

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



**Efecto de la temperatura en la producción de biogás de un digestor
tubular en un invernadero en zonas altoandinas**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor:

Deynid Ccolque Hilario
Diego Llanchipa Ramirez

Asesor:

Dr. Jorge Juvenal Bravo Hualla

Juliaca, octubre de 2022

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Jorge Juvenal Bravo Hualla, 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 LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE UN DIGESTOR TUBULAR EN UN INVERNADERO EN ZONAS ALTOANDINAS”** de los autores **Deynid Ccolque Hilario** y **Diego Llanchipa Ramirez** tiene un índice de similitud de 11% 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 12 días del mes de octubre del año 2023.



Dr. Jorge Juvenal Bravo Hualla

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiari, a 25 día(s) del mes de octubre del año 2010, siendo las 10:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

Mrs. Franklyn Elard Lapana Yucra, el (la) secretario(a): Sr. Juan Eduardo Yigo Rivera y los demás miembros: Ing. Miguel Angel Salcedo Enriquez y el (la) asesor(a) Sr. Jorge Juvenal Bravo Hualla

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado: Efecto de la temperatura en la producción de biogás de un digestor tubular en un invernadero en zonas altoandinas

del(los) bachiller(es): a) Diego Manchipa Ramirez b) Deynid Golque Hilaris c)

conducente a la obtención del título profesional de: Ingeniero Ambiental

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): Diego Manchipa Ramirez

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	17	B+	Muy Bueno	Sobresaliente

Bachiller (b): Deynid Golque Hilaris

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	17	B+	Muy Bueno	Sobresaliente

Bachiller (c):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(*) 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.

Presidencia

Asesora

Bachiller (a)

Miembro

Bachiller (b)

Secretario/a

Miembro

Bachiller (c)

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	8
2. METODOLOGÍA	12
2.1 Instalación del digestor	12
2.2 Instalación de la cobertura para el digestor	13
2.2 Instalación de sensores arduinos de temperatura	14
2.3 Instalación de medidores de biogás.....	14
2.4 Caracterización, relación de mezcla y tiempo de recarga	15
2.5 Modelamiento matemático.....	15
3. RESULTADOS.....	17
3.1 Caracterización del sustrato	17
3.2 Monitoreo de la temperatura	17
3.3 Cinética de obtención de biogás	21
3.4 Cambios fisicoquímicos en el Sustrato	23
4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	24
5. CONCLUSIONES	26
6. REFERENCIAS.....	27
7. ANEXOS	29
7.1 Evidencia de Sumisión.....	29
7.2 Copia de la resolución de inscripción del perfil del proyecto de tesis en formato articulo aprobado por el consejo de la facultad.....	29

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica del sustrato	17
Tabla 2. Temperaturas a diferentes puntos del digestor.....	18
Tabla 3. Comportamiento de las temperaturas VS producción de biogás generado por mes.....	20
Tabla 4. Constantes cinéticas, criterios de ajuste y criterios de información de los modelos matemáticos aplicados a la obtención de biogás.	22
Tabla 5. Comparación de los parámetros fisicoquímicos antes y después de la obtención de biogás.	23

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la distribución de sensores Arduino y componentes que conforman el digestor tubular.....	13
Figura 2. Vista del digestor con cobertor y sin cobertor	14
Figura 3. Boxplot de temperaturas a diferentes puntos del digestor.	18
Figura 4. Comportamiento de las temperaturas VS producción de biogás	19
Figura 5. Cinética no lineal de biogás en escala logarítmica.	21

EFFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE UN DIGESTOR TUBULAR EN UN INVERNADERO EN ZONAS ALTOANDINAS

RESUMEN

Los efectos del calentamiento global causados por el efecto invernadero, se ha convertido en un problema internacional, siendo el sector ganadero una de las responsables de las emisiones de metano. En zonas altoandinas, una limitante en la optimización del proceso fermentativo de digestor es la temperatura. el objetivo de investigación fue evaluar el efecto de la temperatura en la producción de biogás de un digestor tubular en un invernadero en zonas altoandinas. Para tal efecto, se diseñó un digestor con variación de temperatura con el uso de un cobertor, el monitoreo de temperatura se realizó usando sensores Arduino. Asimismo, se realizó la caracterización fisicoquímica de sustrato antes y después del experimento. Los resultados demuestran que se obtuvo una concentración elevada de biogás con cobertor (704 m³) con una media de 19 °C; en comparación de los 299 m³ del digestor sin cobertor con una media de 10°C y una media de temperatura ambiente de 4°C. Por otro lado, el modelo de Gompertz obtuvo mayor ajuste con un R² de 0.909. Concluyendo, que la temperatura influye en la obtención de biogás, lo cual permite implementar digestores en condiciones altoandinas.

Palabras clave: temperatura, biogás, modelamiento matemático, Gompertz

EFFECT OF TEMPERATURE ON THE PRODUCTION OF BIOGAS FROM A TUBULAR DIGESTER IN A GREENHOUSE IN HIGH ANDEAN AREAS

ABSTRACT

The effects of global warming caused by the greenhouse effect have become an international problem, with the livestock sector being one of those responsible for methane emissions. In high Andean areas, a limitation in optimizing the digester fermentation process is temperature. The research objective was to evaluate the effect of temperature on biogas production from a tubular digester in a greenhouse in high Andean areas. For this purpose, a biodigester with temperature variation was designed with the use of a cover, temperature monitoring was carried out using Arduino sensors. Likewise, the physicochemical characterization of the substrate was carried out before and after the experiment. The results show that a high concentration of biogas was obtained with a cover (704 m³) with an average temperature of 19 °C; compared to the 299 m³ of the digester without cover with an average temperature of 10°C and an average ambient temperature of 4°C. On the other hand, the Gompertz model obtained a better fit with an R² of 0.909. Concluding, that the temperature influences the obtaining of biogas, which allows the implementation of digesters in high Andean conditions.

Keywords: Temperature, biogas, mathematical modeling, Gompertz.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se enfrenta una importante falta de aprovechamiento de recursos naturales para producir energías renovables. Además, se presenta el incremento del efecto invernadero por el aumento de los gases del (GEI), por lo que se ha congregado a los países a buscar soluciones que reviertan este problema. (Ibarra, 2018) Según, Steinfeld et al, (2009), el sector ganadero sería responsable del 9,35 a 40 y 65 % de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O). Asimismo, la crianza de ganado bovino, contribuye a la tala de grandes áreas de bosque para instalar pastizales; la descomposición del estiércol del ganado en los pastizales emite metano y la lluvia arrastra restos del estiércol a las fuentes de agua contaminándolas con coliformes fecales (Barrena et al., 2019).

Alcócer et al. (2019) menciona que el cambio climático está generando diversos impactos para los sistemas de salud, afectando a los pobladores que viven en zonas altoandinas que están expuestos a las bajas temperaturas que predominan en los andes peruanos. Por ende, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), indica que la Comunidad Campesina Anansaya Collana (Cuzco), lugar donde se llevó a cabo la investigación se encuentra ubicado a 3,915 msnm donde el promedio de temperatura durante el año es de 22°C en el día y en las noches llega hasta -2°C.

Según, el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2018) los pobladores de zonas rurales del Perú, realizan la cocción de sus alimentos empleando leña (71,3%) y bosta (32,1%). Además, Osorio et al. (2007), realizaron un estudio en comunidades del Cusco, identificando que la exposición prolongada a contaminantes producidos por el humo que generan las cocinas a bosta al interior de la vivienda, produce infecciones respiratorias agudas (IRA's).

Por lo tanto, los sistemas de cocinas rurales al no contar con chimeneas humos peligrosos que son perjudiciales para la salud; estos pobladores se exponen directamente a los gases tóxicos que generan monóxido de carbono, material particulado, partículas benceno, 1-3 butadien y formaldehído, entre otros Agencia Adventista para el Desarrollo y Recursos Asistenciales (ADRA, 2008).

Frente a esta problemática de las familias rurales el biogás puede contribuir a superar problemas ambientales al ocuparse de los desechos orgánicos (bosta) mientras se produce combustible renovable (Lindfors et al., 2022). Según, Liu et al (2023) el metano es un recurso con un gran potencial para su conversión en combustible y biomasa. Asimismo, Park et al. (2023) resalta que la bosta (estiércol de vaca) puede generar biogás en vez de realizar una combustión directa, donde se tiene una baja eficiencia en la producción de energía y se genera grandes producciones de CO₂. Por otro lado, existen estudios que han demostrado la viabilidad técnica y económica de la producción de biogás a partir de estiércol vacuno. Por ejemplo, en un estudio llevado a cabo en una granja lechera en España, se demostró que la producción de biogás a partir de estiércol vacuno y otros residuos orgánicos es una opción rentable y sostenible (Akbulut, 2012). Además, se ha demostrado que el uso de biogás producido a partir de estiércol vacuno puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con el uso de combustibles fósiles (Souza Neto et al., 2023).

Otros estudios han investigado la influencia de diferentes factores en la producción de biogás a partir de estiércol vacuno, como la temperatura, el pH y la relación C/N. Por ejemplo, un estudio llevado a cabo en una planta de biogás en Alemania encontró que la temperatura óptima para la producción de biogás a partir de estiércol vacuno era de 38°C (Nasir et al., 2012). Además, se ha demostrado que la adición de co-sustratos, como los residuos de alimentos, puede

mejorar la producción de biogás a partir de estiércol vacuno (Marañón et al., 2012). También se han investigado diferentes tecnologías para mejorar la producción de biogás a partir de estiércol vacuno, como la digestión en dos fases y la co-digestión con otros residuos orgánicos. Un estudio llevado a cabo en Brasil encontró que la co-digestión de estiércol vacuno con residuos de la industria alimentaria y de la agroindustria mejoró significativamente la producción de biogás (de Souza et al., 2023).

Además, se ha investigado el potencial de la producción de biogás a partir de estiércol vacuno en diferentes regiones del mundo. Un estudio llevado a cabo en India encontró que la producción de biogás a partir de estiércol vacuno podía contribuir significativamente a la reducción de la dependencia del país de los combustibles fósiles y a la mejora de la seguridad energética (D' Silva et al., 2021). Por lo antes descrito surge la necesidad de implementar estas tecnologías que puedan brindar un ambiente de desarrollo para microorganismos en condiciones típicas de zonas sobre los 4000 msnm. con temperaturas inestables; durante el día puede llegar sobre los 20°C, al atardecer descender a los 5°C, por la noche descender a los -6 °C. La finalidad de esta investigación es evaluar el efecto de la temperatura en la producción de biogás a partir de excretas de ganado vacuno en condiciones altoandinas.

1.1. Digestor

El digestor, en su forma más simple, es un contenedor cerrado, hermético e impermeable (llamado reactor), dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar (excrementos de animales, desechos vegetales, etc.) en determinada dilución de agua para que se descomponga, produciendo gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio (Sainz, 2020)

1.2. Procesos dentro del digestor tubular

La biodigestión es un fenómeno que ocurre debido a la presencia de un grupo de microorganismos bacterianos anaeróbicos en la biomasa. Estos microorganismos actúan sobre los desechos orgánicos de origen vegetal y/o animal, lo que resulta en la producción de una mezcla de gases, principalmente metano (CH_4), conocida como biogás. Este biogás es altamente eficiente cuando se utiliza como combustible.

Además, como resultado de este proceso, se generan residuos con una concentración significativa de nutrientes y materia orgánica, lo que los convierte en excelentes fertilizantes. Estos residuos pueden aplicarse frescos, ya que el tratamiento anaeróbico elimina los malos olores y la proliferación de moscas. Además, durante la digestión por bacterias anaeróbicas, se destruyen microorganismos, huevos de parásitos y semillas de malezas presentes en las excretas frescas, lo que garantiza que el fertilizante resultante esté libre de tales gérmenes y plantas indeseables (Acuña, 2015).

El biogás es una mezcla de gases cuyos principales componentes son el metano (CH_4) que se encuentra entre un 60-70% y el bióxido de carbono (CO_2) entre un 30-40% adicionalmente también contiene hidrógeno (H_2) en 1%, nitrógeno (N_2) en 0,5%, monóxido de carbono (CO) en 0,1%, oxígeno (O_2) 0,1% y ácido sulfhídrico (H_2S) en 0,1%. Además, como beneficio los digestores producen biofertilizante, que es un abono orgánico líquido del proceso de la digestión anaerobia, este abono natural contiene nutrientes que pueden ser fácilmente asimilados por las plantas, y es considerado un excelente fertilizante a diferencia de la descomposición de la materia orgánica al aire libre, pues no permite que exista gran pérdida de los nutrientes originales contenidos en la materia prima (Alcócer et al., 2019).

2. METODOLOGÍA

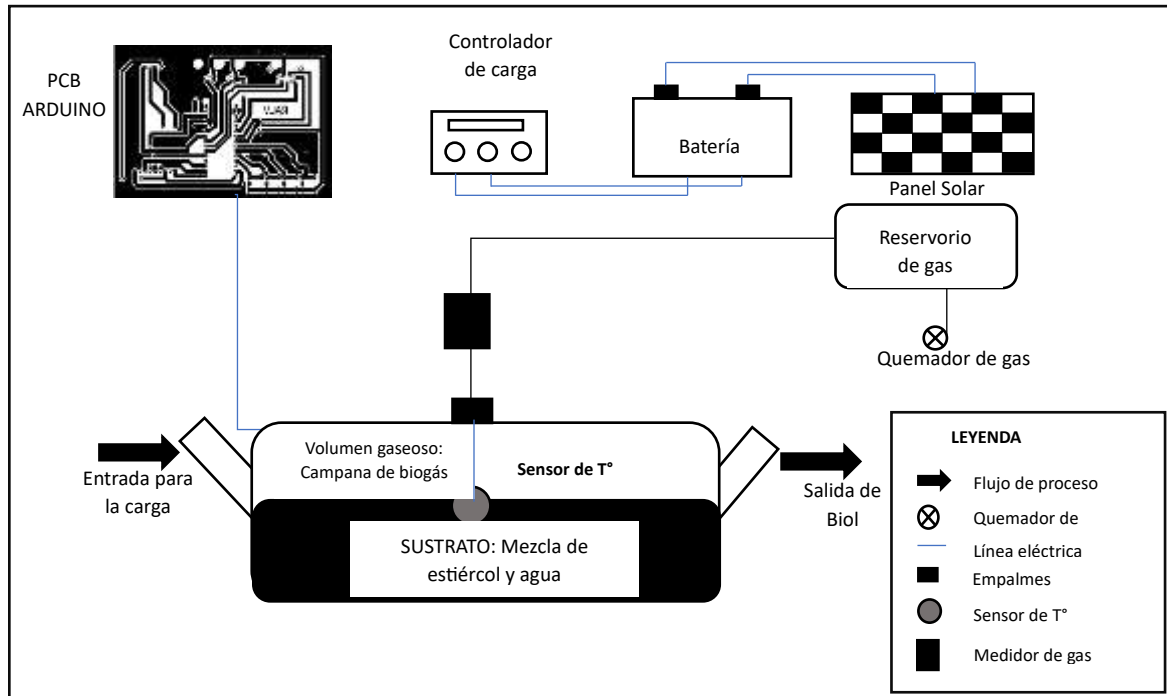
2.1 Instalación del digestor

Se instaló un digestor tubular de plástico hecho de polietileno simple, con dimensiones de 6 metros de largo, 1 metro de ancho y 1 metro de profundidad. Para garantizar el aislamiento, se colocó sobre una base de Tecnopor de 10 cm de espesor. La alimentación del digestor (sustrato más agua) y la descarga del biol se llevaron a cabo utilizando tubos de PVC de 4 pulgadas de diámetro y 2.5 metros de longitud en ambos lados. Además, se instaló un tubo de PVC de 2 pulgadas de diámetro en el centro del digestor para la conducción del gas. Este tubo estaba equipado con una válvula de PVC de 1/2 pulgada, una trampa de gas y un sistema convencional cilíndrico para el tratamiento del ácido sulfhídrico utilizando limaduras de hierro. Para almacenar el gas producido, se utilizó un depósito cilíndrico de plástico (polietileno simple) con dimensiones de 3 metros de largo por 1 metro de ancho, como se muestra en la Figura 1.

Además, se instaló un segundo digestor con las mismas características, pero en condiciones ambientales no controladas. Este segundo digestor fue utilizado como grupo de control en la investigación.

Figura 1.

Esquema de la distribución de sensores Arduino y componentes que conforman el digestor tubular.



2.2. Instalación de la cobertura para el digestor

En el primer digestor se instaló una cobertura compuesta por una estructura metálica y agrofilm amarillo calibre 10. Esta cobertura se encuentra asentada sobre una base de adobe, con dimensiones de 1 metro de altura por 30 cm de ancho. El propósito de esta configuración es mantener temperaturas adecuadas para el desarrollo de los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica dentro del digestor. El invernadero está orientado de este a oeste para aprovechar al máximo la radiación solar. La cobertura tiene dimensiones de 8 metros de largo, 2.10 metros de ancho y 1.60 metros de altura. Ver Figura 2.

Figura 2.

Vista del digestor con cobertor y sin cobertor



A. Digestor con cobertor

B. Digestor sin cobertor

2.2 Instalación de sensores arduinos de temperatura

Se instaló una plataforma Arduino con 4 sensores TH22 (Sensor digital de temperatura y humedad), que se colocaron en 4 puntos estratégicos, el primero se colocó fuera del cobertor (temperatura ambiente), el segundo dentro del digestor sin cobertor, el tercero dentro del digestor con cobertor y el cuarto midió la temperatura dentro del cobertor. La plataforma Arduino se programó para medir los datos a las 6:00, 12:00, 18:00 y 24:00 horas; estos datos se acumularon en una tarjeta SD. La instalación se muestra en la Figura 1.

2.3 Instalación de medidores de biogás

Para medir la producción de biogás se utilizó el medidor Golcard Smart el mismo que registra el volumen del gas generado, con un caudal máximo de 2.5 m³/h y mínimo de 0.016

m³/h y una de presión de 1.5 a 50 kPa como máximo. Por lo que se instalaron dos medidores de gas para los dos digestores (con cobertor y sin cobertor).

2.4 Caracterización, relación de mezcla y tiempo de recarga

La caracterización del estiércol se obtuvo bajo análisis de laboratorio (Laboratorio de Saneamiento Ambiental- UPeU Juliaca) donde se analizaron sólidos totales, sólidos volátiles, cenizas y humedad empleando las normas técnicas peruanas (NTP 339.201, 339.310, 339.308, 339.301). La alimentación de los digestores fue de 1 a 3 (estiércol del vacuno y agua) que representa 115 L/día la recarga se realizó los primeros 30 días seguidos una vez obtenido ya el gas se realizó cada 3 días, durante el periodo experimental (170 días).

2.5 Modelamiento matemático

Para el modelamiento matemático y construcción de la curva de la cinética del biogás se propuso tres modelos matemáticos: el modelo de Gompertz (Ec. 1), sugerida por Chambi & Torres, (2021). Respecto a los modelos Logísticos (Ec. 2) y Van Bertalanffy (Ec. 3), se consideraron debido a su amplia aplicación en este tipo de estudios, estos modelos se calcularon a partir de la conversión logarítmica de biogás en función al tiempo

Modelo de Gompertz

$$y = ae^{-be^{-ct}} \quad (\text{E.1})$$

Modelo Logístico

$$y = ae^{1+be^{-ct}-1} \quad (\text{E. 2})$$

Modelo Van Bertalanffy

$$y = ae^{-be^{-ct^3}}$$

Criterios de Ajuste (E.3)

Coeficiente de Determinación R^2

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \underline{y}_i)^2} \quad (4)$$

Criterios de información

$$AIC = \frac{(T - K)SSE}{T(T - P)} e^{\frac{2k}{T}} \quad (5)$$

$$BIC = \frac{(T - K)SSE}{T(T - P)} T^{\frac{k}{T}} \quad (6)$$

3. RESULTADOS

3.1 Caracterización del sustrato

La tabla 1 muestra la caracterización fisicoquímica del sustrato (estiércol) de la localidad de Espinar – Cuzco, a los 4000 msnm.

Tabla 1.

Caracterización fisicoquímica del sustrato

Parámetro	Estadísticos Descriptivos		
	Media	%	Desviación Estándar
Sólidos totales (g/kg)	154.75	15	0.48
Sólidos volátiles (g/kg)	137.24	14	0.46
Cenizas (g/kg)	17.51	2	0.37
Humedad (%)	84.53	-	0.05

Nota. En la tabla se muestra que los sólidos totales, sólidos volátiles, cenizas y humedad presentan una desviación estándar cercanas a 0.

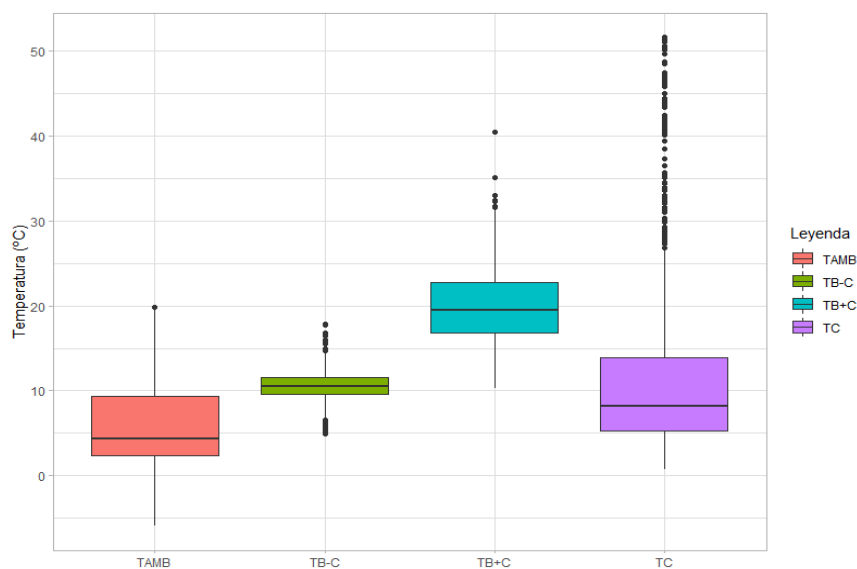
3.2 Monitoreo de la temperatura

La tabla 2 muestra las temperaturas monitoreadas con sensores arduinos cada 06 horas en los 170 días experimentales. Los monitoreos se ejecutaron durante todo el proceso en las estaciones de verano y parte de otoño, considerando que en verano y otoño en zonas altoandinas se tiene condiciones climáticas adversa con lluvias y descenso de temperatura. En los estadísticos descriptivos del monitoreo de la temperatura, se aprecia que la temperatura ambiente (T_{Amb}) reporta valores desde -5.92 a 19.80 °C, la temperatura reportada del digestor sin cobertor (T_{B-C}) van desde 4.97 a 17.89°C, sin embargo, el digestor con cobertor (T_{B+C}) reporta los valores más elevados de 10.23 a 40.53°C y respecto al monitoreo de la temperatura del cobertor (T_C) esta registro temperaturas que van desde los 0.71 a 51.63 °C, finalmente la comparación de medias revela que existe diferencia estadística significativa entre muestras a nivel de significancia del 95% ($p < 0.05$) representado por la diferencia de letras en los superíndices que acompañan a las medias.

Tabla 2.*Temperaturas a diferentes puntos del digestor*

Descriptivos	Temperaturas (°C)			
	T _{Amb}	T _{B - C}	T _{B + C}	T _C
Media	5.65 ^c	10.56 ^b	19.87 ^a	12.71 ^b
Error típico	0.19	0.08	0.18	0.45
Desviación estándar	4.88	1.96	4.75	11.85
Mínimo	-5.92	4.97	10.23	0.71
Máximo	19.80	17.89	40.53	51.63

La Figura 3 muestra que las mediciones de temperatura varían entre las diferentes formas de monitoreo (T_{AMB}, T_{B-C}, T_{B+C} y T_C). Hay diferencias claras entre las distribuciones de temperatura de T_{AMB} y T_{B-C} / T_{B+C}, mientras que T_C muestra una superposición entre el tercer cuartil de T_{AMB} con el primer cuartil de T_C, por otro lado, hay un mayor rango de valores en T_C, con respecto al tamaño de las cajas T_{B-C} presenta la caja más pequeña, por otro lado, también se observa una mayor variabilidad en las mediciones de T_C en comparación con las otras mediciones, y se identificaron datos atípicos en todas las cajas. La figura representa la distribución estadística de datos cuantitativos (T°), debido a que se cuenta una amplia base de datos.

Figura 3.*Boxplot de temperaturas a diferentes puntos del digestor*

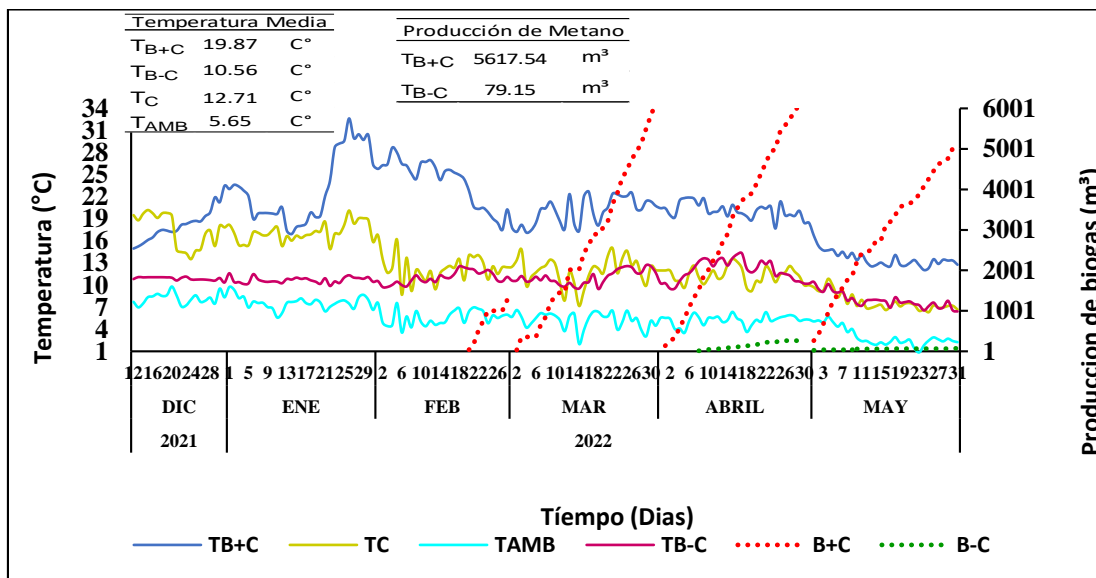
La Figura 4, muestra la relación entre las temperaturas y la producción de biogás, destacando la influencia significativa de la temperatura en la obtención de este último. Se comparan dos condiciones: un digestor con cobertor (B+C) y otro sin cobertor (B-C). En el caso del digestor con cobertor (B+C), se observa que la producción de biogás se desarrolla rápidamente, entrando en una fase exponencial a partir del mes de febrero y continuando en los meses siguientes, de marzo a mayo. Esto sugiere que el cobertor tiene un efecto positivo en la producción de biogás, lo que permite una mayor eficiencia en el proceso de digestión anaeróbica.

En contraste, el digestor sin cobertor (B-C) muestra una obtención de biogás más lenta, teniendo la aparición en el mes de abril. Además, la curva asociada a esta condición exhibe una formación de biogás más lenta, representada mediante una regresión lineal en escala logarítmica.

Esto sugiere que la falta de cobertor está relacionada con una menor producción de biogás y, posiblemente, una menor eficiencia en la digestión anaeróbica.

Figura 4.

Comportamiento de las temperaturas VS producción de biogás



La Tabla 3 muestra la variabilidad de las temperaturas a lo largo de los meses, considerando diferentes condiciones y ubicaciones relacionadas con un digestor. A continuación, se presenta una interpretación de los datos proporcionados: En la tabla 3, se observan diferentes temperaturas relacionadas con un digestor y su cobertor a lo largo del año. El mes de febrero registra la temperatura más alta del digestor con cobertor (T_{B+C}), alcanzando los 24.06 °C. Este mes se destaca por ser el más cálido del año, lo que explica la temperatura más elevada en el digestor protegido. En contraste, el mes de abril muestra la temperatura máxima de un digestor sin cobertor (T_{B-C}), que es de 12.08 °C. Aunque este valor es significativamente más bajo que la temperatura máxima registrada en febrero con cobertor, sigue siendo relevante para comprender la variabilidad térmica a lo largo del año. En cuanto al cobertor (T_C) en sí, su temperatura varía entre un máximo de 17.42 °C y un mínimo de 7.70 °C. Esta variación podría estar influenciada por las condiciones climáticas y la exposición a la luz solar durante los diferentes meses. Finalmente, se proporciona información sobre la temperatura ambiente (T_{AMB}), que es la temperatura del entorno sin ninguna influencia directa del digestor o el cobertor. Se registra una temperatura máxima de 8.17 °C y una temperatura mínima de 2.98 °C. Esta información es relevante para tener una visión completa de las condiciones ambientales en las que se encuentra el digestor. En general, los datos de la Tabla 3 muestran cómo las temperaturas varían en diferentes configuraciones del digestor a lo largo del año, proporcionando información valiosa sobre su comportamiento térmico en diferentes condiciones ambientales y de cobertura.

Tabla 3.

Comportamiento de las temperaturas VS producción de biogás generado por mes.

	Temperatura Media (°C)					
	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
T_{B+C}	18.19	23.03	24.06	20.05	20.18	13.54
T_{B-C}	10.88	10.68	10.99	11.03	12.08	7.92

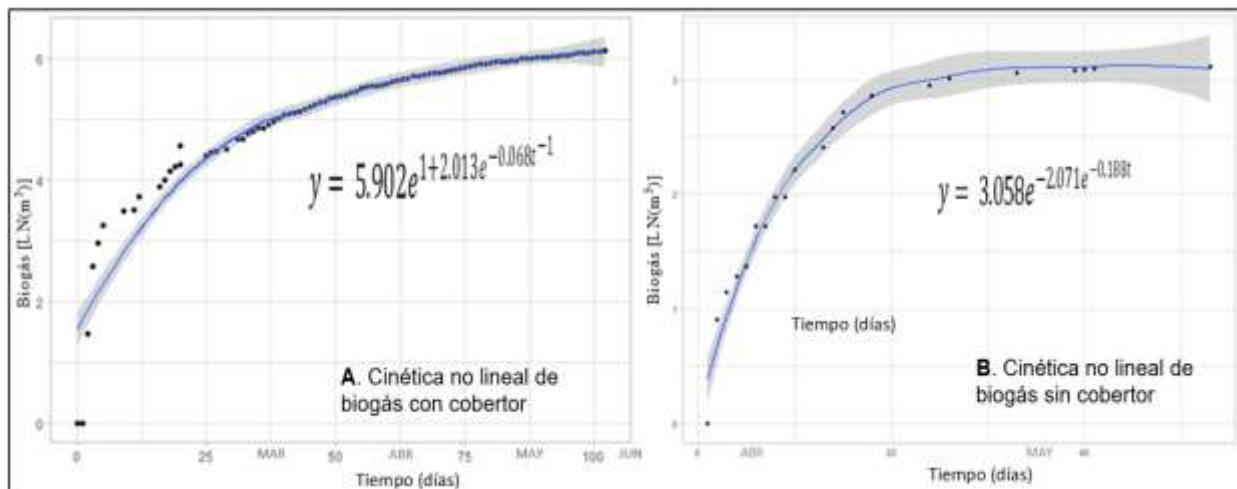
T_C	17.42	17.14	12.33	11.93	11.34	7.70
T_{AMB}	8.17	7.60	5.60	5.23	5.22	2.98

3.3 Cinética de obtención de biogás

La figura 5, muestra la regresión no lineal en escala logarítmica de la obtención de biogás con cobertor (A) en la cual se puede apreciar una curva que desarrolla rápidamente a una fase exponencial la cual se mantiene aproximadamente hasta el día treinta, luego desacelera y pese a esto la producción de biogás se mantiene hasta entrar a una fase estacionaria, sin embargo, la obtención de biogás sin cobertor (B) se muestra la regresión no lineal en escala logarítmica en la cual se puede apreciar una curva con baja formación de biogás.

Figura 5.

Cinética no lineal de biogás en escala logarítmica.



En la Tabla 4, detalla las constantes cinéticas de los modelos matemáticos para el digestor con cobertor, en ella la constante a (carga máxima de biogás) no muestra diferencias marcadas entre modelos que van desde 5.902 (704 m³) correspondiente al modelo Logístico hasta 5.950(710m³) del modelo de Van Bertalanffy, respecto a la constante b (velocidad de

formación del gas) existe una diferencia marcada entre modelos siendo el valor mayor en el modelo Logístico con 2.013, asimismo, los valores de la constante C no presentan diferencias marcadas, sin embargo, el modelo Logístico presenta el valor más elevado con 0.068 seguido por el modelo de Gompertz con 0.056, sin embargo, las constantes cinéticas de los modelos matemáticos para el digester sin cobertor, la constante a (carga máxima del biogás) no muestra diferencias marcadas entre modelos que van desde 3.033(299 m³) correspondiente al modelo Logístico hasta 3.070 (305 m³) del modelo de Van Bertalanffy, respecto a la constante b (velocidad de formación de gas) existe una diferencias más marcada entre modelos siendo el valor mayor en el modelo Logístico con 4.535, asimismo, los valores de la constante C no presentan diferencias marcadas, sin embargo, el modelo Logístico presenta el valor más elevado con 0.251 seguido por el modelo de Gompertz con 0.188, respecto a la significancia para todas las constantes en todos los modelos aplicados se halló que todos los modelos presentan significancia a un nivel de $p < 0.05$; respecto a los criterios de ajuste se muestra que el coeficiente de determinación (R^2) no presentan valores distantes entre los modelos, también se ve que estos están muy cercanos la curva sigmoideal; en relación a los criterios de información.

Tabla 4.

Constantes cinéticas, criterios de ajuste y criterios de información de los modelos matemáticos aplicados a la obtención de biogás.

	CON COBERTOR			SIN COBERTOR		
	Modelos matemáticos					
Parámetros	Gompertz	Logístico	Van Bertalanffy	Gompertz	Logístico	Van Bertalanffy
Constante a	5.936	5.902	5.950	3.058	3.033	3.070
Constante b	1.239	2.013	0.353	2.071	4.535	0.540
Constante c	0.056	0.068	0.052	0.188	0.251	0.168
P – valor para a	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
P – valor para b	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
P – valor para c	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Criterios de ajuste							
Coefficiente de determinación (R ²)	0.909	0.893	0.906	0.970	0.960	0.964	
R ² ajustado	0.907	0.890	0.904	0.967	0.955	0.962	
Criterios de información							
AIC	76.194	91.282	69.463	-12.636	-6.061	-15.710	
BIC	86.238	101.326	79.507	-8.457	-1.883	-11.532	

3.4 Cambios fisicoquímicos en el Sustrato

La tabla 5, muestra los análisis fisicoquímicos del sustrato (estiércol + agua) antes y después de la obtención de biogás en ella se nota una reducción considerable en cada uno de los parámetros. Los parámetros fisicoquímicos antes y después de los tratamientos, muestran un mejor tratamiento del digestor con cobertor en comparación al digestor sin cobertor.

Tabla 5.

Comparación de los parámetros fisicoquímicos antes y después de la obtención de biogás.

Parámetros	Pre test	Digestor con cobertor	Digestor sin cobertor
Sólidos totales (g/kg)	42.64 ± 0.58	10.64 ± 0.41	27.15 ± 0.28
Sólidos volátiles (g/kg)	27.48 ± 1.22	7.59 ± 0.30	20.45 ± 0.18
Cenizas (g/kg)	15.16 ± 1.26	3.05 ± 0.11	6.71 ± 0.11
Humedad (%)	95.74 ± 0.06	98.94 ± 0.04	97.28 ± 0.03
Ácidos Grasos volátiles (mg/L)	1048 ± 30.20	786 ± 8.49	1014 ± 8.49
Alcalinidad Total (mgCaCO ₃ /L)	1133.33 ± 115.47	1170 ± 42.43	1325 ± 35.36
Capacidad buffer	0.93 ± 0.10	0.67 ± 0.02	0.77 ± 0.01
pH	7.38 ± 0.45	8.37 ± 0.09	7.47 ± 0.01

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los valores de sólidos totales (Tabla 1) son similares al sustrato empleado por Acuña (2015), que trabajó biodigestión en condiciones altoandinas de estiércol de vacuno con Sólidos totales del 17%; este porcentaje de cargas permiten generar un sustrato de características fisicoquímicas adecuadas para la carga diaria de una mezcla de agua y estiércol.

El monitoreo de temperatura (Tabla 2) resalta la importancia de mantener condiciones óptimas para la producción de biogás en concordancia con Guasumba et al (2005) que resalta la importancia de la temperatura en la formación de biogás ya que al modificar esta se puede reducir el tiempo de retención hidráulica hasta en 30 días de los cuales empieza a formación de gas, que concuerda con nuestro estudio ya que el cobertor aportó mayor temperatura generando así mayor cantidad de gas en menor tiempo, asimismo Osorio et al (2007) encontraron que el manejo de la temperatura con sistemas aislantes para climas fríos son eficientes para la alta producción de biogás. Además, indica que en temperaturas promedio a los 16 °C se obtiene una buena producción de biogás cercanos a los 45 días.

Respecto a las curvas cinéticas de obtención de biogás (Figura 5) se halló similitud con otras investigaciones como las realizadas en Tarapoto – Perú en sustrato de estiércol bovino que según Barrena et al (2019) reportó que a los 29 días se alcanzó la formación de biogás a una temperatura de 17.5 °C. Además, Acuña (2015) también reportó que a los 35 días se alcanzó la producción de biogás en Cadet (Ecuador) a una altura de 2465 msnm.

Respecto a la aplicación de los modelos cinéticos para Solarte et al (2017) la aplicación de modelos cinéticos nos proporciona una buena fuente para la optimización matemática de la obtención de biogás siendo el modelo logístico el ideal para este tipo de experimentos, en la

cual se resalta el modelo de Gompertz ya que el comportamiento del reactor en condiciones altiplánicas se asemeja más al modelo matemático de Gompertz que trabajo en reactores de tipo tubular que si bien es cierto en el estudio presenta un buen ajuste no es el más significativo como es en el caso del modelo logístico.

Además, en los cambios fisicoquímicos del sustrato (Tabla 5) León et al (2019) resalta su importancia en la formación de biogás, por lo cual la interacción de sustrato y microorganismos es de mucha relevancia.

5. CONCLUSIONES

La investigación reveló que se cuenta con elevadas cargas en los parámetros fisicoquímicos presentes en el sustrato, con 42.64 g/Kg de sólidos totales, 27.48 g/kg de sólidos volátiles, de la cual el digestor con cobertor obtuvo una mayor descomposición.

Además, el digestor con cobertor reporta los valores más elevados de temperatura con una media de 19.45°C en comparación al digestor sin cobertor con una media de 10.56°C existiendo una diferencia estadística entre muestras a nivel de significancia del 95% ($p < 0.05$).

De acuerdo a la optimización del proceso fermentativo, el digestor con cobertor desarrolla rápidamente una fase exponencial y se mantiene después de los treinta días, a comparación del digestor sin cobertor que mantiene una curva con baja formación de biogás.

El modelo Gompertz obtuvo mayor ajuste con un R^2 de 0.909, todos los modelos presentan significancia a nivel de $p < 0.05$.

En conclusión, el efecto de la temperatura y la influencia del cobertor en la producción de biogás. Los meses más cálidos, como febrero y marzo, favorecieron la producción de biogás, mientras que, en meses más fríos, como diciembre, enero y mayo, la producción fue más limitada, especialmente en el digestor sin cobertor por lo que en un invernadero impacta directamente en la obtención de biogás como en cantidad y tiempo, siendo el tratamiento con cobertor que alcanzó la mayor producción de biogás (704 m³).

6. REFERENCIAS

- Acuña, J. (2015). Diseño e implementación de un biodigestor para el tratamiento de excretas de ganado bovino 2015. *Tesis de Grado, Ingeniería Agronómica*, 151, 10–17.
<http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/15473>
- ADRA. (2008). *Cocinas mejoradas*. 48. <http://bvs.minsa.gob.pe/local/minsa/2918.pdf>
- Akbulut, A. (2012). Techno-economic analysis of electricity and heat generation from farm-scale biogas plant: Çiçekdağı case study. *Energy*, 44(1), 381–390.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.06.017>
- Alcócer, J., Pinto, O., Costa, M., Silva, M., Oliveira, J., & Da Fonseca, A. (2019). Use of biodigesters, cisterns and desalinators: social technologies as sustainable alternatives of coexistence with the Semi-arid. *Revista Electrónica Em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 23, 24. <https://doi.org/10.5902/2236117036472>
- Barrena, M., Cubas, F., Gosgot, W., Ordinola, C., Rascón, J., & Huanes, M. (2019). Sistema de producción de biogás y bioabonos a partir del estiércol de bovino, Molinopampa, Chachapoyas, Amazonas, Perú. *Arnaldoa*, 26(2), 725–734.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.22497/arnaldoa.262.26214>
- Chambi, A., & Torres, A. (2021). Modelos cinéticos sigmoidales aplicados al crecimiento de *Saccharomyces boulardii*. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 23(1), 55–60. <https://doi.org/10.18271/ria.2021.226>
- D' Silva, T. C., Isha, A., Chandra, R., Vijay, V. K., Subbarao, P. M. V., Kumar, R., ... Kovács, K. L. (2021). Enhancing methane production in anaerobic digestion through hydrogen assisted pathways – A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111536. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111536>
- de Souza, J., Feitosa, B., Candeia, R., Cavalcanti, M. T., & Lima, A. S. (2023). Generation of biogas and thermal energy at the Bolo das Oliveiras Agroindustry, Pombal, Paraíba, Brazil. *Nativa*, 11(1), 108–114.
<https://doi.org/https://doi.org/10.31413/nativa.v11i1.14583>
- Guasumba, S., Tafur, P., Tipanluisa, L., Ocaña, E., & Pérez, J. (2005). Producción eficiente de biogás mediante calentamiento del sustrato con energía solar térmica de baja temperatura. *Rev Fac Nac Salud Pública*, 20, 1–17.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61458265001>
- INEI - JUNÍN. (2018). Resultados Definitivos. *Censos Económicos*, 1060.
http://www.inr.pt/uploads/docs/recursos/2013/20Censos2011_res_definitivos.pdf
- León, C., Rodríguez, N., Mendoza, G., Bardales, C., Cabos, J., & Barrera, M. (2019). Diseño e implementación de una planta piloto de producción de Biogás, Biol y Biosol. *Arnaldoa*, 26(3), 1017–1032. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.22497/arnaldoa.263.26311>

- Lindfors, A., Hagman, L., & Eklund, M. (2022). The Nordic biogas model: Conceptualization, societal effects, and policy recommendations. *City and Environment Interactions*, 15(July), 100083. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2022.100083>
- Liu, T., Ferrari, G., Pezzuolo, A., Alengebawy, A., Jin, K., Yang, G., ... Ai, P. (2023). Evaluation and analysis of biogas potential from agricultural waste in Hubei Province, China. *Agricultural Systems*, 205, 103577. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103577>
- Nasir, I., Mohd, T., & Omar, R. (2012). Anaerobic digestion technology in livestock manure treatment for biogas production: A review. *Engineering in Life Sciences*, 12(3), 258–269. <https://doi.org/10.1002/elsc.201100150>
- Osorio, J., Velásquez, H., & González, H. (2007). *Evaluación de un sistema de biodigestión en serie para clima frío* (pp. 4145–4162). pp. 4145–4162. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/34778>
- Park, M.-J., Kim, H.-M., Gu, Y.-J., & Jeong, D.-W. (2023). Optimization of biogas-reforming conditions considering carbon formation, hydrogen production, and energy efficiencies. *Energy*, 265, 126273. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126273>
- Sainz, S. (2020). *Elaboración de un biodigestor a escala de laboratorio Autora* : (June). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33561.03681>
- Solarte, J., Mariscal, J., & Aristizábal, B. (2017). Evaluación de la digestión y co-digestión anaerobia de residuos de comida y de poda en biorreactores a escala laboratorio. *Revista ION*, 30(1), 105–116. <https://doi.org/10.18273/revion.v30n1-2017008>
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., & de Haan, C. (2009). La larga sombra del ganado: problemas ambientales y opciones. In *Fao*.

7. ANEXOS

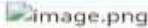

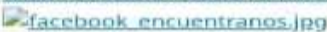

7.1 Evidencia de Sumisión

Comentarios para el editor/a

Participantes [Editar](#)

Deynid Ccolque Hilario (deynid_98)

Mensajes

Nota	De
<p>Estimado editor, previo saludo.</p> <p>El motivo de la presente para poder someter un manuscrito original de título: Efecto de la temperatura en la producción de biogás de un digestor tubular en un invernadero en zonas altoandinas, para lo cual adjunto la carta de presentación y el documento del manuscrito.</p> <p>Atento a vuestros comentarios.</p> <p>Atte.</p> <p>Deynid Ccolque Hilario</p>	<p>deynid_98 Aug 11</p>
<p>Estimada Deynid, buenas tardes.</p> <p>Acusamos recibo de su manuscrito y carta de licencia y derechos de autoría, sin embargo, aún faltan requisitos según los lineamientos de publicación.</p> <p>Los cuales son:</p> <p>La lista de mínimo 3 posibles revisores del manuscrito. Las tablas, cuadros o figuras enviadas por separado en alta resolución para su respectiva manipulación al momento de editarlo para la versión final.</p> <p>A continuación le compartiremos el enlace de nuestra página Web en donde encontrará todos los lineamientos relacionados con la presentación de los mismos.</p> <p>https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/ambientales</p> <p></p> <p>En esos documentos podrá encontrar un ejemplo de cómo presentar su manuscrito, así como de la guía de diseño de figuras y cuadros, también la guía para autores. Quedamos atentos.</p> <p>Sin otro particular.</p> <p>Atentamente, --- Dr. Sergio A. Molina-Murillo Editor en jefe</p> <p>Revista de CIENCIAS AMBIENTALES  Tropical Journal of Environmental Sciences Tel.: + (506) 2277-3688</p> <p>www.revistas.una.ac.cr/ambientales</p> <p> </p>	<p>nancycenteno Aug 15</p>

[Añade mensaje](#)



“AÑO DE LA UNIDAD, LA PAZ Y EL DESARROLLO”

RESOLUCIÓN N° 0316-2023/UPeU-FIA-CF-I

Lima, Naña 27 de junio de 2023

VISTO:

El expediente de **Deynid Ccolque Hilario**, identificado(a) con código universitario N° 201521159 y **Diego Llanchipa Ramírez** identificado(a) con código universitario N° 201521967 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 proyecto de tesis;

Que **Deynid Ccolque Hilario** y **Diego Llanchipa Ramírez**, han solicitado la modificación de la denominación del proyecto de tesis titulado "Efecto de la temperatura en la producción de biogás a partir de excretas de ganado vacuno en condiciones altoandinas";

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 27 de junio de 2023, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de Investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:

Aprobar la modificación de la denominación del proyecto de tesis titulado: "Efecto de la temperatura en la producción de biogás a partir de excretas de ganado vacuno en condiciones altoandinas", por el de: "Efecto de la temperatura en la producción de biogás de un digestor tubular en un invernadero en zonas altoandinas", en el registro respectivo y disponer que con la orientación de su asesor el(la) **Dr. Jorge Juvenal Bravo Hualla**, sea desarrollado y ejecutado el proyecto de tesis por **Deynid Ccolque Hilario** y **Diego Llanchipa Ramírez**, otorgándoles un plazo máximo de doce (12) meses para la ejecución, a partir de la inscripción inicial.

Regístrese, comuníquese y archívese.




Dra. Erika Inés Acuña Salinas
DECANA




Dr. Santiago Ramírez López
SECRETARIO ACADÉMICO

cc:

- Interesado
- Asesor
- DGI
- Archivo