

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Ambiental



TESIS

**Producción de biogás a partir de la digestión anaeróbica de
residuos de descarte de la piel de Paiche (*Arapaima gigas*)**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Ambiental

Elaborado por

Fidel Arturo Huarcaylata Tamariz

 [0009-0007-1163-9300](https://orcid.org/0009-0007-1163-9300)

Asesor

Dr. Chirinos Collantes Hugo David

 [0000-0003-3450-7320](https://orcid.org/0000-0003-3450-7320)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Huarcaylata Tamaríz [1]
Referencia/Reference	[1] F. Huarcaylata Tamaríz, “ <i>Producción de biogás a partir de la digestión anaeróbica de residuos de descarte de la piel de Paiche (Arapaima gigas)</i> ” [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Huarcaylata, 2025)
Referencia/Reference	Huarcaylata, F.A. (2025). <i>Producción de biogás a partir de la digestión anaeróbica de residuos de descarte de la piel de Paiche (Arapaima gigas)</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

A Dios, a mi abuela Antonina, a mis padres, Fidel Huarcaylata y Catalina Tamariz, por su apoyo incondicional. A mi hermana Yasmín y mis sobrinos, Thiago y Ashley; quienes sin saber lograron brindarme el amor más bonito y ser un motivo importante. A mi novia - Gaby por sus ánimos compartidos. A mis familiares, profesores y amigos, deseando que se encuentren orgullosos por su valioso apoyo en diversas etapas de la elaboración de este trabajo de investigación.

Agradecimientos

Expreso mi sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que contribuyeron a hacer posible la culminación de esta investigación.

En primer lugar, agradezco a Dios, por brindarme la determinación, perseverancia, salud y bienestar para terminar esta investigación.

Agradezco a mis padres, mis sobrinos y familiares por darme su amor incondicional y sus palabras de ánimo, su sacrificio y detalles para este proyecto.

Agradezco a mis amigos por su apoyo, palabras de aliento y amistad sincera durante este viaje.

Quiero agradecer a mi asesor el Dr. Hugo Chirinos, a mi mentora la Ing. Liliana Marrufo, a los especialistas en biogás: la Ing. Silvia Barrenechea y el Blgo. Julio Reyes, por compartirme su experiencia y aportar a que esta investigación sea más significativa.

Y por último quiero reconocer la contribución de la Universidad Nacional de Ingeniera, CITEccal Lima, ITP – RED CITES, el laboratorio de fisicoquímica y de Biogás, lugares que me brindaron las facilidades para adquirir conocimientos teóricos y prácticos.

A todos en general les estoy eternamente agradecido.

Resumen

La descomposición de residuos sólidos orgánicos en rellenos sanitarios o botaderos libera gases de efecto invernadero, por lo que su valorización energética representa un aporte significativo a la sostenibilidad ambiental. Además, las energías renovables desempeñan un papel fundamental en la mitigación del cambio climático. En la presente tesis se evaluó la producción de biogás a partir de residuos del descarte de pieles de Paiche (*Arapaima gigas*), obtenidos del proceso de curtido en el CITEccal – Lima. Se planteó la hipótesis de que este residuo, presenta un rendimiento de biogás superior al de otro residuo pesquero, reportados en la bibliografía revisada.

Inicialmente, se realizó un análisis químico proximal para determinar la composición fisicoquímica del residuo. Posteriormente, se llevó a cabo la biodigestión anaeróbica en diferentes porcentajes de dilución de este residuo, junto con el inóculo del laboratorio de biogás del ITP, utilizando biodigestores tipo batch con agitadores continuos y siguiendo el Estandar Aleman VDI 4630 (2016). Los experimentos concluyeron a los 57 días, mostrando que las muestras de residuos diluidas al 12,5% y 25% lograron rendimientos de biogás de 384,75 *Ln/Kg SV* y 337,48 *Ln/Kg SV* respectivamente, siendo valores muy cercanos al valor de 400,00 *Ln/Kg SV* (residuos de la piel de Tilapia); valor planteado en la hipótesis.

Finalmente, se analizó el comportamiento temporal de la producción acumulada de biogás mediante modelos dinámicos. El modelo de Gompertz modificado presentó un mejor ajuste comparado con el modelo de Primer Orden, probablemente debido a la ausencia de producción de biogás en los primeros días y al comportamiento sigmoideo, posiblemente influido por sustancias inhibidoras.

Palabras clave — Digestión anaerobia, potencial de biogás, rendimiento de biogás, modelos dinámicos, sustancias inhibidoras.

Abstract

The decomposition of organic solid waste in landfills or dumps releases greenhouse gases, so their energy recovery represents a significant contribution to environmental sustainability. In addition, renewable energies play a fundamental role in climate change mitigation. This thesis evaluated the production of biogas from the waste of Paiche (*Arapaima gigas*) skin fleshing, obtained from the tanning process at CITEccal - Lima. It was hypothesized that this waste has a higher biogas yield than other fishery waste reported in the literature.

Initially, a proximate chemical analysis was carried out to determine the physicochemical composition of the waste. Subsequently, anaerobic biodigestion was carried out at different dilution percentages of this waste, together with the inoculum from the ITP biogas laboratory, using batch type biodigesters with continuous stirrers and following the German Standard VDI 4630 (2016). The experiments concluded after 57 days, showing that the waste samples diluted at 12.5% and 25% achieved biogas yields of 384.75 Ln/Kg SV and 337.48 Ln/Kg SV respectively, being values very close to the value of 400.00 Ln/Kg SV (Tilapia skin waste); value raised in the hypothesis.

Finally, the temporal behavior of cumulative biogas production was analyzed using dynamic models. The modified Gompertz model presented a better fit compared to the First Order model, probably due to the absence of biogas production in the first days and the sigmoidal behavior, possibly influenced by inhibitory substances.

Keywords - Anaerobic digestion, biogas potential, biogas yield, dynamic models, inhibitory substances.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	iv
Abstract	v
Introducción	xiii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Título.....	1
1.2 Generalidades.....	1
1.3 Descripción del problema de investigación.....	2
1.3.1 Problema de investigación.....	3
1.4 Antecedentes investigativos	3
1.4.1 Antecedentes Internacionales.....	3
1.4.2 Antecedentes Nacionales	5
1.5 Justificación	6
1.5.1 Justificación metodológica	6
1.5.2 Justificación social	7
1.5.3 Justificación económica.....	7
1.5.4 Justificación ambiental.....	8
1.6 Objetivos del estudio.....	8
1.6.1 Objetivo general	8
1.6.2 Objetivos específicos.....	8
1.7 Hipótesis	8
1.7.1 Hipótesis específicas	9

Capítulo II. Marco teórico y Marco legal	10
2.1 Marco teórico	10
2.1.1 Industria de la curtiembre	10
2.1.2 Curtiembre de pieles de Paiche (Arapaima gigas)	10
2.1.3 Paiche (Arapaima gigas)	10
2.1.4 Descarne de la piel del Paiche (Arapaima gigas).....	12
2.1.5 Residuos del descarne de la piel del Paiche (Arapaima gigas).....	12
2.1.6 Residuos orgánicos	13
2.1.7 Relleno sanitario.....	13
2.1.8 Economía circular	13
2.1.9 Huella de carbono	14
2.1.10 Biogás	14
2.1.11 Digestión anaeróbica.....	16
2.1.12 Inoculo.....	18
2.1.13 Biodigestor	18
2.1.14 Estándar Alemán VDI 4630 (2016)	19
2.1.15 Factores que influyen en la digestión anaeróbica	19
2.1.16 Materia orgánica.....	22
2.1.17 Potencial de biogás	22
2.1.18 Rendimiento de biogás	22
2.1.19 Biodigestor tipo batch	23
2.1.20 Tiempo de residencia	23
2.1.21 Análisis químico proximal	23

2.1.22 Relación FOS/TAC	24
2.1.23 Software y pruebas estadísticas	24
2.1.24 Modelos dinámicos de producción de biogás.....	26
2.2 Marco legal	27
capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	28
3.1 Diseño de investigación	28
3.1.1 Nivel de investigación	28
3.1.2 Población de estudio	28
3.1.3 Muestra de estudio	28
3.2 Manejo de la muestra.....	28
3.2.1 Identificación de la muestra de residuos de Paiche	28
3.2.2 Obtención, transporte, envío y almacenamiento de la muestra.....	29
3.3 Acondicionamiento de la muestra de laboratorio para sus análisis.....	30
3.4 Obtención del inóculo.....	31
3.5 Definición de variables	31
3.5.1 Variable independiente	31
3.5.2 Variable dependiente.....	31
3.5.3 Variables operacionales	31
3.6 Materiales, reactivos e insumos químicos, y equipos usados para el desarrollo de la tesis	31
3.6.1 Materiales.....	31
3.6.2 Reactivos e insumos químicos	32
3.6.3 Equipos	33

3.7 Metodologías	33
3.7.1 Análisis proximal del residuo de Paiche.....	33
3.7.2 Determinación del potencial teórico de biogás del residuo de Paiche (Arapaima gigas)	40
3.7.3 Determinación del rendimiento de biogás, del residuo de Paiche	42
3.7.4 Determinación del modelo dinámico de producción acumulativa de biogás...	51
3.8 Métodos estadísticos	51
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados	52
4.1 Potencial teórico del biogás del residuo del descarte de la piel de Paiche	52
4.2 Determinación del rendimiento de biogás del residuo de Paiche.....	54
4.3 Análisis del modelo dinámico de producción acumulativa de biogás	60
4.3.1 Análisis de los modelos dinámicos para el residuo de Descarte al 12.5%	60
4.3.2 Análisis de los modelos dinámicos para el residuo de Descarte al 25.0%	62
4.4 Contraste de la hipótesis	63
4.4.1 Análisis estadístico del rendimiento de biogás.....	64
4.4.2 Análisis estadístico de los modelos dinámicos.....	65
Conclusiones	66
Recomendaciones	67
Referencias bibliográficas	68
Anexos	75

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Clasificación del Paiche (<i>Arapaima gigas</i>)	11
Tabla 2: Composición química proximal de la carne de Paiche (<i>Arapaima gigas</i>) adulto	12
Tabla 3: Parámetros analizados del residuo de Paiche (<i>Arapaima gigas</i>).....	33
Tabla 4: Potencial teórico de biogás por tipo de macronutriente	41
Tabla 5: Requisitos para el sistema batch según la VDI 4630(2016)	42
Tabla 6: Cantidad de inóculo vertida por botella	46
Tabla 7: Combinaciones en el sistema batch.....	47
Tabla 8: Parámetros de la mezcla en el batch	49
Tabla 9: Evaluación de la relación FOS/TAC	50
Tabla 10: Modelos dinámicos de producción acumulativa de biogás	51
Tabla 11: Composición química proximal del residuo de Paiche por porcentaje en peso	52
Tabla 12: Composición química proximal del residuo de Paiche en base seca.....	52
Tabla 13: Potencial teórico de biogás del descarte de la piel de Paiche	53
Tabla 14: Potencial teórico de biogás por tipo de macronutriente	53
Tabla 15: Cantidad de SV empleados en las botellas de fermentación	54
Tabla 16: Resultados del rendimiento de biogás diario por tipo de sustrato.....	55
Tabla 17: Rendimientos máximos de biogás para diversas especies de pez.....	57
Tabla 18: Resultados de mediciones del pH y FOS/TAC en las botellas	59
Tabla 19: Resultados de producción acumulativa de biogás para el residuo de descarte al 12.5% según modelos dinámicos:	60

Tabla 20: Resultados de producción acumulativa de biogás para el residuo de descarte al 25.0% según modelos dinámicos:	62
Tabla 21: Análisis estadístico - prueba Kolmogorov -Smirnov en la producción acumulativa de biogás	64
Tabla 22: Análisis estadístico - prueba Kruskal – Walls en la producción acumulativa de biogás	64
Tabla 23: Resultados de los parámetros en los modelos dinámicos	65

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Registro de <i>Arapaima gigas</i>	11
Figura 2: Diagrama de la mariposa de la economía circular.....	14
Figura 3: Proceso de digestión anaeróbica	16
Figura 4: Obtención y almacenamiento de la muestra de residuos	29
Figura 5: Preparación de la muestra de residuos.....	30
Figura 6: Composición de la materia fresca	40
Figura 7: Instalación del sistema batch	44
Figura 8: Producción de biogás en función del tiempo	58

Introducción

El cambio climático es uno de los desafíos globales más críticos del siglo XXI, impulsado en gran parte por actividades antrópicas como lo son: el uso de energías no renovables, la generación y disposición inadecuada de residuos sólidos. En el Perú, una problemática ambiental es debida a que gran porcentaje de los residuos sólidos generados diariamente terminan en lugares inadecuados, como botaderos; y en el mejor de los casos, en rellenos sanitarios. A esta situación se suma el uso indiscriminado de energías no renovables.

La industria de la curtiembre no es ajena a esta problemática, ya que genera residuos provenientes de las pieles de diversas especies animales, sin embargo, muchos de estos residuos poseen un considerable potencial de valorización, ya sea energética o material. Por ello, esta investigación se enfoca en promover la valorización energética de los residuos del subproceso de descarte de pieles de Paiche (*Arapaima gigas*) en las industrias de curtiembre, impulsando el uso de energías sostenibles y minimizando la generación de residuos sólidos; fomentando procesos respetuosos con el medio ambiente.

En este contexto, se plantea el uso de biogás como fuente de energía renovable, obtenida mediante la tecnología de digestión anaeróbica. Los residuos de descarte de pieles de Paiche (en adelante, residuos de Paiche) serán procesados en biodigestores tipo batch junto con un inóculo (conjunto de diversos microorganismos anaeróbicos), los cuales convertirán gran parte de la materia orgánica en biogás.

Asimismo, se evaluará la producción de biogás, considerando diversos factores que influyen en su rendimiento. Comprender estos factores permitirá optimizar los resultados y aumentar la capacidad de carga para la producción de biogás a escala real, lo que contribuirá a la reducción de residuos sólidos destinados a la disposición final.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Título

Producción de biogás a partir de la digestión anaeróbica de residuos del descarte de la piel del Paiche (*Arapaima gigas*).

1.2 Generalidades

En la actualidad, el cuero se utiliza y está presente en muchos productos de uso diario. No obstante, la industria del cuero genera impactos ambientales negativos, principalmente debido a la toxicidad de sus efluentes y a la gran cantidad de residuos sólidos generados durante el proceso (Salinas & Herrera, 2021). En respuesta a estos problemas, se buscan alternativas sostenibles que permitan la valorización de subproductos.

Por otro lado, la acuicultura ha sido promocionada como una actividad con gran potencial económico. En el caso del Paiche (*Arapaima gigas*), uno de los residuos generados es la piel, que puede ser valorizada a través del proceso de curtición para obtener cuero. (Segundo & Marrufo, 2019).

Dentro de este marco, se exploran formas de valorizar los residuos de descarte de la piel de Paiche generados en el proceso de curtición de pieles de Paiche. Estos residuos, que consisten principalmente en restos de carne y tejido adiposo adherido a la piel, tienen un alto potencial de valorización energética debido a su contenido orgánico. La tecnología de digestión anaeróbica puede convertir gran parte de esta materia orgánica compleja en biogás (principalmente metano), mediante la fermentación en ausencia de oxígeno realizada por un conjunto de microorganismos conocidos como inóculo (Olaya Arboleda et al., 2012) y lograr cero residuos incorporando la economía circular evitando impactos negativos al medio ambiente.

1.3 Descripción del problema de investigación

Durante el siglo anterior, a lo largo del siglo XX la demanda mundial de Paiche (*Arapaima gigas*) fue insostenible por lo que esta especie, se enlistó en el apéndice II de La Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestre (CITES), trayendo nuevos desafíos de sostenibilidad, siendo los principales países importadores Japón, China y USA. Además, se evidencia en estudios y sondeos de mercado, que esta especie también es comercializada con fines ornamentales para su uso en artesanía y elaboración de cueros (Chu et al., 2017).

En Perú, la acuicultura del Paiche ha experimentado un notable crecimiento, evidenciando niveles elevados de producción de Paiche, logrando producirse 1,227 toneladas en el año 2015, del mismo modo se incrementó la generación de residuos proveniente de esta actividad, constituyéndose el 20.8% en peso de estos residuos entre pieles y escamas para individuos promedios de 1 año con 1.1 m de longitud y 11 kg en peso (Del Carpio, 2020; Espinoza, 2017).

Actualmente, parte de los residuos de pieles de Paiche se aprovechan para la producción de piezas de cuero en la industria de curtiembre. Sin embargo, durante las operaciones de acondicionamiento para obtener el cuero de Paiche, todavía se generan residuos, los cuales requieren una gestión adecuada para su reutilización. Además, los residuos de pescado expuestos a la intemperie pueden generar la propagación de vectores y malos olores, lo que ocasiona problemas de salud y contaminación ambiental en las áreas circundantes. Por lo tanto, la valorización energética de estos residuos no solo contribuye a la reducción de estos impactos, sino que también promueve la aplicación del segundo principio de economía circular “aprovechar al máximo el valor de los productos y materiales”, justificando así su aprovechamiento (Acosta & Candela, 2020; Del Carpio, 2020; Ellen MacArthur Foundation, 2017).

Por lo cual, en esta investigación, se estudió la valorización energética de los residuos del proceso de descarte de la piel de Paiche en industrias de curtido, mediante

la tecnología de la digestión anaeróbica, evaluando las condiciones óptimas para producir biogás durante la digestión anaeróbica en biodigestores tipo batch.

1.3.1 Problema de investigación

En las recientes investigaciones realizadas sobre producción de biogás, a partir de la digestión anaeróbica en biodigestores tipo batch de residuos de diferentes especies de pescados, se obtuvieron rendimientos de biogás que varían en el rango de 224,03 Ln/Kg SV a 1011 Ln/Kg SV, asimismo, específicamente para residuos de piel de pescados, ensayos con la piel de Tilapia lograron un rendimiento de biogás 400 Ln/Kg SV (Fonseca et al., 2020a). Al no existir investigaciones de producción de biogás a partir de los residuos de descarte de pieles de Paiche hasta la fecha, se plantea el siguiente problema de investigación:

¿Cómo será la evaluación del biogás producido por residuos de descarte de la piel del Paiche (*Arapaima gigas*) mediante su digestión anaeróbica, en comparación con residuos de otras especies de peces?

1.4 Antecedentes investigativos

1.4.1 Antecedentes Internacionales

Thakur et al. (2024) en su investigación sobre la digestión anaeróbica de mantecas, aceites y grasas (FOG), obtuvo como resultados que al añadir una concentración de FOG al 2% (V/V) al lodo de una planta doméstica de biogás, se obtuvo una producción de biogás y biometano menor, debido a un efecto inhibitor por acumulación de ácidos grasos de cadena larga (AGCL) sobre microbios claves asimismo dificultando la biometanación. En comparación con otro experimento en el que adicionalmente se añadió 2, 4, 6, 8 y 10 g/L de bio carbón modificado, una mezcla de aditivos combinados entre sales de calcio y bio carbón (Biocarbón Ca - M). De los cuales los niveles más altos de producción de biogás y biometano se lograron con la adición del Biocarbón Ca – M de 10 g/L, 6,02 y 9,46 veces, respectivamente. Reduciendo la fase de retraso en 19 días y aliviando la inhibición.

Silva (2023) evaluó el potencial de biogás con los residuos de diversos pescados (vísceras, cabeza, piel y huesos) mediante la digestión anaeróbica, los experimentos fueron realizados en matraces de 50 ml sellados herméticamente asegurando condiciones anaeróbicas y conectados a un sistema de jeringas durante 30 días, los mejores resultados fueron de $144,21 \text{ ml} \frac{\text{biogás}}{\text{g}} \text{SV}$ y $224,03 \text{ ml} \frac{\text{biogás}}{\text{g}} \text{SV}$ obtenidos en la relación (inoculo/sustrato) de $9,0 \frac{\text{g}}{\text{g}}$ y $4,71 \frac{\text{g}}{\text{g}}$ respectivamente, adicional se realizó el estudio cinético de la biodigestión y producción de metano, donde se comparó los modelos cinéticos de primer orden y el modelo de Gompertz. Es este último modelo que tiene una mejor aproximación porque considera una fase de retraso antes de iniciar con la producción de metano.

(Kavan et al., 2022) en su trabajo de investigación optimizaron la relación del inoculo y sustrato, para mejorar el rendimiento de metano. Como sustrato emplearon el descarte de cuero vacuno, los cuales presentaron una composición principalmente de grasa, proteínas y productos químicos; como la cal y el sulfuro, siendo sustancias inhibitoras en la producción del metano. En consecuencia, se realizó un proceso de descalcado para los residuos de descarte, y así obtener un pH de 7,6 siendo adecuado para la producción de metano durante la biodigestión anaeróbica por lotes. Asimismo, se observó que las carcasas de cuero al ser mezcladas con inóculos y un previo un proceso de descalcado obtienen un rendimiento de biogás satisfactorio. Durante los 50 días que duró el experimento se obtuvo que la relación de inoculo de purín biodigerido al 25% y descarte al 75% fue la que dio mejor rendimiento de biogás con un 63,77% de metano, siendo una potencial forma sostenible de reutilizar estos residuos sólidos.

Fonseca et al. (2020) en su investigación caracterizó y determinó el rendimiento de metano para cada fracción de residuos de Tilapia (*Oreochromis niloticus*) entre: cabeza, huesos con carne, víscera, aletas, piel y escamas; asimismo siguió pautas de la VDI 4630 (2016) en biodigestores tipo batch. Para determinar a las fracciones con mayor potencial metanogénico y a aquellas con baja biodegradabilidad introducirlas en otros sistemas

productivos. Se evaluaron dos modelos cinéticos (modelo de primer orden y modelo de Gompertz modificado), y como resultados se obtuvo que la facción de la cabeza presento mayor rendimiento de biogás con 1011 *Ln/Kg SV* y los menores resultados se obtuvieron de las facciones de la piel y escamas con 400 *Ln/Kg SV* y 286 *Ln/Kg SV* respectivamente. La concentración de los lípidos fue el mejor parámetro para relacionar las variaciones en los resultados. Asimismo, las facciones de las aletas, piel y escamas presentaron un periodo de retraso mayor en la producción de biogás, debido a su composición elevada de colágeno y minerales.

Bücker et al. (2020) su trabajo investigativo realizado en Brasil, sobre la monodigestión anaeróbica de vísceras de la carpa común (*Cyprinus carpio*), con el inocular proveniente de una planta de biogás. Empleo la VDI 4630 (2016) como norma de referencia, porque esta norma considera: utilizar controles (positivos y negativos), aclimatar al inocular para evitar posibles inhibiciones, etc. La composición del residuo de pescado presento mayor porcentaje de lípidos y una relación C/N de 6,5 (posible inhibición por amoníaco) pese a esto, el rendimiento de biogás y el pH al final de la digestión anaeróbica para: residuo de pescado, residuo de aceite de pescado, celulosa microcristalina (control positivo) y solo inocular (control negativo) fue de: 791,78 *Ln/Kg SV* con pH 7.97; 733,93 *Ln/Kg SV* con pH.89; 657,38 *Ln/Kg SV* con pH 8.12 y 37,66 *Ln/Kg SV* con pH 8.07 respectivamente. Durante la preparación de la muestra, se realizó un proceso termomecánico (cocino, tamizo y prensa), lo cual encarece el costo para la producción de biogás.

1.4.2 Antecedentes Nacionales

Barrenechea et al. (2021) En su investigación, la metodología empleada para estimar el mejor potencial de biogás de la codigestión anaeróbica de macroalgas marinas, residuos pesqueros y residuos vegetales, fue la caracterización de los sustratos mediante el análisis de su composición química proximal (CQP). En esta metodología, se procedió con la determinación de la relación C/N, SV, entre otros cálculos y para el diseño de las mezclas de los sustratos se empleó la metodología VDI 4630 (2016) y Chen 2007, en la

que se recomienda que la relación C/N de la mezcla este en rangos de 20 a 30 para asegurar la estabilidad durante el proceso de codigestión anaeróbica. Finalmente se logró optimizar la producción de biogás obtenida durante la codigestión anaeróbica siendo la metodología de la VDI 2016 y la caracterización de la CQP una herramienta para formular mezclas de residuos sometidos a la biodigestión anaeróbicas.

En las investigaciones previas sobre la tecnología de la digestión anaeróbica, la producción de biogás y el aprovechamiento de residuos pesqueros, se puede evidenciar una ausencia del empleo de residuos de peces de acuicultura como la especie del Paiche (*Arapaima gigas*), que tienen una creciente demanda para importación. Además, con fecha febrero del 2025 se revisó en la base de datos bibliográficas “Scopus”, y para la especie del Paiche (*Arapaima gigas*), todavía no hay investigaciones relacionadas a determinar el potencial teórico del biogás, el rendimiento de biogás durante la prueba batch y tampoco se ha establecido un modelo dinámico que se ajuste a la producción del biogás a partir de residuos de Paiche.

1.5 Justificación

1.5.1 Justificación metodológica

Para la obtención del biogás se realizó la digestión anaeróbica en biodigestores tipo batch de los residuos de piel de Paiche, en cada botella se colocó diferente porcentaje de mezcla del residuo de Paiche, la metodología aplicada fue el estándar alemán de la VDI 4630 (2016), facilitando la evaluación para residuos de animales y como inóculo, se empleó al conjunto de microorganismos pertenecientes al laboratorio de biogás del ITP, adaptados previamente con residuos pesqueros, el cual obtuvo buenos resultados en anteriores investigaciones (Weinrich et al., 2018).

Asimismo, el uso de reactores tipo batch en esta investigación se fundamenta en su idoneidad para evaluaciones iniciales del potencial de producción de biogás a partir de nuevos sustratos. Este sistema permite controlar con precisión las condiciones operativas (como temperatura, tiempo de retención, concentración de sólidos volátiles y relación

sustrato/inóculo), facilitando la recolección de datos confiables sobre la cinética de producción de biogás.

Además, los reactores tipo batch son ampliamente recomendados en estudios de laboratorio para pruebas de biodegradabilidad, ya que permiten observar el comportamiento del sustrato en un entorno cerrado y sin adición de nueva materia durante el proceso, lo cual es ideal para comparar rendimientos específicos entre diferentes concentraciones de residuo o diferentes tipos de residuos.

Aunado a ello, el método batch es el protocolo base de la norma alemana VDI 4630 (2016), reconocida internacionalmente para ensayos de potencial bioquímico de metano (BMP), lo que garantiza la comparabilidad y reproducibilidad de los resultados con otros estudios de referencia.

1.5.2 Justificación social

La valorización energética de los residuos de Paiche disminuirá la dependencia de los combustibles fósiles, siendo una opción de energía limpia en zonas donde la electricidad es escasa, por ende se considerará una medida de mitigación del cambio climático (Ministerio del Ambiente, 2019). Además, la valorización de estos residuos mejorará el manejo de los residuos sólidos evitando que se proliferen animales indeseados como los transmisores de diversas enfermedades. De este modo se mejora la calidad de vida de las personas (Ministerio de Salud, 2019).

1.5.3 Justificación económica

El uso de los residuos de Paiche, promoverá la economía circular en industrias de curtiembre del Paiche, mediante el aprovechamiento de estos residuos orgánicos para generar biogás, pudiendo ser reintroducido en el mismo proceso de curtición (Del Carpio, 2020). Asimismo, la digestión anaeróbica es una tecnología rentable en comparación con otros tratamientos de residuos orgánicos, logrando disminuir gastos por disposición final de residuos sólidos (Romero et al., 2016).

1.5.4 Justificación ambiental

Gracias a la digestión anaeróbica de los residuos de Paiche, se evitará que la descomposición natural de residuos orgánicos, liberen GEI sin ningún control en la atmósfera, siendo una medida de mitigación al cambio climático (Ministerio del Ambiente, 2019). Asimismo, se obtendrá energía limpia, reduciendo la huella de carbono, logrando un mejor aprovechamiento de los recursos naturales y se estaría reduciendo los impactos ambientales negativos (Alvarez, 2020).

1.6 Objetivos del estudio

1.6.1 Objetivo general

Evaluar la producción de biogás a partir de los residuos de descarte de la piel del Paiche (*Arapaima gigas*) mediante digestión anaeróbica.

1.6.2 Objetivos específicos

Determinar el potencial teórico del biogás de los residuos de descarte de la piel del Paiche (*Arapaima gigas*) mediante cálculos basados en la composición de nutrientes.

Determinar el Máximo Rendimiento de Biogás del residuo de Paiche (*Arapaima gigas*) en biodigestores batch.

Evaluar modelos dinámicos de producción de biogás que se ajusten los resultados obtenidos durante la digestión anaeróbica de residuos de descarte de la piel del Paiche (*Arapaima gigas*) en biodigestores batch.

1.7 Hipótesis

La evaluación del biogás producido por residuos de descarte de la piel del Paiche (*Arapaima gigas*) mediante su digestión anaeróbica en ensayos tipo batch, presenta un rendimiento de biogás mayor a 400 $Ln/Kg\ SV$, tomando como referencia al rendimiento de biogás obtenido con de residuos de piel de Tilapia.

1.7.1 Hipótesis específicas

La evaluación del potencial teórico del biogás de los residuos de descarte de la piel del Paiche (*Arapaima gigas*) mediante cálculos basados en la composición de nutrientes presenta condiciones favorables para la producción de biogás.

La prueba batch con mayor porcentaje en mezcla de residuos del descarte de piel de Paiche (*Arapaima gigas*) tendrá un mejor rendimiento para la producción del biogás.

El modelo dinámico de producción de biogás que se ajusta con mayor significancia a los resultados obtenidos durante la digestión anaeróbica de residuos de descarte de la piel del Paiche (*Arapaima gigas*) en biodigestores batch es el modelo de Gompertz modificado.

Capítulo II. Marco teórico y Marco legal

2.1 Marco teórico

2.1.1 Industria de la curtiembre

La industria de la curtiembre se encarga de procesar las pieles de los animales, teniendo como producto terminado el cuero, que es un material resistente y usado en calzados, vestimenta, artesanía, etc. Sin embargo, durante la producción se emplean químicos tóxicos y generan impactos ambientales negativos principalmente debido a la generación de sus residuos, por lo que se busca realizar una producción sustentable (Silva & Salinas, 2022).

2.1.2 Curtiembre de pieles de Paiche (*Arapaima gigas*)

La curtiembre de pieles de Paiche, surgió como solución a la generación de los **residuos de pieles de Paiche** en las actividades acuícolas. Esta industria aun es nueva por lo que se busca llevar a cabo una curtición limpia sin utilizar agentes curtientes contaminantes, así mismo presenta una serie de subprocesos para la obtención del cuero de Paiche, los cuales son: pre - remojo, descarnado de la piel, remojo, piquelado y curtición (Segundo & Marrufo, 2019).

2.1.3 Paiche (*Arapaima gigas*)

El Paiche, "*Arapaima gigas*", es una de las cuatro especies más importantes de la cuenca amazónica peruana, debido a su enorme tamaño, calidad y sabor en su carne. Además, su piel gruesa y fácil de retirar también es comercializada para elaborar cuero de alta calidad contribuyendo con la generación de ingresos (Del Carpio, 2020).

El siglo pasado, la demanda de pesca en los medios naturales, para esta especie la posición es una situación crítica fue considerada en el apéndice II de la "Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestre – CITES". Por lo que su crianza en las piscigranjas, empleando técnicas sostenibles se

presentó como una opción idónea reduciendo el impacto negativo en la población del Paiche (Koo et al., 2017).

Figura 1

Registro de *Arapaima gigas*



Nota: fuente [https://rnia.produce.gob.pe/wp-content/uploads/2019/09/Protocolo-de-Reproducci%C3%B3n-del-Paiche_\(Arapaima_gigas\).pdf](https://rnia.produce.gob.pe/wp-content/uploads/2019/09/Protocolo-de-Reproducci%C3%B3n-del-Paiche_(Arapaima_gigas).pdf)

2.1.3.1 Clasificación

La especie de “*Arapaima gigas*”, en base a su taxonomía (Fondo Nacional de Desarrollo Pesquero, 2016) presenta la siguiente clasificación:

Tabla 1

Clasificación del Paiche (Arapaima gigas)

Reino	<i>Animalia</i>
Filo	<i>Chordata</i>
Subfilo	<i>Vertebrata</i>
Clase	<i>Actinopterygii</i>
Súper orden	<i>Osteoglossomorpha</i>
Orden	<i>Clupeiformes (Osteoglossiformes)</i>
Super familia	<i>Osteoglossidae (Arapaimidae)</i>
Familia	<i>Arapaimidae</i>
Género	<i>Arapaima</i>
Especies	<i>Arapaima gigas</i> (Cuvier, 1829)
Nombre común	“Paiche” (Perú, Bolivia), “Pirarucú” (Brasil y Colombia), Warapaima (Colombia) y De-chi (Guyana).

Nota: Adaptado de (Fondo Nacional de Desarrollo Pesquero, 2016)

2.1.3.2 Composición química proximal de la carne de Paiche

En los criaderos de Paiche, las especies son cosechadas al alcanzar los 10 a 12 Kg en promedio, ya que la carne extraída de estos individuos tiene alta calidad (Koo et al., 2017). Presentando la siguiente composición:

Tabla 2

Composición química proximal de la carne de Paiche (Arapaima gigas) adulto

Composición química (100%)	
Componente	Porcentaje
Humedad	72%
Grasa	5%
Proteína	21%
Cenizas	1,3%

Nota: Adaptado de (Chu Koo et al., 2017)

2.1.3.3 Producción del Paiche (*Arapaima gigas*) en el Perú.

La producción de Paiche para fines comerciales se concentra en las regiones de Loreto y Ucayali, asimismo algunos subproductos como las aletas, escamas y especímenes de piaches vivos son exportados. Para el 2018 el principal país destino fue EE. UU. Exportando en presentaciones de filete y finalmente sus pieles son valoradas en el sector textil para producir cueros (Del Carpio, 2020).

2.1.4 Descarne de la piel del Paiche (*Arapaima gigas*)

Es un subproceso de acondicionamiento, previo a la aplicación del agente curtiente, en el cual se hace ingresar la piel pre – remojada, a la máquina de descarne y se procede a retirar la carne y grasa adherida a la piel (Segundo & Marrufo, 2019). Durante esta operación se agrega agua para facilitar el descarne, por lo que los residuos obtenidos contienen porcentaje de humedad adicional.

2.1.5 Residuos del descarne de la piel del Paiche (*Arapaima gigas*)

Los residuos de Paiche empleados como sustratos en esta investigación son el material de descarte procedente del subproceso descarne de pieles de Paiche, conformado

por trazas de carne, grasa y agua. En la actualidad este material de descarte es generado en la industria de curtiembre de pieles de Paiche y carece de algún valor en el mercado (Segundo & Marrufo, 2019).

2.1.6 Residuos orgánicos

Los residuos orgánicos son los residuos de materiales provenientes de especies de flora y fauna, como: excretas de animales, cascara de huevos, restos de frutas, hojas secas, desechos de vegetales y carnes, entre otros. Siendo la principal característica de los residuos orgánicos es que tengan la facilidad para ser descompuestos por microorganismos (Comisión para la Cooperación Ambiental, 2017).

2.1.7 Relleno sanitario

Es una infraestructura construida bajo normas, acondicionada sanitariamente para la disposición final de los residuos sólidos y presenta una estructura segura para este fin. Hay que tener presente que la mayor parte de los residuos dispuestos en los rellenos sanitarios son orgánicos, pudiéndose valorizar energéticamente (Poder Ejecutivo del Perú, 2016).

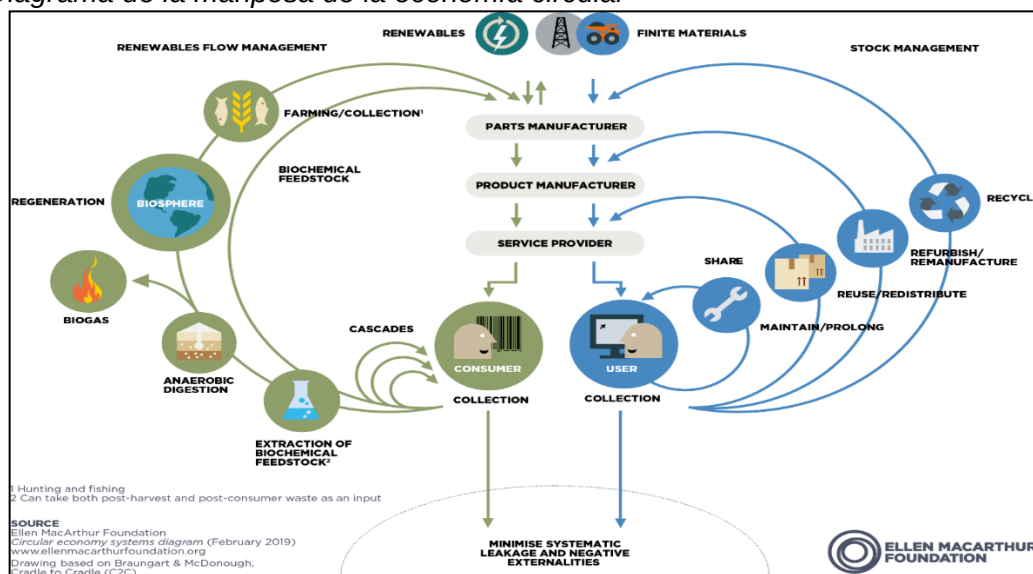
2.1.8 Economía circular

La economía circular es un modelo económico sostenible y regenerativo para el medio ambiente, el cual tiene como finalidad reducir los residuos, la contaminación, el sobreuso de los recursos, las fugas de energía, las emisiones y promover el desarrollo sostenible (Kumar et al., 2023).

Así mismo la economía circular presenta dos ciclos: el ciclo biológico y el ciclo técnico. Los materiales biodegradables, como caso de los residuos del Paiche (*Arapaima gigas*), son considerados como renovables dentro del ciclo biológico, y estos pueden crear un mayor valor al ser empleados en aplicaciones de biorrefinería, produciendo combustibles y minerales, estos últimos sirven como nutrientes para el suelo (Ellen MacArthur Foundation, 2017).

Figura 2

Diagrama de la mariposa de la economía circular



Nota: fuente <https://ellenmacarthurfoundation.org/es/el-diagrama-de-la-mariposa>

2.1.9 Huella de carbono

Es un indicador ambiental el cual se utiliza para medir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas por actividades antropogénicas, de manera directa e indirecta. Se expresa en toneladas de CO₂ equivalentes y proporciona una medida cuantitativa de las emisiones totales de GEI (Saavedra Blas, 2020). Cabe mencionar que los residuos orgánicos al ser dispuestos producen GEI como el dióxido de carbono y metano, los cuales son liberados a la atmósfera sin ningún control.

Las energías renovables son un conjunto de fuentes de energía que se obtienen a partir de recursos naturales y no generan emisiones netas de gases de efecto invernadero (GEI), a diferencia de las energías fósiles. Las cuales pueden emplearse para producir calor y electricidad. Es importante destacar que su uso es crucial para hacerle frente al cambio climático (Dirección General de Energía, 2020).

2.1.10 Biogás

El biogás es un biocombustible considerado una fuente de energía renovable siendo actualmente una alternativa para reemplazar a los combustibles fósiles ya que es respetuoso con el medio ambiente. El cual es producido a partir de la interacción entre

microorganismos anaeróbicos (hongos, bacterias y arqueas) con los residuos orgánicos, los cuales son biodegradados en un proceso llamado digestión anaeróbica (Bücker et al., 2020; Varnero, 2011).

Obteniendo como resultado a una mezcla gaseosa que consta principalmente de (50% - 75%) en metano, de (25% – 50%) en dióxido de carbono, de (0% - 10%) en nitrógeno, de (0% - 1%) en hidrogeno, de (0%-0.5%) en otros gases (oxigeno, sulfuro de hidrogeno y amoniaco). Pudiendo ser comprimido y usado en combustibles de transporte (Balagurusamy & Chandel, 2021a).

En la actualidad, el biogás es una alternativa viable al gas natural de origen fósil, por lo que la tecnología del biogás puede resolver problemas de suministro en electricidad, el calor y combustible para transporte (Da Costa, 2013).

Para poder comparar las cantidades de biogás obtenidas de los sustratos, es necesario una previa transformación en condiciones normales, del cual la unidad que se usa para comparar es "*Ln/kg SV*" que significa litros de biogas producido por kilogramo de muestra seca en condiciones normales. (Verein Deutscher Ingenieure, 2016)

2.1.10.1 Metano

Es un gas inflamable que fue identificado por primera vez en finales del siglo XVIII, siendo utilizado inicialmente en calefacción e iluminación. Su empleo se masifico en la segunda guerra mundial debido a la escasez de otros combustibles y en años venideros se impulsó su generación, a través de la tecnología de la digestión anaeróbica, en el cual se obtiene el biogás cuyo principal componente deseado es el metano. (Varnero, 2011).

2.1.10.2 Biometano

Es el biogás sometido a un proceso de mejora en el que se realiza la separación de componentes indeseados (siloxanos, sulfanos, etc.) y principalmente el dióxido de carbono. Adecuando la composición de este hasta los estándares solicitados de acuerdo a la legislación y al uso que se le pretende emplear. (Niesner et al., 2013)

2.1.10.3 Dióxido de carbono

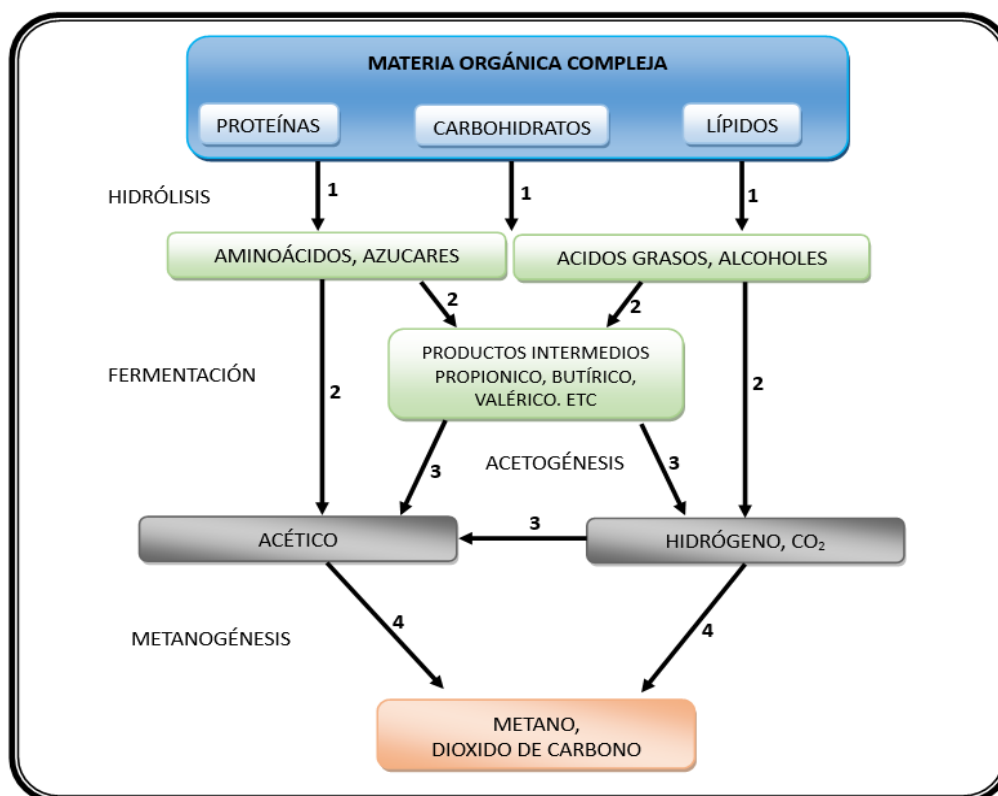
Es el segundo gas más abundante de la composición del biogás y se genera durante la descomposición de diferentes sustratos en el proceso de digestión anaeróbica, este gas actúa como aceptor de electrones para bacterias metanogénicas. Sin embargo, debido a que disminuye la capacidad energética del biogás se le considera como una impureza que debe eliminarse (Deng et al., 2020).

2.1.11 Digestión anaeróbica

El proceso de digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo, en el cual la materia orgánica es convertida en biogás en ausencia de oxígeno. Es gracias a este proceso que grandes cantidades de residuos agrícolas, agrónomos, de industria alimentaria, etc. son convertidos en subproductos útiles y menos contaminantes. Asimismo, el proceso sucede en cuatro etapas: hidrólisis, etapa acidogénica, etapa acetogénica y etapa metanogénica, las cuales suceden en forma simultánea (Varnero, 2011).

Figura 3

Proceso de digestión anaeróbica



Nota: Adaptado de Manual de biogás (Varnero Moreno, 2011)

2.1.11.1 Hidrolisis

La hidrólisis es la etapa inicial y necesaria de la digestión anaeróbica, en la cual los microorganismos hidrolíticos generan enzimas extracelulares (proteasa, amilasa, lipasa, etc.) para degradar compuestos macromoleculares insolubles (carbohidratos, proteínas y grasas). (Varnero, 2011)

Esta fase depende de parámetros como: la composición bioquímica del sustrato (la hidrólisis de los carbohidratos se completa en pocos minutos, mientras que para las proteínas y grasas tarda días), la temperatura del proceso, el tamaño de las partículas, el potencial de hidrogeno, entre otros (Deng et al., 2020; Varnero, 2011).

2.1.11.2 Etapa acidogénica o fermentativa

En esta etapa están presentes diversos grupos de microorganismos, conocidos como bacterias formadoras de ácidos, que inician varios procesos clave. Primero, fermentan moléculas orgánicas solubles y las reducen a compuestos como ácido acético, ácido fórmico e hidrógeno, los cuales pueden ser utilizados de inmediato por las bacterias metanogénicas. Además, convierten compuestos orgánicos complejos en compuestos más simples (como ácido propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol), que luego son oxidados por bacterias acetogénicas. También se encargan de eliminar los residuos de oxígeno presentes en el proceso de digestión anaeróbica, y participan en la fermentación de carbohidratos solubles, la fermentación de aminoácidos y la oxidación anaeróbica de ácidos grasos de cadena larga (Pérez, 2014)

2.1.11.3 Etapa acetogénica

Es en esta etapa que bacterias acetogénicas, se encargan de transformar los siguientes productos: etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos; en productos más sencillos como acetatos e hidrogeno. Además, existen un grupo de microorganismos llamados homoacetogénicos que gracias a su metabolismo se logra bajas presiones parciales del hidrogeno permitiendo la actividad de las bacterias acidogénicas y acetogénicas (Varnero, 2011).

2.1.11.4 Etapa metanogénica

En la etapa metanogénica existen los microorganismos metanogénicos los cuales son los responsables de completar el proceso de digestión anaeróbica y de la formación del metano a partir de sustratos con átomos de carbono. Cabe resaltar que un 70 % del metano producido en los reactores anaeróbicos se forma debido a la descarboxilación de ácido acético entre los principales microorganismos responsables tenemos a las Arqueas metanogénicas y que el ácido sulfhídrico producido por bacterias sulfato reductoras podrían envenenar a estos metanógenos (Deng et al., 2020; Varnero, 2011).

2.1.12 Inoculo

En el contexto de la digestión anaeróbica el inoculo es una mezcla de diversos microorganismos, los cuales son los responsables de descomponer la materia orgánica presente en distintos tipos sustratos menos complejos hasta transformar parte de esta en biogás. Los microorganismos se dividen en: bacterias hidrolíticas, bacterias acetogénicas, bacterias homoacetogénicas y metanógenos. Asimismo, entre las principales fuentes de inóculos tenemos al lodo digerido y al estiércol de animales, la cantidad del inoculo inicial ira disminuyendo en función del tiempo en el que se genera el biogás (Deng et al., 2020; Sood et al., 2019).

2.1.12.1 Microorganismos metanogénicos

Son los microorganismos anaeróbicos facultativos, que se encargan de producir el metano a través de la digestión anaeróbica, se podría decir que cumplen con una función de enzimas para la obtención de biogás. Además, su población se incrementa durante la fase de metanogénesis (Varnero, 2011).

2.1.13 Biodigestor

El biodigestor viene a ser una estructura cerrada para lograr la condición anaeróbica, en donde se introducen al inoculo, uno o más tipos de residuos orgánicos en mezcla con agua, para que sean descompuestos, con el objetivo de generar biogás,

pudiendo ser almacenado en su interior del biodigestor o estar separada en otra estructura a la cual se le conoce como gasómetro (Varnero, 2011).

2.1.14 Estándar Alemán VDI 4630 (2016)

Es un estándar alemán el cual nos establece las pautas para realizar la “fermentación de materiales orgánicos – caracterización del sustrato, muestreo, recogida de datos del material, pruebas batch de digestión anaeróbica”. La cual es empleada en diversas investigaciones por su gran aceptación de sustratos, y que establece criterios claros para desarrollar la prueba de lotes, en la biodigestión anaeróbica (Weinrich et al., 2018).

2.1.15 Factores que influyen en la digestión anaeróbica

La tecnología de la digestión anaeróbica depende de varios factores, cualquiera de estos puede influir en el metabolismo del inóculo, entre los más resaltantes factores son los requerimientos nutricionales, tipo de sustratos, el pH, la temperatura y presencia de sustancias inhibitoras. También se considera el ambiente ya que para cada tipo de microorganismo se necesitarán requisitos ambientales diferentes (Deng et al., 2020).

2.1.15.1 Sustrato

Es el material que contiene materia orgánica proveniente de subproductos o productos residuales, los cuales tengan bajo costo o costo cero, por ejemplo, estiércol de animales, residuos de alimentos, residuos agrícolas, residuos industriales, etc. Todos estos pueden ser usados como insumo para la producción de biogás a través del proceso de biodigestión anaeróbica, en general el sustrato se compone de 3 tipos básicos de macromoléculas: hidratos de carbono, proteínas y lípidos (Balagurusamy & Chandel, 2021b; Varnero, 2011).

2.1.15.1.1 Hidratos de carbono o carbohidratos

También llamados glúcidos, su función principal es proporcionarnos energía de manera inmediata, su unidad son los monosacáridos y cuya fórmula general es: $C_n(H_2O)_n$.

Su clasificación se realiza de las siguientes maneras: en base al número de monosacáridos (simples y compuestos), en base al grupo funcional (aldehído y cetona) y de acuerdo al número de carbonos (triosa, tetrosas, etc.)

2.1.15.1.2 Proteínas

Su función más importante es brindar soporte y estructura a las células, su unidad básica son los aminoácidos que se unen mediante enlaces covalentes los cuales contienen un grupo carboxilo, un grupo amino y un grupo R unido al carbono. Las cadenas de 2 a más aminoácidos forman los péptidos. Una célula generalmente contiene miles de proteínas diferentes, cada una con una función diferente. Después de la hidrólisis las proteínas simples generan solo aminoácidos. (Varnero, 2011).

2.1.15.1.3 Lípidos y grasas

Una característica general de todos los lípidos, grasas y aceites es su poca cantidad de átomos de oxígeno por lo que tiene gran insolubilidad en el agua pudiéndose extraer con disolventes del tipo apolar. Estas macromoléculas constituyen una fuente de almacenamiento de energía. Se pueden clasificar en ácidos grasos saturados e insaturados contiendo su grupo carboxilo que es la parte polar de estas moléculas. (Varnero, 2011).

2.1.15.1.4 Ácidos grasos

En general los ácidos grasos son una clase de lípidos y grasas; suelen estar formados por un hidrocarburo de cadena larga unido a un grupo carboxilo, por lo que son ácidos mono-carboxílicos (David L. & Michael M., 2009).

2.1.15.1.5 Ácidos grasos de cadena larga

Son compuestos producidos por la digestión de triglicéridos, y son potenciales inhibidores en la etapa de metanogénesis. (Passeggi M. et al., n.d.)

2.1.15.1.6 Ácidos grasos de cadena corta

También conocidos como ácidos grasos volátiles, en el contexto del biogás, son un subproducto obtenido en la descomposición de la materia orgánica, los principales ácidos grasos volátiles son: ácido acético, ácido propiónico, ácido valérico, ácido caproico, entre otros similares. Asimismo, es el ácido acético el que se descompone y forma gran parte del metano durante un proceso de digestión anaeróbica. (Zhang et al., 2022).

2.1.15.2 pH

El pH es un factor importante para el crecimiento y metabolismo de los microorganismos, las bacterias acidogénicas crecen en un rango de 4,5 a 8,0 y para los metanógenos el rango óptimo es de 6,7 a 7,5. Siendo el pH más alto en las etapas de acetogénesis y metanogénesis que en las etapas de hidrólisis y acidogénica, con un rango de 6,5 a 7,5 (Deng et al., 2020).

2.1.15.3 Temperatura

Cada clase de microorganismos presenta una temperatura que favorece su crecimiento y metabolismo, para las bacterias mesófilas el rango óptimo de las acidogénicas es de 25°C a 35°C y en las metanógenas es de 32°C a 42°C, mientras que para las termófilas es de 48°C a 55°C. Los metanógenos termófilos son más sensibles que los mesófilos, y según las investigaciones una variación de temperatura superior a 2°C disminuirá la producción de biogás. Sin embargo, la tasa de degradación de las termófilas para los sustratos podría aumentar en un 50% que el promedio (Deng et al., 2020).

2.1.15.4 Relación carbono / nitrógeno

El carbono y el nitrógeno son esenciales para el desarrollo de las arqueas metanogénicas, las cuales consumen 30 veces el carbono que el nitrógeno, para su metabolismo y reproducción, por lo que la relación óptima del C/N de la mezcla de sustrato tiene que estar en un rango de 30/1 hasta 20/1. Ya que en concentraciones elevadas de

nitrógeno el proceso se vuelve toxico, o bien cuando la cantidad de carbono es elevada el proceso se torna lento (Varnero, 2011).

2.1.15.5 Sustancias inhibidoras

Según (Deng et al., 2020) en algunos casos los sustratos contienen sustancias toxicas que reducen la producción de biogás, las sustancias inhibidoras recurrentes son:

- El nitrógeno amoniacal (NH_3 y NH_4^+) cuando este supera 150 mg/L causa envenenamiento al sistema.
- Los sulfuros, ya que, durante la metanogénesis una concentración entre 150 a 200 mg/L genera inhibición en el sistema.
- Otros inhibidores son las sales, metales pesados y algunas sustancias sintéticas.

2.1.16 Materia orgánica

El contenido de materia orgánica presente en el sustrato es un factor fundamental para la producción de biogás. Pudiendo provenir de residuos con alto contenido orgánico o de lodos residuales. Además, se pueden emplear cultivos agrarios con fines energéticos (Deng et al., 2020).

2.1.17 Potencial de biogás

En este estudio consideraremos que el potencial del biogás es un valor teórico que puede ser obtenido a partir del análisis químico proximal del sustrato, con valores de referencia precedida de investigaciones previas (Varnero, 2011).

2.1.18 Rendimiento de biogás

El rendimiento de biogás se suele confundir frecuentemente con el potencial de biogás. Sin embargo, el rendimiento de biogás es la fracción del potencial de biogás en condiciones prácticas, considerando un tiempo de residencia limitado y establecido por la norma internacional VDI 4630 (2016) (Weinrich et al., 2018).

2.1.19 Biodigestor tipo batch

Son llamados también reactores discontinuos teniendo, aplicabilidad para análisis en laboratorios debido a su practicidad y su reducido riesgo de contaminación. Su característica principal es que solo presentan una carga al inicio, posterior al periodo de biodigestión, el contenido de los sustratos disminuye por lo que el rendimiento del biogás decae, y el investigador da por finalizado el estudio (Varnero, 2011; Wasewar, 2022).

2.1.20 Tiempo de residencia

El tiempo de residencia es un término empleado para sistemas de biodigestores tipo batch o discontinuos, y se define como el lapso del tiempo en el que se inicia el arranque del sistema hasta el instante en el que se detenga la producción de biogás o se finalice el periodo de evaluación por parte del investigador, por lo general suele ser 30 días (Varnero, 2011).

2.1.21 Análisis químico proximal

El análisis químico proximal es una metodología empleada en laboratorios para caracterizar a los sustratos. Se enfoca en determinar la composición química básica de los materiales orgánicos permitiendo estimar la calidad y el potencial teórico en la generación de biogás (Weinrich et al., 2018).

Entre los principales componentes a determinar tenemos:

2.1.21.1 Humedad

Al determinar la cantidad de humedad contenida en la muestra fresca, obtenemos el porcentaje de agua presente e indirectamente nos permite determinar el porcentaje de solidos totales contenidos en la muestra fresca (Weinrich et al., 2018).

2.1.21.2 Cenizas

La cantidad de ceniza presente en la muestra fresca se obtiene mediante una calcinación entre 500°C y 600°C, cuyo resultado representa a los componentes

inorgánicos. Mediante la diferencia de los sólidos totales de las cenizas se obtiene la cantidad solidos volátiles (Weinrich et al., 2018).

2.1.21.3 Proteína, carbohidratos y grasa

La determinación de la composición en porcentaje de estas macromoléculas presentes en las muestras nos permite calcular el potencial teórico de biogás, para ello es necesario emplear los valores del potencial de biogás para cada macromolécula establecido en las referencias bibliografías (Weinrich et al., 2018).

2.1.21.4 Hierro, potasio y fosforo

La determinación de concentración adecuada de las sales minerales en los sustratos debería de favorecer la actividad microbiana en el sistema anaeróbico, y si la concentración es elevada podría existir algún efecto inhibidor en la producción del biogás (Weinrich et al., 2018).

2.1.22 Relación FOS/TAC

Al realizar el análisis de la relación FOS / TAC obtenemos información de las características de la producción de biogás, permitiendo detectar si existe alguna interferencia en el proceso, este análisis se realiza para los digestores continuos o semicontinuos, y para el caso del biodigestor tipo batch, indica el estado de biodegradación de los sustratos por efecto del inóculo cuando se haya finalizado la prueba por lotes (Ulrich & Petra, 2008).

2.1.23 Software y pruebas estadísticas

2.1.23.1 Microsoft Excel Real Statistic

Es un paquete de software y a su vez complemento de Microsoft Excel, el cual añade herramientas para analizar datos facilitando los análisis estadísticos. Es compatible con muchas versiones de Excel, asimismo permite el uso de funciones estadísticas y de herramientas estadísticas de análisis de datos (Zaiontz, n.d.).

2.1.23.2 IBM SPSS Statistics

Es un software estadístico potente, tiene una interfaz de fácil uso y un conjunto de funciones para analizar gran cantidad de datos. También posee funciones estadísticas avanzadas generando análisis de alta precisión y calidad (International Business Machines, 1968).

2.1.23.3 Prueba estadística de Kolmogorov - Smirnov

Es una prueba de bondad de ajuste que se utiliza extensamente para evaluar la adecuación de los datos de una muestra a una distribución normal para cantidades superiores a 50 datos. Su utilidad se destaca en contextos de procesos físicos no lineales e interactivos, donde las distribuciones tienden a desviarse de la normalidad. Además, la determinación de la normalidad es un paso crucial, ya que algunas pruebas estadísticas y enfoques son óptimos o requieren el supuesto de normalidad. Por tanto, realizar esta prueba se convierte en un prerrequisito para garantizar la validez de los resultados (Flores Tapia & Flores Cevallos, 2021).

2.1.23.4 Prueba estadística de Kruskal - Wallis

También conocida como prueba H, es la versión no paramétrica del análisis de varianza (ANOVA) para datos no emparejados. Se aplica cuando hay más de 2 grupos. Esta prueba determina si las diversas muestras tienen una distribución similar, indicando si así pertenecen a la misma población y en ciertos casos esta prueba compara las medianas (Amat, s. f.).

2.1.23.5 Prueba estadística de Dunn

Esta prueba se emplea cuando los resultados de una prueba de Kruskal - Wallis muestran significancia estadística, logrando identificar de manera precisa cuáles grupos difieren entre sí. La prueba de Dunn realiza comparaciones de a pares entre cada grupo independiente, indicando qué grupos presentan diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza α determinado (Dinno, 2022).

2.1.24 Modelos dinámicos de producción de biogás

Los modelos dinámicos de producción de biogás se emplean para predecir la producción de biogás, basándose en una serie de componentes iniciales dependientes de las características físicas, químicas y biológicas del sustrato, y también en algunos casos considerando efectos de inhibiciones y las etapas de la digestión anaeróbica (Poblete et al., 2020).

2.1.24.1 Modelos de Primer orden

El modelo de Primer orden se emplea en procesos de degradación química, bioquímica, biológica y también en la producción de biogás; este se caracteriza por tener una única constante de velocidad exponencial. El cual asume que la velocidad de degradación es proporcional a la concentración de los sustratos orgánicos (Moreira et al., 2023).

2.1.24.2 Modelo de Gompertz modificado

En sus inicios el modelo de Gompertz fue propuesto para simular las tasas de mortalidad humana, posteriormente fue modificándose para aplicarlo en el entorno biotecnológico. Así mismo en la actualidad se aplica para predecir el crecimiento microbiano y la cinética de bio producción de gases como el hidrogeno y metano considerando los cambios en la velocidad de degradación de los sustratos. Radicando su importancia para predecir el comportamiento de la producción de biogás a partir de una digestión anaeróbica (Wang & Guo, 2024).

2.2 Marco legal

- Acuerdo entre la Confederación Suiza y la República del Perú para la implementación del acuerdo de París - 2021
- Constitución Política del Perú - 1993
- Decreto Supremo N° 025-2021-RE, Ratifica el “Acuerdo entre la Confederación Suiza y la República del Perú para la Implementación del Acuerdo de París”
- Ley N° 28611, Ley General del Ambiente
- Ley N° 26842, Ley General de Salud
- Decreto Ley N° 25977, Ley General de Pesca
- Decreto Legislativo N° 1278 - Ley de gestión integral de residuos sólidos
- Decreto Supremo N° 014-2017-MINAM, Aprueban Reglamento de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos
- Decreto Legislativo N° 1501, Decreto Legislativo Que Modifica El Decreto Legislativo N° 1278, Que Aprueba La Ley De Gestión Integral De Residuos Sólidos
- Decreto Supremo N° 012-2001-PE, Aprueban el Reglamento de la Ley General de Pesca
- Decreto Supremo N° 012-2019-PRODUCE, Aprueban el Reglamento de Gestión Ambiental de los Subsectores Pesca y Acuicultura

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Diseño de investigación

Esta investigación se desarrolló siguiendo un diseño cuasiexperimental ya que la muestra fue recolectada de un grupo específico de residuos generados durante el descarte de la piel de Paiche (*Arapaima gigas*) en el Centro de Innovación Productiva y Transferencia Tecnológica del Cuero, Calzado e Industrias Conexas – CITEccal - Lima.

3.1.1 Nivel de investigación

La presente investigación presenta un nivel explicativo – predictivo, ya que se buscó establecer las relaciones óptimas de los parámetros; para incrementar el potencial de biogás durante la digestión anaeróbica del residuo, y así mismo se buscó predecir el potencial de biogás acumulado mediante modelos dinámicos de producción de biogás.

3.1.2 Población de estudio

La población considerada son todos los residuos de la piel del Paiche (*Arapaima gigas*) generados durante el proceso del descarte, en industrias dedicadas a la curtiembre de pieles de Paiche.

3.1.3 Muestra de estudio

La muestra de estudio fueron los residuos de descarte de la piel de Paiche (*Arapaima gigas*), generados en el CITEccal – Lima durante el año 2023. Cabe mencionar que estas pieles de Paiche fueron compradas a la empresa “FUNDO LLONTOP E.I.R.L.”, la cual está ubicada en el gobierno regional de Ucayali, esta empresa cuenta con certificado de procedencia N°167-2021, acreditando un comercio sostenible del Paiche.

3.2 Manejo de la muestra

3.2.1 Identificación de la muestra de residuos de Paiche

Se elaboro una ficha de las cantidades de residuos disponibles para realizar el análisis durante la parte experimental, con esta información se reservó las muestras representativas.

3.2.2 Obtención, transporte, envió y almacenamiento de la muestra

La muestra del residuo fue obtenida del área de descarte del CITEccal - Lima, se usaron guantes de nitrilo para manipular a la muestra y colocarlas en ,bolsas con bocas anchas, de 1 a 2 litros de capacidad. Inmediatamente las bolsas fueron selladas (para evitar olores, derrames y contaminación).

Para el transporte de la muestra al laboratorio del ITP – Sede Callao, las muestras fueron colocadas en una nevera con 4 Ice Pack Gel de 500ml en el interior.

Para preservar a la muestra a una temperatura de 7°C aproximadamente durante su traslado y evitar el crecimiento de microorganismos, el traslado se realizó en un tiempo menor a 24 horas.

En el laboratorio, las muestras fueron almacenadas en congelación a 4°C hasta su posterior uso para su análisis químico y experimento en biodigestores batch.

Figura 4

Descarte, obtención y almacenamiento de la muestra de residuos del descarte de piel de Paiche





3.3 Acondicionamiento de la muestra de laboratorio para sus análisis

Se empleó una bandeja de aluminio como soporte para descongelar las muestras de residuos de Paiche (*Arapaima gigas*) en el interior del frigorífico con temperatura de entre 4 - 6 °C. Una vez descongelado se extrajo y se puso a temperatura ambiente para conservar la calidad de la muestra.

Posteriormente se empleó el molino triturador de laboratorio para homogenizar la muestra, como es una muestra novedosa, no se tamizo ya que puede haber alteraciones no deseables en los análisis posteriores y finalmente, las muestras fueron preservadas y/o destinadas para sus respectivos análisis.

Figura 5

Preparación de la muestra de residuos



3.4 Obtención del inóculo

El inóculo que fue empleado para la prueba en los biodigestores tipo batch fue obtenido del Laboratorio de Biogás del ITP, el cual se extrajo de un reactor de biogás y fue almacenado en galoneras.

3.5 Definición de variables

3.5.1 *Variable independiente*

Porcentaje de mezcla en residuos de descarte de la piel de Paiche (*Arapaima gigas*)

3.5.2 *Variable dependiente*

Producción del biogás

3.5.3 *Variables operacionales*

Composición de nutrientes

Potencial teórico de biogás

Relación C/N

Temperatura (T°)

Grado de agitación

Tiempo de residencia

3.6 Materiales, reactivos e insumos químicos, y equipos usados para el desarrollo de la tesis

3.6.1 *Materiales*

- | | |
|------------------------|--------------------------|
| - Vasos de precipitado | - Matraz Erlenmeyer |
| - Pipetas descartables | - Tubos de digestión |
| - Micropipetas | - Balones de destilación |
| - Probetas | - Dedales de extracción |
| - Tubos de ensayo | - Guantes de cuero |

- Pesa filtros
- Crisoles de porcelana
- Gradillas
- Kitasato
- Tabla de picar
- Desecador
- Frasco de agua destilada
- Soportes metálicos
- Guantes de nitrilo
- Pinzas
- Mascarillas
- Tijeras
- Algodón
- Pipetas
- Cuchillo
- Cucharas metálicas
- Recipientes de diversos tamaños
- Placas Petri
- Envases de vidrio
- Vaso de extracción de grasas
- Mangueras
- Jeringas
- Fiolas
- Embudos
- Parafilm
- Válvulas y accesorios
- Pissetas 1000 ml
- Bandejas de aluminio y plásticas
- Espátula acero inoxidable
- Pastillas magnéticas
- Pesa filtros
- Papel toalla
- Bagueta
- Bolsas con boca ancha
- Buretas
- Bolsas colectoras de biogás
- Agua y Jabón
- Lapiceros
- Cuadernos
- Agua destilada

3.6.2 Reactivos e insumos químicos

- Ácido sulfúrico concentrado EMSURE Grado Pureza: ACS
- Ácido sulfúrico 0.1 N (Diluido)
- Ácido sulfúrico 0.2 N (Diluido)
- Sulfato de sodio EMSURE / Grado Pureza: ACS
- Sulfato de cobre EMSURE / Grado Pureza: ACS
- Éter de petróleo EMSURE
- Etanol
- Ácido Clorhídrico EMSURE / Grado Pureza: ACS

- Alcohol 96°
- Hidróxido de sodio al 20% (Diluido)
- Hidróxido de sodio 0.02N (Diluido)
- Indicador de Tashiro
- Celulosa Microcristalina SPECTRUM
- Soluciones buffer (pH 4,7 y10)

3.6.3 Equipos

- Computadora LG
- Congeladora Ilumi
- Frigorífico Electrolux
- Termo selladora manual Brother
- Molino triturador de laboratorio Hamilton Beach
- Balanza electrónica de precisión Discovery
- Centrífuga de laboratorio Thermo Scientific
- Titulador de biogás Mettler Toledo
- MilliGascounter Ritter
- Horno incubador para sistema de botellas de fermentación Binder
- Extractor Soxhlet Buchi
- Botellas de fermentación con dispositivo de agitación (PMMA cristalino) Ritter
- Sistema de análisis de gases AwiFLEX y AwiLAB
- Campana extractora Draft Chamber
- Horno de secado Nabertherm
- Plancha / hornilla eléctrica de laboratorio Selecta
- Mufla de laboratorio Nabertherm
- Digestor Kjeldahl Gerhardt
- Destilador Kjeldahl Buchi
- Bureta acoplable a frascos Titrette

3.7 Metodologías

3.7.1 Análisis proximal del residuo de Paiche

El análisis proximal de los residuos de Paiche (*Arapaima gigas*) consistió en determinar los siguientes parámetros.

Tabla 3

Parámetros analizados del residuo de Paiche (Arapaima gigas)

Parámetros	Método analítico realizado en el laboratorio
Humedad	FAO pp 205 T 14/7, 1986
Cenizas	FAO pp 228 T 14/7, 1986

Parámetros	Método analítico realizado en el laboratorio
Grasa total	Método de extracción Soxhlet
Proteína total	Método Kjeldahl
Carbohidrato total	Por diferencia de componentes
Relación C/N	Análisis a partir del método Kjeldahl

3.7.1.1 Humedad

La determinación de la humedad consiste en secar a la muestra del residuo de Paiche (*Arapaima gigas*) y la muestra del inóculo en el horno de secado, de este modo se elimina la humedad presente en el residuo y se obtiene el porcentaje de sólidos totales presentes en la muestra.

Se homogenizo la muestra con ayuda de una bagueta, posteriormente las muestras en duplicados se pesaron en la placa Petri y/o pesa filtro limpio y seco, se tomó registro y se presionó el botón “Tara” de la balanza, luego de que se pesó 3.5 ± 1 g para el residuo de Paiche y para el inóculo. Se procedió a registrar los pesos en el cuaderno de apuntes considerando cuatro decimales, luego se colocaron las muestras en el horno de secado a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ por un tiempo de 12 horas.

Se retiraron las muestras y posteriormente se dejaron enfriar a temperatura ambiente al interior del desecador. Finalmente se pesaron las placas Petri y/o pesa filtros con la muestra seca, para medir la diferencia de pesos debido a la pérdida de la humedad.

El diagrama de flujo para el cálculo de la humedad se visualiza el anexo 01.

Cálculos:

El porcentaje de la humedad fue obtenida en la siguiente ecuación:

$$HU (\%) = \frac{(\text{Peso de muestra húmeda} - \text{Peso de muestra seca})}{\text{Peso de la muestra húmeda}} \times 100\%$$

Donde:

- HU (%): Porcentaje de Humedad

3.7.1.2 Cenizas

Este método consiste en la calcinación de la muestra para determinar el contenido de los minerales presentes en ella, y así mismo nos permite por diferencia de los pesos del antes y después de la calcinación, obtener la cantidad de sólidos volátiles presentes en la muestra del residuo de Paiche y en la muestra del inoculo que fueron calcinados.

La determinación de cenizas comienza con la homogenización de las muestras empleando una bagueta, todas estas muestras con su respectivo duplicado. A continuación, fueron pesados los crisoles limpios y secos en los cuales se verterán las muestras, se anotaron los pesos en el cuaderno de apuntes y taró la balanza. Luego se pesó $10 \pm 1g$ de las muestras sobre los crisoles y los pesos obtenidos fueron anotados, posteriormente los crisoles con las muestras fueron puestas en la hornilla eléctrica y gradualmente carbonizadas al interior de una campana extractora por 3 horas. Se dejó enfriar a temperatura ambiente e inmediatamente fueron puestas a calcinar en la mufla a una temperatura de $550^{\circ}C$ durante 12 horas.

Finalmente, las muestras calcinadas se extrajeron de la mufla y se dejaron enfriar dentro de un desecador a temperatura ambiente para luego pesar los crisoles con los contenidos de muestra que aun permanecieron, los cuales fueron registrados en el cuaderno de apuntes.

El diagrama de flujo para el cálculo de cenizas se visualiza el anexo 02.

Cálculos:

El porcentaje de cenizas fue obtenido en la siguiente ecuación:

$$CE (\%) = \frac{(Peso\ crisol\ con\ cenizas - Peso\ del\ crisol)}{Peso\ de\ la\ muestra} \times 100\%$$

Donde:

- CE (%): Porcentaje de Cenizas

3.7.1.3 Grasa total

Para determinar el porcentaje de grasa total se empleó el “Método de Extracción Soxhlet” en las muestras del residuo de Paiche y del inóculo.

El método consiste en la utilización de un solvente universal “Éter de petróleo” que será sometido a temperatura elevada juntamente con la muestra, para extraer los compuestos no polares o poco polares; como las grasas y aceites, las cuales pueden ser de origen animal y vegetal, el éter evaporado será condensando y recirculado dentro del sistema del Soxhlet.

Se procedió a la homogenización de las muestras empleando una bagueta, todas estas muestras con su respectivo duplicado, luego se pesó $3 \pm 1\text{g}$ de las muestras en el interior de envases de vidrio, los pesos fueron anotados en el cuaderno de apuntes, luego se pesó sobre un papel filtro $5 \pm 1\text{g}$ de la mezcla de sulfato de sodio y sulfato de cobre, los cuales fueron agregados y mezclados con cada muestra para ayudar a eliminar trazas de humedad. Inmediatamente los envases de vidrio con las muestras fueron puestas en el horno de secado a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ por un tiempo aproximado de 4 horas.

Una vez enfriados a temperatura ambiente dentro de un desecador, se empezó a extraer todo el contenido de las muestras secas del interior de los envases de vidrio, con ayuda de una bagueta, pinza y algodón.

Todo el contenido extraído de las muestras secas fue introducido en dedales de extracción, al cual también se puso algodón en el interior para evitar que este se derrame o escape durante el proceso de extracción de grasas.

En simultaneo se pesó a los vasos de extracción de grasas, se rotularon y anotó el pesaje en el cuaderno de apuntes. A continuación, se incorporan los dedales cargados con las muestras, los vasos de extracción y un aproximado de 150 ml de éter de petróleo por cada muestra; todo al equipo Extractor de Grasas Buchi y finalmente se inicia la extracción de grasas por un aproximado de 5 horas, se enfría y se pesan los vasos de extracción con el peso de grasa adquirida de los cuales por diferencia de pesos se puede obtener la cantidad de grasas presentes en las muestras.

El diagrama de flujo para el cálculo de grasas se visualiza el anexo 03.

Cálculos:

El porcentaje de grasa total fue obtenido en la siguiente ecuación:

$$GT(\%) = \frac{(\text{Peso vaso de extracción con grasa} - \text{Peso del vaso de extracción})}{\text{Peso de la muestra}} \times 100\%$$

Donde:

- GT (%): Porcentaje de Grasa Total

3.7.1.4 Proteína total

El “Método Kjeldahl” fue empleado para cuantificar la cantidad de nitrógeno proveniente de las proteínas de las muestras de residuos de Paiche e inóculo.

Para conocer la cantidad de proteína se empleó un factor de corrección al nitrógeno de 6.25 aplicado para alimentos y carnes. El desarrollo de este método se dividió en las siguientes tres etapas:

DIGESTION:

Se procedió a la homogenización de las muestras empleando una bagueta, todas estas muestras con su respectivo duplicado. Se continuó con el pesaje de 1 ± 0.1 g de las muestras del residuo de Paiche (*Arapaima gigas*) y del inóculo respectivamente, al interior del balón de digestión Kjeldahl, tomando nota del pesaje en el cuaderno de apuntes, luego se añadió aproximadamente 7 g del acondicionador de humedad (mezcla de sulfato de cobre con sulfato de sodio) y se dosificó 15 ml de ácido sulfúrico concentrado con la ayuda de pipetas.

Las muestras preparadas en los balones de digestión fueron homogenizadas y trasladadas al digestor Kjeldahl, se inició la digestión con 100°C, luego se fue incrementando la temperatura gradualmente hasta aproximadamente 400°C. Pasando aproximadamente 2 horas las muestras se tornaron de color azul verdoso y es cuando se detuvo la digestión, se dejó enfriar a temperatura ambiente hasta aproximadamente 100 °C e inmediatamente se procedió a agregar agua destilada a cada muestra homogenizándolas cuidadosamente, ya que aun contiene residuos de ácidos. Finalmente,

con ayuda de embudos estas muestras son trasladadas a una fiola de 100ml cada una y se enrasa con agua destilada hasta alcanzar 100ml de muestra, se homogenizo y reservó.

DESTILACION:

Con la ayuda de pipetas se vertió 5 ml de ácido sulfúrico 0.1 N al Erlenmeyer de 250 ml y se agregó 5 gotas del indicador de Tashiro, durante esta etapa se preparó un Erlenmeyer por cada fiola obtenida en la digestión y se reservó. De las muestras obtenidas en la digestión se extrajo 5 ml con una micropipeta y se colocó en un tubo Kjeldahl para cada muestra; las cuales fueron instaladas en el destilador Kjeldahl, se agregó un chorro de hidróxido de sodio al 20% hasta que la muestra cambie a un color marrón o azul, en paralelo se coloca el Erlenmeyer previo trabajado, en la salida del destilador y se enrasa con agua destilada.

Posteriormente se ejecuta la destilación de cada muestra reservada en el destilador Kjeldahl durante 2 minutos con 30 segundos, y la fracción destilada es recibida en el Erlenmeyer previo trabajado. Obteniendo así las muestras destiladas con una coloración rosada.

TITULACION:

Las muestras destiladas previamente, fueron tituladas en la bureta acoplable de titulación a frascos con la solución de hidróxido de sodio 0.02 N, la titulación continua hasta que se torne un color transparente e iniciando un verde ligero, asimismo se tomó nota del gasto de hidróxido de sodio en el cuaderno de apuntes, el cual posteriormente sirvió para determinar el contenido proteico.

El diagrama de flujo para el cálculo de proteínas se visualiza el anexo 04.

Cálculos:

El porcentaje de proteína total fue obtenido en la siguiente ecuación:

$$PT(\%) = \frac{((Bco - Gasto) \times N \times F \times 0,014 \times 20 \times 6,25 \times 100\%)}{Pm}$$

Donde:

- PT (%): Porcentaje de Proteína Total

- Bco: es el gasto de hidróxido de sodio para el blanco
- Gasto: es el gasto de hidróxido de sodio para la muestra
- N: es la normalidad del NaOH (0.02)
- F: es el factor del NaOH
- Pm: es el peso de la muestra

3.7.1.5 Carbohidrato total

Para determinar el porcentaje de carbohidrato total presente en las muestras de inoculo y del residuo de Paiche, se agruparon el contenido de: ceniza, humedad y de los nutrientes evaluados anteriormente, de los cuales se entiende que la parte restante está compuesta por el porcentaje de carbohidratos totales tal como se muestra en la siguiente ecuación:

Cálculos:

El porcentaje de carbohidrato total fue obtenido en la siguiente ecuación:

$$CT(\%) = 100 \% - [HU (\%) + CE (\%) + GT(\%) + PT(\%)]$$

Donde:

- CT (%): Porcentaje de Carbohidrato Total

3.7.1.6 Relación Carbono / Nitrógeno

Para calcular la relación Carbono / Nitrógeno, primero se estimó la concentración del Nitrógeno Total presente en la muestra mediante la cual se obtuvo de la concentración de Proteínas al ser dividida por 6.25 (García M. & Fernández S., s. f.). Mientras que para la estimación de la concentración del Carbono Total se obtuvo de la concentración de los sólidos volátiles al ser dividida por 1.8 (Adams et al., 1951). Finalmente, la relación se obtiene al dividir estos dos valores tal como se muestra en la siguiente ecuación:

Cálculos:

La relación Carbono / Nitrógeno fue obtenida en la siguiente división:

$$Relación \frac{C}{N} = \frac{Carb\acute{o}n\acute{o} Total}{Nitr\acute{o}g\acute{e}n\acute{o} Total}$$

3.7.2 Determinación del potencial teórico de biogás del residuo de Paiche

(Arapaima gigas)

Para estimar el potencial teórico de biogás producido por el residuo de Paiche, se necesitó determinar la composición de los macronutrientes (Carbohidratos, Proteínas y Grasas) presentes en toda materia orgánica, basándonos en el método de Weender.

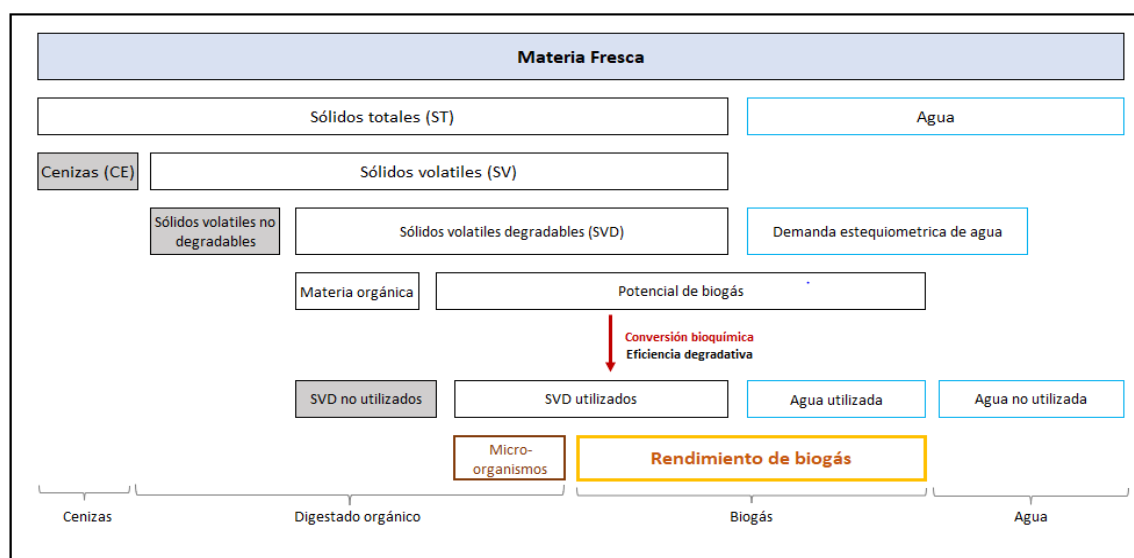
Por lo que se empleó métodos analíticos basados en la composición de nutrientes para determinar las diferentes fracciones de la composición del residuo de Paiche (*Arapaima gigas*).

Así mismo para determinar el potencial o rendimiento del biogás de un sustrato, se trabajó en base seca, porque la humedad puede variar ampliamente en cada sustrato, y también fluctuar diariamente, de esta manera tenemos una medición más consistente durante la digestión anaeróbica, además se siguió los lineamientos empleados en la VDI 4630 (2016) para facilitar la comparación entre sustratos.

En la siguiente figura, vemos la composición de una materia fresca y se interpreta que una fracción de esta se logra transformar en biogás.

Figura 6

Composición de la materia fresca



Nota: Adaptado de (Weinrich et al., 2018)

Además, también se consideró que los valores del potencial teórico de biogás para cada macronutriente presente en el residuo de Paiche de esta investigación fueron obtenidos de los valores determinados según la VDI 4630 (2016) tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4

Potencial teórico de biogás por tipo de macronutriente

Tipo de Macronutriente	Potencial teórico de biogás en base seca (Ln/Kg SV)
Carbohidratos (CT)	750
Grasas (GT)	1390
Proteínas (PT)	800

Nota: Adaptado de (Verein Deutscher Ingenieure, 2016)

Composición de los nutrientes en base fresca:

$$ST(\%) = 100 - HU(\%)$$

$$SV(\%) = ST(\%) - CE(\%)$$

$$ST(\%) = CE(\%) + GT(\%) + PT(\%) + CT(\%)$$

Donde:

- ST (%): Porcentaje de Sólidos Totales
- SV (%): Porcentaje de Sólidos Volátiles

Cálculos para transformar la composición del residuo a base seca:

$$CE(\%SV) = \frac{CE(\%)}{ST(\%)} * 100$$

$$GT(\%SV) = \frac{GT(\%)}{ST(\%)} * 100$$

$$PT(\%SV) = \frac{PT(\%)}{ST(\%)} * 100$$

$$CT(\%SV) = \frac{CT(\%)}{ST(\%)} * 100$$

Donde:

- CE(%SV): Porcentaje de Cenizas en base seca
- GT(%SV): Porcentaje de Grasa Total en base seca
- PT(%SV): Porcentaje de Proteína Total en base seca
- CT(%SV): Porcentaje de Carbohidrato Total en base seca

Cálculos para determinar el potencial teórico de biogás:

Para determinar el potencial teórico de biogás se emplearon los valores teóricos de la tabla N° 4.

$$PT \text{ Biogás } \left(\frac{L}{Kg} SV \right) = GT(\%SV) * 1390 + PT(\%SV) * 800 + CT(\%SV) * 750$$

Donde:

PT Biogás (Ln/Kg SV): Potencial Teórico de Biogás en litros por kg de solido volátil de la muestra en condiciones normales.

3.7.3 Determinación del rendimiento de biogás, del residuo de Paiche

Para la determinación del rendimiento de biogás producido durante la digestión anaeróbica de los residuos de paiche en biodigestores tipo batch, se aplicó el método estándar alemán VDI 4630 (2016), el cual consta con una serie de requisitos (Verein Deutscher Ingenieure, 2016), tal como se indica en la siguiente tabla:

Tabla 5

Requisitos para el sistema batch según la VDI 4630(2016)

Etapas	Requisitos / Condiciones para el sistema batch
Antes de la prueba por lotes	Los sustratos que serán biodigeridos deben provenir de residuos orgánicos
	Las botellas batch deben de ser entre 0,5 a 2 litros, para una muestra homogénea y 10 litros en caso de ser muestras heterogéneas
	Las botellas batch deben de ser herméticas, (vidrio, PMMA cristalino, etc.)
	El inóculo debe de presentar una gran variedad de microorganismos, por lo que puede ser plantas de tratamientos, digestores anaeróbicos, etc.

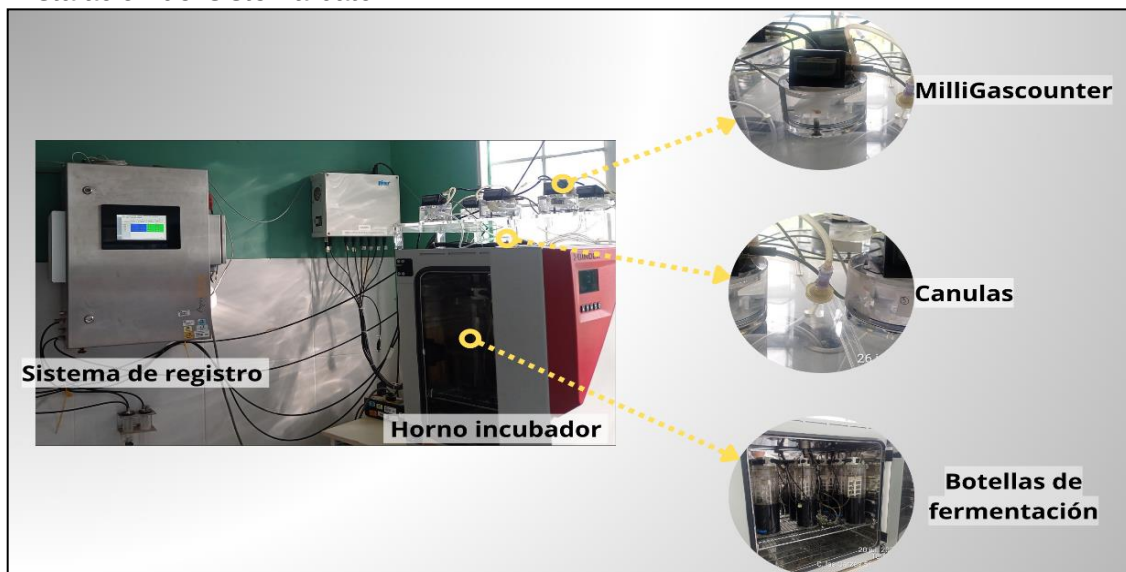
Etapas	Requisitos / Condiciones para el sistema batch
	Se debe de eliminar el material grueso para evitar inhibiciones durante el proceso
	Los SV del sustrato, deben ser menor al 50% de los SV del inoculo
	El inoculo deberá de ser desgasificado (agotado en producción endógena de biogás), durante una semana
	Adaptación opcional del inoculo con el digerido de pruebas de lotes anteriores con el mismo sustrato
	La concentración de los ST de la mezcla no debe superar el 10 % si se quiere garantizar una transferencia de masa adecuada
Durante la prueba por lotes	Es opcional trabajar en atmósfera de nitrógeno al momento de llenar el sustrato y el inoculo, sin embargo, antes de cerrar el recipiente se debe de lavar el aire con nitrógeno
	Las muestras serán vertidas en corto tiempo al interior del equipo batch para evitar intercambios con el aire del ambiente
	La temperatura del sistema batch debe ser mesófila
	El sistema batch deberá tener una agitación continua o deberá realizarse una mezcla manual periódica (15 Rpm durante 5 minutos cada hora)
	El registro será diario, con ayuda del analizador de gases
	La prueba finaliza cuando la producción diaria de biogás es menor al 0.5% del volumen total acumulado.
Posterior a la prueba por lotes	La microcelulosa cristalina se usa como referencia, y se espera un rendimiento de al menos un 80 % de 745Ln/Kg ST
	El rendimiento de biogás del inoculo debe ser menor al 20% del rendimiento de biogás de la mezcla
	El rendimiento de biogás que corresponde al sustrato debe ser mayor del 80% del biogás total producido en la mezcla
	El rendimiento neto de biogás del sustrato es la diferencia entre la producción de biogás de la mezcla menos la producción de biogás del inoculo
	Se deberá corregir el volumen del biogás a condiciones normales (273.15K y 101.33 KPa).

Nota: Adaptado de (Verein Deutscher Ingenieure, 2016)

Asimismo, en el anexo 05 se encuentra el diagrama de flujo de la metodología aplicada del Estándar alemán VDI 4630 (2016).

Figura 7

Instalación del sistema batch



Los elementos principales para la instalación del sistema de producción de biogás en biodigestores batch fueron los siguientes:

- Equipos MilliGascounter
- Horno incubador para sistema de botellas de fermentación
- Botellas de fermentación con dispositivo de agitación (PMMA cristalino)
- Sistema de registro y análisis de gases
- Cánulas para biogás

3.7.3.1 Antes de la puesta en marcha

Previo al inicio de la puesta en marcha del sistema de biodigestores tipo batch, se aseguró que: las botellas sean herméticas, las cuales son de PMMA (Polimetilmetacrilato) cristalinas, presentando una resistencia a variedad de productos químicos y una alta transparencia, además, tienen una capacidad de 2 litros las cuales fueron idóneas para un sustrato que ya estaba homogenizado.

El inóculo empleado pertenece al laboratorio de biogás del ITP, el cual cuenta con una gran variedad de microorganismos, así como también ya se encontraba adaptado a

diferentes residuos, además este inoculo no presenta una elevada concentración de material grueso.

Luego se realizaron cálculos para asegurar las relaciones entre los SV y ST, que son necesarias para cumplir con la metodología de la VDI 4630 (2016). Asimismo, las metodologías para determinar los SV y ST en las muestras, fueron realizadas tal como se explicó en apartados anteriores.

En adición a esto, para determinar los **SV y ST de la mezcla del batch** del se emplearon los siguientes cálculos:

Cálculos para determinar el porcentaje de SV en la mezcla:

$$SV\ batch(\%) = \frac{SV\ Ino.(\%) * Peso\ Ino. + SV\ RP.(\%) * Peso\ RP.}{Peso\ Ino. + Peso\ RP.}$$

Donde:

- SV batch(%) : Porcentaje de Solidos Volátiles de la Mezcla en el Batch
- SV Ino. (%): Porcentaje de Solidos Volátiles del Inoculo
- Peso Ino.: Peso del Inoculo
- SV RP. (%): Porcentaje de Solidos Volátiles del Residuo de Paiche
- Peso RP.: Peso del Residuo de Paiche

Cálculos para determinar el porcentaje de ST en la mezcla:

$$ST\ batch(\%) = \frac{ST\ Ino.(\%) * Peso\ Ino. + ST\ RP.(\%) * Peso\ RP.}{Peso\ Ino. + Peso\ RP.}$$

Donde:

- ST batch(%) : Porcentaje de Solidos Volátiles de la Mezcla en el Batch
- ST Ino. (%): Porcentaje de Solidos Volátiles del Inoculo
- Peso Ino.: Peso del Inoculo
- ST RP. (%): Porcentaje de Solidos Volátiles del Residuo de Paiche
- Peso RP.: Peso del Residuo de Paiche

Posteriormente, se realizaron cálculos adicionales para estimar la cantidad de sustratos que serán empleadas y mezcladas con el inóculo. Estos cálculos cumplieron con las siguientes relaciones:

Los SV del sustrato, deben ser menor al 50% de los SV del inóculo.

$$SV\ RP(\%) \leq 50\%(SV\ Ino\ (\%))$$

El inóculo debe de tener una concentración de SV superior al 50% de los ST.

$$SV\ Ino\ (\%) \geq 50\%(ST\ Ino\ (\%))$$

La concentración de los ST de la mezcla no debe superar el 10 % si se quiere garantizar una transferencia de masa adecuada.

$$ST\ batch\ (\%) \leq 10\%$$

En esta etapa se instala el sistema de los biodigestores batch y se comienza con desgasificar al inóculo para 4 diluciones en botellas según el anexo 06, por lo que la cantidad de inóculo vertida en las botellas se realizó acorde a la siguiente tabla:

Tabla 6

Cantidad de inóculo vertida por botella

BOTELLA DE FERMENTACIÓN	CANTIDAD INOCULO VERTIDA(g)
Batch 01	1060
Batch 02	1060
Batch 03	1060
Batch 04	1060

Así mismo en cada una de botellas de fermentación se cuenta con dispositivo de agitación continua y programada, posteriormente estas botellas fueron colocadas al interior del horno incubador a una temperatura de 37°C (mesófila), hasta que ya no se registró producción de biogás endógena del inóculo, finalmente este proceso de desgasificación duro aproximadamente 5 días.

3.7.3.2 Durante la puesta en marcha

En esta etapa se calculó las cantidades de mezclas en cada una de las botellas de fermentación para lograr cumplir las condiciones de la etapa anterior, así como para evitar una posible inhibición por exceso de grasas, por lo que se diluyó con agua destilada la muestra del residuo de Paiche en porcentajes del 12.5% y 25%.

Asimismo, se establecieron como control positivo a la mezcla del inóculo con Micro celulosa cristalina y control negativo al inóculo solo, del cual las combinaciones preparadas por cantidades para cada botella están en la siguiente tabla:

Tabla 7

Combinaciones en el sistema batch

BOTELLA DE FERMENTACIÓN	TIPO DE SUSTRATO	CANTIDAD INOCULO (g)	CANTIDAD SUSTRATO (g)
Batch 01	Residuos de paiche al 12.5%	1060	153.02
Batch 02	Residuos de paiche al 25%	1060	71.02
Batch 03	Micro celulosa cristalina	1060	10.01
Batch 04	N/A	1060	0

Posteriormente las cantidades de sustratos respectivas fueron vertidas en corto tiempo al interior del equipo batch que contiene inóculo ya desgasificado. De esta manera se evitó contaminar al proceso de digestión anaeróbica con el aire del medio ambiente. Dando inicio al proceso de producción de biogás a base del residuo de paiche, este experimento se mantuvo a una temperatura de 37°C y en agitación continua, los registros de la producción acumulada de biogás fueron realizados por el sistema de registro y análisis de gases AwiFLEX y AwiLAB.

Finalmente, este experimento se detuvo hasta que la producción de biogás diaria sea menor del 0.5% del biogás acumulado en las botellas que contenían residuos de Paiche, que fue aproximadamente a los 2 meses de iniciado la producción de biogás.

3.7.3.3 Posterior a la puesta en marcha

Los registros de producción de biogás diario deberán ser corregidos a condiciones normales (273.15K y 101.33 KPa) y en unidades de “Ln / Kg SV”, de esta manera ya se puede comparar la cantidad de biogás acumulado producida durante la prueba batch.

Para indicar que el inoculo estuvo en capacidad de biodegradar la materia orgánica, se compara los resultados obtenidos en las botellas que tuvieron como sustrato a la micro celulosa cristalina, y se espera que su rendimiento sea como mínimo el 80% de 745 Ln/Kg SV.

Así mismo, se debe de evaluar que el rendimiento del biogás en la botella de fermentación con solo el inoculo debe ser menor del 20% del rendimiento del biogás producido en cualquiera de las mezclas de: residuos de Paiche e inoculo.

3.7.3.4 Determinación del rendimiento de biogás del residuo de Paiche

Para determinar el rendimiento de biogás del residuo de Paiche, se deberá calcular la diferencia entre el rendimiento de biogás en la mezcla con el rendimiento de biogás del inoculo, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

Cálculos:

$$RB\ RP\left(\frac{L}{Kg}SV\right) = RB\ Mezcla\left(\frac{L}{Kg}SV\right) - RB\ Ino.\left(\frac{L}{Kg}SV\right)$$

Donde:

- RB RP (Ln/Kg SV): Rendimiento Neto de Biogás del Residuo de Paiche
- RB Mezcla (Ln/Kg SV): Rendimiento de Biogás en la Mezcla de Residuo de Paiche e Inoculo
- RB Ino (Ln/Kg SV): Rendimiento de Biogás solo del Inoculo

En resumen, en su inicio el biogás producido que se registra estaba en condiciones mesófilas y también se consideraron para diferentes cantidades de solidos totales, por lo que, para lograr establecer una comparación con cualquier sustrato, esta debe ser

transformada a condiciones normales y se debe de convertir en la siguiente unidad de medida: “Ln/Kg SV”

3.7.3.5 Caracterización fisicoquímica de la mezcla en el batch de inóculo y residuo

La caracterización fisicoquímica de la mezcla inóculo y residuo, fue realizada antes y después de iniciar el experimento en los biodigestores Batch. El cual consistió en determinar los siguientes parámetros y así evaluar la estabilidad del bio digerido.

Tabla 8

Parámetros de la mezcla en el batch

Parámetros	Método analítico
pH	APHA-AWWA-21°Ed 2510 B, 2005
FOS / TAC	Centro Federal Alemán de Investigación Agrícola - Método Nordmann

Cabe mencionar que la determinación de la humedad y ceniza se dio en separado por lo cual se usaron cálculos para la obtención de los porcentajes de humedad y ceniza en la mezcla del inóculo con el residuo.

Asimismo, se emplearon las mismas metodologías depara determinar el porcentaje de humedad y porcentaje de cenizas; utilizadas en el apartado del Análisis proximal del residuo de Paiche.

De esta manera se logró determinar el porcentaje de Sólidos Totales y el porcentaje de Sólidos Volátiles.

3.7.3.6 pH

La determinación del pH de la mezcla consistió en centrifugar un aproximado de 50 ± 1 g de la mezcla a una revolución de 3000 rpm durante 10 minutos, para eliminar el contenido grueso. Posteriormente se pesó 20 ± 1g del centrifugado en la balanza electrónica de laboratorio sobre el vasito del equipo titulador, posteriormente se introdujo la pastilla magnética. Finalmente se llevó al equipo Titulador de biogás y una vez estabilizado se dio lectura al resultado del pH.

3.7.3.7 FOS / TAC

En continuación de la determinación del pH en el equipo titulador de biogás se da comienzo a la valoración FOS / TAC, se comenzó a titular con ácido sulfúrico al 0.1 N hasta obtener un pH de 5 y se tomó nota del volumen de ácido usado.

Posteriormente se continuo la valoración hasta un pH de 4.4 y se tomó nota del volumen de ácido gastado.

El diagrama de flujo para el cálculo del pH y de la valoración FOS/TAC se visualiza el anexo 07.

Cálculos:

Para calcular la valoración $\frac{FOS}{TAC}$ se empleó la siguiente ecuación descrita según el Método Nordmann:

$$FOS = (Volumen\ de\ H_2SO_4\ añadido\ de\ pH\ 5\ hasta\ pH\ 4.4\ en\ ml \times 1.66 - 0.15) \times 500$$

$$TAC = Volumen\ de\ H_2SO_4\ añadido\ desde\ el\ princio\ hasta\ pH\ 5\ en\ ml \times 250$$

$$Relación\ \frac{FOS}{TAC} = \frac{FOS}{TAC}$$

Para la interpretación de los valores de la relación FOS/TAC, se considera los valores indicados en la siguiente tabla:

Tabla 9

Evaluación de la relación FOS/TAC

Valor relación FOS/TAC	Interpretación
>0.6	Sobrealimentación de biomasa
0.5-0.6	Excesivo ingreso de biomasa
0.4-0.5	El sistema está muy cargado
0.3-0.4	La producción de biogás es optima
0.2-0.3	Bajo ingreso de biomasa
<0.2	El ingreso de biomasa es bajísimo

Nota: adaptado de (Ulrich & Petra, 2008)

Estos resultados del valor sobre el pH y la relación FOS/TAC, fueron analizados al ser bio digeridos en el sistema en batch.

3.7.4 Determinación del modelo dinámico de producción acumulativa de biogás

Para la determinación del modelo dinámico que más se acople a la producción acumulativa de biogás para residuos de piel de Paiche en curtiembres, en biodigestores tipo batch y habiéndose revisado el repertorio de antecedentes los modelos mayormente empleados para residuos en especies de peces fueron los siguientes modelos:

Tabla 10

Modelos dinámicos de producción acumulativa de biogás

Modelo	Ecuación	Constantes
Primer orden	$S * (1 - e^{-k*T})$	S: Potencial de biogás en Ln/Kg SV K: Constante de reacción de primer orden.
Gompertz modificado	$S * e^{-e * \left(\frac{Rm * e}{S} * (\lambda - t) + 1 \right)}$	S: Potencial de biogás en Ln/Kg SV Rm: Tasa máxima de producción de biogás en mL/g SV/d λ = tiempo de retraso en días

Nota: Adaptado de (Weinrich et al., 2018)

3.8 Métodos estadísticos

El tratamiento de los datos y resultados obtenidos durante el tiempo de 57 días sobre producción acumulada de biogás en diferentes porcentajes de mezcla (12.5% y 25.0%). Durante esta investigación estos análisis fueron realizados, a través del complemento “Real Statistic” del software Microsoft Excel y del software IBM SPSS Statistics.

Para el análisis estadístico de los resultados de producción de biogás acumulada se realizaron las siguientes pruebas estadísticas: Prueba estadística de Kolmogorov - Smirnov, prueba de Kruskal-Wallis y la prueba de Dunn.

Asimismo, estos datos fueron previamente transformados según las especificaciones del estándar alemán VDI 4630 (2016).

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1 Potencial teórico del biogás del residuo del descarte de la piel de Paiche

El resultado de las características del residuo del descarte de piel de Paiche, se obtuvo aplicando la metodología del análisis de su composición química proximal, obteniendo valores de: humedad (HU), cenizas (CE), grasa total (GT), proteína total (PT) y carbohidrato total (CT). Tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 11

Composición química proximal del residuo de Paiche por porcentaje en peso

RESIDUO	HU (%) ¹	CE (%) ¹	GT (%) ¹	PT (%) ¹	CT (%) ¹
Descarte de piel de Paiche	50,60	0,21	42,14	6,94	0,11

(1) Composición en base fresca

Sin embargo, para determinar el potencial teórico de biogás es necesario determinar la cantidad de sólidos volátiles (SV) y transformar la composición en base seca, por lo que los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 12

Composición química proximal del residuo de Paiche en base seca

RESIDUO	RELACIÓN C/N	CE (%) ¹	SV (%) ¹	GT (%) ¹	PT (%) ¹	CT (%) ¹
Descarte de piel de Paiche	24,61	0,43	99,57	85,30	14,049	0,22

(1) Composición en base seca

Según la tabla se puede observar que el resultado del contenido de grasas de la muestra de residuos es de 85,3036% siendo un valor elevado. Según Thakur et al., (2024) la elevada concentración de cada macronutriente presenta efecto inhibitorio y en este caso una concentración elevada de ácidos grasos de cadena larga puede inhibir la producción de biogás, por lo que se puede considerar realizar un estudio de la composición de ácidos grasos, asimismo la relación Carbono / Nitrógeno de la muestra se encuentra en el rango de 20 a 30 estando de acuerdo con la investigación realizada por Barrenechea et al. (2021),

en el cual indica una relación adecuada para el desarrollo de los microorganismos, también sería una opción emplear cosustratos en caso se genere algún efecto inhibidor.

Usando las tablas de potencial de biogás de referencia para los macronutrientes (grasa, carbohidratos y proteínas) de la VDI 4630 (2016) – ver anexo 08 descritas anteriormente y considerado la composición química, se obtiene el siguiente resultado.

Tabla 13

Potencial teórico de biogás del descarte de la piel de Paiche

RESIDUO	POTENCIAL TEORICO (Ln/KG SV)
Residuo del descarte de piel de Paiche	1299.79

Este valor del potencial teórico de biogás obtenido es calculado tal cual se detalla en el anexo 09; siendo cercano al valor de potencial teórico para el macronutriente de tipo grasa de la VDI 4630 (2016) ya que el residuo cuenta con elevado porcentaje de grasa. Mientras que el potencial teórico de las fracciones de macronutrientes según otros autores, presentan los valores en la siguiente tabla:

Tabla 14

Potencial teórico de biogás por tipo de macronutriente

Tipo de Macronutriente	Weiland 2001 (Ln/Kg SV)	Baserga 1998 (Ln/Kg SV)	Weissbach 2009b (Ln/Kg SV)
Carbohidratos (CT)	750	790	791.5
Proteínas (PT)	650	700	798.5
Grasas (GT)	1125	1250	1350

Nota: Adaptado de (Weinrich et al., 2018)

Considerando la tabla anterior se obtienen los siguientes valores para el potencial teórico de biogás: 1052.652 Ln/Kg SV, 1166.395 Ln/Kg SV y 1265.540 Ln/Kg SV para Weiland, Baserga y Weissbach respectivamente. Sin embargo, estos valores de potencial teórico de biogás son inferiores al valor teórico de la VDI 4630 (2016), ya que estos autores solo validaron sus experimentos en base a residuos vegetales, y a la fecha no se encuentra

valores del potencial teórico de las fracciones de macronutrientes validadas para residuos de origen animal o similares.

4.2 Determinación del rendimiento de biogás del residuo de Paiche

Para determinar el rendimiento de biogás en las pruebas por lotes primero se previno el efecto inhibitor por exceso de solidos volátiles según lo recomendado por la VDI 4630 (2016), a diferencia del curtido en pieles de ganado vacuno en donde se requiere de un tratamiento previo para evitar algún efecto inhibitor (Kavan et al., 2022). En consecuencia, se mezcló el residuo de Paiche con agua destilada, obteniendo los residuos de Paiche al 12.5% y residuos de Paiche al 25.0%, de este modo se cumplió la condición que el SV del sustrato fue ser menor al 50% de los SV del inóculo según la VDI 4630 (2016) y así mismo se empleó la mayor cantidad de sustrato posible, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 15

Cantidad de SV empleados en las botellas de fermentación

BOTELLA DE FERMENTACIÓN	TIPO DE SUSTRATO	CANTIDAD SUSTRATO (g)	SV SUSTRATO (g)
Batch 01	Residuos de Paiche al 12.5% (R. Paiche al 12,5%)	153.02	9.4088
Batch 02	Residuos de Paiche al 25% (R. Paiche al 25%)	71.02	8.7337
Batch 03	Microcelulosa cristalina	10.01	
Batch 04	N/A	0.00	-

Los valores del rendimiento de la producción de biogás, generado a partir de los residuos de Paiche, fueron transformados a condiciones normales y llevados a unidades comparables como lo es en “Ln/Kg SV de muestra seca”, de los cuales se tuvieron los siguientes resultados:

Tabla 16

Resultados del rendimiento de biogás diario por tipo de sustrato

Tiempo (Días)	TIPO DE SUSTRATO			
	R. Paiche 12.5%	R. Paiche 25%	Microcelulosa Cristalina	Inoculo
	(Ln/Kg SV)	(Ln/Kg SV)	(Ln/Kg SV)	(Ln/Kg SV)
0	0.00	0.00	0.00	0
1	2.98	3.92	2.87	0
2	3.26	3.92	3.24	0
3	3.26	3.92	3.24	0
4	3.26	3.92	3.24	0
5	3.26	3.92	35.75	0
6	8.39	5.52	103.82	0
7	11.37	11.95	148.00	0
8	11.37	16.47	169.85	0
9	11.37	23.50	183.19	0
10	11.37	30.02	198.65	0
11	11.37	34.84	207.64	0
12	57.04	38.66	211.99	0
13	63.66	42.27	214.86	0
14	68.41	46.09	217.27	0
15	71.40	58.94	217.55	0
16	74.75	58.94	219.59	0
17	78.95	58.94	222.46	0
18	81.00	58.94	225.33	0
19	82.58	59.95	228.85	0
20	83.70	64.46	233.48	0
21	84.91	67.98	239.59	0
22	86.40	70.89	247.74	0
23	87.89	73.50	257.93	0
24	89.48	76.71	268.11	0
25	91.25	80.23	278.58	0
26	93.67	84.45	289.97	0
27	96.38	88.96	302.47	0
28	99.92	93.78	316.09	0
29	104.11	98.90	330.35	0
30	109.89	106.03	346.93	0
31	116.41	112.76	363.78	0
32	123.96	120.19	381.29	0
33	133.56	128.33	399.53	0
34	144.38	136.96	418.15	0
35	156.96	146.70	437.41	0
36	169.54	156.64	456.30	0
37	181.57	165.68	473.44	0
38	195.08	176.92	490.85	0
39	209.53	188.27	507.15	0
40	226.02	201.12	522.61	0
41	240.66	212.07	534.19	0
42	257.86	224.32	545.31	0
43	274.03	236.87	554.01	0
44	290.52	248.22	561.51	0
45	307.02	260.77	568.55	0
46	321.75	271.71	576.05	0
47	338.24	282.96	585.41	0
48	350.83	291.69	591.24	0

Tiempo (Días)	TIPO DE SUSTRATO			
	R. Paiche 12.5%	R. Paiche 25%	Microcelulosa Cristalina	Inoculo
	(Ln/Kg SV)	(Ln/Kg SV)	(Ln/Kg SV)	(Ln/Kg SV)
49	363.13	300.43	595.32	0
50	371.52	306.86	595.87	0
51	380.28	317.50	596.98	0
52	383.26	324.23	596.98	0
53	383.82	329.45	596.98	0
54	384.20	333.57	596.98	0
55	384.48	336.18	596.98	0
56	384.75	337.48	596.98	0

Nota: R. Paiche = Residuos del descarte de la piel de Paiche

Las pruebas batch concluyeron a los 57 días, cuando la producción diaria de biogás para ambas muestras (el R. Paiche al 12.5% y R. Paiche al 25%) fue inferior al 0.5% del volumen de la producción de biogás acumulado hasta ese día. Esto se alineó con las pautas de la VDI 4630 (2016), la cual indica que se debe finalizar el ensayo en estas condiciones.

A diferencia de otros trabajos de investigación previamente mencionados, donde al realizar esta prueba batch suelen finalizar aproximadamente después de 20 días, y en la mayoría de los casos, después de 40 días sólo queda un nivel muy pequeño de biogás tal como lo indica el mismo estándar. (Verein Deutscher Ingenieure, 2016).

En consecuencia, el rendimiento final de biogás al cabo de 57 días del inicio de la digestión anaeróbica en los biodigestores tipo batch para cada sustrato fue:

Para el control positivo (microcelulosa cristalina) tuvo un valor de 596.98 Ln/Kg SV, el cual representa el 80.132 % del potencial de biogás esperado (745 Ln/Kg SV), encontrándose por encima del 80% tal como se establece (Verein Deutscher Ingenieure, 2016) en la VDI 4630 (2016), permitiendo verificar la calidad y el funcionamiento correcto del inoculo, obteniendo resultados similares a los de (Bücker et al., 2020).

La diferencia de los valores obtenidos para los rendimientos de biogás se ven afectados por los parámetros: el tipo de la composición de los sustratos, la relación de ST, entre otros tal como lo indica (Silva, 2023)

Mientras que el rendimiento de biogás en las muestras de los residuos de Paiche con porcentajes al 12.5 % y 25.0%, tuvieron una producción de 384.75 Ln/Kg SV y 337.48 Ln/Kg SV respectivamente, y también se obtuvo que la producción de biogás del inóculo solo, es nula, por lo que no se debería restar ninguna cantidad de biogás producido en los experimentos. Además, su rendimiento de biogás mediante su digestión anaeróbica en ensayos tipo batch de ambas muestras se aproxima al valor propuesto en la hipótesis de 400 Ln/Kg SV siendo el rendimiento para residuos de piel de Tilapia (*Oreochromis mossambicus*) otra especie según (Fonseca et al., 2020b). Con estos resultados se pueden considerar un estudio más detallado para la producción de biogás. Asimismo, en la siguiente tabla se muestra el valor de rendimientos para diversos residuos pesqueros de otras especies de peces.

Tabla 17

Rendimientos máximos de biogás para diversas especies de pez

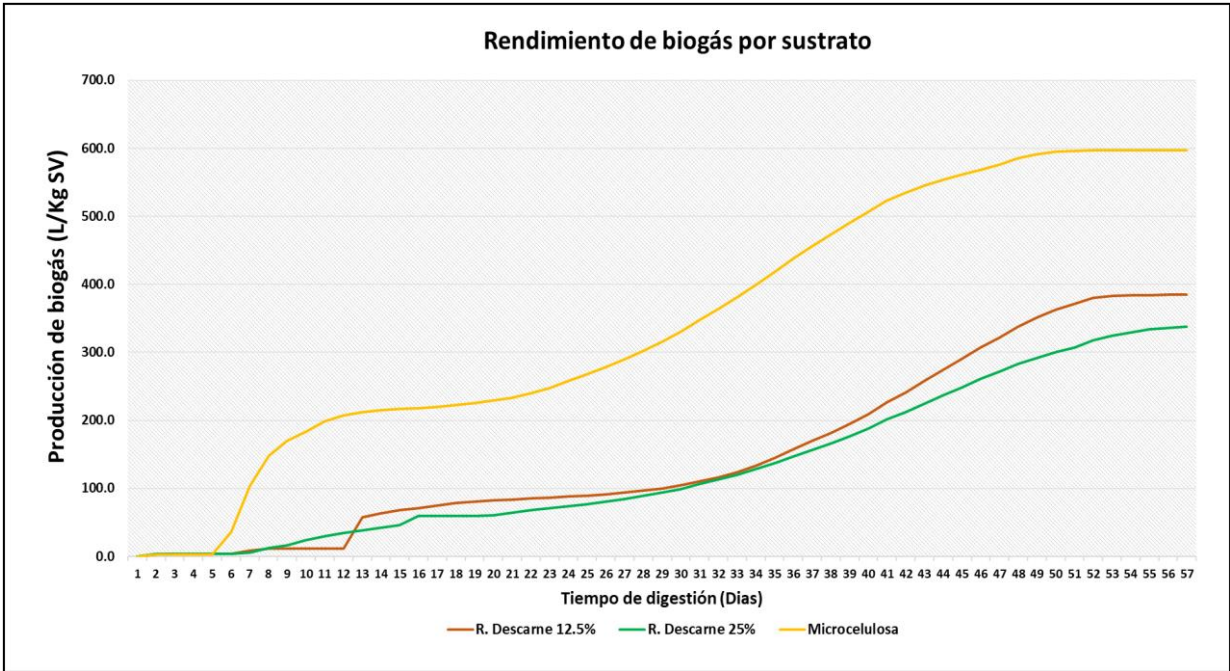
Rendimiento biogás (LN / KG SV)	Tipo de sustrato empleado	Especie de pez	Autor
1011	Cabeza	Tilapia (<i>Oreochromis mossambicus</i>)	(Fonseca et al., 2020b)
964	Esqueleto		
966	Vísceras		
889	Mezcla		
621	Aletas		
400	Piel		
286	Escamas		
714.62	Mezcla (tripas, tracto digestivo y vísceras)	Pargo (<i>Pagrus pagrus</i>), Corvina (<i>Argyrosomus regius</i>) y Atún (<i>Thunnus</i>)	(Cadavid-Rodríguez et al., 2019)
224.03	Mezcla (Vísceras, cabeza, piel y espinas)	Mero (<i>Epinephelus marginatus</i>) y Corvina (<i>Argyrosomus regius</i>)	(Silva Dayse, 2023)
696.27	Vísceras de pescado	Carpa común (<i>Cyprinus carpio</i>)	(Bücker et al., 2020)
688.78	Aceite de vísceras de pescado		
378.5	Lodo solido de anchoveta	Anchoveta (<i>Engraulis ringens</i>)	(Paone et al., 2021)
433.4	Vísceras	Carpa cabezona (<i>Hypophthalmichthys nobilis</i>)	(Xu et al., 2017)

De la presente tabla se puede visualizar que en la mayoría de los estudios se suelen evaluar los residuos pesqueros como mezclas, sin embargo, en la investigación realizada se analizo el rendimiento de biogás específicamente del residuos de la piel del Paiche, a diferencia de los residuos evaluados como mezclas.

En la siguiente figura se indica el rendimiento de biogás para los porcentajes en dilución de los residuos de Paiche.

Figura 8

Producción de biogás en función del tiempo



Nota: Elaboración propia

Según la figura, se visualiza que el comportamiento de la producción de biogás en la digestión anaeróbica para ambos sustratos de descarnes se presenta un tiempo de retraso aproximadamente de 6 días antes de la producción de biogás, según Thakur et al. (2024) este retraso se podría deber a que una elevada concentración en grasa provoca una baja digestibilidad.

También se considera un lapso en el que no hubo producción de biogás debido a que parte de la energía producida se empleó en el periodo de adaptación del inóculo para el crecimiento y desarrollo de microorganismos, tal como lo indica (Weinrich et al., 2018).

Asimismo, el comportamiento de la producción de biogás es similar para ambos porcentajes del residuo (12.5 % y 25%) y tienen una tendencia sigmoidea, entre los días 31 y 34 se visualiza un incremento en la producción de biogás, este comportamiento sigmoideo de la producción de biogás se puede explicar que según (Guerrero et al., 2019) podría deberse a la inhibición por la alta concentración de ácidos grasos de cadena corta en la etapa de acidogénesis presentando así una disminución de producción de biogás.

Asimismo, en la etapa de acetogénesis gran parte es transformada en acetato en consecuencia otra vez se incrementa la producción de biogás.

Finalmente, visualmente el mejor rendimiento del biogás producido por la digestión anaeróbica de residuos de descarte de la piel del Paiche (*Arapaima gigas*) en biodigestores batch, según la gráfica se obtuvo que el mejor rendimiento de biogás se produjo en el menor porcentaje de dilución al 12.5% en residuos, con un porcentaje en grasa del 10.54%. Sin embargo, Fonseca et al. (2020) encontró en su investigación sobre los residuos de Tilapia (*Oreochromis niloticus*) que la mayor producción de biogás se produce cuando hay una mayor concentración en grasas difiriendo con los resultados obtenidos en la presente investigación.

Adicionalmente al finalizar la prueba batch se analizó el pH y la relación FOS/TAC de las mezclas, de las cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 18

Resultados de mediciones del pH y FOS/TAC en las botellas

BOTELLA DE FERMENTACIÓN	TIPO DE MEZCLA	pH Final	FOS/TAC Final
Batch 01	Residuos de paiche al 12.5% e inóculo	8.67	0.1262
Batch 02	Residuos de paiche al 25% e inóculo	8.75	0.1305
Batch 03	Micro celulosa cristalina e inóculo	8.83	0.1344
Batch 04	Solo inóculo	8.72	0.1254

De los cuales los resultados de la relación FOS/TAC son menores a 2, esto debido a que en el sistema batch solo se hace ingresar una vez la biomasa, confirmado lo establecido por (Ulrich & Petra, 2008) que el ingreso de biomasa es bajísimo y que no hay mucho material disponible para ser biodegrado.

El pH de los bio digeridos presentaron valores superiores a 8.0, este valor difiere de las biografías, ya que el inóculo empleado pertenece a lodos de aguas de residuales en industrias pesqueras y ha sido adaptado para trabajar con pH ligeramente alcalino con elevado contenido de amoníaco, similar a la investigación realizada por (Rincón et al., 2021) en la que se obtuvieron mejores resultados en la producción de metano al trabajar con pH 9 (ligeramente alcalino) que con un pH neutro.

4.3 Análisis del modelo dinámico de producción acumulativa de biogás

4.3.1 Análisis de los modelos dinámicos para el residuo de Descarne al 12.5%

Los datos de los resultados de la producción acumulativa de biogás para el residuo de descarte de Paiche al 12.5% fueron ingresados en el Software IBM SPSS, además de las ecuaciones para los modelos de Primer orden y Gompertz modificado. De los cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 19

Resultados de producción acumulativa de biogás para el residuo de descarte al 12.5% según modelos dinámicos:

Tiempo (Días)	Valores de Laboratorio (Ln/Kg SV)	Primer Orden (Ln/Kg SV)	Gompertz Modificado (Ln/Kg SV)
0	0	0	8.07
1	2.98	6.01	9.22
2	3.26	12.02	10.48
3	3.26	18.04	11.89
4	3.26	24.05	13.43
5	3.26	30.06	15.14
6	8.39	36.07	17
7	11.37	42.08	19.04
8	11.37	48.09	21.27
9	11.37	54.1	23.68
10	11.37	60.11	26.3
11	11.37	66.12	29.13
12	57.04	72.12	32.18
13	63.66	78.13	35.46
14	68.41	84.14	38.98
15	71.4	90.15	42.74

Tiempo (Días)	Valores de Laboratorio (Ln/Kg SV)	Primer Orden (Ln/Kg SV)	Gompertz Modificado (Ln/Kg SV)
16	74.75	96.16	46.76
17	78.95	102.16	51.04
18	81	108.17	55.58
19	82.58	114.17	60.4
20	83.7	120.18	65.5
21	84.91	126.19	70.88
22	86.4	132.19	76.55
23	87.89	138.19	82.51
24	89.48	144.2	88.77
25	91.25	150.2	95.33
26	93.67	156.21	102.18
27	96.38	162.21	109.33
28	99.92	168.21	116.78
29	104.11	174.22	124.53
30	109.89	180.22	132.57
31	116.41	186.22	140.92
32	123.96	192.22	149.55
33	133.56	198.22	158.47
34	144.38	204.22	167.68
35	156.96	210.22	177.17
36	169.54	216.22	186.93
37	181.57	222.22	196.96
38	195.08	228.22	207.25
39	209.53	234.22	217.8
40	226.02	240.22	228.6
41	240.66	246.22	239.64
42	257.86	252.22	250.91
43	274.03	258.21	262.4
44	290.52	264.21	274.1
45	307.02	270.21	286.01
46	321.75	276.21	298.11
47	338.24	282.2	310.4
48	350.83	288.2	322.86
49	363.13	294.19	335.49
50	371.52	300.19	348.27
51	380.28	306.18	361.19
52	383.26	312.18	374.25
53	383.82	318.17	387.42
54	384.2	324.17	400.71
55	384.48	330.16	414.1
56	384.75	336.15	427.57

En el día N°42, se observa un aumento notable en los valores de laboratorio pasando de 240.66 Ln/Kg SV a 257.86 Ln/Kg SV (aumento de 17.2 Ln/Kg SV en un solo día), habiendo llegado a un pico máximo de producción y posteriormente su producción diaria empieza a disminuir, para lo cual el modelo dinámico Gompertz modificado se ajusta mejor a los datos por lo que se comprueba posteriormente en los análisis estadísticos.

Los valores del modelo dinámico Gompertz modificado al finalizar el experimento tienden a ser mayores a los valores obtenidos en el laboratorio y también a los del modelo dinámico de Primer orden.

4.3.2 Análisis de los modelos dinámicos para el residuo de Descarne al 25.0%

Los datos de los resultados de la producción acumulativa de biogás para el residuo de descarte de Paiche al 25.0% fueron ingresados en el Software IBM SPSS, además de las ecuaciones para los modelos de Primer orden y Gompertz modificado. De los cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 20

Resultados de producción acumulativa de biogás para el residuo de descarte al 25.0% según modelos dinámicos:

Tiempo (Días)	Valores de Laboratorio (Ln/Kg SV)	Primer Orden (Ln/Kg SV)	Gompertz Modificado (Ln/Kg SV)
0	0.00	0	6.88
1	3.92	5.21	7.9
2	3.92	10.42	9.03
3	3.92	15.63	10.28
4	3.92	20.84	11.67
5	3.92	26.05	13.2
6	5.52	31.25	14.88
7	11.95	36.46	16.72
8	16.47	41.67	18.73
9	23.50	46.88	20.91
10	30.02	52.08	23.27
11	34.84	57.29	25.83
12	38.66	62.5	28.59
13	42.27	67.7	31.55
14	46.09	72.91	34.73
15	58.94	78.11	38.12
16	58.94	83.32	41.75
17	58.94	88.52	45.6
18	58.94	93.73	49.68
19	59.95	98.93	54.01
20	64.46	104.14	58.58
21	67.98	109.34	63.39
22	70.89	114.54	68.45
23	73.50	119.75	73.76
24	76.71	124.95	79.32
25	80.23	130.15	85.12
26	84.45	135.35	91.18
27	88.96	140.55	97.48
28	93.78	145.75	104.03
29	98.90	150.95	110.82
30	106.03	156.15	117.85
31	112.76	161.35	125.11
32	120.19	166.55	132.6
33	128.33	171.75	140.32

Tiempo (Días)	Valores de Laboratorio (Ln/Kg SV)	Primer Orden (Ln/Kg SV)	Gompertz Modificado (Ln/Kg SV)
34	136.96	176.95	148.26
35	146.70	182.15	156.41
36	156.64	187.35	164.77
37	165.68	192.55	173.32
38	176.92	197.75	182.07
39	188.27	202.94	191
40	201.12	208.14	200.11
41	212.07	213.34	209.38
42	224.32	218.53	218.81
43	236.87	223.73	228.39
44	248.22	228.93	238.11
45	260.77	234.12	247.96
46	271.71	239.32	257.93
47	282.96	244.51	268.01
48	291.69	249.71	278.19
49	300.43	254.9	288.46
50	306.86	260.09	298.82
51	317.50	265.29	309.25
52	324.23	270.48	319.74
53	329.45	275.67	330.29
54	333.57	280.87	340.88
55	336.18	286.06	351.51
56	337.48	291.25	362.16

En el día N°41, se aprecia que los valores en ambos modelos dinámicos se aproximan en consecuencia, los valores obtenidos en según el modelo dinámico Gompertz modificado comienzan a ser superiores a los valores del modelo dinámico de Primer orden, porque la producción de biogás entra en una fase de desaceleración, y la capacidad de producción se va agotando siendo el modelo dinámico Gompertz modificado el que se ajusta mejor a la desaceleración progresiva, comprobándose posteriormente en los análisis estadísticos.

Finalmente, los valores del modelo dinámico Gompertz modificado al finalizar el experimento tienden a ser mayores a los valores obtenidos en el laboratorio y también a los del modelo dinámico de Primer orden.

4.4 Contrastación de la hipótesis

En este ítem se presenta la contrastación de la hipótesis general mediante la prueba de normalidad de Kolmogorov -Smirnov y posteriormente la prueba de Kruskal – Wallis.

4.4.1 Análisis estadístico del rendimiento de biogás

Los datos obtenidos de la producción acumulativa de biogás para los residuos del descarte de la piel de Paiche para ambas proporciones de porcentajes (12.5%, 25.0%) se sometieron a una prueba de normalidad de Kolmogorov -Smirnov, los cuales no presentaron una distribución normal, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 21

Análisis estadístico - prueba Kolmogorov -Smirnov en la producción acumulativa de biogás

	Descarte 12.5%	Descarte 25.0%
W-stat	0.872361597	0.890521565
p-value	2.30366E-05	9.02408E-05
alpha	0.05	0.05
normal	no	no

En consecuencia, se realizó la prueba de Kruskal – Wallis para los resultados de producción acumulativa de biogás, del cual: Hipótesis nula (H_0): No existe diferencia significativa entre los tratamientos; Hipótesis alterna (H_1): Existe diferencia significativa entre los tratamientos; Criterio de decisión: Si (*p-value*) es menor que (*Alpha*) entonces se rechaza la hipótesis nula. Los resultados del análisis se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 22

Análisis estadístico - prueba Kruskal – Wallis en la producción acumulativa de biogás

	Descarte 12.5%	Descarte 25.0%	
median	99.9169216	93.7839823	
rank sum	3421.5	3133.5	
count	57	57	114
r ² /n	205380.0395	172260.0395	377640.079
H-stat			0.66597615
H-ties			0.66614073
df			1
p-value			0.41440037
alpha			0.05
sig			no

Posterior al análisis siendo el valor de (*p-value*) mayor a (*Alpha*) se acepta la hipótesis nula, en conclusión, no existe diferencia estadísticamente significativa para las proporciones de porcentajes (12.5%, 25.0%) en los residuos de la piel del Paiche.

4.4.2 Análisis estadístico de los modelos dinámicos

Los resultados de los parámetros estimados para el modelo dinámico se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 23

Resultados de los parámetros en los modelos dinámicos

Parámetros	Descarne 12.5%	Descarne 25.0%
RB (L kg VS ⁻¹)	384.750	337.480
RBGM (L kg VS ⁻¹)	427.570	362.160
Diferencia (%)	11.129	7.313
R ² GM	0.978	0.992
RBPO (L kg VS ⁻¹)	336.150	291.250
Diferencia (%)	-12.632	-13.699
R ² PO	0.870	0.892

RB: rendimiento de biogás, RBGM: rendimiento de biogás según el modelo de Gompertz, RBPO: rendimiento de biogás según el modelo de Primer orden, R²: coeficiente de determinación

El modelo de Gompertz modificado presento la diferencia más baja entre el Rendimiento de biogás medido y predicho los residuos de descarte de Paiche al 12.5% y descarte de Paiche al 25% con valores de 11.129% y 7.313% respectivamente en comparación con el modelo de Primer orden. Así mismo el indicador estadístico R² (coeficiente de determinación) también se ajustaron mejor estadísticamente para el modelo de Gompertz modificado para los residuos de descarte de Paiche al 12.5% y descarte de Paiche al 25% con valores de 0.980 y 0.992 respectivamente. Este resultado difiere a los obtenidos por (Fonseca et al., 2020b) por su diferente composición química con un bajo porcentaje en grasas a diferencia del residuo de Paiche, por eso obtuvo un mejor ajuste con el modelo de Primer orden mientras investigaba la cinética del biogás para los residuos de diferentes partes de la Tilapia (*Oreochromis mossambicus*).

Conclusiones

El residuo del descarte de la piel de Paiche tiene un potencial teórico de biogás elevado con el valor de 1290 Ln/Kg SV obtenidos mediante cálculos basados en la composición de nutrientes, lo cual comprueba que tiene potencial para ser aplicado como alternativa en producción de energía limpia a base del biogás.

Los porcentajes en mezcla del residuo del descarte de la piel de Paiche (12.5% y 25.0%) no presentaron diferencias estadísticas significativas para los valores de los rendimientos de biogás obtenidos, lo cual indica que ambos ensayos tienen similar rendimiento.

El modelo dinámico que mejor se ajustó a la producción acumulada de biogás para ambos porcentajes de mezclas del residuo del descarte de la piel de Paiche (12.5% y 25.0%) fue el modelo dinámico de Gompertz modificado.

Recomendaciones

Plantear el uso de un cosustrato con elevada carga orgánica y baja concentración de grasas; como lodo de aguas residuales, entré otros. El cual permita acelerar la biodigestión de las grasas presentes en el residuo del descarte de Paiche y así mejorar el proceso de producción de biogás durante la biodigestión anaeróbica en los biorreactores batch.

Realizar pruebas en un biodigestor semicontinuo con base a los datos obtenidos durante el experimento en los biorreactores batch para residuos del descarte de Paiche, con el fin continuar con la investigación en una escala superior a nivel laboratorio.

Realizar estudios sobre la composición de los principales ácidos grasos de cadena larga que están presentes en el residuo del descarte de Paiche y de los ácidos grasos volátiles que se obtienen durante las etapas de la biodigestión para conocer sus posibles efectos inhibidores y así controlarlos.

Referencias bibliográficas

- Adams, R., Bennett, F., Dixon, J., Lough, R., Maclean, F., & Martin, G. (1951). *The utilization of organic wastes in N.Z. | New Zealand Engineering*.
<https://search.informit.org/doi/epdf/10.3316/informit.359233295091848>
- Alvarez Huamani, M. Y. (2020). Análisis de ciclo de vida del biometano como combustible para el transporte en comparación con el diésel y el gas natural. Arequipa, 2018. In *Universidad Católica de Santa María*.
<https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3363313>
- Balagurusamy, N., & Chandel, A. K. (2021a). *Biogas production: From anaerobic digestion to a sustainable bioenergy industry*. Springer International Publishing.
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-58827-4>
- Balagurusamy, N., & Chandel, A. K. (2021b). Biogas production: From anaerobic digestion to a sustainable bioenergy industry. In *Biogas Production: From Anaerobic Digestion to a Sustainable Bioenergy Industry*. Springer International Publishing.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-58827-4>
- Barrenechea Ramírez, S., Reyes Chávez, J., Ayala, M. E., & Steinmetz, R. (2021). Valorización energética de macroalgas marinas, residuos pesqueros y de vegetales como sustrato de codigestión anaerobia en la Bahía de Pucusana, Lima-Perú. *REVISTA DE INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA PRODUCTIVA*.
<https://doi.org/10.54353/ritp.v3i1.e004>
- Bücker, F., Marder, M., Peiter, M. R., Lehn, D. N., Esquerdo, V. M., Antonio de Almeida Pinto, L., & Konrad, O. (2020). Fish waste: An efficient alternative to biogas and methane production in an anaerobic mono-digestion system. *Renewable Energy*, 147, 798–805.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119313278?via%3Dihub>
- Cadavid-Rodríguez, L. S., Vargas-Muñoz, M. A., & Plácido, J. (2019). Biomethane from fish waste as a source of renewable energy for artisanal fishing communities. *Sustainable*

Energy Technologies and Assessments, 34, 110–115.

<https://doi.org/10.1016/J.SETA.2019.05.006>

Carlos Ernesto Flores Tapia, & Lissette Flores Cevallos, K. (2021). *PRUEBAS PARA COMPROBAR LA NORMALIDAD DE DATOS EN SHAPIRO-WILK Y KOLMOGÓROV-SMIRNOV TESTS TO VERIFY THE NORMALITY OF DATA IN PRODUCTION PROCESSES*. 23(2), 83–106.

<https://revistas.up.ac.pa/index.php/societas/article/view/2302/2137>

Chu Koo, F., Fernández Méndez, C., Rebaza Alfaro, C., Darías, M. J., García Dávila Carmen, García Vásquez, A., Tello Martín, S., Campos Baca, L., Alván Aguilar, M., Ayarza Rengifo, J., Arévalo Llerena, L., François Renno, J., & Arbildo, H. (2017). *El cultivo del paiche. Biología, procesos productivos, tecnologías y estadísticas*. (INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE LA AMAZONÍA PERUANA – IIAP & GOBIERNO REGIONAL DE LORETO, Eds.; 01 ed.). INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE LA AMAZONÍA PERUANA – IIAP. <https://hdl.handle.net/20.500.12921/267>

Comisión para la Cooperación Ambiental. (2017). *Caracterización y gestión de los residuos orgánicos en América del Norte*. <http://www.cec.org/files/documents/publications/11770-characterization-and-management-organic-waste-in-north-america-white-paper-es.pdf>

Da Costa Gomez, C. (2013). Biogas as an energy option. In *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications* (pp. 1–16). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1533/9780857097415.1>

David L. Nelson, & Michael M. Cox. (2009). *Lehninger, Principios de Bioquímica*. <https://www.studocu.com/latam/document/universidad-de-panama/bioquimica/lehninger-capitulo-11-lipidos/18029815>

De María Guerrero-Toledo, F., Espinosa-Solares, T., Balagurusamy, N., Guerra-Ramírez, D., Huber, D. H., & Hernández-Eugenio, G. (2019). Potencial bioquímico de metano

- de pollinaza adicionada con propionato en condiciones mesofílicas. *Scientia Agropecuaria*, 10(2), 307–311. <https://doi.org/10.17268/SCI.AGROPECU.2019.02.17>
- Deng, L., Liu, Y., & Wang, W. (2020). Biogas technology. In *Biogas Technology*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-4940-3>
- Dinno, A. (2022). *Title Dunn's Test of Multiple Comparisons Using Rank Sums*.
- Dirección General de Energía. (2020, March 18). *A fondo: las energías renovables en Europa*. Comisión Europea. https://commission.europa.eu/news/focus-renewable-energy-europe-2020-03-18_es
- Ellen MacArthur Foundation. (2017). *The butterfly diagram: visualising the circular economy*. Ellen MacArthur Foundation. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram>
- Espinoza Sosa, F. C. (2017). Elaboración de ensilado biológico a partir de residuos de paiche (*Arapaima gigas*). In *Universidad Nacional Agraria La Molina*. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3272>
- Fondo Nacional de Desarrollo Pesquero. (2016). Protocolo de Reproducción del Paiche *Arapaima gigas*. In *Fondo Nacional de Desarrollo Pesquero – FONDEPES*. <https://rnia.produce.gob.pe/wp-content/uploads/2019/09/Protocolo-de-Reproducci%C3%B3n-del-Paiche.pdf>
- Fonseca, C., Frare, L. M., D'avila, L., & Edwiges, T. (2020a). Influence of different waste compositions from tilapia fish on methane production. *Journal of Cleaner Production*, 265, 121795. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.121795>
- Fonseca, C., Frare, L. M., D'avila, L., & Edwiges, T. (2020b). Influence of different waste compositions from tilapia fish on methane production. *Journal of Cleaner Production*, 265, 121795. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.121795>
- García Martínez, E., & Fernández Segovia, I. (n.d.). Determinación de proteínas de un alimento por el método Kjeldahl. Valoración con un ácido fuerte. *UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA*.

- International Business Machines. (1968). *IBM SPSS Statistics*.
<https://www.ibm.com/products/spss-statistics>
- Joaquín Amat Rodrigo. (n.d.). *Test Kruskal-Wallis*. Retrieved January 3, 2024, from
https://cienciadedatos.net/documentos/20_kruskal-wallis_test
- Kavan Kumar, V., Mahendiran, R., Subramanian, P., Karthikeyan, S., & Surendrakumar, A. (2022). Optimization of inoculum to substrate ratio for enhanced methane yield from leather fleshings in a batch study. *Journal of the Indian Chemical Society*, 99(3), 100384. <https://doi.org/10.1016/J.JICS.2022.100384>
- Kumar, S., Darshna, A., & Ranjan, D. (2023). A review of literature on the integration of green energy and circular economy. *Heliyon*, 9(11), 18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21091>
- Ministerio de Salud. (2019, August 20). *La acumulación de residuos sólidos puede generar afectaciones a la salud de la población*. Plataforma Del Estado Peruano. <https://www.gob.pe/institucion/minsa/noticias/49954-la-acumulacion-de-residuos-solidos-puede-generar-afectaciones-a-la-salud-de-lapoblacion>
- Ministerio del Ambiente. (2019). *Catálogo de Medidas de Mitigación* (p. 142). https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/426371/CATALOGO_MITIGACION.pdf?v=1689276999
- Moreira, A. J. G., de Sousa, T. A. T., Franco, D., Lopes, W. S., & de Castilhos Junior, A. B. (2023). Kinetic modeling and interrelationship aspects of biogas production from waste activated sludge solubilized by enzymatic and thermal pre-treatment. *Fuel*, 347, 128452. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2023.128452>
- Niesner, J., Jecha, D., & Stehlík, P. (2013). *Biogas Upgrading Technologies: State of Art Review in European Region*. 35. <https://doi.org/10.3303/CET1335086>
- Olaya Arboleda, Y., Agrícola LUIS OCTAVIO GONZÁLEZ SALCEDO, I., Civil, I., & Asociado, P. (2012). *Fundamentos para el diseño de Biodigestores*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/10762>

- Omar del Carpio Rodríguez. (2020). Cadena de valor del paiche. In *Programa Nacional de Innovación en Pesca y Acuicultura - PNIPA*. PNIPA. <https://www.scribd.com/document/504980323/estudio-de-prospectiva-paiche-pnipa-2020>
- Paone, E., Fazzino, F., Pizzone, D. M., Scurria, A., Pagliaro, M., Ciriminna, R., & Calabrò, P. S. (2021). Towards the Anchovy Biorefinery: Biogas Production from Anchovy Processing Waste after Fish Oil Extraction with Biobased Limonene. *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 2428, 13(5), 2428. <https://doi.org/10.3390/SU13052428>
- Passeggi, M., Benzo, M., & Borzacconi, L. (n.d.). *Planta Centralizada para la Codigestión de Residuos Agroindustriales del Área Metropolitana de Montevideo, con Producción de Biogás y Bioabono*.
- Poblete, I. B. S., Araujo, O. de Q. F., & de Medeiros, J. L. (2020). Dynamic analysis of sustainable biogas-combined-cycle plant: Time-varying demand and bioenergy with carbon capture and storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 109997. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.109997>
- Poder Ejecutivo del Perú. (2016). Decreto Legislativo N°1278 - DECRETO LEGISLATIVO QUE APRUEBA LA LEY DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS. In *El Peruano* (Decreto Legislativo N° 1278).
- Rincón-Pérez, J., Celis, L. B., Morales, M., Alatraste-Mondragón, F., Tapia-Rodríguez, A., & Razo-Flores, E. (2021). Improvement of methane production at alkaline and neutral pH from anaerobic co-digestion of microalgal biomass and cheese whey. *Biochemical Engineering Journal*, 169, 107972. <https://doi.org/10.1016/J.BEJ.2021.107972>
- Romero-Güiza, M. S., Vila, J., Mata-Alvarez, J., Chimenos, J. M., & Astals, S. (2016). The role of additives on anaerobic digestion: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1486–1499. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.12.094>
- Saavedra Blas, E. (2020). Huella de carbono: emisiones de GEI por uso del sistema de iluminación de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú. *TECNIA*, 30(1). <https://doi.org/10.21754/tecnia.v30i1.827>

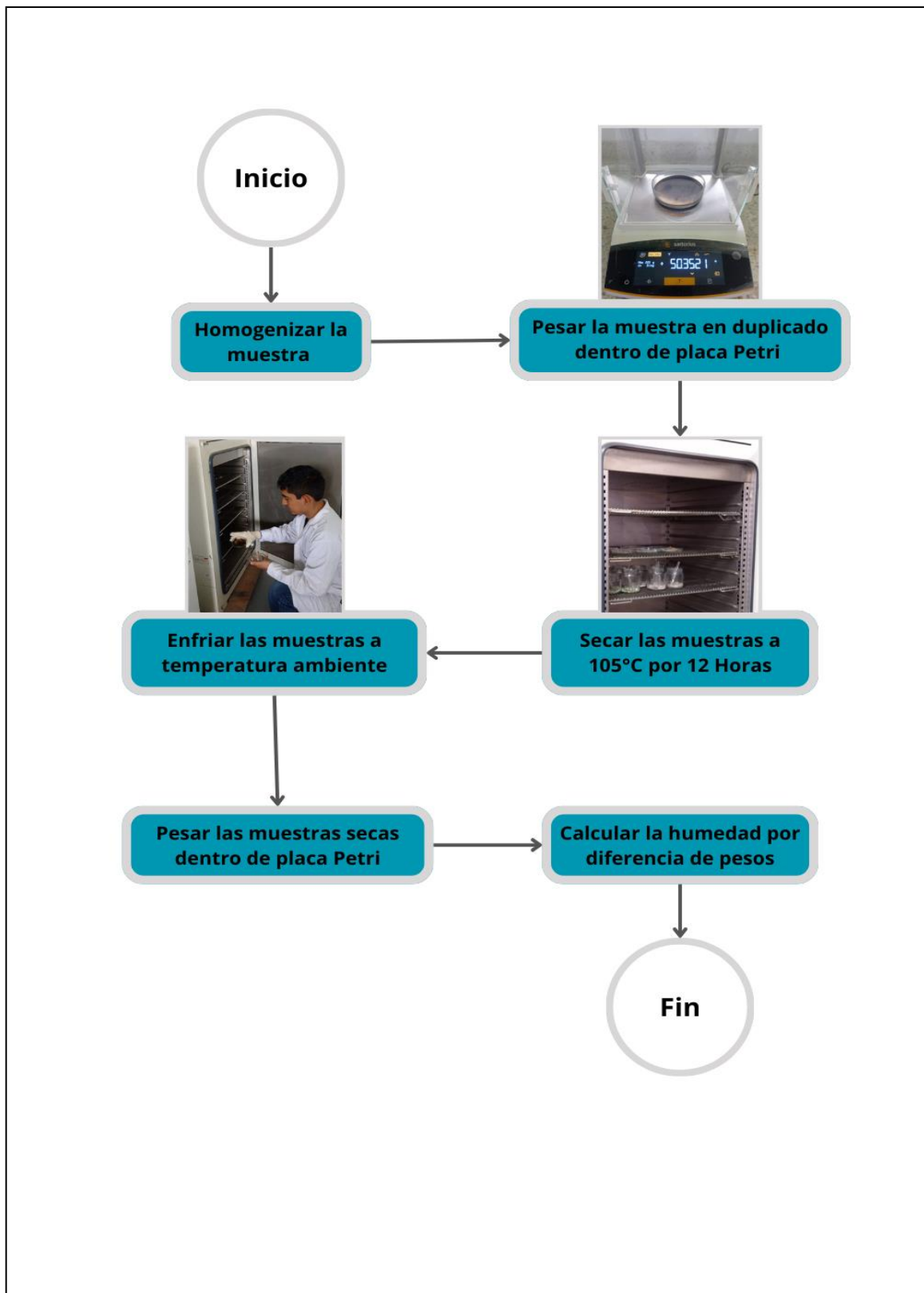
- Salinas Murillo, V., & Herrera Araujo, P. A. (2021). Obtención de harina proteica de origen animal a partir de residuos sólidos generados en el proceso de descarte del sector curtiembre - Arequipa. *Universidad Católica de Santa María*.
<https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3362551>
- Segundo Espada, A., & Marrufo Saldaña, L. del R. (2019). Manual de curtido de pieles de paiche y doncella conservando su patrón y color natural. In Instituto Tecnológico de la Producción (Ed.), *Instituto Tecnológico de la Producción* (1ra edición, p. 75). Instituto Tecnológico de la Producción.
- Silva Dayse, M. S. da. (2023). *Produção de biogás a partir de resíduos de pescados da região Bragantina/Estado do Pará*.
<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/51678>
- Silva, M. J., & Salinas Morales, D. (2022). La contaminación proveniente de la industria curtiembre, una aproximación a la realidad ecuatoriana. *Revista Científica UISRAEL*, 9(1), 69–80. <https://doi.org/10.35290/rcui.v9n1.2022.427>
- Sood, S., Singhal, R., Bhat, S., & Kumar, A. (2019). Inoculum preparation. In *Comprehensive Biotechnology* (pp. 230–243). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64046-8.00076-8>
- Thakur, N., Jalalah, M., Alsareii, S. A., Harraz, F. A., Almadiy, A. A., Su, S., Salama, E. S., & Li, X. (2024). Anaerobic digestion of fat, oil, and grease (FOG) under combined additives: Enhanced digestibility, biogas production, and microbiome. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 191, 114155.
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2023.114155>
- Ulrich, L., & Petra, P. (2008). *Informe Práctico Analítica de Laboratorio Valoración FOS/TAC*. <https://es.hach.com/asset-get.download.jsa?id=25593611197>
- Varnero Moreno, M. T. (2011). Manual de biogás. In *FAO* (p. 119). FAO.
<https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

- Verein Deutscher Ingenieure. (2016). VDI 4630:2016-11 “Fermentation of organic materials - Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests.” In *VDI*. VDI.
- Wang, J., & Guo, X. (2024). The Gompertz model and its applications in microbial growth and bioproduction kinetics: Past, present and future. *Biotechnology Advances*, 72, 108335. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2024.108335>
- Wasewar, K. L. (2022). Process intensification in biobutanol production. *Biofuels and Bioenergy: A Techno-Economic Approach*, 223–262. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90040-9.00035-7>
- Weinrich, S., Schäfer, F., & Liebetrau, J. (2018). *Value of batch tests for biogas potential analysis - Method comparison and challenges of substrate and efficiency evaluation of biogas plants* (Jerry D. Murphy, Ed.; IEA Bioenergy). IEA Bioenergy Task 37. https://task37.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/32/2022/02/Batch_tests_web_END.pdf
- Xu, J., Mustafa, A. M., & Sheng, K. (2017). Effects of inoculum to substrate ratio and co-digestion with bagasse on biogas production of fish waste. *Environmental Technology*, 38(20), 2517–2522. <https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1269837>
- Zaiontz, C. (n.d.). *Home Page (Welcome) | Real Statistics Using Excel*. Retrieved January 3, 2024, from <https://real-statistics.com/>
- Zhang, L., Tsui, T. H., Loh, K. C., Dai, Y., & Tong, Y. W. (2022). Acidogenic fermentation of organic wastes for production of volatile fatty acids. *Biomass, Biofuels, Biochemicals: Microbial Fermentation of Biowastes*, 343–366. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90633-3.00005-5>

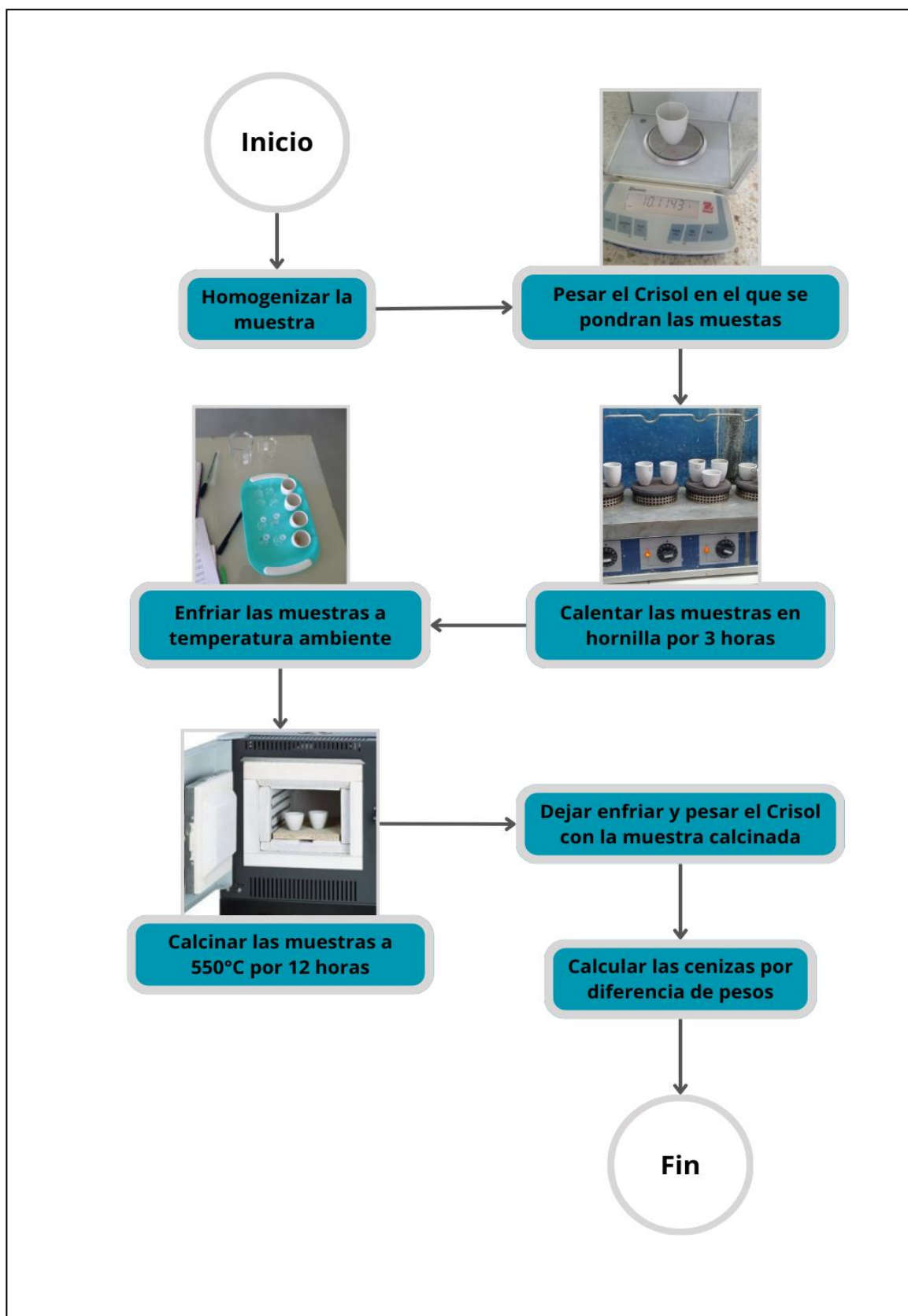
Anexos

Anexo 01: Diagrama de flujo para determinar humedad	1
Anexo 2: Diagrama de flujo para determinar cenizas	2
Anexo 3: Diagrama de flujo para determinar grasas	3
Anexo 04: Diagrama de flujo para determinar proteínas	4
Anexo 05: Diagrama de flujo Estándar alemán VDI 4630 (2016)	6
Anexo 06: Diseño Experimental.....	7
Anexo 07: Diagrama de flujo para determinar pH y relación FOS/TAC	8
Anexo 08: Valor del potencial teórico de las macromoléculas - Norma VDI 4630 (2016)	9
Anexo 09: Cálculo del potencial teórico según la norma VDI 4630 (2016)	9
Anexo 10: Matriz de Consistencia.....	10

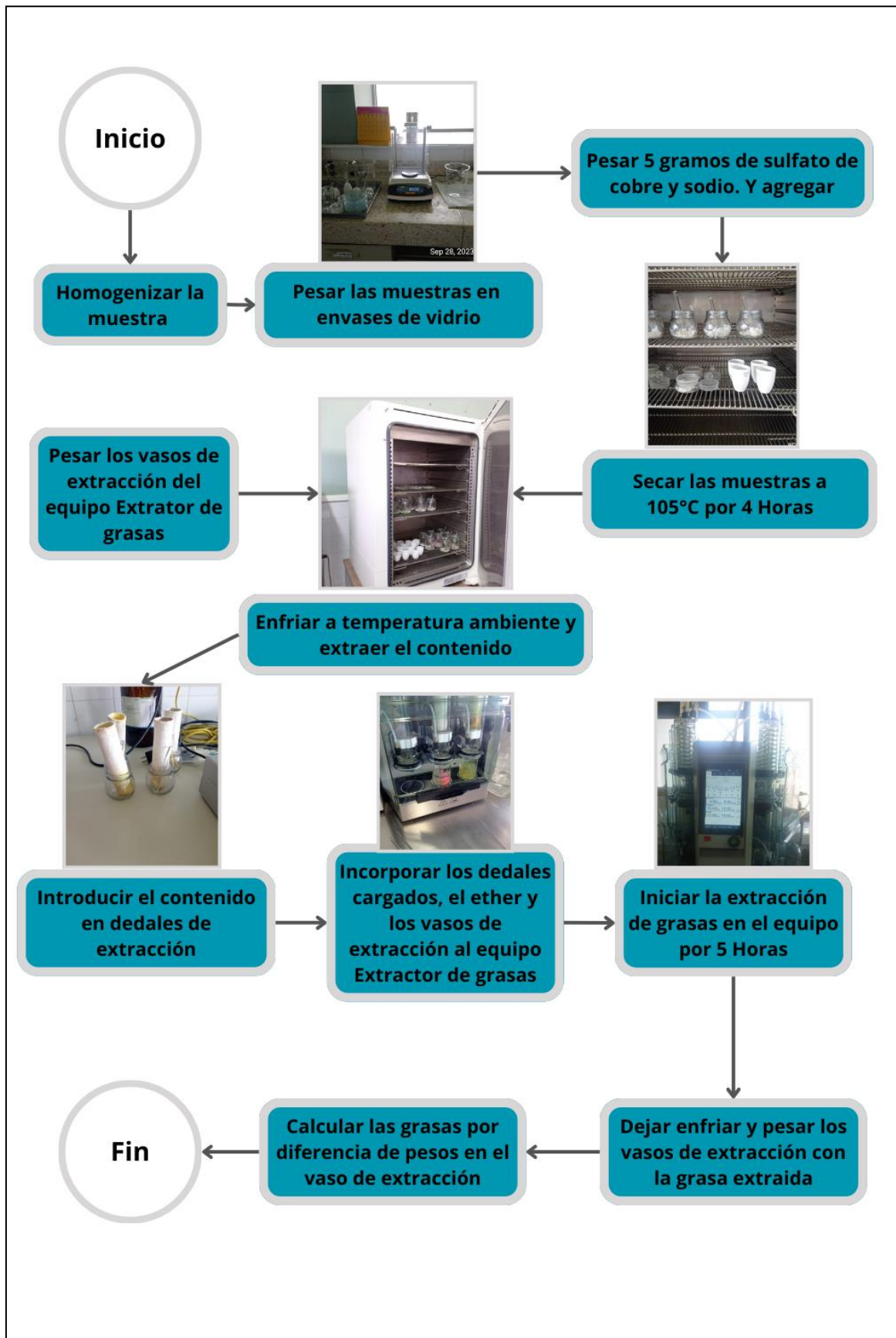
Anexo 01: Diagrama de flujo para determinar humedad



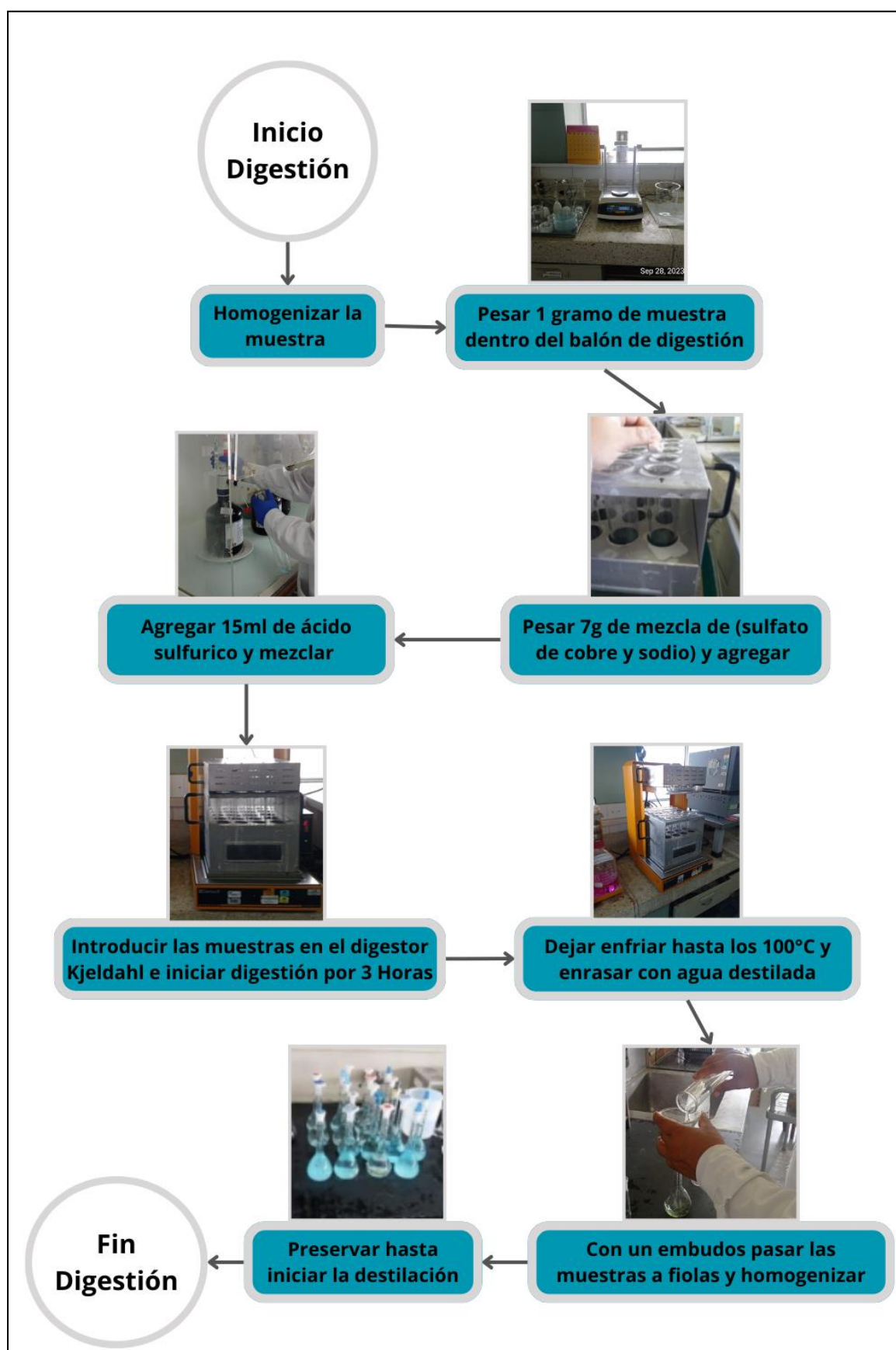
Anexo 2: Diagrama de flujo para determinar cenizas

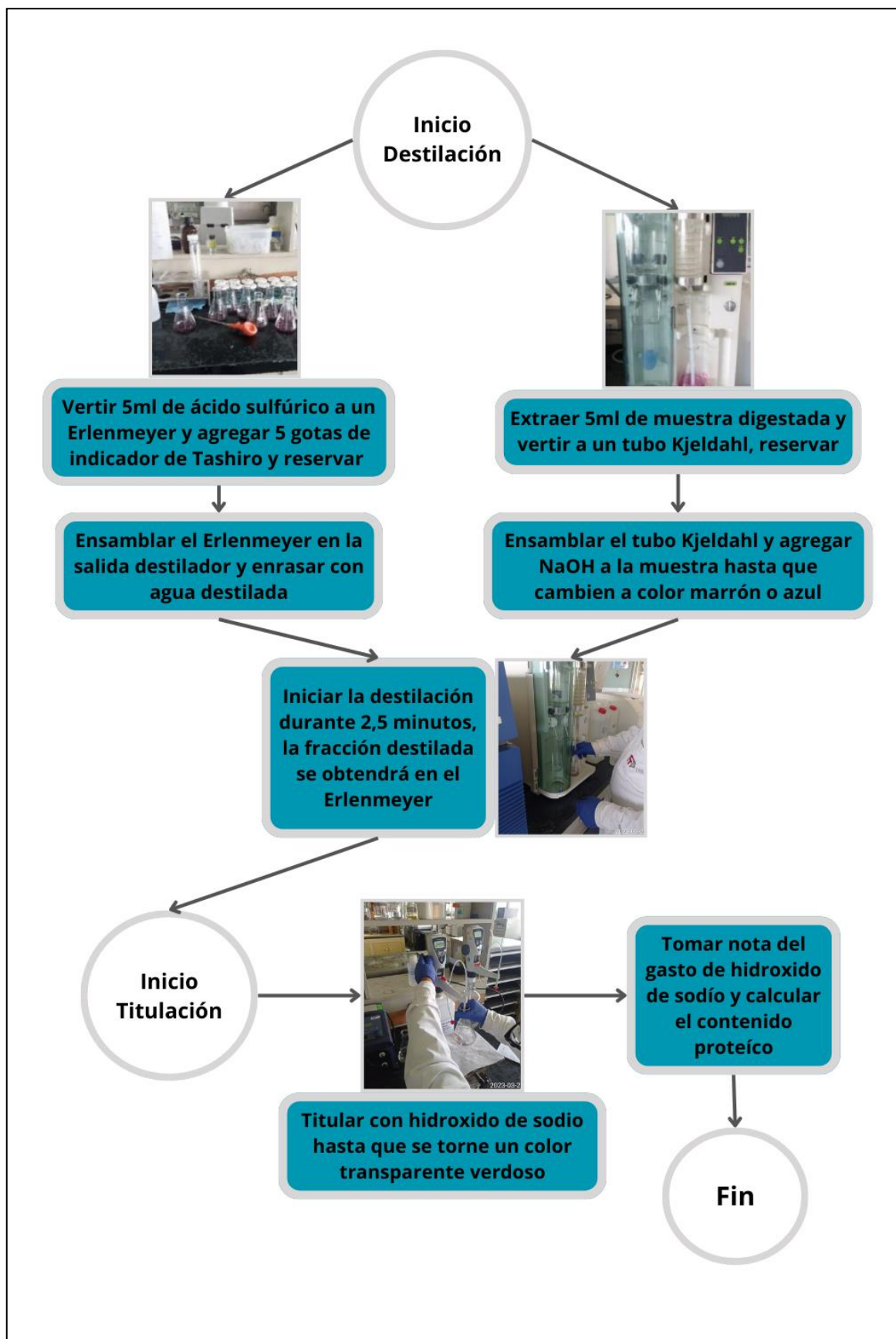


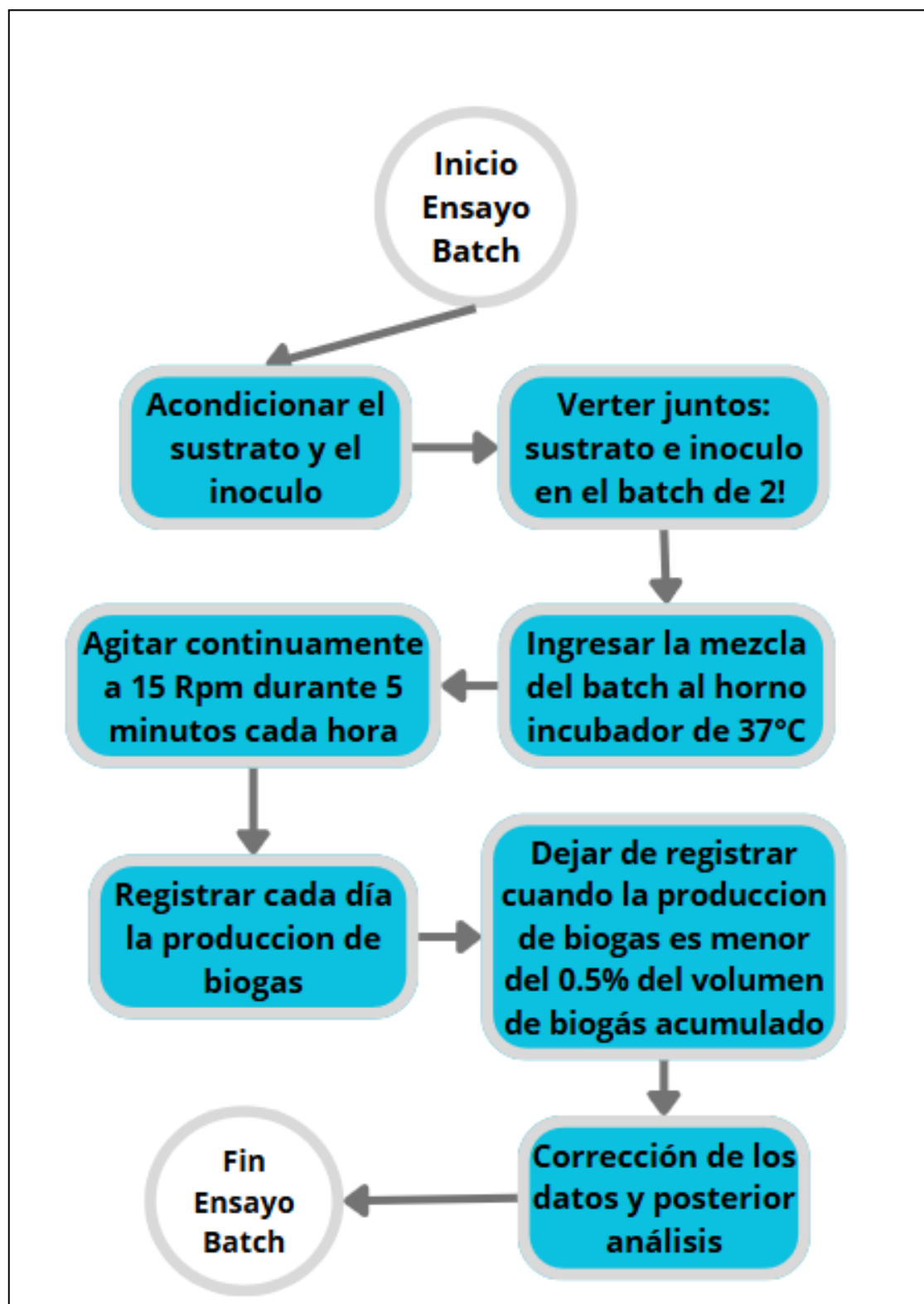
Anexo 3: Diagrama de flujo para determinar grasas

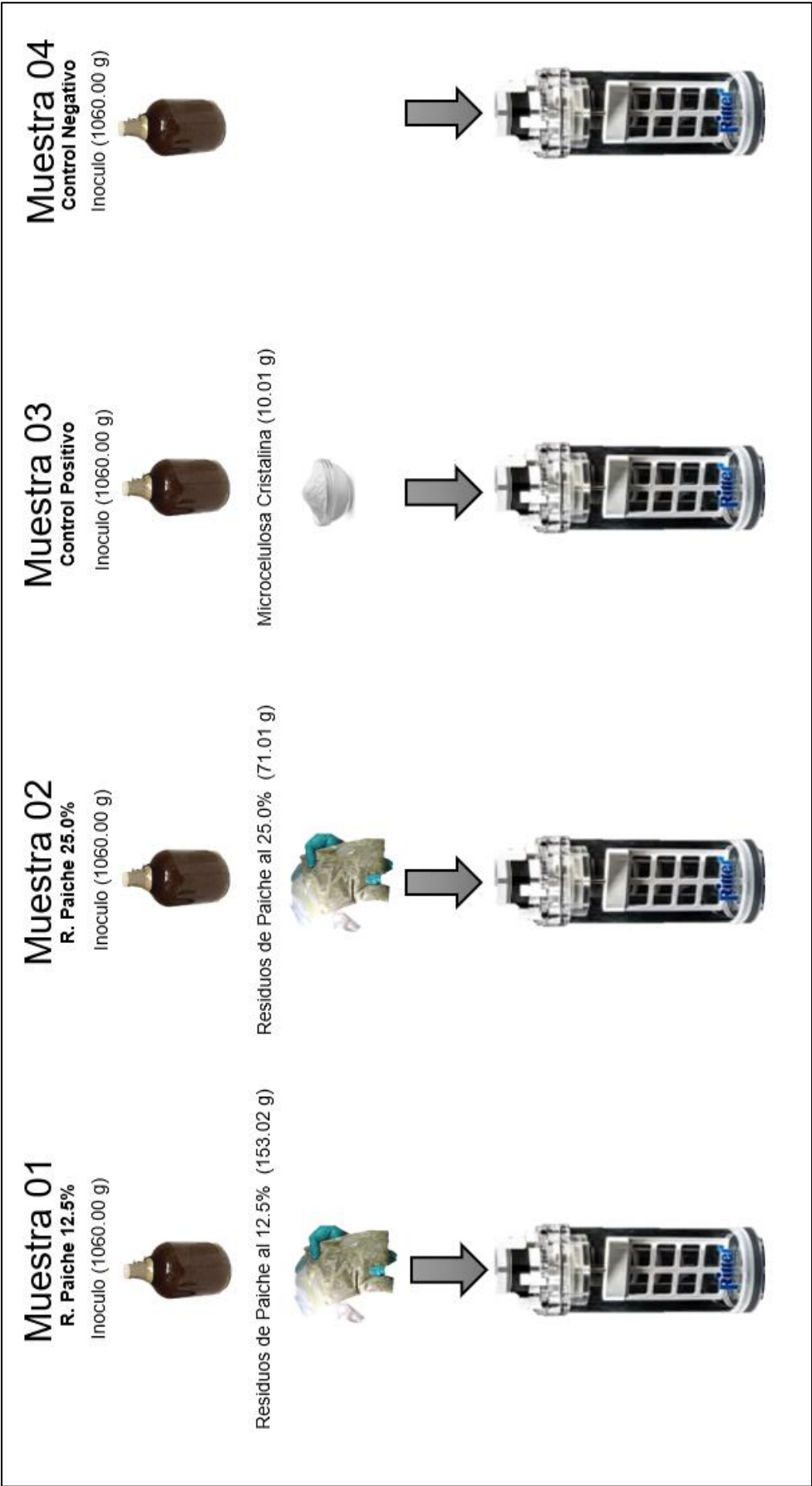


Anexo 04: Diagrama de flujo para determinar proteínas

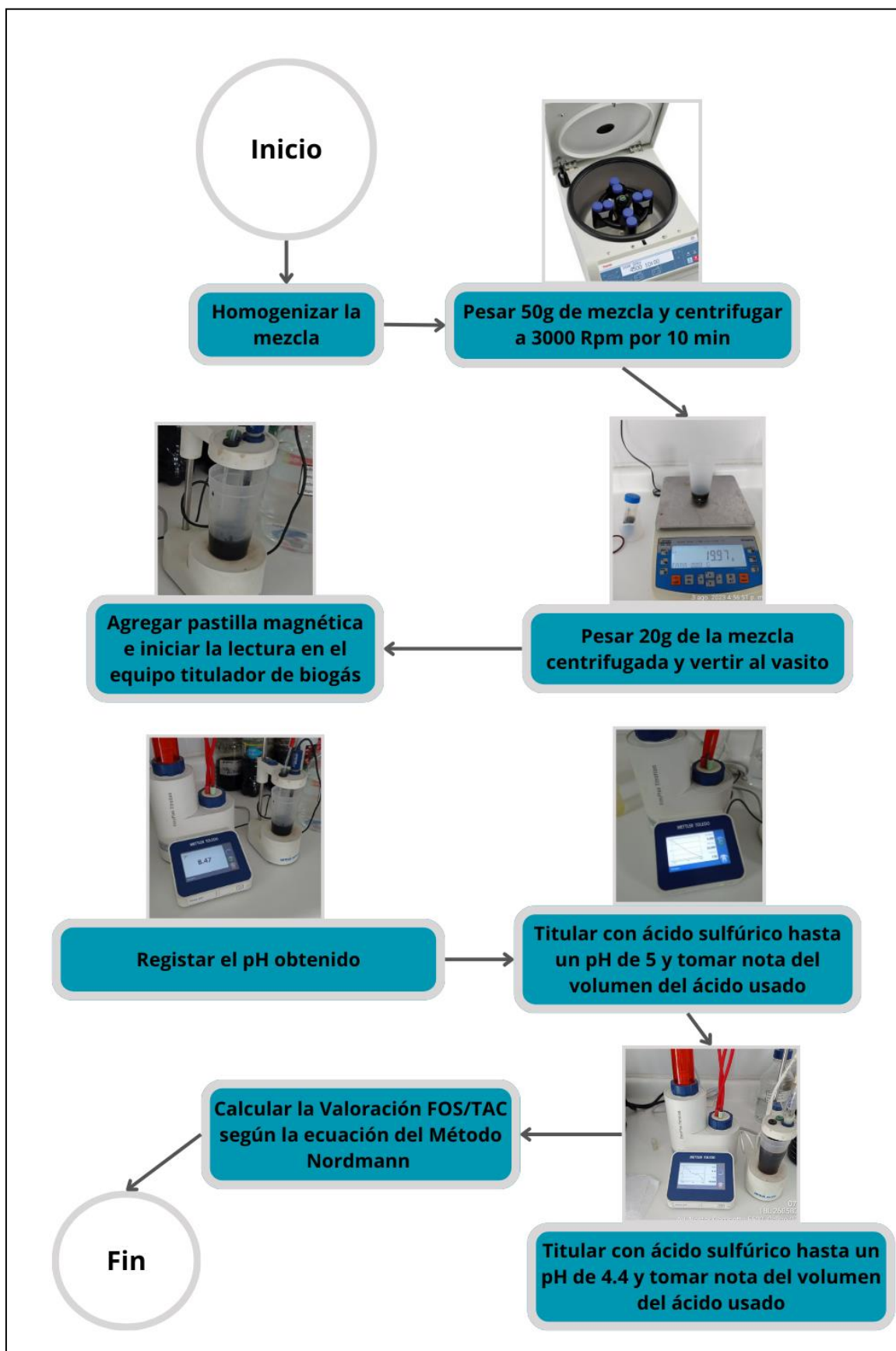








Anexo 07: Diagrama de flujo para determinar pH y relación FOS/TAC



Anexo 08: Valor del potencial teórico de las macromoléculas - Norma VDI 4630 (2016)

Substrate type	Theoretical biogas yield in $\ell_N/\text{kg oTS}$	Theoretical CH_4/CO_2 composition in % by volume	
Carbo-hydrate	750	50 % CH_4	50 % CO_2
Fats	1390	72 % CH_4	28 % CO_2
Proteins	800	60 % CH_4	40 % CO_2

Anexo 09: Cálculo del potencial teórico según la norma VDI 4630 (2016)

Potencial Teorico del Descarne por Kg SV
$750 \cdot 0.0022 + 1390 \cdot 0.853 + 1390 \cdot 0.1405$
1299.779352

Anexo 10: Matriz de Consistencia

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables e indicadores	
			Variable Dependiente (V.D.)	Indicador
Problema general	Objetivo General	Hipótesis General		
¿Cómo será la evaluación del biogás producido por residuos de descarte de la piel del Paiche (<i>Arapaima gigas</i>) mediante su digestión anaeróbica, en comparación con residuos de otras especies de peces?	Evaluar la producción de biogás a partir de los residuos de descarte de la piel del Paiche (<i>Arapaima gigas</i>) mediante digestión anaeróbica.	La evaluación del biogás producido por residuos de descarte de la piel del Paiche (<i>Arapaima gigas</i>) mediante su digestión anaeróbica en ensayos tipo batch, presenta un rendimiento de biogás mayor a 400 <i>Ln/Kg SV</i> , tomando como referencia al rendimiento de biogás obtenido con de residuos de piel de tilapia.	Producción del biogás	<i>Ln/Kg SV</i> de biogás producido
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable Independiente (V.I.)	Indicador
¿Cuál es el potencial teórico del biogás de los residuos de descarte de la piel del Paiche (<i>Arapaima gigas</i>) mediante cálculos basados en la composición de nutrientes?	Determinar el potencial teórico del biogás de los residuos de descarte de la piel del Paiche (<i>Arapaima gigas</i>) mediante cálculos basados en la composición de nutrientes.	La evaluación del potencial teórico del biogás de los residuos de descarte de la piel del Paiche (<i>Arapaima gigas</i>) mediante cálculos basados en la composición de nutrientes presenta condiciones favorables para la producción de biogás.		
¿Cuál es el máximo rendimiento de biogás del residuo de Paiche (<i>Arapaima gigas</i>) en biodigestores batch?	Determinar el máximo rendimiento de biogás del residuo de Paiche (<i>Arapaima gigas</i>) en biodigestores batch.	La prueba batch con mayor porcentaje en mezcla de residuos del descarte de piel de Paiche (<i>Arapaima gigas</i>) tendrá un mejor rendimiento para la producción del biogás.	Porcentaje de mezcla en residuos de descarte de la piel de Paiche (<i>Arapaima gigas</i>)	% en mezcla del residuo empleado
¿Cuáles serán los modelos dinámicos de producción de biogás que se ajusten los resultados obtenidos durante la digestión anaeróbica de residuos de descarte de la piel del Paiche (<i>Arapaima gigas</i>) en biodigestores batch?	Evaluar modelos dinámicos de producción de biogás que se ajusten los resultados obtenidos durante la digestión anaeróbica de residuos de descarte de la piel del Paiche (<i>Arapaima gigas</i>) en biodigestores batch.	El modelo dinámico de producción de biogás que se ajusta con mayor significancia a los resultados obtenidos durante la digestión anaeróbica de residuos de descarte de la piel del Paiche (<i>Arapaima gigas</i>) en biodigestores batch es el modelo de Gompertz modificado.		