (Echeverri, 2015).

3.5.2. Prueba de homocedasticidad de Levene

La prueba de homocedasticidad que se utilizó es la de Levene, esto es necesario para determinar si existe homogeneidad en las varianzas, para comprobar esto, el valor de significación (p-valor) debe ser de igual forma, mayor a 0.05 que es el valor de significancia (Rubio, 2012).

3.5.3. Método de comparación LSD de Fisher

En el programa INFOSTAT, una vez realizado la prueba de normalidad y de homogeneidad, se realiza el análisis de varianza, pero con una comparación, LSD de Fisher, con un nivel de significación del 5%. Esto permitirá determinar que mezcla tiene significancia respecto a sus medias.

3.6. Materiales utilizados

3.6.1. Caracterización de residuos orgánicos

Para la caracterización se necesitaron de los equipos que se enlistan a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 2

Materiales para la cuantificación

Equipo	Unidad	Característica
Balanza digital profesional	1	Capacidad de 40 kg a una división de 5g
Balanza Camry EK9270	1	Capacidad de 5 kg a una división de 1 gramo
Guantes	1	Guantes de caucho
Mascarilla	1	N95

3.6.2. Análisis elemental

Para el análisis elemental se requirieron de los siguientes equipos:

Tabla 3*Materiales para el análisis elemental*

Equipo	Unidad	Característica
Estufa memmert	1	Estufa con capacidad de hasta 220°C
Bandejas de aluminio	12	Bandejas resistentes a altas temperaturas
Molino de cuchillas Fritsh	1	Trituradora de material seco
Balanza Camry	1	Balanza con sensibilidad a 0.01 g
Elementar Vario Macrocube	1	Temperatura superior a 1000° C
Balanza de precisión	1	Con error de 0.01 g

3.6.3. Digestión anaerobia

Para la digestión anaerobia se requirieron de los siguientes equipos:

Tabla 4*Materiales para la digestión anaerobia*

Equipo	Unidad	Característica
Botellas de vidrio de 1000ml	9	Serán utilizados como biorreactores
Instrumento Electroquímico OAKTON PC450	1	Permite monitorear la temperatura y medir el pH
Balanza Camry	1	Balanza con sensibilidad a 0.01 g
Jeringas	4	De 15 y 20 ml
Equipo de venoclisis	12	Incluya válvula
Termo de espuma	1	Se mantiene constante la temperatura
Tapones de caucho	9	Prefabricados a la medida del pico de las botellas de vidrio

Capítulo IV

Resultados y Discusión

A continuación, se presentan todos los resultados obtenidos del presente proyecto de investigación en base a los objetivos específicos propuestos. Se discute desde la caracterización de los residuos orgánicos, las mezclas seleccionadas para biodigestión, los rendimientos de producción de biogás y su potencial energético.

4.1. Caracterización de los residuos orgánicos de diferente procedencia para su aplicación energética

4.1.1. Población total

En el mercado Amazonas de Ibarra hay 424 puestos comerciales que generan residuos orgánicos, denominados a partir de ahora como población total. Los puestos de Comida (CM) y de Vegetales y Hortalizas (VH) abarcan la mayor cantidad de puestos con 139 y 155 respectivamente, a menor escala se encuentran los puestos de Frutas (FT) y de Juguerías (JG) con 38 y 28. En Cárnicos (CR) hay 64 puestos que se clasifican según el tipo de carne que venden (pollo, res, borrego, cerdo).

Tabla 5

Estratos de puestos comerciales del mercado

Estrato	Número de puestos
Vegetales y Hortalizas	139
Frutas	38
Comida	155
Juguería	28
Cárnicos	64
Total	424

4.1.2. Encuesta

La encuesta se realizó en la mañana y en la tarde, de 08:00 a 11:00 y de 14:00 a 16:00 evitando interrumpir el horario de comida de los encuestados. Primero, se realizó la encuesta a 20

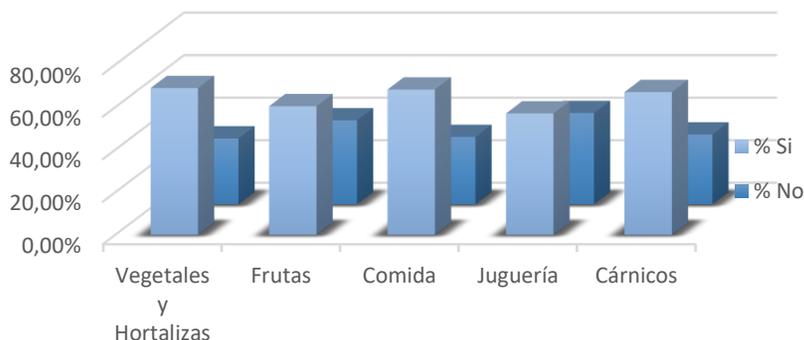
puestos y se corrigió una pregunta que los encuestados no se sentían cómodos a responder. Antes de iniciar cada encuesta, el encuestador asignaba un código al puesto, se presentaba y explicaba el proyecto de investigación, dando a conocer la problemática y la justificación de este. Los resultados se muestran a continuación.

4.1.2.1. Pregunta 1. ¿Está dispuesto a formar parte de la investigación?

En la figura 10 se observa que la mayoría de los encuestados estuvieron atraídos por la propuesta, el 67% de la población total respondió que “Sí”, esta población será tomada en cuenta para el tamaño muestral de la cuantificación de los residuos orgánicos. El 33% de la población total respondió que “No”, explicaron que no tenían el tiempo suficiente o no estaban interesados en la investigación.

Figura 10

Resultados obtenidos de la pregunta 1



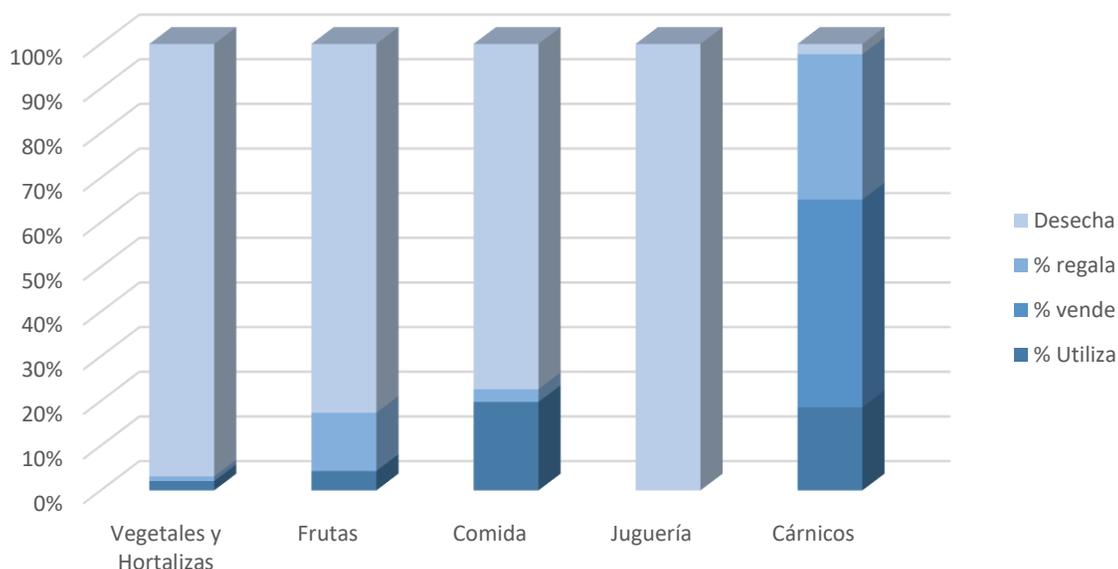
4.1.2.2. Pregunta 2. ¿Qué fin les da a los residuos orgánicos de su negocio?

En la figura 11 se ve que el 67% de los puestos de los puestos de VH desechan los residuos orgánicos, un bajo 2% lo utiliza y un 1% lo regala. Mientras que en los puestos de CM el 57% lo desecha en los recolectores, un 14% lo utiliza para animales, un pequeño 2% regala a personas que llegan a pedir al local. Respecto a los puestos de FT, un 3% lo utiliza para sus huertos y un 8% regala las frutas que estén en mal estado. En los puestos de JG se desecha todos los residuos que se producen debido a las grandes cantidades y lo ocupados que se encuentran. Es decir, en los puestos de VH, CM, JG y FT en su mayoría se desechan sin darle un valor agregado. En los puestos de CR, el 31% vende todo, incluido lo que no es consumo para las personas, porque se utiliza para alimentar los animales, un 12% utiliza estos residuos y el 22% regala los restos de carne a los

clientes si ellos lo piden, por último, el 2% desecha los residuos que le sobran, normalmente en cantidades pequeñas, por lo que, por falta de materia prima no se tomará en cuenta para el pesaje ni el resto de la investigación.

Figura 11

Resultados de la pregunta 2



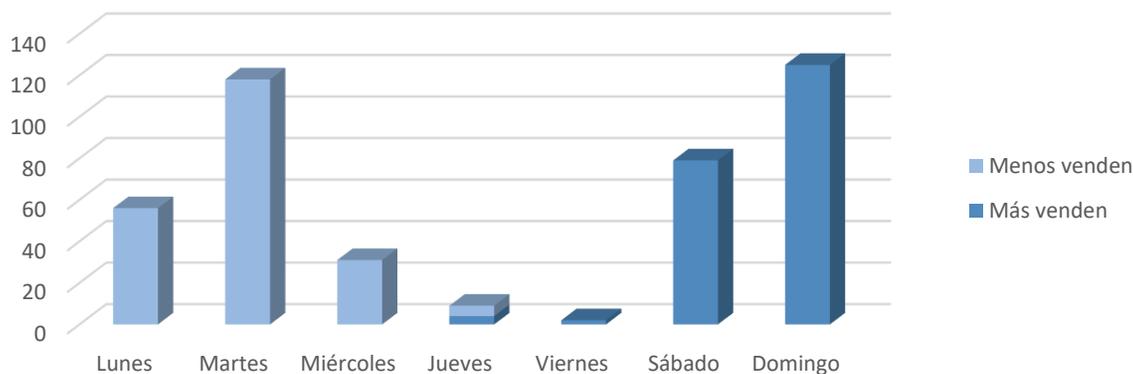
Notas: En el gráfico se muestra los resultados de todas las opciones de respuesta en la pregunta.

4.1.2.3. Pregunta 3. ¿Qué día de la semana vende más?

Se preguntó qué día de la semana vende más ya que esto se asemeja con el día que más generan basura debido a la complejidad de preguntar un volumen aproximado de basura que generan. Como se puede ver en la figura 12 los días que más venden y que por consiguiente son los días que más se genera residuos orgánicos son los fines de semana.

4.1.2.4. Pregunta 4. ¿Qué día de la semana vende menos?

Los días que menos venden son los lunes y martes (figura 12), esto permitió escoger los días de pesaje para realizar una media en la cuantificación de residuos.

Figura 12*Días de mayor y menor venta***4.1.3. Muestreo aleatorio estratificado**

Se utilizó la muestra de 210 puestos en total, que son los que aceptaron formar parte de la investigación, se eliminó el estrato de los puestos de CR, en la mayoría de los puestos los residuos orgánicos son reutilizados por los propietarios ya sea para vender, regalar o utilizar para ellos mismos. En la tabla 6 se desglosa la cantidad de puestos por cada uno de los estratos.

Tabla 6*Puestos comerciales por estrato*

Tipo de puesto	Cantidad	%
VH	93	44%
FT	19	9%
CM	82	39%
JG	16	8%
TOTAL	210	100%

Aplicando la ecuación 5 se obtiene que de los 210 puestos comerciales del mercado se debe realizar el pesaje a 136 puestos que son repartidos de acuerdo con el porcentaje del del tamaño de muestra, como se muestra a continuación:

Tabla 7*Tamaño de muestra por estrato*

Tipo de puesto	Cantidad	%	Tamaño de muestra
Vegetales y hortalizas	93	44%	60
Frutas	19	9%	13
Comida	82	39%	53
Juguería	16	8%	10
Total	210	100%	136

4.1.4. Cuantificación de los residuos orgánicos

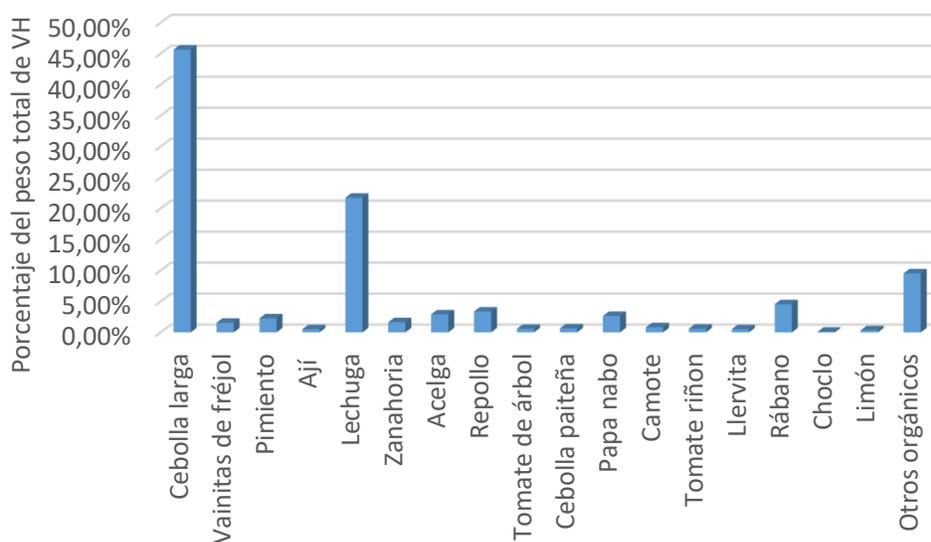
Antes de realizar el pesaje, se realizó un sorteo para seleccionar completamente al azar a los puestos que formarán parte de la muestra, esto se identificó mediante el código asignado a cada puesto. Los días de pesaje fueron, lunes y martes, para los días de menor venta y sábado y domingo para los de mayor venta, esto se realizó mediante un acuerdo personal con cada encargado de los puestos, los que generaban poca cantidad de residuos, lo acumulaban en un saco y era pesado en la balanza al finalizar la jornada, los que generaban mayor cantidad de residuos, se iba pesando a lo largo del día antes de que pase el recolector de basura. Con los resultados se realizó un promedio. En la tabla 8 se puede observar que los puestos de VH son los que más residuos orgánicos generan representando el 51% del total con 2.77 Tn, seguido de CM con el 32%, esto es debido a que la mayoría de los puestos pertenecen a estos dos estratos, mientras que FT y JG representan el 4 y 13% respectivamente. Diariamente, en el mercado Amazonas, se generan 5.41 Tn de residuos orgánicos en promedio.

Tabla 8*Pesaje medio diario y total por estratos*

Tipo	Pesaje medio diario (kg)	Pesaje medio diario (Tn)	%
Vegetales y hortalizas	2765.52	2.77	51%
Comida	1726.81	1.73	32%
Frutas	230.58	0.23	4%
Juguería	689.34	0.69	13%
Total	5412.24	5.41	100%

4.1.5. Caracterización de los residuos orgánicos

Como se puede observar en la figura 13, los puestos de VH están representados por cebolla larga (45.64%) y lechuga (21.74%) en su mayoría, esto sucede porque son deshojadas previo a su venta para darle un mejor aspecto visual. Los otros orgánicos son residuos que no se lograban identificar con claridad.

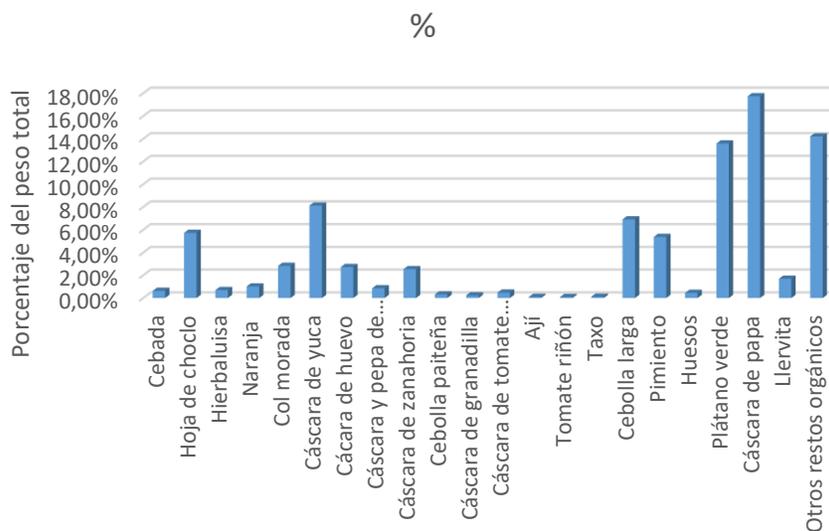
Figura 13*Caracterización de vegetales y hortalizas.*

En los puestos de comida, como se puede ver en la figura 14, las cáscaras de papas es el mayor residuo que se genera con cerca del 18%, de igual forma la cáscara de verde con casi el

14%, además se puede encontrar cáscara de yuca, de choclo, pimiento y tomate, que son ingredientes principales en la gastronomía de Ibarra.

Figura 14

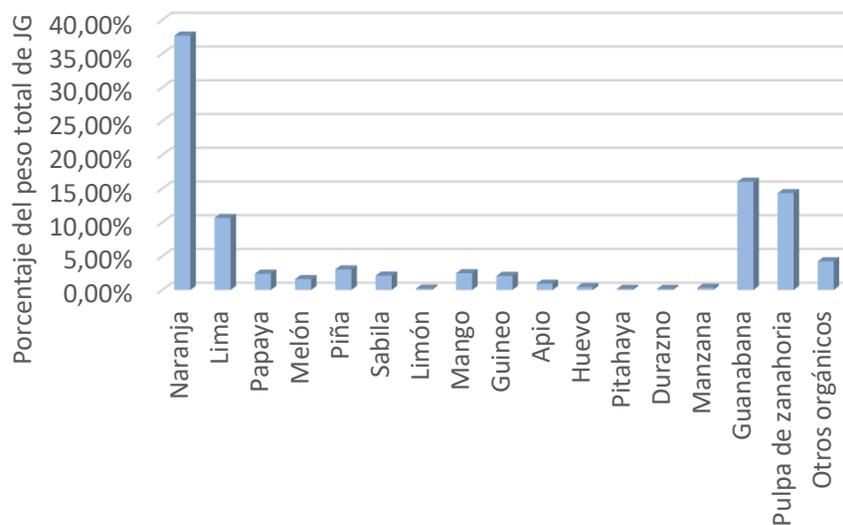
Caracterización de residuos de comida



Los puestos de juguería se encuentran representados por los residuos de la naranja con cerca del 38%, seguido de la guanábana y la zanahoria, con 16% y 14% respectivamente, que son las principales frutas que se consumen para jugo en la ciudad de Ibarra como se muestra en la figura 15.

Figura 15

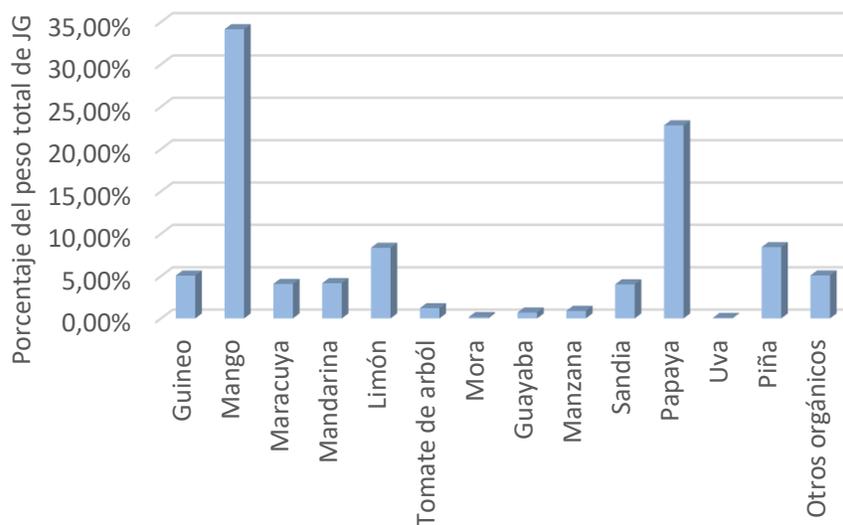
Caracterización de puestos de juguería



Los puestos de frutas se ven representados principalmente por el mango en un 34%, seguido de la papaya con un 23% y la piña con un 8%. Hay que tener en cuenta que esta caracterización puede variar acorde a la temporada y a la estación del año según se observa en la figura 16.

Figura 16

Caracterización de puestos de frutas



4.2. Análisis elemental

En la tabla 9 se puede observar los porcentajes de C, H, N, S. De cada uno de los estratos seleccionados, esto permitió conocer la relación carbono-nitrógeno (C/N) de las diferentes mezclas potenciales a utilizar en la biodigestión.

Tabla 9

Resultados del análisis elemental

Cod.	N [%]	C [%]	H [%]	S [%]
VH	5.24%	39.39%	3.52%	0.39%
CM	4.13%	43.30%	4.56%	0.28%
JG	1.76%	44.94%	1.73%	0.16%
FT	2.33%	43.28%	2.84%	0.16%

Nota: Los porcentajes mostrados son una media de 3 repeticiones analizadas.

4.3. Relación carbono-nitrógeno (C/N)

De los resultados presentados en la tabla 10, el estrato con mejor relación es el de juguería (26:1) que se encuentra dentro del rango recomendado por la FAO de una relación óptima de 30:1 hasta 20:1 (Varnero, 2011). Muy cerca de lo ideal se encuentra las muestras de frutas con una relación 19:1. Respecto a los estratos de vegetales y hortalizas y comida, se encuentran fuera de lo recomendado con una relación de 8:1 y 10:1 respectivamente.

Tabla 10

Relación C/N de los estratos

Cod.	N [%]	C [%]	Relación C/N
VH	5.2%	39.4%	8:1
CM	4.1%	43.3%	10:1
JG	1.8%	44.9%	26:1
FT	2.3%	43.3%	19:1

4.4. Formulación de mezclas

Mediante la ecuación 2, se formuló mezclas con diferentes proporciones con el fin de obtener una relación C/N dentro del rango 30:1 a 20:1 o a su vez que se acerque y ocupar la mayor

cantidad de residuos del mercado de acuerdo con su pesaje medio diario, en la tabla 11 se puede observar las mezclas.

Tabla 11

Formulación de mezclas potenciales para biogás

Proporciones	Relación C/N
JG70VH30	15:1
JG50FT50	22:1
JG50CM30FT20	17:1
JG60FT30CM5VH5	20:1
JG70FT10CM10VH10	18:1
JG60FT20CM15VH5	18:1
JG70FT15CM10VH5	20:1
JG13FT4CM32VH51	10:1

Para seleccionar las mezclas se tomó en cuenta una relación C/N dentro del rango ideal y que ocupe la mayor cantidad de residuos orgánicos, por lo que fueron seleccionadas dos mezclas potenciales, la primera con el 50% de frutas y 50% de jugos debido a que son los residuos con mejor relación y otra mezcla con todos los tipos de residuos y ocupando al máximo los residuos de comida y vegetales debido a que tienen la peor relación pero mayor cantidad de residuos, la mezcla que servirá de testigo es la que se obtiene a partir de las proporciones del promedio de residuos generados en el mercado como se muestra a continuación en la tabla 12.

Tabla 12

Mezclas seleccionadas debido a su relación C/N

Código	Proporciones	Relación C/N
Mezcla1	JG50FT50	22:1
Mezcla2	JG70FT15CM10VH5	20:1
Mezcla3	JG13FT4CM32VH51	10:1

4.5. Contenido de humedad, sólidos totales y sólidos volátiles

De acuerdo con la ecuación 3 de humedad, ecuación 4 de sólidos totales y ecuación 5 de sólidos volátiles, se obtuvo los siguientes resultados.

Tabla 13

Resultados de humedad, TS, TSV

Muestras	Humedad	Sólidos totales (TS)	Sólidos volátiles (TSV)
M1	78.83%	21.17%	4.97%
M2	80.98%	19.02%	5.37%
M3	79.46%	20.54%	6.99%

Cómo se puede observar, se pierde alrededor del 20% de humedad en las mezclas establecidas, por lo que las muestras deben ser tratadas antes de entrar a digestión anaerobia, ya que en biorreactores discontinuos es recomendable del 40 al 60% de TS, por lo que, es necesario iniciar el proceso con la suficiente cantidad de agua (Varnero et al. , 2014).

4.6. Rendimiento de biogás por mezclas

A continuación, se puede apreciar un resumen de los rendimientos de cada una de las mezclas con sus repeticiones y una media total de cada mezcla.

Tabla 14

Media del volumen de biogás generado

MUESTRA	M1 (ml)	M2 (ml)	M3 (ml)
A	1323	514.8	325.2
B	1136.5	556.6	480.3
C	1387	530.5	411.9
Media	1282.1	534	405.8

Después de 14 días de digestión anaerobia, se obtuvo que el rendimiento de biogás para M1 es de 30.28 mlCH₄/gST, para M2 es 14.03 mlCH₄/gST y M3 es 9.87 mlCH₄/gST. Por lo que, podemos afirmar que, en efecto, se cumple con lo dice (Varnero, 2011) en su manual de biogás,

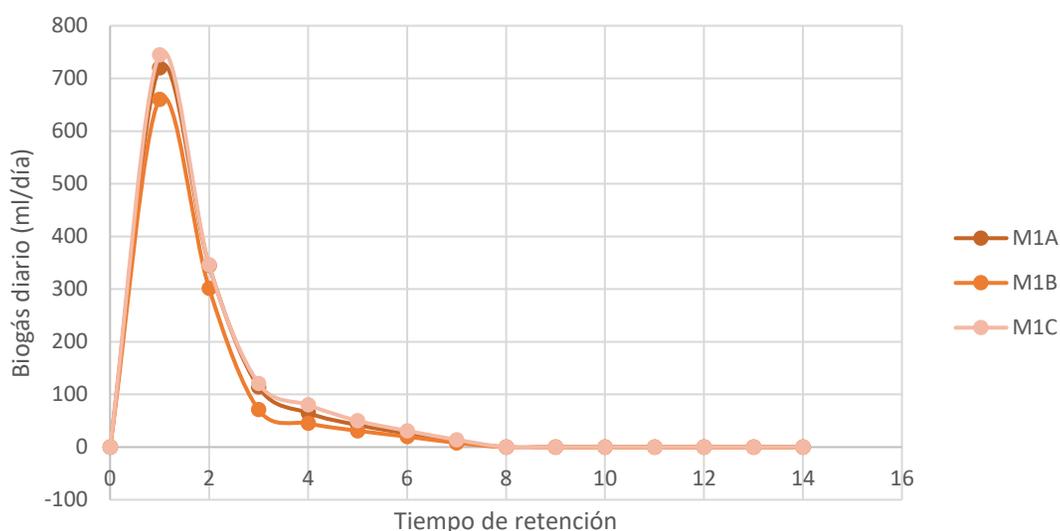
que es necesario una relación C/N de 30:1 a 20:1 para un mejor rendimiento de biogás. Puesto que, M3 era la mezcla con la relación más baja (10:1), mientras que M1 y M2, tenían la relación C/N dentro del rango óptimo (22:1 y 20:1 respectivamente).

4.6.1. Volumen de biogás diario y acumulado generado por M1

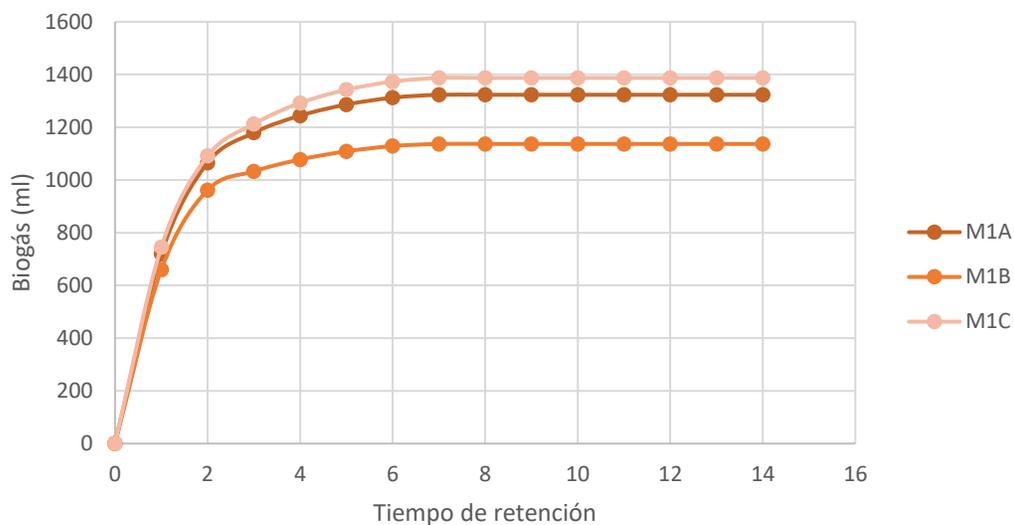
Como se puede apreciar en la figura 17, las repeticiones que obtuvieron un resultado favorable para M1 son la repetición A y C, mientras que la repetición B obtuvo un resultado menor, pero con una diferencia no tan significativa.

Figura 17

Volumen diario de biogás producido para la muestra M1



En la figura 18 se puede observar la producción acumulada de las tres repeticiones, siendo la repetición B, quien tiene una diferencia significativa en la curva respecto a C y A.

Figura 18*Volumen de biogás acumulado en ml***4.6.2. Volumen de biogás diario y acumulado generado por M2**

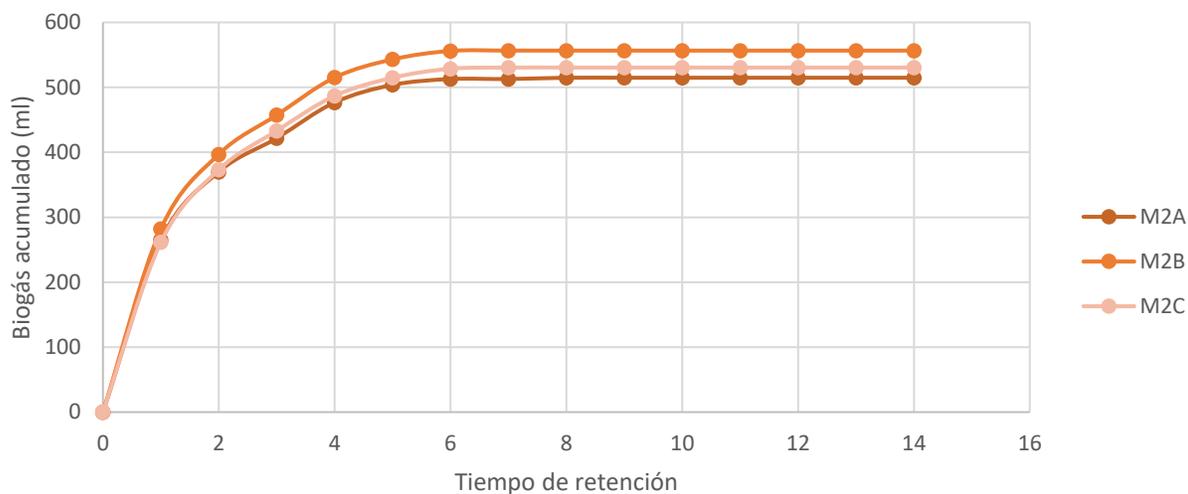
El volumen de biogás diario para M2, no tienen una diferencia significativa como se puede observar en la figura 19, la curva es similar en las tres repeticiones.

Figura 19*Producción diaria de Biogás para M2*

Respecto a la producción acumulada, se puede observar en la figura 20 con mayor claridad que la repetición B obtuvo ligeramente un mejor resultado respecto a las otras, sin embargo, la curva es similar en las tres repeticiones, al igual que TRH.

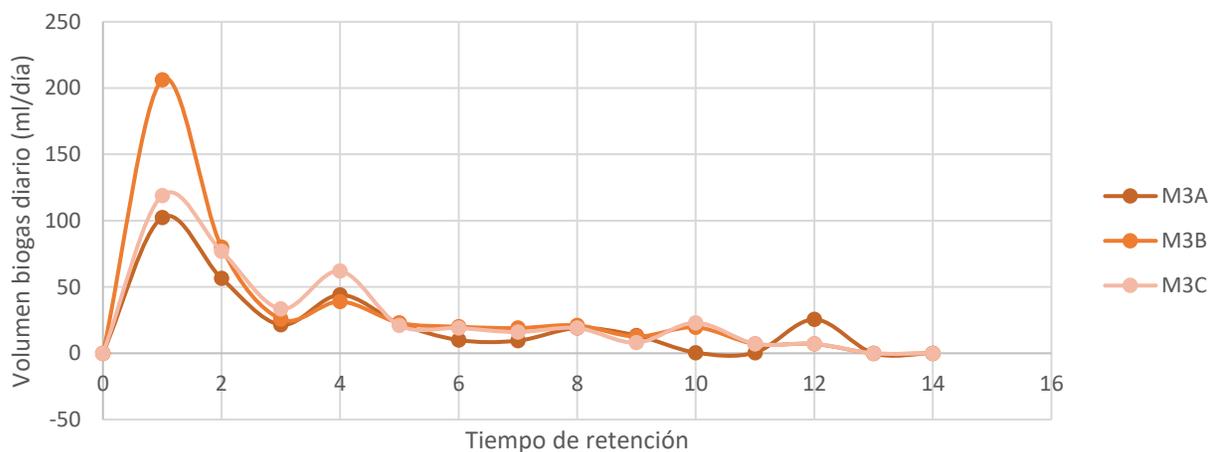
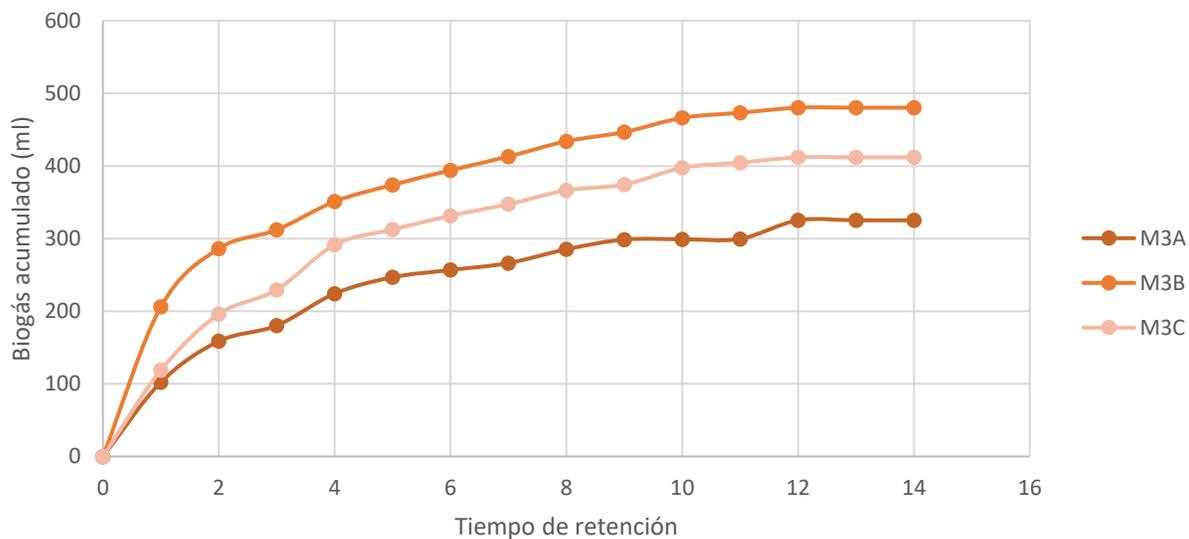
Figura 20

Producción acumulada de biogás para M2



4.6.3. Volumen de biogás diario y acumulado generado por M3

Según la figura 21 podemos afirmar que la repetición que obtuvo mejor rendimiento es la B, seguido de la C y por último la A. La diferencia de producción en cada repetición es notoria, esto pudo suceder debido a que la mezcla 3 es la que peor relación C/N obtuvo, sin embargo, la mezcla se formuló de acuerdo con la cantidad de residuos que posee el área de estudio, en la figura 22 se observa que las tres repeticiones tuvieron una producción estable.

Figura 21*Producción diaria de biogás para M3***Figura 22***Producción acumulada de biogás para M3*

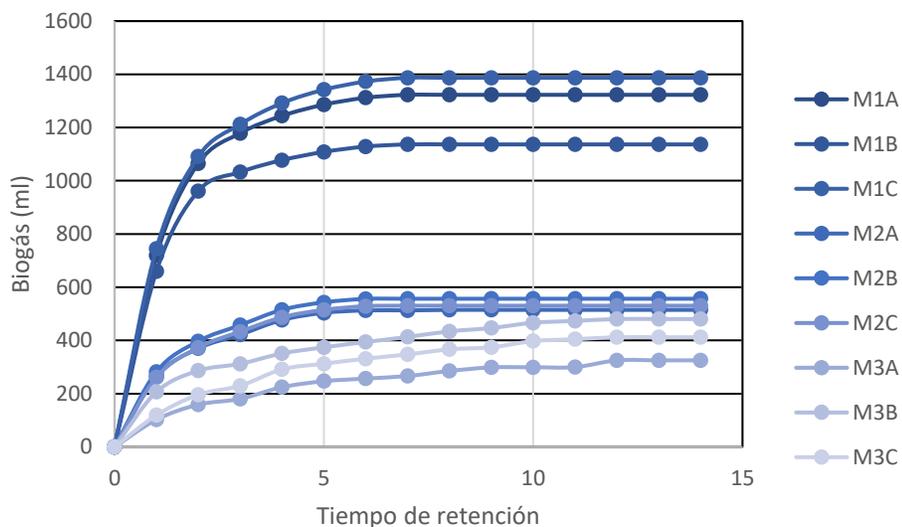
4.7. Volumen de biogás diario acumulado para las 9 unidades experimentales

En la figura 23 se observa que hay una diferencia significativa en las mezclas de M1 con respecto a las mezclas M2 y M3, siendo estas últimas semejantes. Las repeticiones de M1, alcanzan a los 8 días su máxima producción, coinciden con lo reportado por (Chen y Hashimoto, 1996)

quienes afirman que el periodo de latencia es más corto para estos sustratos. Sin embargo, la alta acidez que poseen inhibe la producción de biogás en el biorreactor.

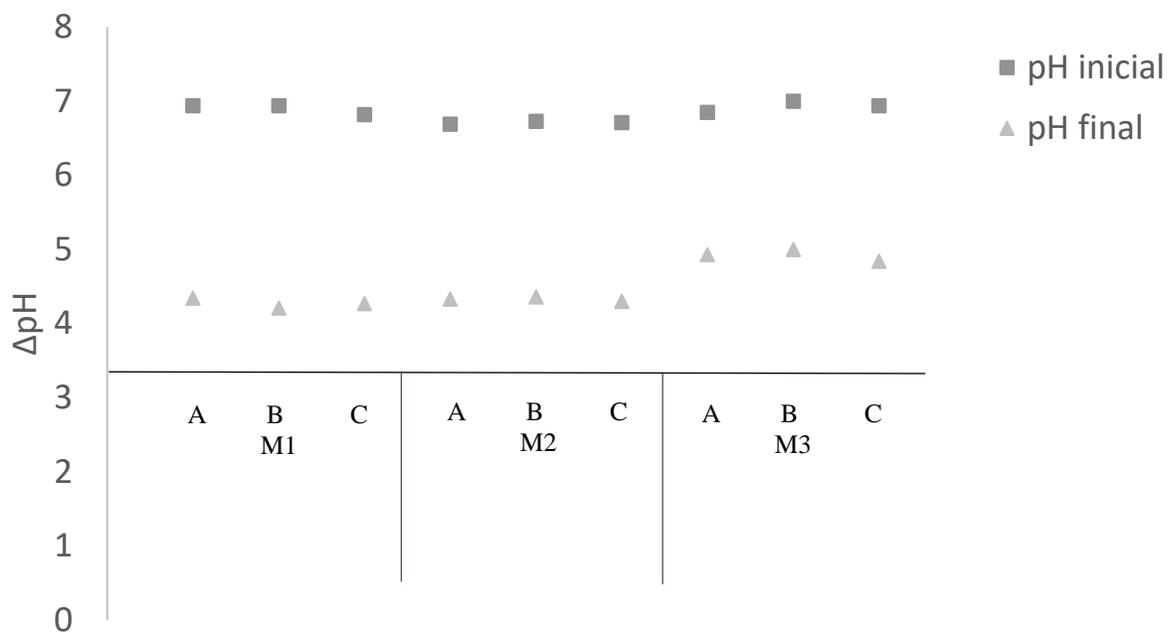
Figura 23

Biogás acumulado para todas las repeticiones



4.8. Diferencia de pH

Los niveles de pH en los biorreactores muestran la cantidad de ácidos acumulados en los 14 días que tardó el proceso de digestión anaerobia. En la figura 28 se puede observar que el pH inicial para las diferentes mezclas se encuentra entre 6.5 y 7.5, rango óptimo para digestión anaerobia. Los niveles de pH final se encuentran por debajo de 5 para las mezclas de M1 y M2, para M3 los niveles de pH se encuentran por arriba de 5 como se observa en la figura 24. Esto demuestra que en M1 y M2 se acumula mayor cantidad de ácidos que no pueden ser transformados a biogás por las bacterias metanogénicas, se acumulan tanto que neutralizan el proceso, mientras que para M3, este nivel es diferente, puede ser porque la mezcla contiene menor cantidad de jugos y frutas respecto a las demás mezclas.

Figura 24*Diferencia de pH por cada Mezcla***4.9. Análisis de varianza ANOVA.**

Se tabularon los datos para la ejecución del programa INFOSTAT, es necesario la mezcla y la cantidad de biogás producido.

Tabla 15*Tabulación de datos para ingresar a INFOSTAT*

Mezcla	Repetición	Biogás (ml)
M1	A	1323
M1	B	1136.5
M1	C	1387
M2	A	514.8
M2	B	556.6
M2	C	530.5
M3	A	325.2
M3	B	480.3
M3	C	411.9

El primer análisis de varianza sirvió para obtener los residuos, residuos absolutos y predichos de la variable dependiente, que servirá para realizar la prueba de normalidad y la prueba de homogeneidad. La prueba de Shapiro-Wilk, dio un valor p de significación de 0.8348. Este resultado, al ser mayor que α , cumple con que los datos se distribuyen normalmente (ver anexo 6). Mientras que la prueba de Levene (ver anexo 7) dio como resultado 0.1085, de igual forma, al ser mayor que α , asegura que las varianzas de los datos son homogéneas. Una vez comprobadas estas dos pruebas, se abre paso para un ANOVA, mediante una comparación.

La prueba LSD de Fisher (ver anexo 8) dio como resultado lo mostrado en la tabla 16.

Tabla 16

Comparación LSD de Fisher

Mezcla	Medias	n	Comparación
M1	1282.1	3	B
M2	533.9	3	A
M3	405.8	3	A

Nota: Las letras representan si existe o no diferencia en las medias.

Según los resultados, se puede deducir que no existe diferencia en las medias de M3 y M2, eso significa que M1 tiene una diferencia significativa respecto a las otras 2 mezclas. Este resultado se ve reflejado con lo obtenido en la relación C/N.

Tabla 17

Resumen estadístico de cada una de las mezclas

Muestra	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
M1	1282.1	130.1	10.1%
M2	533.9	21.1	3.9%
M3	405.8	77.7	19.1%

En la tabla 17 se muestra el resultado de coeficiente de variación, M2 es quién obtuvo el menor porcentaje de error a los datos obtenidos, seguido de M1 y por último M3 con el porcentaje de error mayor. Esto puede ser debido a la complicación que existía en medir el volumen de manera convencional, sin embargo, los valores son aceptables.

4.10. Porcentaje de CH₄

De acuerdo con la medición del porcentaje de CH₄ tenemos que la mezcla M2 y M3, obtuvieron mejores resultados, con un rango del 60 al 75% de metano, mientras que la mezcla M1, obtuvo del 60 al 70% de metano.

Tabla 18

Porcentaje de metano

Mezcla	% CH ₄
M1	60-70
M2	60-75
M3	60-75

4.11. Potencial energético eléctrico

La cantidad de energía eléctrica para M3 fue el resultado más alto, esto es debido a que se calculó de acuerdo con el pesaje promedio de residuos diarios del mercado Amazonas (5412.2 kg), mientras que M1 utiliza 460 kg y M2 la cantidad de 506 kg del pesaje total.

Tabla 19

Energía y electricidad producida

Energía	M1	M2	M3
MJ/año	68233.7	34191.5	279556.7
kWh/año	18955.3	9498.4	77660.8

4.12. Evaluación de las mezclas de acuerdo con sus resultados

En la tabla 20 se recolectó los resultados con mayor relevancia para evaluar la eficiencia y rendimiento de cada una. Esto con la finalidad de discutir cual mezcla es potencial para aplicar llegado al caso.

Tabla 20*Resultados para evaluar la mezcla con mejor rendimiento.*

Mezcla	M1	M2	M3
Media (ml/200gM)	1282.1	534	405.8
Rendimiento de biogás (mlCH ₄ /gST)	30.2	14.03	9.8
Desviación estándar	130.1	21.1	77.7
Varianza	16938	445.8	6041.9
Uso de materia orgánica respecto a la mezcla (kg)	459.9	506.9	5412.2
Contenido de CH ₄	60-70	60-75	60-75
Energía eléctrica (kWh/año)	18955	9498	77660.8

Respecto a M1, el punto fuerte es la producción de biogás, es superior en más del doble respecto a las demás mezclas, por lo que tiene mayor eficiencia de biogás en menor cantidad de residuos, el punto débil de esta mezcla es el limitado recurso orgánico debido a la mezcla de fruta y jugos en un 50/50. La mezcla M2, tiene como punto fuerte la desviación estándar, debido a que la investigación se realizó en biodigestores elaborados de manera casera, es el resultado con menor dispersión en los datos, dando una mayor confianza, el punto débil de esta mezcla es la energía eléctrica que se produce al año, es muy baja con diferencia. En M3, el punto más alto es la energía eléctrica y el recurso orgánico que posee, al ser la mezcla que utiliza todos los residuos orgánicos que se generan en el mercado, produce más electricidad que las otras pese al bajo rendimiento de biogás, esto puede ocasionar problemas en el dimensionamiento de una planta de biodigestión.

CAPÍTULO V

Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

- La caracterización que se realizó en el mercado Amazonas demuestra que existe en promedio diariamente 5.42 toneladas de residuos orgánicos. Los estratos de comida y vegetales-hortalizas reflejan el 83% del total, siendo desventajoso porque la relación C/N que contienen se encuentra fuera de lo permitido (menor a 10:1). Mientras que el 17% restante está dividido por los estratos de residuos de jugos y frutas, que contienen la relación C/N dentro del rango óptimo (entre 20:1 y 30:1).
- La mezcla 1 obtuvo un rendimiento de 30.2 mlCH₄/gST, la mezcla 2 un rendimiento de 14.03 mlCH₄/gST, y la mezcla 3 un rendimiento de 9.8 mlCH₄/gST. esto evidencia que la relación C/N es determinante en el proceso de biodigestión, la mezcla 1 solo contiene frutas y jugos, mientras que la mezcla 2 y 3, incluye los cuatro estratos. La mezcla 3, compuesta por el 51% de Vegetales y hortalizas, 32% de Comida, 13% de Juguería y 4% de frutas, presentó mayor estabilidad en la producción de biogás, finalizando el proceso con un nivel de pH superior a 5, demostrando que consume mayor cantidad de ácidos en la fase metanogénica.
- La mezcla 3 puede generar 77660.8 kWh/año si se llegase a utilizar todo el recurso orgánico, sin embargo, necesitarían de un biodigestor con capacidad de 5000kg. La mezcla 1 puede generar 18955 kWh/año y se necesitaría un biodigestor con capacidad de 500kg, siendo la mezcla 1 más rentable. Sin embargo, el contenido de CH₄ es mayor para la mezcla 3 con un 75% a un 70% que tiene la mezcla 1.
- La mezcla 1 obtuvo mejores resultados en los experimentos realizados, siendo los más importantes, la relación C/N y el rendimiento de biogás, sin embargo, es posible producir biogás con cualquiera de las tres mezclas.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda reciclar los residuos orgánicos del mercado Amazonas en el momento que se realiza la recolección diaria por medio de las carretas, esto facilitaría a realizar estudios con mayor precisión.
- Realizar el pesaje correspondiente a los camiones de basura que transportan los residuos del mercado Amazonas al relleno de la ciudad, esto con la finalidad de obtener un pesaje histórico y poder realizar un dimensionamiento para una posible planta de biogás.
- Incentivar a los comerciantes el uso de las energías renovables y explicar el importante impacto ambiental que existe en el mercado Amazonas debido a los residuos orgánicos vertidos, por culpa de estos, existe mal olor y roedores dentro del área comercial.
- Incluir en un próximo estudio los análisis fisicoquímicos para un posible dimensionamiento de un biodigestor semiindustrial, aplicar relaciones S/I a los estratos con menor relación carbono-nitrógeno.
- Realizar un estudio económico en la implementación tres biodigestores para las tres mezclas formuladas y obtener el máximo provecho del recurso orgánico que se genera en el mercado Amazonas de Ibarra.

Bibliografía

- Amin, A. (Diciembre de 2015). El potencial de competitividad de la energía renovable en términos de costos. *UNCHRONICLE*. Obtenido de Naciones Unidas: <https://www.un.org>
- ARCONEL. (2019). *Balance Nacional de Energía Eléctrica*. Quito: Agencia de Regulación y control de Electricidad.
- Arrieta, W. (2016). *Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado (Tesis de pregrado en Ingeniería Mecánico-Eléctrica)*. Piura: Universidad de Piura.
- Atil, H. (2001). Multiple Comparisons. *Journal of Biological Sciences*, 723-727.
- Atkinson, B. (1974). Reactores bioquímicos. España: Editorial Reverte.
- BEN. (2016). *Balance Energético Nacional 2016*. Quito: Ministerio de Coordinación de los Sectores Estratégicos.
- Blanco et al. (2021). *Bioenergía y Desarrollo sostenible: Una relación difícil*. Buenos Aires: Climate Transparency.
- Botero, R. (1987). *Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas: "Manual para su instalación, operación y utilización"*. Cali: CIPAV.
- Bouallagui, H. (2003). Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester. *Bioresource Technology*, 85-89.
- BP. (2019). *BP Statistical Review of World Energy*. London: Pureprint Group Limited.
- Bravo, M. (5 de Julio de 2018). *Ibarra produce 135 toneladas de basura a diario*. Obtenido de Diario El Norte: <https://www.elnorte.ec>
- Camps et al. (2008). *Los Biocombustibles*. Barcelona: Ediciones Mundi-Prensa.
- Cantanhede, A. (2005). Procedimientos estadísticos para los estudios de caracterización de residuos sólidos. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales*, Vol. 1, número 1, año 2006.
- Castillo, P. (2012). *Consultoría para la realización de un estudio de caracterización de residuos sólidos urbanos domésticos y asimilables domésticos para el Distrito Metropolitano de Quito*. Quito: EMASEO.
- CCA. (2017). *Caracterización y gestión de los residuos orgánicos en América del Norte*. Montreal: Comisión para la Cooperación Ambiental.

- Chen y Hashimoto. (1996). Effects of pH and substrate: inoculum ratio on batch methane fermentation. *Bioresource Technology*, 179-186.
- Chirino, J. et. al. (2016). *Introducción a las técnicas de muestreo*. Madrid: Pirámide.
- Collaguazo, G. et. al. (2016). Household Wastes Characterization and seasonal variations in Bihor county. Romania. *U.P.B. Sci. Bull*, 281-290.
- Costa, A. (2013). *Biomasa y Biocombustibles*. Madrid: AMV EDICIONES.
- Creus, A. (2009). *Energías Renovables*. Murcia: CANO PINA, S.L.
- De Juana, J. (2007). *Energías renovables para el desarrollo*. Madrid: PARANINFO.
- Dennis, L. (1913). *Gas Analysis*. New York: MacMillan.
- Díaz de Basurto, A. (2013). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgánicos generados en el mercado de Tiquipaya (Bolivia)*. Escola Tecnica Superior d Enginyeria de Camins, Canals i Ports, UPC 3185-3194: Tesis de Máster en Ingeniería Ambiental.
- Dirven , B. B., Pérez, R., Cáceres, R. J., Tito, A. T., Gómez , R. K., & Ticona, A. (2018). *El desarrollo rural establecido en las áreas Vulnerables*. Lima: Colección Racso.
- Eaton et al. (1995). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. EEUU: APHA.
- Echeverri et al. (2015). Comparación de pruebas de normalidad. *XXI Simp. Int. Estad*, 8-11.
- Echeverri, L. (2015). Comparación de pruebas de normalidad. *XXI Simp. Int. Estad*, 8-11.
- Elías et al. (2012). *Procesos biológicos: la digestión anaerobia y el compostaje*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- EPA. (2001). *Method 1684. Total, Fixed, and Volatile Solids in Water, Solids, and Biosolids*. Washington, DC: Office of Science and Technology Engineering and Analysis Division.
- FCCC. (1998). *Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. Kioto: Naciones Unidas.
- Fernández, J. (2009). *Tecnologías de las energías renovables*. MADRID: MUNDI-PRENSA.
- Fernández, J. (2010). *Optimización de la digestión anaerobia seca de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en reactores en fases de temperatura*. Universidad de Cádiz: Tesis Doctoral.
- Ferrer, J., & Seco, A. (2008). *Tratamiento biológico de aguas residuales*. México: Alfaomega.

- Gonzales, J. (2013). Alternativas para la reducción de emisiones de metano. *CEGESTI Éxito Empresarial*, 1-4.
- Hernandez, H. (2012). *Diseño de un Biodigestor Instrumentado Electrónicamente para la Generación de Biogás en Casa Habitación*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hiler, E., & Stout, B. (1985). *Biomass Energy: a Monograph*. Texas: Texas A&M University Press.
- Holguín, J. (18 de Junio de 2017). Biogás, alternativa energética para cuidar el ambiente. Guayaquil, Guayas, Ecuador.
- Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). *What a Waste: A global review of solid waste management*. Washington: World Bank.
- IEA. (13 de Octubre de 2020). *International Energy Agency*. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>
- INSHT. (2015). *Gestión de residuos: clasificación y tratamiento*. Madrid: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo.
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014*. Ginebra: R.K. Pachauri & L.A. Meyer.
- Karaj et al. (2009). Analysis of biomass residues potential for electrical energy generation in Albania. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 493-499.
- Kaza, S. (2018). *What a waste 2.0: una instantánea global de la gestión de desechos sólidos hasta 2050*. Washington DC: Banco Mundial.
- Manzanilla, R., & Marbán, N. (2012). *Aspectos biológicos de la estabilización aeróbica II*. Madrid: Mundiprensa.
- MEER. (2017). *Plan Nacional de eficiencia energética 2016-2035*. Quito: Manthra Comunicación.
- Metcalf, E. (1998). *Ingeniería de las Aguas Residuales Volumen 1*. Madrid: Mc-Graw Hill.
- MINAM. (2016). Contaminación ambiental causada por los residuos sólidos. En M. d. Ambiente, *Residuos sólidos* (págs. 3-5). Lima: Gráfica49 S.A.C.
- OPS & OMS. (2002). Análisis sectorial de residuos sólidos Ecuador. Quito, Pichincha, Ecuador.
- OPS/CEPIS. (2002). *Guía para caracterización de residuos sólidos domiciliarios*. Lima: OPS/CEPIS.
- Ordan et al. (2010). *Métodos estadísticos y econométricos en la empresa y para finanzas*. Sevilla: Universidad Pablo de Olavide.

- Pedrosa, I. (2015). Pruebas de bondad de ajuste en distribuciones simétricas, ¿qué estadístico utilizar? *Universitas psychologica*, 245-254.
- Pizarro, S. (2005). *Biodigestor*. Buenos Aires: Gráfica Pinter.
- Ramírez, G. (2016). *Valoración de la producción de biogas durante un proceso de digestión anaerobia con contenido ruminal de origen bovino bajo condiciones de tiempo, carga y temperatura diferenciales*. Universidad de Manizales: Tesis de posgrado.
- Rittman, B., & McCarty, P. (2001). *Environmental Biotechnology: Principles and Applications. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering*.
- Rubio, M. (2012). Cómo aplicar las pruebas paramétricas bivariadas t de Student y ANOVA en SPSS. *REIRE. Revista d'Innovació i Recerca en Educació*, 83-100.
- Scheaffer, R. et. al. (2006). *Elementos de Muestreo*. Madrid: Thomson.
- Tovar, G. L. (1986). *El asentamiento y la segregación de los Blancos y Mestizos*. Bogotá: Cengage.
- UNFCCC. (2015). Acuerdo de París. *Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático 2015* (págs. 1-18). París: Naciones Unidas.
- Varnero et al. . (2014). Producción de biogás y enmiendas orgánicas a partir del residuo olivícola (alperujo). *Información Tecnológica*, 73-78.
- Varnero, M. (2011). *Manual del Biogás*. Santiago de Chile: FAO.
- Verma, S. (2002). *Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes*. Columbia University: Master of science degree in earth resources engineering.
- Winkler, M. (1994). *Tratamiento Biológico de Aguas de Desecho*. México: Limusa.
- Zegers, F. (1990). *Microbiología*. Países Bajos: Universidad Agrícola de Wageningen.

ANEXOS

7.1. Anexo 1: Solicitud de pesaje

SOLICITUD: Pesaje de residuos orgánicos

Fecha: 23 de octubre del 2019

Dirigido a: Ab. Marco Parreño COORDINADOR DE SISTEMATIZACIÓN DE MERCADOS

Solicitante: Geovanny Miguel Gualle Bermeo

Asunto: Solicito a usted muy comedidamente, que me autorice a realizar el pesaje de los residuos orgánicos generados en el día, de ciertos puestos escogidos aleatoriamente del mercado Amazonas de Ibarra durante el periodo de una semana, sin perjudicar el trabajo del propietario del puesto, con la finalidad de obtener datos para la investigación de Tesis que estoy realizando en la Universidad Técnica del Norte. Por lo que, se espera la colaboración de los propietarios o encargados para la realización del pesaje.

Constancia de presentación:

Fecha:

Hora:

Firma:

7.2. Anexo 2: Encuesta



Universidad Técnica del Norte
Investigación de Tesis
Ingeniería en Energías Renovables

Objetivo: Invitar a los propietarios de los puestos del Mercado Amazonas de Ibarra a formar parte de la investigación.

Encuesta dirigida a los propietarios o encargados de los puestos de alimentos del Mercado Amazonas.

Tipo de puesto: _____

Código: _____

1. ¿Está dispuesto a formar parte de la investigación?

Sí _____

No _____

2. ¿Qué fin le da a los residuos orgánicos de su negocio?

Desechar _____

Uso propio _____

Regalar _____

Vender _____

3. ¿Qué día de la semana vende más?

Lunes _____ Martes _____

Miércoles _____ Jueves _____

Viernes _____ Sábado _____

Domingo _____

4. ¿Qué día de la semana vende menos?

Lunes _____ Martes _____

Miércoles _____ Jueves _____

Viernes _____ Sábado _____

Domingo _____

7.3. Anexo 3: Pretest de la encuesta



Universidad Técnica del Norte
Investigación de Tesis
Ingeniería en Energías Renovables

Objetivo: Invitar a los propietarios de los puestos del Mercado Amazonas de Ibarra a formar parte de la investigación con total voluntad.

Encuesta dirigida a los propietarios o encargados de los puestos de alimentos del Mercado Amazonas.

N.º de encuesta: _____

Tipo de puesto: _____

1. ¿Estaría dispuesto a formar parte de la investigación?

Sí _____

No _____

2. ¿Qué día de la semana vende más?

Lunes _____ Martes _____

Miércoles _____ Jueves _____

Viernes _____ Sábado _____

Domingo _____

3. ¿Qué día de la semana vende menos?

Lunes _____ Martes _____

Miércoles _____ Jueves _____

Viernes _____ Sábado _____

Domingo _____

4. ¿Cuántas fundas de basura orgánica desecha al día?

7.4. Anexo 4: Aplicación de encuesta en el mercado Amazonas



7.5. Anexo 5: Pesaje en la fuente generadora



7.6. Anexo 6: Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
RDUO BIOGÁS	9	0,00	76,53	0,96	0,8348

7.7. Anexo 7: Prueba de homogeneidad de Levene

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	10102,67	2	5051,33	3,29	0,1085
MEZCLA	10102,67	2	5051,33	3,29	0,1085
Error	9215,09	6	1535,85		
Total	19317,76	8			

7.8. Anexo 8: Comparación LSD-Fisher

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1344248,47	2	672124,23	86,07	<0,0001
Mezcla	1344248,47	2	672124,23	86,07	<0,0001
Error	46851,63	6	7808,61		
Total	1391100,10	8			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=176,54660

Error: 7808,6056 gl: 6

Mezcla	Medias	n	E.E.	
M3	405,80	3	51,02	A
M2	533,97	3	51,02	A
M1	1282,17	3	51,02	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)