

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



**Efecto de la temperatura en un digester anaerobio tubular,
acondicionado en un invernadero de bajo costo en el altiplano
peruano**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autores:

Ada Leidi Mamani Calsin
Cristian Max Machaca Herrera
Luis Encarno Almiron Quispe

Asesor:

Juan Eduardo Vigo Rivera

Juliaca, octubre de 2023

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Juan Eduardo Vigo Rivera, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“EFECTO DE LA TEMPERATURA EN UN DIGESTOR ANAEROBIO TUBULAR, ACONDICIONADO EN UN INVERNADERO DE BAJO COSTO EN EL ALTIPLANO PERUANO”** de los autores **Ada Leidi Mamani Calsin, Cristian Max Machaca Herrera y Luis Encarno Almiron Quispe** tiene un índice de similitud de 5% verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca, a los 9 días del mes de octubre del año 2023.



Juan Eduardo Vigo Rivera

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiari, a 06 día(s) del mes de octubre del año 2023 siendo las 11:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

Msc. Franklyn Elard Zapana Yucra, el (la) secretario(a) Msc. Rose Solimón Gallata Ghura

y los demás miembros: Ing Verónica Haydes Pari Mamani

y el (la) asesor(a) Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado:

Efecto de la temperatura en un digestor anaeróbico tubular, recirculado en un invernadero de bajo costo en el altiplano peruano

del(los) bachiller(es): a) Christian Max Machaca Herrera

b) Sola Lidi Mamani Galin

c) Luis Encarno Almirón Quijpe

conducente a la obtención del título profesional de: Ingeniero Ambiental
(Denominación del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Christian Max Machaca Herrera

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>16</u>	<u>B</u>	<u>Buena</u>	<u>Muy Bueno</u>

Bachiller (b): Sola Lidi Mamani Galin

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>16</u>	<u>B</u>	<u>Buena</u>	<u>Muy Bueno</u>

Bachiller (c): Luis Encarno Almirón Quijpe

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>16</u>	<u>B</u>	<u>Buena</u>	<u>Muy Bueno</u>

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

[Firma]
Presidentera

[Firma]
Asesor(a)

[Firma]
Bachiller (a)

[Firma]
Miembro

[Firma]
Bachiller (b)

[Firma]
Secretario/a

[Firma]
Miembro

[Firma]
Bachiller (c)

AGRADECIMIENTOS

A los ingenieros Glen Madrigal Pérez y Pedro Mamani Ordoñez docentes de la Universidad Peruana Unión por su tiempo y apoyo.

INDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	8
2. MATERIALES Y MÉTODOS	10
2.1. Instalación del invernadero y digestor anaerobio (DA)	10
2.2. Datos meteorológicos	12
2.3. Flujo calorimétrico	14
2.4. Caracterización fisicoquímica del lodo	14
3. RESULTADOS	14
3.1. Temperatura del lodo	14
3.2. Análisis de Calorimetría	15
3.3. Caracterización del substrato	16
4. DISCUSIÓN	18
5. CONCLUSIÓN	19
REFERENCIAS	20

Efecto de la temperatura en un digestor anaerobio tubular, acondicionado en un invernadero de bajo costo en el altiplano peruano

Effect of temperature in a tubular anaerobic digester, conditioned in a low-cost greenhouse in the Peruvian highlands

Cristian Max Machaca Herrera¹, Ada Leidi Mamani Calsin¹, Luis Encarno Almiron Quispe¹, Juan Eduardo Vigo Rivera¹

1. Universidad Peruana Unión, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, EP. Ingeniería Ambiental, Juliaca, Perú; eduardo.vigo@upeu.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0002-6597-7336>.

RESUMEN

Introducción: En el Perú la población de bovinos produce desechos contaminantes que pueden ser procesados mediante digestión anaeróbica para generar biogás. Los digestores de polietileno tubular son una tecnología prometedora, pero la temperatura es un factor importante para su operatividad. Objetivo: El objetivo de esta investigación es evaluar el efecto de la temperatura en un digestor anaerobio tubular acondicionado en un invernadero de bajo costo en el altiplano peruano. Metodología: Se instaló un digestor tubular de 8 m³ a 3830 msnm, alimentado con estiércol de bovino-agua en una proporción de 1.3. Para el incremento y conservación de la temperatura se instaló un invernadero de adobe (tierra-ichu) con paredes internas revestidas de yeso y una cubierta de policarbonato. El material del digestor fue geomembrana de 0.05 cm de espesor, instalado a un metro de profundidad, con geotextil, poliestireno y plástico como pared de aislamiento. El tiempo de retención hidráulica fue de 30 días, y se monitoreó la radiación solar, la humedad del invernadero y las temperaturas ambientales del invernadero y del lodo del digestor. Resultados: Bajo estas condiciones medias del digestor (radiación solar 79.2 W/m²/día, temperatura ambiental 10.8 °C, humedad media 37.1%) se alcanzó una temperatura de 22.3°C en el lodo del digestor. Además, el calor ganado en promedio del sistema fue de 856 182 kJ/día, mientras que la pérdida en promedio fue de -332 998 kJ/día. Conclusión: El digestor anaerobio tubular acondicionado en un invernadero de bajo costo es viable, dado que es posible mantener una temperatura media del lodo de 22,3 °C en promedio, lo que garantiza el funcionamiento del proceso de digestión a 3830 msnm en el altiplano peruano.

Palabras claves: altiplano, digestor anaerobio, energía solar, invernadero, temperatura.

ABSTRACT

Introduction: In Peru, the bovine population produces polluting waste that can be processed through anaerobic digestion to generate biogas. Tubular polyethylene biodigesters are a promising technology, but temperature is an important factor for their effectiveness. **Objective:** The objective of this research is to evaluate the effect of temperature in a tubular anaerobic digester conditioned in a low-cost greenhouse in the Peruvian highlands. **Methodology:** An 8 m³ tubular digester was installed at 3830 masl, fed with bovine manure-water in a ratio of 1 to 3. To increase and conserve the temperature, an adobe (a mixture of earth and ichu) greenhouse was installed, whose internal walls were finished with 0.5 cm of plaster, and the roof was made of polycarbonate. The digester material was 0.05 cm thick geomembrane, installed one meter deep, with geotextile, polystyrene, and plastic as insulation wall. The hydraulic retention time was 30 days, and solar radiation, greenhouse humidity, and environmental temperatures of the greenhouse and digester sludge were monitored. **Results:** Under these average digester conditions (solar radiation 79.2 W/m²/day, ambient temperature 10.8 °C, average humidity 37.1%), a temperature of 22.4 °C was reached in the digester sludge. In addition, the heat gained from the system was 856 182 kJ/day, while the heat loss was -332 998 kJ/day. **Conclusion:** The tubular anaerobic digester conditioned in a low-cost greenhouse is viable at 3830 masl in the Peruvian highlands, because the inoculum temperature was maintaining in 22.4°C.

Keywords: highlands, anaerobic digester, solar energy, greenhouse, temperature.

1. INTRODUCCIÓN

En el Perú, la crianza de bovinos genera desechos (estiércol, orines, aguas de limpieza, etc.) que son contaminantes debido a su composición por materia orgánica, microorganismos y nutrientes. Según MIDAGRI (2017) existen alrededor de 824 000 productores de ganado bovino y una población de 5.2 millones de cabezas de ganado en el país, de los cuales el 73% se encuentra en la sierra. Una de las posibles soluciones para procesar los residuos orgánicos de la producción ganadera es la digestión anaeróbica (DA). Sin embargo, este proceso es dificultoso debido a la cantidad de reacciones bioquímicas y la proporción de microorganismos implicados (FAO et al. 2011). Estos sistemas son atractivos debido a su sencillez de construcción, operación, capital y costos operativos relativamente bajos, sin embargo, las tecnologías de digestión anaeróbica que carecen de calentamiento y agitación se ven propensos a las influencias de condiciones ambientales, fundamentalmente la temperatura. Los biodigestores de polietileno tubular surgieron a principios de la década de los 70 y 80, se introdujeron en el mundo en desarrollo como una posible solución a los problemas de desechos orgánicos y combustible para cocinar que enfrentan las comunidades rurales de acuerdo a Poggio et al. (2009). Se construyen fácilmente con materiales básicos y asequibles, y solo requieren la adición de agua y estiércol para su funcionamiento.

La digestión anaeróbica del estiércol se presenta como una tecnología prometedora, ya que permite obtener simultáneamente biogás y biol, mientras se mejora el saneamiento ambiental. Esta tecnología se adapta como fuente de energía descentralizada en zonas rurales remotas, lo que la convierte en una solución sostenible y eficiente para estas áreas (Alvarez y Lidén, 2008). Es importante enfatizar que la implementación de la digestión anaeróbica del estiércol requiere una inversión inicial relativamente baja por parte de los agricultores que habitan en climas tropicales. Sin embargo, aquellos que viven en zonas más frías y a mayores altitudes no pueden aprovechar los mismos tipos de digestores, porque requieren una temperatura mínima para ser efectivos. Por lo tanto, se debe considerar que la digestión anaeróbica es un proceso sensible a la temperatura, y que la temperatura promedio de operación puede influir en las velocidades de reacción del proceso (Sillero et al. 2023), mientras que las fluctuaciones de temperatura pueden afectar su estabilidad (Alvarez y Lidén, 2008).

El Altiplano está situado a una altura de 3000 a 4000 msnm, en donde hay fuertes vientos y el clima es árido y frío, con grandes cambios de temperatura durante el día. Las temperaturas máximas diarias oscilan entre los 15 y los 20°C, mientras que las mínimas diarias oscilan entre los 15 y los 3°C. La presión atmosférica es de unos 60-70 kPa, y la radiación solar media elevada de 5.5 kW-h/m².día (Álvarez y Lidén, 2008).

Debido a las condiciones climáticas del Altiplano, la rentabilidad de la producción de biogás depende de mantener una temperatura del lodo del digestor más alta que la temperatura ambiente promedio, se han propuesto varios métodos para aumentar la temperatura del digestor: la mezcla de la materia prima de entrada con agua caliente, la construcción de un pozo de compost aeróbico alrededor del digestor y el aislamiento de la planta de biogás dentro de un invernadero o 'cubierta solar' (Kishore 1989). Uno de los problemas actuales en la digestión anaeróbica para mejorar la producción de biogás es la co-digestión, sin embargo, estos artículos proporcionan información sobre digestores en climas cálidos (Mata-Alvarez et al. 2014).

El crecimiento y actividad microbiana son afectados por la temperatura, varias investigaciones mostraron el impacto en su proceso. Esto se refiere a ciertos grupos de arqueas que producen metano y prosperan a diferentes temperaturas ideales. La temperatura ideal para que se lleve a cabo la DA, en un rango mesófilo, es de 35-45 °C, por lo que requiere menos energía para el calentamiento en comparación con la digestión termófila (55-80 °C), teniendo un rango de actividad más amplio y menor riesgo de inhibición del amoníaco y fallas en el proceso. Del mismo modo, se necesita una temperatura constante para optimizar la estabilidad del proceso y el funcionamiento eficiente de la planta de biogás, por lo que las fluctuaciones e impactos podrían afectar su rendimiento en el funcionamiento y variaciones en la comunidad microbiana. Liu et al (2019) encontraron que mantener la temperatura constante aumentó la producción de metano (CH₄) en un 14%, en comparación con las temperaturas variables en las regiones frías de China.

El desarrollo de un modelo de transferencia de calor de un digestor anaeróbico tridimensional para aplicaciones en climas fríos realizado por Wu y Bibeau (2006) mostró simulaciones numéricas para cuatro configuraciones de digestor: (1) rectangular con parte superior arqueada, (2) rectangular con parte superior plana, (3) cilíndrico con parte superior plana y (4) cilíndrico con fondo cónico; los análisis de sensibilidad demostraron la pérdida de calor a través de la cubierta, el piso y las paredes del digestor de diferentes dimensiones geométricas, del mismo modo, las comparaciones de pérdida de calor total mostraron que el digestor cilíndrico con la parte superior plana ofrece mejor geometría para minimizar las pérdidas de calor en climas fríos y que la relación de pérdida de calor y el biogás es un parámetro importante en estas condiciones, del mismo modo, muestran que con el aumento de la profundidad disminuye la pérdida de calor en todos los digestores subterráneos investigados.

La termodinámica de la degradación de ácidos grasos volátiles durante la digestión anaeróbica bajo estrés por sobrecarga orgánica realizado por Wu et al (2022) utilizó una mayor proporción de sustrato a inóculo en pruebas por lotes con Hybrid Pennisetum para simular el estrés por sobrecarga orgánica. Como resultado, observó una disminución en la actividad metanogénica y una prolongación en la fase de latencia de la actividad anaerobia, pero no se detectaron efectos termodinámicos adversos, proporcionando nuevos conocimientos sobre los mecanismos termodinámicos implicados en la degradación de los ácidos grasos volátiles, siendo importantes para mejorar los métodos actuales de diagnóstico de la estabilidad del proceso de la actividad anaerobia.

En el bioaumentación con cultivo metanogénico para impulsar la producción de metano mediante la co-digestión anaeróbica de estiércol de ganado y paja de maíz a 20 °C realizado por Xu et al (2023), adaptaron con éxito un consorcio metanogénico que tolera el frío, y lo aplicaron como una semilla de bioaumentación para mejorar la actividad anaerobia psicrófila. Se introdujeron diferentes dosis de la semilla de bioaumentación (4, 8, 12, 14 y 16%) para mejorar la DA psicrófila de una mezcla de estiércol de ganado y paja de maíz. El equipo sugiere que el uso del bioaumentación con el consorcio metanogénico tolerante al frío es un enfoque potencial para mejorar el proceso de la actividad anaerobia psicrófila y proporcionar orientación teórica para las plantas comerciales de biogás en regiones frías.

En el estudio realizado por Jaimes-Estévez et al (2022) sobre la co-digestión anaeróbica psicrófila a escala de granja de suero de queso y estiércol de ganado se probó la posibilidad de hacer una co-digestión anaeróbica entre el suero de queso y estiércol de ganado, los cuales fueron monitoreados desde los ensayos de laboratorio de potencial de biometano hasta un digestor a escala de granja en condiciones psicrófilas. Esto destaca la importancia de investigar nuevas formas de tratar residuos a escala agrícola en zonas rurales, y la necesidad de establecer un procedimiento claro para determinar la viabilidad de la prueba de BMP en condiciones psicrófilas, como un vínculo entre los ensayos de laboratorio y el seguimiento a escala real.

La construcción de un modelo de transferencia de calor estable 2-D axisimétrica a escala real donde determinaron el efecto de flujo de aire entre la membrana de la cubierta del digestor sobre las pérdidas de calor, este estudio realizado por Rynkowski (2018) concluyo que, las pérdidas de calor por la cubierta pueden cambiar en un amplio rango desde alrededor del 50% hasta cerca del 80% de la pérdida total de calor (desde 1 m/s hasta 5 m/s en una tubería de entrada de 10 cm).

Cuando la temperatura ambiente es baja y el aire es seco, el aire actúa como un buen aislante debido a que su conductividad térmica disminuye cuando hay menos vapor de agua presente. Çengel (2008) afirma que cuando el aire está húmedo conduce mejor el calor, por lo tanto, la transferencia de energía con el medio ambiente es más rápida, lo que conduce a una pérdida acelerada de calor. En la simulación de la transferencia de calor para la producción de biogás realizado por Gebremedhin et al (2004), se desarrolló un modelo matemático que tiene en cuenta la pérdida y ganancia de calor por radiación solar a través de las paredes, el piso y la cubierta superior del digestor, en el que comprobaron que un aumento de 1 °C en la temperatura de estiércol afluente da como resultado un ahorro de 224 300 kJ de energía.

Este artículo describe un estudio sobre el efecto de la temperatura en un digestor anaeróbico tubular experimental a mediana escala, acondicionado en un invernadero de bajo costo para el aprovechamiento de estiércol bovino en el altiplano peruano (Juliaca, Perú). Los resultados muestran que es posible mantener una temperatura óptima para el lodo de 22.3 °C en promedio, y una ganancia de calor máxima diaria de 856 182 kJ en un día de menor RS. Lo que garantiza el proceso de digestión anaeróbica en el altiplano peruano.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Instalación del invernadero y digestor anaerobio (DA)

Se construyó un invernadero en la UPeU - Juliaca, a una altitud de 3830 msnm, siguiendo la guía de (Quino et al. 2016; Perrigault et al. 2012; Martí-Herrero et al. 2014). El invernadero tiene medidas de 4.80 x 3.44 m y adopta una forma de prisma rectangular horizontal, acorde a la forma tubular del digestor. La orientación longitudinal del invernadero fue de Este a Oeste, para aprovechar la radiación solar en el calentamiento del digestor. Las paredes a base de adobe poseen un espesor de 23 cm y un acabado interior de yeso de 0.5 cm, la pared orientada hacia el sur alcanza una altura de 2 m, mientras que la pared norte tiene una altura de 1.20 m. El techo se instaló con fibra de policarbonato de cuatro capas, con un espesor de 0.6 cm, en un área total de 4.20 x 5.15 m, diseñado con una inclinación perpendicular al recorrido del sol, con un ángulo

de inclinación de 38 °. Para garantizar un buen aislamiento del digester y mantener una temperatura óptima, se instaló una capa de poliestireno de 10 cm de espesor en el piso, 3.15 x 2.30 m laterales de la zanja de y 1.1 m de profundidad, situada dentro del invernadero. Ver Fig. 1 (Final del artículo).

Quino et al (2016) instalaron un digester experimental dentro del invernadero con una capacidad de 8 m³. Este digester fue alimentado diariamente con una mezcla de estiércol y agua en proporción 1:3, y se operó con un tiempo de retención hidráulica de 30 días. El reactor tubular, compuesto por geomembrana, fue aislado del suelo con plástico, poliestireno de 10 cm de espesor y una capa de geotextil.

Para llevar a cabo el proceso de estabilización del digester, se recolectó estiércol bovino de la finca de la UPeU - Juliaca, y se alimentó utilizando una mezcla de estiércol de bovino y agua en proporción 1:5 al 73% de su capacidad total equivalente a 5.9 m³, Ver Fig. 2 (Final del artículo). Una vez estabilizado el digester se comenzó con la alimentación diaria (5 días por semana) durante el mes de diciembre, en este periodo se utilizó una mezcla de estiércol bovino y agua en proporción 1:3, lo que permitió ingresar 35 kg de estiércol en una solución de 105 L de agua. Ver Fig. 3.

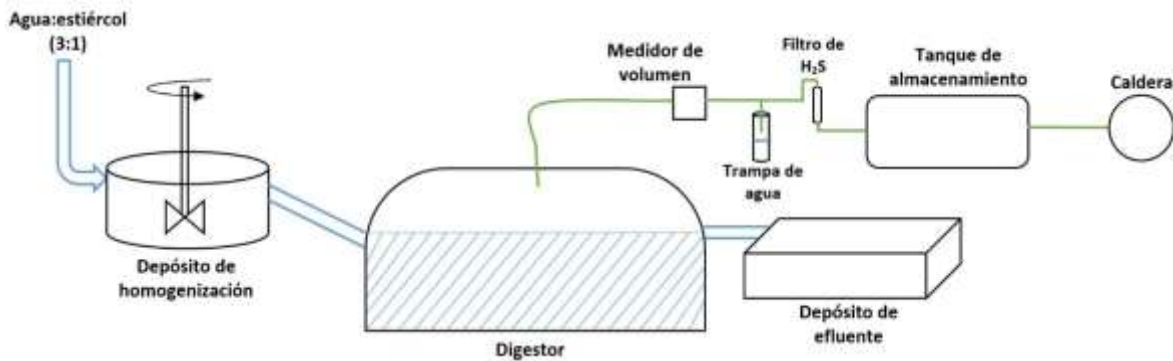


Figura 3. Diagrama del proceso de digestión anaerobia usado en este trabajo

2.2. Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos y de proceso se registraron durante los 30 días del mes de diciembre. Haciendo referencia a Perrigault et al (2012), quién instaló sensores en un sistema similar, que también produjo una temperatura ambiente promedio de alrededor de 18 °C. Las mediciones incluyen la radiación solar y la temperatura.

Con el fin de obtener datos precisos sobre las condiciones ambientales dentro y fuera del invernadero y evaluar su desempeño de manera confiable, se instalaron sensores Arduino ubicados en puntos diferentes, los cuales se describen sus características en la Tabla 1: temperatura del lodo (TI), temperatura del invernadero (Ti), temperatura ambiente (Ta), radiación solar (RS), humedad del invernadero (H). Los datos de temperatura se registraron cada 10 minutos y posteriormente se promediaron cada hora.

Tabla 1

Especificaciones de los instrumentos usados

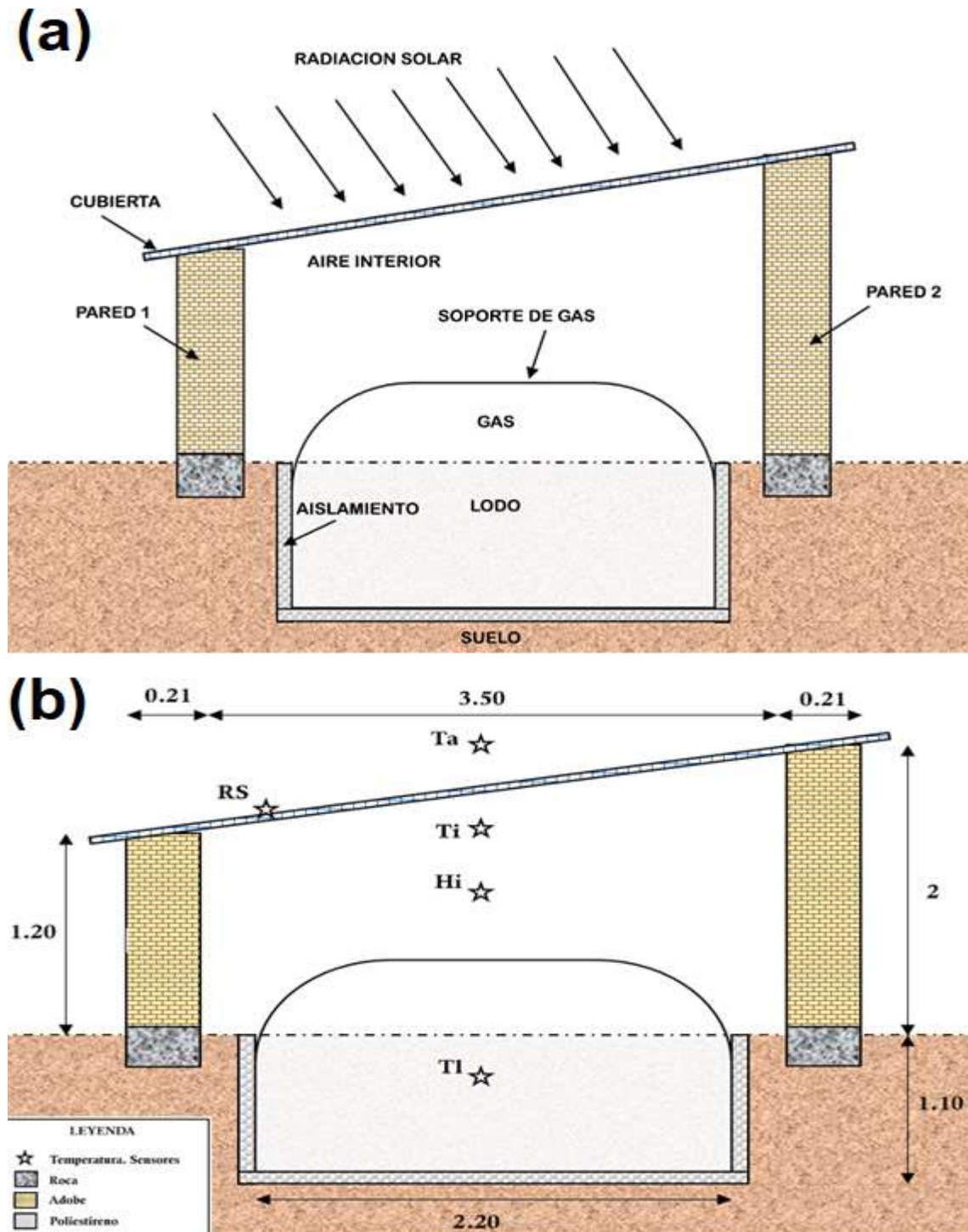
Datos	Equipo	Resolución	Exactitud
Temperatura interior	Sensor digital de temperatura y humedad relativa SHT31	0.015°C/0.01 %	0.2°C/2%
Radiación solar	Módulo sensor de luz ultravioleta (UV) ML8511	-	± 1UV
Temperatura de Invernadero, lodo, y ambiente	Sensor digital de Temperatura DS18B20	9-12 bits	±0.5°C

Fuente: Perrigault et al. (2012)

El sensor TI se instaló a través de un tubo de PVC de 4 pulgadas. Como el sensor es impermeable, se amarró a un alambre galvanizado para facilitar su recuperación. La Fig. 4 muestra la ubicación de los sensores de temperatura, humedad y la radiación solar estudiada.

Figura 4

Sección transversal general del digester simulada en un modelo térmico de computadora 1-D



Nota: (a) Ubicaciones de los sensores de temperatura dentro y alrededor del digester experimental (b). Las medidas de longitud son en metros (m).

2.3. Flujo calorimétrico

A diario, tanto el invernadero como el digestor experimentan cambios de temperatura dependiendo principalmente de la RS. Se asume que la temperatura del gas en la cúpula del digestor es igual a la del lodo, mientras que la temperatura del invernadero está sujeta a las condiciones ambientales externas. En consecuencia, debido al flujo térmico se puede calcular (Ecuación 1) utilizando el método de transferencia de calor descrito por Gebremedhin et al. (2005), con esta metodología, se puede obtener una estimación precisa de los cambios de temperatura en el invernadero y el digestor, lo que permite una evaluación detallada de su desempeño.

$$Q = m \cdot C_e \cdot \Delta t \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde, Q es cantidad de calor (kJ), m es masa del cuerpo (Kg), C_e es el calor específico (J/Kg·K) y Δt es variación de temperatura (K) Gebremedhin et al. (2005).

Para C_e se toma el valor planteado por Martí-Herrero et al. (2014), en donde se utilizó el coeficiente de calor específico del agua que es equivalente a 4180 J/Kg·K.

2.4. Caracterización fisicoquímica del lodo

Los contenidos de sólidos volátiles, se determinaron en una estufa FD023UL-120 V (Binder, Tuttlingen, Alemania) a 105 °C durante 24 h y luego en mufla a 550 °C, durante 1 h (métodos 254B y 2540 °C) (Lenore y Clesceri, 2017). Para las mediciones de pH, ácidos grasos volátiles (AGV) y alcalinidad total (AT), las muestras se centrifugaron a 5000 rpm durante 30 min y el sobrenadante se utilizó para el pH. El pH se midió con un multiparámetro HI5521- 01 (Hanna Instruments, Providence, EE. UU.). Los AGV y AT se cuantificaron mediante el método volumétrico descrito por Jobling et al. (2014).

Todos los análisis se realizaron por triplicado y se realizaron durante las etapas inicial y final de la prueba.

3. RESULTADOS

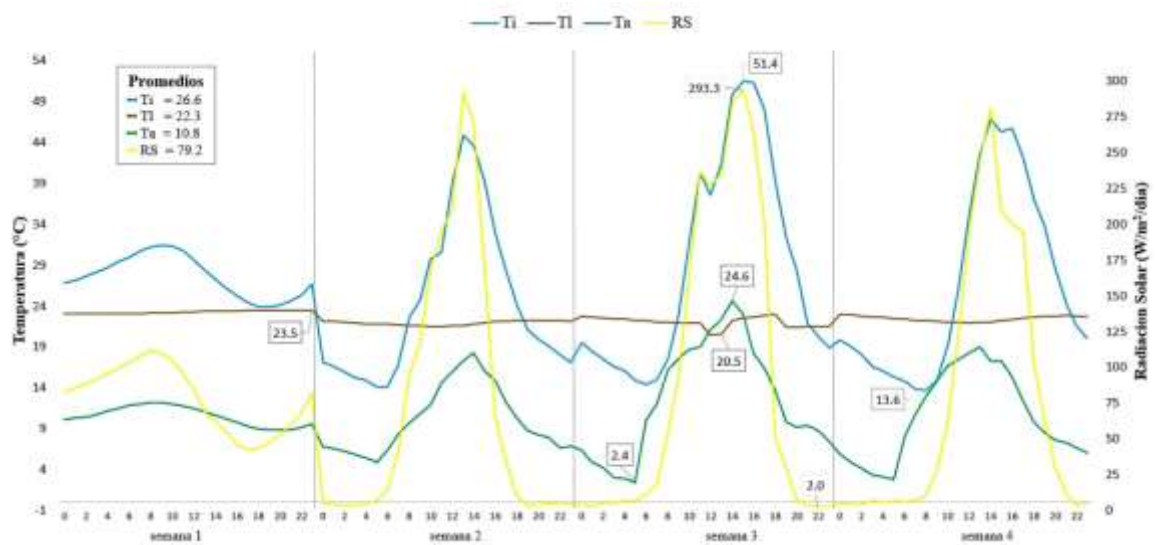
3.1. Temperatura del lodo

La Fig. 5 muestra la temperatura del invernadero (T_i), temperatura ambiente (T_a), temperatura de lodo (T_l) para el mes de diciembre 2022, durante el periodo de estudio. El eje secundario se refiere a la radiación solar (RS $W/m^2/día$).

La temperatura máxima del invernadero y la temperatura ambiente fueron 51,4 y 24,6 °C, respectivamente; mientras que las temperaturas mínimas fueron de 13,6 y 2,4 °C, respectivamente. Y en el caso de la RS, el máximo valor registrado fue de 293,3 $W/m^2/día$.

Figura 5

Gráfico de temperaturas del mes de diciembre



En la primera semana, la RS alcanzó un valor de 111.2 W/m²/día, obteniendo una Ti máximo de 31.2 °C, y una Tl mínima de 22.3 °C.

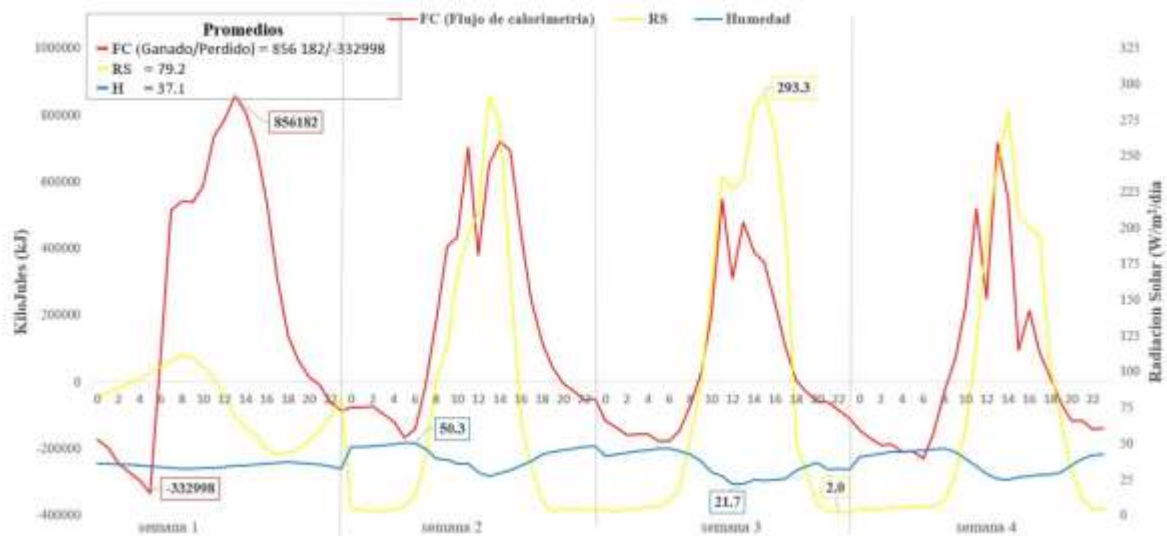
Durante las siguientes tres semanas se registró una RS máxima de 293.3 W/m²/día y una Ta máxima de 24.6 °C durante el día. Las fluctuaciones de la temperatura ambiental no afectaron en la temperatura del lodo, dado que se mantuvo superior a 20 °C.

3.2. Análisis de Calorimetría

La Fig. 6 muestra el registro de la radiación solar y humedad del mes de diciembre. En la primera semana, el flujo de calorimétrico de la DA se muestra con una ganancia máxima de 856 182 kJ, que se dio después del mediodía; y una pérdida de -332 198 kJ durante la noche. La RS presenció bajos niveles de hasta 112.8 W/m²/día, llegando a su pico a las 9 am y finalmente una H máxima de 36.8%.

Figura 6

Flujo de calorimetría, radiación solar y humedad del mes de diciembre



Durante las 4 semanas, se registró una ganancia máxima de 856 182 kJ durante el día y una pérdida de -332 998 kJ por la noche de forma general. Además, la RS presentó una máxima de 293.3 W/m²/día en promedio, a las 3 pm, mientras que la H máxima fue de 50.3%. A pesar de estas fluctuaciones, la temperatura del lodo se mantuvo estable (promedio de 22.3 °C, ver Figura 4), ya que, debido a estas variaciones, durante el día no hubo diferencias significativas en la temperatura del lodo. Esto sugiere que el proceso de DA puede ser una alternativa viable y sostenible para el tratamiento de residuos orgánicos en estos sistemas.

La ganancia y pérdida de calor están influenciados por la RS y la H, en las noches sin presencia de RS, la H aumenta hasta en un 50.3%, lo que hace que las pérdidas de calor sean mayores y que el invernadero tenga un bajo aislamiento térmico. Esto provoca la condensación del rocío en la cubierta del invernadero al cambiar de temperatura, lo que, a su vez, hace que el aire dentro del invernadero pierda calor. Durante el día, el lodo gana calor por el aumento de la temperatura del invernadero y en la noche el diseño estructural del invernadero es determinante, ya que actúa como un aislante frente a las pérdidas de calor.

3.3. Caracterización del substrato

La Tabla 2 muestra los resultados de los análisis de muestras tomadas en dos fechas diferentes, se presentan los valores de sólidos totales, sólidos volátiles, ácidos grasos volátiles (AGV), alcalinidad total (AT) y pH, tanto en la entrada y salida del digestor.

Tabla 2*Resultado de los análisis de laboratorio del mes de diciembre*

Fecha	Muestra	Sólidos Totales (g/Kg)	Sólido Volátiles (g/Kg)	AGV (mg ácido acético/L)	AT (mg CaCO ₃ /L)	pH
16/12/2022	entrada	26.4	19.85	1305	1358	7.05
	salida	5.5	3.4	1062	1537	7.24
30/12/2022	entrada	28.4	22.11	1259	1294	7.11
	salida	6.88	4.89	984	1599	7.31

En ambas fechas de la toma de muestra, los ST disminuyeron en 77.4%, del mismo modo, los SV disminuyeron en 80.2%. Lo que indica una degradación significativa de materia orgánica presente en el sustrato durante el proceso de DA, concordando con lo mencionado por Lu et al. (2018) y Zhang et al. (2016) que obtuvieron una disminución significativa de los ST y SV durante el proceso de DA.

Los niveles de AGV presentaron una reducción de 20.2%, lo que indica que la producción de ácidos orgánicos disminuyen en el proceso de acuerdo con lo mencionado por Lu et al. (2018); Wei et al. (2021) y Zhang et al. (2016) que concluyeron en que el pH aumentó sin exceder los estándares (6.6-7.6) durante el proceso de DA, consistentes con los resultados obtenidos.

En la primera fecha de monitoreo, los niveles de AT aumentaron en un 15.4%. Este comportamiento sugiere que el proceso de DA generó alcalinidad adicional, lo que pudo ser beneficioso para mantener un pH adecuado en el sistema y reducir la acumulación de ácidos orgánicos.

Los resultados obtenidos de este estudio muestran la factibilidad del uso de un digestor anaerobio tubular en un invernadero de bajo costo en el altiplano peruano, donde se logró mantener una temperatura media del lodo en 22,3 °C. La ganancia y pérdida de calor en el digestor fue influenciada por la radiación solar y humedad, lo que proporcionó una acumulación de 856,182 kJ por fermentación de lodo en un día con RS mínima. Durante la fermentación anaeróbica, se observó una disminución significativa de ST y SV en un 77,4 % y un 80,2 %, respectivamente. Y un aumento en el nivel de AT del 15,4 %, lo que indica que se generó alcalinidad adicional durante el proceso de digestión, lo que puede ser útil para mantener un pH adecuado en el sistema.

4. DISCUSIÓN

A pesar de la baja RS, el lodo se mantuvo estable debido a la baja conductividad térmica, lo que indica una alta inercia térmica en el invernadero, como concluye Su et al. (2017). Por lo tanto, si la temperatura del lodo es más alta que la T_a , los digestores tubulares asistidos por un invernadero actúan como colectores de calor solar con almacenamiento térmico, detallado en los estudios de Perrigault et al. (2012) y Martí-Herrero et al. (2015). Además Liu et al. (2019) concluyeron que la temperatura del lodo aumenta de acuerdo a la profundidad del digestor, mientras que Holman (2010) menciona que la temperatura del suelo es constante a mayor profundidad; en este estudio, se mantuvo una temperatura estable debido a que el digestor se instaló a una profundidad de 1m, lo que ayudo a mantener una temperatura estable y por tanto una producción de biogás constante.

En estudios realizados por Deng et al. (2014) y Yao et al. (2020) se investigó los efectos de la temperatura en la producción de biogás y concluyeron que la digestión anaerobia es más sensible a las variaciones de temperatura entre 15 y 20 °C, con una temperatura promedio del lodo de 22,3 °C. Además, se observó una mayor producción de biogás, lo que sugiere que un digestor anaerobio tipo tubular es factible a estas condiciones. Zhong et al. (2015) construyeron un reactor solar para un digestor de 10 m³ obteniendo una eficiencia del 82%, a la vez que, en este estudio se utilizó un digestor de 8 m³, asistido por energía solar para mantener las condiciones óptimas para el lodo. Bajo diferentes condiciones ambientales, la temperatura del lodo se logró mantener en un promedio de 22,3 °C, lo que permitió la conservación de calor.

En nuestro caso, se logró mantener una temperatura óptima para el lodo mediante el uso de energía solar y la conservación de calor. Los resultados indican que el sistema biorreactor solar es efectivo para un digestor de menor tamaño, lo que sugiere su potencial para su uso en sistemas a mayor escala. Además, los hallazgos de Perrigault et al. (2012) y Garfí et al. (2011) respaldan los resultados obtenidos, lo que sugiere que el uso de invernaderos asistidos por energía solar para la DA es una estrategia viable. Según un estudio realizado por Villagran et al. (2021) y Ahmed et al. (2019) la H tiene un efecto significativo en la pérdida de calor, al igual que el diseño de un techo más plano, demostrado en este estudio.

De acuerdo con Çengel (2008) cuando la temperatura ambiente es baja y el aire es seco, el aire actúa como un aislante más eficiente, debido a que su conductividad térmica disminuye al haber menos vapor de agua presente en el ambiente, lo que demuestra que el sistema durante el día presencié niveles relativamente bajos de H y el aire del invernadero por convección se calienta. Por otro lado, cuando el aire es húmedo, conduce mejor el calor, además, la transferencia de energía de las paredes y digestor con el medio ambiente es más rápida, lo que resulta en una pérdida de calor más acelerada, lo cual demuestra la pérdida de calor del digestor durante las noches.

Según Perrigault et al. (2012) el aire del invernadero pierde energía a través de la cubierta por convección; y la cubierta pierde calor a través de la radiación nocturna y la convección del aire nocturno, pero gana calor en la pared, de tal modo que, al comparar las temperaturas de una pared de adobe de 30 cm de espesor, tanto exterior como interior poseen una diferencia de 1.5 °C durante la noche y hasta 18 °C durante el día, dando lugar al efecto del invernadero. En este caso, se trabajó con una pared de 23 cm de espesor, lo que sugiere un comportamiento similar. Garfí et al. (2011)

observaron temperaturas dentro de un invernadero en condiciones similares al presente estudio, que oscilan entre 15 y 60 °C, consistentemente mayores que la Ta.

En los estudios previos realizados por Liu et al. (2020) y Chen et al. (2015) notaron que el aumento de la AT durante la DA mejoró la estabilidad del proceso y redujo la acumulación de ácidos orgánicos, así mismo, encontraron que la AT estuvo directamente relacionada con la producción de CH₄ y la eliminación de materia orgánica. Por lo tanto, los datos obtenidos son consistentes con los resultados obtenidos en estos estudios previos, cabe destacar que todo el proceso se desarrolló a una temperatura promedio óptima de 22.3 °C, lo que respalda la interpretación previa.

5. CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos de este estudio muestran la factibilidad del uso de un digester anaerobio tubular en un invernadero de bajo costo en el altiplano peruano, donde se logró mantener una temperatura media del lodo en 22,4 °C. La ganancia y pérdida de calor en el digester fue influenciada por la radiación solar y humedad, lo que proporcionó una acumulación de 83,980 kJ por fermentación de lodo en un día con RS mínima. Durante la fermentación anaeróbica, se observó una disminución significativa de ST y SV en un 77,4 % y un 80,2 %, respectivamente. Y un aumento en el nivel de AT del 15,4 %, lo que indica que se generó alcalinidad adicional durante el proceso de digestión, lo que puede ser útil para mantener un pH adecuado en el sistema.

REFERENCIAS

- Ahmed HA, Tong YX, Yang QC, Al-Faraj AA, Abdel-Ghany AM. (2019). Spatial distribution of air temperature and relative humidity in the greenhouse as affected by external shading in arid climates. *Journal of Integrative Agriculture*. 18: [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62598-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62598-0)
- Alvarez R, Lidén G. (2008). The effect of temperature variation on biomethanation at high altitude. *Bioresource Technology*, 99: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.12.055>
- Mata-Alvarez J, Dosta J, Romero-Güiza MS, Fonoll X, Peces M & Astals S. (2014). A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.039>
- Wu B, Bibeau EL. (2006). Development of 3-d anaerobic digester heat transfer model for cold weather applications. *Transactions of the ASABE*. 10: <https://doi.org/10.13031/2013.20482>
- Çengel YA. (2004). Introduction to thermodynamics and heat transfer / Yunus A. Cengel. In *Introduction to thermodynamics and heat transfer*. (2nd ed.).
- Chen S, Zhang J, Wang X. (2015). Effects of alkalinity sources on the stability of anaerobic digestion from food waste. *Waste Management and Research*. 33: <https://doi.org/10.1177/0734242X15602965>
- Deng L, Yang H, Liu G, Zheng D, Chen Z, Liu Y, Pu X, Song L, Wang Z, Lei Y. (2014). Kinetics of temperature effects and its significance to the heating strategy for anaerobic digestion of swine wastewater. *Applied Energy*, 134: <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2014.08.027>
- FAO, MINENERGIA, PNUD, & GEF. (2011). Manual del Biogás. In *Proyecto CHI/00/G32*. <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>
- Garfí M, Ferrer-Martí L, Perez I, Flotats X, Ferrer I. (2011). Codigestion of cow and guinea pig manure in low-cost tubular digesters at high altitude. *Ecological Engineering*. 37: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.08.018>
- Gebremedhin KG, Wu B, Gooch C, Wright P. (2004). Simulation of heat transfer for biogas production. *ASAE Annual International Meeting 2004*, 5991–6011. <https://doi.org/10.13031/2013.16833>
- Gebremedhin KG, Wu B, Gooch C, Wright P, Inglis S. (2005). Heat transfer model for plug-flow anaerobic digesters. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 48: <https://doi.org/10.13031/2013.18320>
- Holman JP. (2010). Heat Transfer, Holman. In *McGraw-Hill, Inc, New York*.
- Jobling Purser BJ, Thai SM, Fritz T, Esteves SR, Dindale RM, Guwy AJ. (2014). An improved titration model reducing over estimation of total volatile fatty acids in anaerobic digestion of energy crop, animal slurry and food waste. *Water Research*. 61: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.05.020>
- Kishore VVN. (1989). A heat-transfer analysis of fixed-dome biogas plants. *Biological Wastes*. 30: [https://doi.org/10.1016/0269-7483\(89\)90121-3](https://doi.org/10.1016/0269-7483(89)90121-3)
- Lenore SC, Wefa DE. (2017). APHA/AWWA/WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.23rd Edition. In *American Public Health*

Association. American Water Works Association Water Environment Federation Stable.

- Liu C, Sun Y, Li N, Zhang B, Liu J. (2019). Improved energy utilization efficiency via adding solar radiant heating mode for traditional bioreactor to dispose straw: Experimental and numerical evaluation. *Waste Management*.89: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.027>
- Liu S, Butman DE, Raymond PA. (2020). Evaluating CO₂ calculation error from organic alkalinity and pH measurement error in low ionic strength freshwaters. *Limnology and Oceanography: Methods*. <https://doi.org/10.1002/lom3.10388>
- Lu C, Gu J, Wang X, Liu J, Zhang K, Zhang X, Zhang R. (2018). Effects of coal gasification slag on antibiotic resistance genes and the bacterial community during swine manure composting. *Bioresource Technology*. 268: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.086>
- Martí-Herrero J, Alvarez R, Cespedes R, Rojas MR, Conde V, Aliaga L, Balboa M, Danov S. (2015). Cow, sheep and llama manure at psychrophilic anaerobic co-digestion with low cost tubular digesters in cold climate and high altitude. *Bioresource Technology*. 181: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.063>
- MIDAGRI. (2017). *Diagnóstico de Crianzas Priorizadas para el Plan Ganadero 2017-2021* (J. Acosta (ed.); primera). MINISTERIO DE AGRICULTURA Y RIEGO DIRECCIÓN GENERAL DE POLÍTICAS AGRARIAS. www.minagri.gob.pe
- Perrigault T, Weatherford V, Martí-Herrero J, Poggio D. (2012). Towards thermal design optimization of tubular digesters in cold climates: A heat transfer model. *Bioresource Technology*. 124: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.019>
- Poggio D, Ferrer I, Batet L, Velo E. (2009). Adaptation of plastic tubular biodigesters to cold climates [Adaptación de biodigestores tubulares de plástico a climas fríos]. *Livestock Research for Rural Development*.
- Quino F, Morales V, Espejo O, Martí-Herrero J. (2016). *BioNati Manual de instalacion en zona andina.pdf* (O. Espejo (ed.); Primera). Oficina Regional HIVOS Sud America. <https://www.beegroup-cimne.com/sistema-bio-nati-manual-de-instalacion-en-zona-andina/>
- Martí-Herrero J, Chipana M, Cuevas C, Paco G, Serrano V, Zymla B, Heising K, Sologuren J & Gamarra A. (2014). Low cost tubular digesters as appropriate technology for widespread application: Results and lessons learned from Bolivia. *Renewable Energy*. 71. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.036>
- Jaimes-Estévez J, Mercado EV, Jaramillo JG, Rodríguez P, Martí-Herrero J, Escalante H & Castro L. (2022). From laboratory to farm-scale psychrophilic anaerobic co-digestion of cheese whey and cattle manure. *Bioresource Technology Reports*. 19. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101168>
- Wu D, Li L, Zhen F, Liu H, Xiao F, Sun Y, Peng X, Li Y & Wang X. (2022). Thermodynamics of volatile fatty acid degradation during anaerobic digestion under organic overload stress: The potential to better identify process stability. *Water Research*. 214. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118187>
- Xu X, Yan M, Sun Y & Li Y. (2023). Bioaugmentation with cold-tolerant methanogenic culture to boost methane production from anaerobic co-digestion of cattle manure and corn straw at 20°C. *Chemical Engineering Journal*, 466.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143183>

- Rynkowski P. (2018). Numerical Modelling of Heat Loss Through the Cover in the Anaerobic Digester. *Ekonomia I Srodowisko-Economics and Environment*, 2(65), 18–29: <https://www.ekonomiaisrodowisko.pl/journal/article/view/154/148>
- Sillero L, Solera R, Pérez M. (2023). Thermophilic-mesophilic temperature phase anaerobic co-digestion of sewage sludge, wine vinasse and poultry manure: Effect of hydraulic retention time on mesophilic-methanogenic stage. *Chemical Engineering Journal*. 451: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138478>
- Su X, Li H, Zhang X, Song B. (2017). Model and Experiment Study on Solar Heating Biogas Production in Rural China. *Procedia Engineering*. 205: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.921>
- Villagran E, Henao-Rojas JC, Franco G. (2021). Thermo-environmental performance of four different shapes of solar greenhouse dryer with free convection operating principle and no load on product. *Fluids*. 183: <https://doi.org/10.3390/fluids6050183>
- Wei Y, Li Z, Ran W, Yuan H, Li X. (2021). Performance and microbial community dynamics in anaerobic co-digestion of chicken manure and corn stover with different modification methods and trace element supplementation strategy. *Bioresource Technology*. 325: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124713>
- Yao Y, Huang G, An C, Chen X, Zhang P, Xin X, Shen J, Agnew J. (2020). Anaerobic digestion of livestock manure in cold regions: Technological advancements and global impacts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119: <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.109494>
- Zhang J, Lv C, Tong J, Liu J, Liu J, Yu D, Wang Y, Chen M, Wei Y. (2016). Optimization and microbial community analysis of anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge based on microwave pretreatment. *Bioresource Technology*. 200: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.037>
- Zhong Y, Roman BM, Zhong Y, Archer S, Chen R, Deitz L, Hochhalter D, Balaze K, Sperry M, Werner E, et al. (2015). Using anaerobic digestion of organic wastes to biochemically store solar thermal energy. *Energy*. 83: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.070>

ANEXOS

Anexo 1. Evidencia de Sumisión

The screenshot displays the submission interface for the journal 'Revista de Investigación de la UNED'. The breadcrumb trail indicates the article title: '4865 / Vigo Rivera y otros. / Efecto de la temperatura en un digestor anseróbico tubular, acondicionado en un invernadero de bajo'. The interface is divided into 'Flujo de trabajo' (Workflow) and 'Publicación' (Publication) sections. The 'Publicación' section is active, showing a progress bar with stages: 'Envío' (Submitted), 'Revisar' (Review), 'Edición de copia' (Copy editing), and 'Producción' (Production). The 'Envío' stage is highlighted, and a table of submitted files is shown below.

Archivos de envío		Q. Buscar	
•	23597 Artículo.docx	19 de septiembre de 2023	Texto del artículo
•	23598 FORMULARIO DE PRESENTACIÓN DE LA CARTA PARA LA UNED RESEARCH.docx	19 de septiembre de 2023	Carta ética

Descargar todos los archivos

Anexo 2. Copia de la resolución de inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo aprobado por el consejo de facultad correspondiente.

"AÑO DEL FORTALECIMIENTO DE LA SOBERANÍA NACIONAL"

RESOLUCIÓN N° 0573-2022/UPeU-FIA-CF-T

Lima, Ñaña 02 de agosto de 2022

VISTO:

El expediente de **Ada Leidi Mamani Calsin**, identificado(a) con Código Universitario N° 201612427, **Cristian Max Machaca Herrera**, identificado(a) con Código Universitario N° 201520888 y **Luis Encarno Almiron Quispe**, identificado(a) con Código Universitario N° 201712494, de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

CONSIDERANDO

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la aprobación e inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo y la designación o nombramiento del asesor para la obtención del título profesional;

Que **Ada Leidi Mamani Calsin**, **Cristian Max Machaca Herrera** y **Luis Encarno Almiron Quispe**, han solicitado: la inscripción del perfil de proyecto de tesis titulado "Generación de biogás y digestato a partir de estiércol bovino empleando un digestor anaerobio tubular en el altiplano peruano." y la designación del Asesor, encargado de orientar y asesorar la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo;

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 02 de agosto de 2022, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de Investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:

Aprobar el perfil de proyecto de tesis en formato artículo titulado "**Generación de biogás y digestato a partir de estiércol bovino empleando un digestor anaerobio tubular en el altiplano peruano.**" y disponer su inscripción en el registro correspondiente, designar al (a) la **Mtro. Eduardo Vigo Rivera** como ASESOR para que oriente y asesore la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo el cual fue dictaminado por: **MSc. Rose Adeline Callata Chura** y **Ing. Veronika Haydeé Pari Mamani**, otorgándoles un plazo máximo de doce (12) meses para la ejecución.

Regístrese, comuníquese y archívese.


Dra. Erika Inés Acuña Salinas
DECANA


Dr. Santiago Ramírez López
SECRETARIO ACADÉMICO

cc:
-Interesado
-Asesor
-Dirección General de Investigación
-Archivo

ANEXO DE FIGURAS

Figura 1

Vista exterior del invernadero construido para este estudio



Figura 2

Alimentación al 73% de su capacidad del DA

