



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Modelos cinéticos aplicados en la co-digestión anaerobia  
usando estiércol y residuos orgánicos para la producción  
óptima de metano. Revisión sistemática**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
Ingeniero Ambiental**

**AUTORES:**

Llerena Saavedra, Anderson Alejandro (orcid.org/0000-0003-1375-3100)

Vasquez Solis, Jean Pierre (orcid.org/0000-0003-2968-367X)

**ASESOR:**

Dr. Sernaque Auccahuasi, Fernando Antonio (orcid.org/0000-0003-1485-5854)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Tratamiento y Gestión de los residuos

**LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:**

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

LIMA – PERÚ

2022

## **Dedicatoria**

Dedicó esta investigación a mis padres que gracias a su apoyo emocional y consejos han hecho que este trabajo se realice con éxito, y a mi Creador por la fortaleza, vida y salud para seguir optando por nuevos conocimientos y transmitirlos a los lectores a través de esta investigación.

*Jean Pierre Vasquez*

A Dios con mucho amor y gratitud, por darme como madre a Leonor Saavedra , ejemplo de honestidad, esfuerzo, perseverancia y deseos de superación, a la que debo lo que soy, por sus consejos y sacrificios abnegados estaré eternamente agradecido.

*Anderson Llerena*

## **Agradecimiento**

A mis asesores de tesis el Dr. Fernando Sernaque y la Dra. Rita Cabello por su exigencia, orientación, confianza y paciencia se pudo realizar esta investigación. A la Universidad Cesar Vallejo por brindarme a los mejores docentes en mi carrera universitaria. A mi familia por acompañarme en todos los momentos difíciles que se presentaron y me brindaron su apoyo incondicional.

*Jean Pierre Vasquez*

Agradezco mucho a nuestro asesor de tesis Dr. Fernando Sernaque, por brindarnos de su sabiduría, paciencia, exigencia y confianza el cual se pudo concluir exitosa y satisfactoriamente esta investigación. A la Universidad Cesar Vallejo quien me dio la bienvenida como tal, las oportunidades que me ha brindado son incomparables.

*Anderson Llerena*

## Índice de contenidos

Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento.....	iii
Índice de contenido .....	iv
Índice de tablas.....	v
Índice de gráficos y figuras .....	vi
Resumen.....	vii
Abstract.....	viii
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. MARCO TEÓRICO .....	5
III. METODOLOGÍA .....	16
3.1 Tipo y diseño de investigación .....	16
3.2 Categorías, Subcategorías y matriz de categorización.....	16
3.3 Escenario de estudio .....	18
3.4 Participantes .....	18
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	18
3.6 Procedimientos .....	18
3.7 Rigor científico .....	21
3.8 Método de análisis de datos.....	22
3.9 Aspectos éticos.....	23
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	23
V. CONCLUSIONES .....	45
VI. RECOMENDACIONES.....	47
REFERENCIA.....	48
ANEXOS	

## Índice de tablas

<b>Tabla 1:</b>	Etapas del proceso de la digestión anaerobia .....	7
<b>Tabla 2:</b>	Composición del biogás.....	9
<b>Tabla 3:</b>	Modelos que se utilizan en el crecimiento bacteriano .....	10
<b>Tabla 4:</b>	Categorías, Subcategorías y matriz de categorización .....	17
<b>Tabla 5:</b>	Tipos de modelos cinéticos aplicados en la codigestión .....	24
<b>Tabla 6:</b>	Tipos de sustratos que se utilizan para la producción metano .....	30
<b>Tabla 7:</b>	Parámetros de control en la codigestión anaerobia para la producción de metano.....	37

## Índice de gráficos y figuras

<b>Grafico 1:</b>	Procedimiento de la búsqueda de artículos científicos .....	20
<b>Grafico 2:</b>	Tipos de sustratos .....	34
<b>Grafico 3:</b>	Tipos de residuos orgánicos .....	35
<b>Grafico 4:</b>	Parámetros de control en la codigestión anaerobia.....	42
<b>Figura 1:</b>	Diagrama de flujo de la digestión anaerobia .....	6
<b>Figura 2:</b>	Ecuación base de modelo cinético Gompertz .....	11

## Resumen

Las tecnologías de codigestión anaerobia son procesos bastantes complejos, ya que a veces pueden sufrir inestabilidades que se deben principalmente a las fluctuaciones de 3 parámetros del proceso: disminución de la producción de metano, exceso AGV-amonio y disminución del pH, es por ello que los modelos cinéticos son un paso necesario para el diseño y control adecuado de los sistemas DA. El objetivo de la investigación fue describir los modelos cinéticos aplicados en la co-digestión anaerobia usando estiércol y residuos orgánicos para la producción óptima de metano. El tipo investigación fue de tipo aplicada de enfoque cualitativo narrativo de tópicos. El resultado del modelo cinético más utilizado es de Gompertz modificado, el segundo modelo es el de Primer orden y por último el de Cono. Se identifico 6 tipos de estiércol, el más utilizado fue el de cerdo, vaca, pollo, oveja, cuy y búfalo. Entre los residuos orgánicos más utilizados es de desechos alimentarios, residuos de cocina, residuos lignocelulósicos y residuos de cartón y papel. Se concluye que el modelo cinético más utilizado es de Gompertz modificado. Se recomienda realizar mayores investigaciones aplicando diferentes tipos de modelos cinéticos y en la producción de metano a través de la co-digestión anaerobia.

Palabras clave: Cinética, codigestión anaerobia, producción de metano, estiércol animal, residuos orgánicos.

## **Abstract**

Anaerobic co-digestion technologies are quite complex processes, since they can sometimes suffer instabilities that are mainly due to fluctuations in 3 process parameters: decreased methane production, VFA-ammonium excess, and decreased pH, which is why kinetic models are a necessary step for the proper design and control of DA systems. The objective of the research was to describe the kinetic models applied in anaerobic co-digestion using manure and organic waste for optimal methane production. The type of research was of an applied type with a qualitative narrative approach to topics. The result of the most used kinetic model is the modified Gompertz model, the second model is the First Order model and finally the Cone model. 6 types of manure were identified, the most used was pig, cow, chicken, sheep, guinea pig and buffalo. Among the most used organic waste is food waste, kitchen waste, lignocellulosic waste and cardboard and paper waste. It is concluded that the most used kinetic model is the modified Gompertz model. Further research is recommended applying different types of kinetic models and on methane production through anaerobic co-digestion.

**Keywords:** Kinetics, anaerobic codigestión, methane production, animal manure, organic waste.



## I. INTRODUCCIÓN

Las grandes cantidades de residuos orgánicos y estiércol animal que se genera continuamente en todo el mundo dan lugar a importantes riesgos de saneamiento y problemas ambientales. A nivel mundial, se produjeron 1400 millones de toneladas de desperdicio de alimentos (Guo et al. 2020, p. 1), y la inadecuada gestión de estiércol contribuyen con el 25% de las emisiones de GEI (Hassanat y Benchaar, 2019, p. 11766), donde el tratamiento y la eliminación de dichos desechos son el mayor desafío que afrontar.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) indicó que para el 2025 se generarían aproximadamente más 2200 millones de toneladas de desperdicio de alimentos en el mundo (Mehariya et al. 2018, p. 519). Asimismo, los residuos orgánicos y la ganadería intensiva se han desarrollado rápidamente en las últimas décadas por satisfacer nuestras demandas de alimentos y al mismo tiempo producir desechos masivos (Zhang et al. 2022, p. 2), ya que esto trae como consecuencia una problemática ambiental por la descontrolada emisión de CO<sub>2</sub> de dichos desechos que ocasiona el aumento del calentamiento global.

Por otro lado, la generación de estos residuos sólidos no son el único problema ambiental, si no la utilización de combustibles fósiles para la producción de energía ha causado una grave contaminación ambiental en las últimas décadas, Bi et al. (2020) indicó que para hacer frente al cambio climático y reducir las emisiones CO<sub>2</sub>, los países desarrollados tienen el objetivo de reducir la intensidad económica que produce estos GEI (p. 213).

Para reducir el uso de combustibles fósiles, el desarrollo y utilización de recursos energéticos renovables se ha convertido en un componente importante de las estrategias mundiales sostenibles, Kasinath et al. (2021) indicó que las tecnologías renovables producen energía eléctrica, térmica o mecánica utilizando biomasa (p. 2), según Özer la biomasa es una fuente de energía limpia y sostenible que se puede producir a partir de diversos tipos de residuos orgánicos y estiércol de animales (2017, p. 3).

En la actualidad, la implementación de la tecnología de conversión de desechos en energía, como la producción de biogás a partir de desechos animales y orgánicos, se ha considerado uno de los mejores medios para lograr los objetivos de desarrollo sostenible en muchos países en desarrollo (Khalil et al. 2019, p. 5).

La digestión anaerobia (DA) de los residuos de alimentos está atrayendo cada vez más atención en todo el mundo para recuperar energía y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Según Kouas et al (2018) la digestión anaerobia es una opción interesante ya que representa una tecnología robusta y bien desarrollada que se utiliza para gestionar los residuos orgánicos, reduciendo el volumen y produciendo biogás (p. 40).

Asimismo, el producto más importante de la digestión anaerobia es el biogás que está compuesto por un conjunto de gases entre ellos el más importante el metano (Romero et al. 2020, p. 777).

La producción de metano a partir de materia prima de biomasa es una práctica común, donde se ha desarrollado toda una industria del biogás basada en la codigestión de estiércol y desechos orgánicos, esta codigestión se realiza para incrementar la eficiencia del metano y la rentabilidad del proceso, Neshat et al. (2017) mencionó que la codigestión anaeróbica de estiércol se está aprovechando al máximo, ya que el proceso permite la generación simultánea de bioenergía, producción enmiendas de suelo rico en nutrientes, la reducción de GEI y el control de olores (p. 1).

De acuerdo con ello, Romero et al. (2020) define la codigestión anaerobia por la mezcla, digestión y tratamiento de dos o más residuos orgánicos, las ventajas que se pueden obtener de este proceso son la recuperación de energía de diferentes biomásas produciendo gas metano (p. 431).

Por esta razón, la codigestión anaeróbica de estiércol se está adaptando cada vez más por los beneficios ambientales asociados: reducción de olores y patógenos, reducción de sólidos, mejora de la salud del suelo y reducción de las emisiones del metano y los beneficios económicos del metano recuperado (Ma et al. 2020, p. 2). Xu et al. (2018) menciona la falta de un análisis profundo de las ventajas de

codigestión y las relaciones entre la nutrición de los cosustratos y la comunidad microbiana (p. 4).

Es por ello, Li et al. (2018) sostiene que para ayudar a dilucidar el proceso de codigestión anaerobia se debe permitir la predicción de algunos modelos cinéticos para describir el proceso de degradación del sustrato y la producción del biogás (p. 136).

No obstante, los modelos cinéticos son necesarios para el diseño, construcción y aplicación de procesos químicos y/o bioquímicos que describen las características del proceso y permiten una mayor optimización. Además, con parámetros cinéticos reales es posible realizar una variedad de simulaciones para explorar los resultados en condiciones experimentales en la producción de metano.

Asimismo este trabajo de investigación se justifica teóricamente ya que la creciente demanda de energía y preocupaciones por la protección del medio ambiente fomentan la producción de energía renovable, que es una fuente de energía alternativa, barata y sostenible en comparación con las fuentes de energía no renovables como los combustibles fósiles que aumentan las emisiones globales de efecto invernadero, es por ello que para producir energía renovable se utiliza la codigestión anaerobia para producir metano que es una fuente de energía limpia y sostenible, pero en estos procesos se puede encontrar diversas problemáticas como inestabilidades que se deben principalmente a las fluctuaciones de 3 parámetros del proceso: disminución de la producción de metano, exceso AGV y/o amonio y disminución del pH, es por ello que los modelos cinéticos se utilizan para determinar y predecir la producción de metano, la tasa máxima de producción y el tiempo de retraso de la DA. De tal manera que los modelos cinéticos son un paso necesario para el diseño y control adecuado de los sistemas DA que van a permitir que otros autores puedan analizar la información sobre el proceso de codigestión anaerobia aplicando un modelo cinético para la obtención de metano como un desarrollo sostenible en el futuro.

De tal manera, el presente trabajo de investigación se realizó con la finalidad de brindar un análisis sobre los modelos cinéticos aplicados en la producción de metano por codigestión anaerobia utilizando estiércol y residuos orgánicos, con el

fin de demostrar que modelo cinético se ajusta bien a los datos experimentales y que tipos de sustratos puede brindar un óptimo resultado en la producción de metano.

De todo lo mencionado, el trabajo investigación planteó como problema general ¿Cuáles son los modelos cinéticos aplicados en la co-digestión anaerobia usando estiércol y residuos orgánicos para la producción óptima de metano?, de igual manera se tienen como problemas específicos:

Problema específico 1: ¿Qué tipo de modelos cinéticos se aplican en la codigestión anaerobia para la producción óptima de metano?

Problema específico 2: ¿Cuáles son los tipos de sustratos que son utilizados en la co-digestión anaerobia para la producción óptima de metano?

Problema específico 3: ¿Cuáles son los parámetros de control en el proceso de la codigestión anaerobia para la producción óptima de metano?

De tal forma, el objetivo general es describir los modelos cinéticos aplicados en la co-digestión anaerobia usando estiércol y residuos orgánicos para la producción óptima de metano, de las cuales se tienen los objetivos específicos

Objetivo específico 1: Identificar los tipos de modelos cinéticos que se aplican en la codigestión anaerobia para la producción óptima de metano.

Objetivo específico 2: Identificar los tipos de sustratos que son utilizados en la co-digestión anaerobia para la producción óptima de metano.

Objetivo específico 3: Identificar los parámetros de control en el proceso de la codigestión anaerobia para la producción óptima de metano.

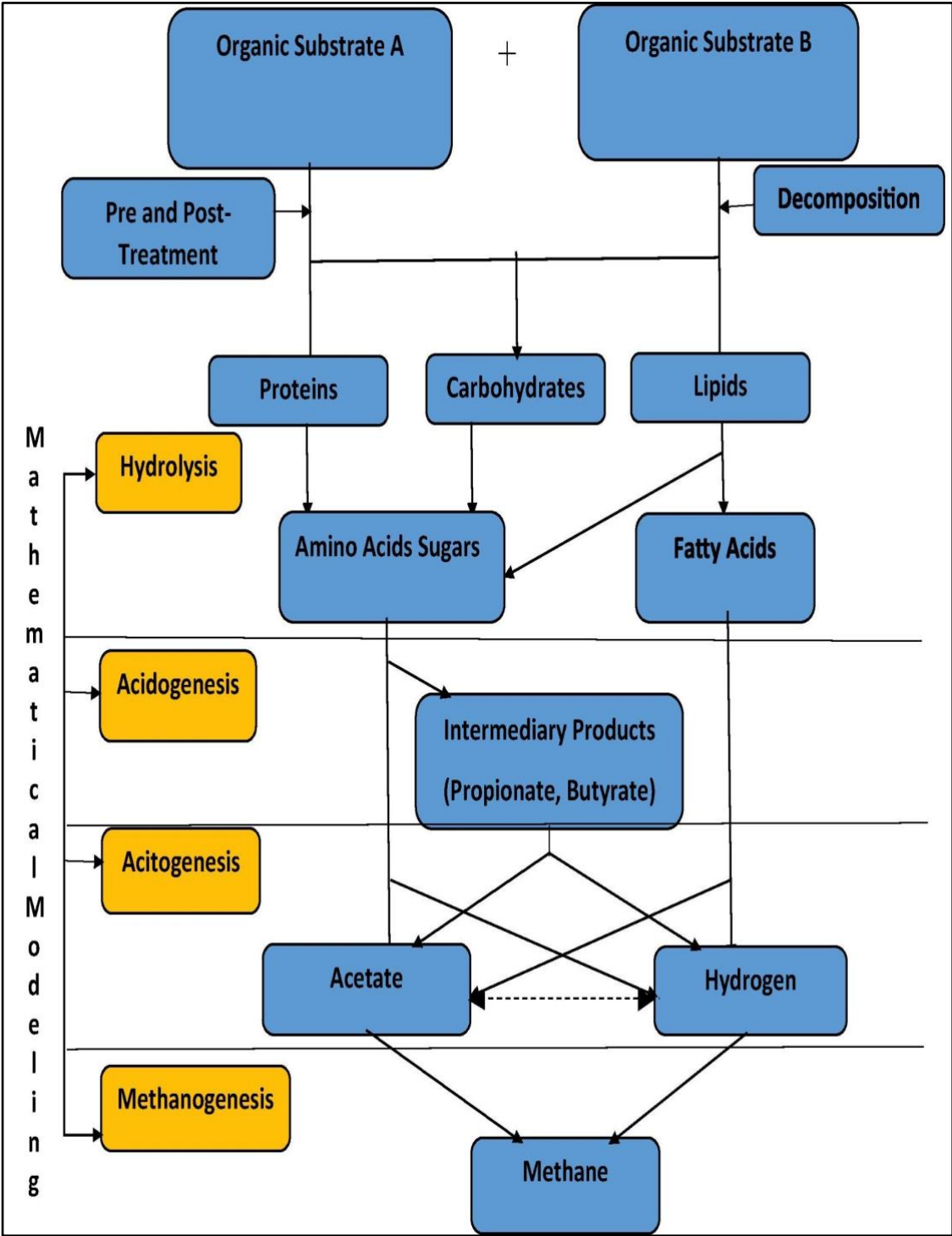
Por lo tanto, esta investigación permitirá revelar las influencias de los factores en el análisis de datos que mejoren la precisión de los resultados mediante una revisión sistemática en datos de los últimos 5 años (2018 al 2022).

## II. MARCO TEÓRICO

Las emisiones de metano han aumentado en más del 150% desde 1750, siendo la agricultura y ganadería la principal fuente. Se pronostican nuevos aumentos a medida que la producción agrícola y animales rumiantes se expandan (Jeffery et al. 2018, p. 251). La digestión anaeróbica se ha empleado en el tratamiento de residuos por su capacidad de capturar el gas metano liberado como producto durante la digestión. Sin embargo, algunos desechos no se pueden digerir fácilmente debido a su bajo nivel de nutrientes ya que es insuficiente para la digestión anaeróbica, por lo que la codigestión es una opción viable (Chow et al. 2020, p. 2).

La codigestión anaeróbica de estiércol animal con otras materias primas también conocida como codigestión se utiliza cada vez más para mejorar el rendimiento de metano y la gestión de residuos orgánicos (Ma et al. 2020, p. 2). La codigestión anaeróbica se considera un método pragmático para resolver las dificultades relacionadas con las propiedades del sustrato y la optimización del sistema en procesos de digestión de dos o más mezclas de sustrato y cosustrato (Siddique y Wahid, 2018, p. 350). En la figura 1 se presenta un diagrama esquemático del proceso de codigestión:

**Figura 1:** Diagrama de flujo de la digestión anaerobia



Fuente: Siddique y Wahid (2018)

Este sistema normalmente comprende hidrólisis-acidogénesis en la primera etapa y acetogénesis-metanogénesis en la segunda etapa, la primera etapa implica la producción de AGV e hidrógeno, mientras que en la segunda etapa los AGV se convierten en metano y dióxido de carbono (Tena et al. 2021, p. 2).

La descomposición de la materia orgánica se puede dividir en 4 etapas (Pan et al. 2019; Ren et al. 2018). La materia orgánica macromolécula se descompone en monómeros que se disuelven fácilmente, incluidos los carbohidratos, proteínas, grasas en azúcar, aminoácidos y ácidos grasos, este proceso se llama Hidrólisis (Ren et al. 2018, p. 2).

**Tabla 1:** Etapas del proceso de la digestión anaerobia

ETAPA	Proceso
Hidrólisis	El paso limitante de la degradación de sustratos orgánicos complejos, resultado de la formación de subproductos tóxicos o ácidos grasos volátiles (AGV).
Acidogénesis	Los monómeros se descomponen aún más en ácidos grasos de cadena corta que incluye el AGV, ácido láctico, ácido pirúvico, ácido acético y ácido fórmico.
Acetogénesis	Los ácidos como el ácido láctico y el ácido pirúvico comienzan a digerirse en ácido acético e hidrógeno
Metanogénesis	El hidrógeno y los ácidos acéticos se transforman en metano mediante arqueas metanogénicas

**Fuente:** Elaboración propia adaptado de Ren et al. 2018, pág. 2

Las bacterias generadas durante estos procesos dependen en gran medida del pH del sistema donde tienen lugar la digestión anaerobia, el pH de cada una de las mezclas se mantiene entre 5 y 8, lo que es suficiente para la supervivencia de las bacterias y la degradación de la materia orgánica. El pH y los AGV son parámetros muy importantes al realizar el proceso de digestión anaerobia, estos parámetros muestran la estabilidad y el rendimiento del proceso de co-digestión anaerobia (Kumaria et al. 2018, p. 547).

De acuerdo con Duan et al. (2019), el proceso de codigestión anaerobia es complejo y se ve afectado por muchos factores incluidos el tipo y la composición del sustrato, la composición microbiana, la temperatura, la tasa de carga orgánica (OLR), el pH y la configuración del reactor, etc. Muchos estudios han informado que la temperatura es uno de los factores más cruciales, factores que influyen en la comunidad microbiana, la cinética del proceso, la estabilidad, las tasas de utilización del sustrato y el rendimiento de metano (p. 646).

Hay muchas ventajas en el proceso de la codigestión anaerobia, la amplia adaptación de la producción de biogás y metano está limitada por la baja estabilidad operativa causada por la calidad/consumo de la alimentación y el alto contenido de nitrógeno amoniacal total (TAN), según Wijesinghe et al. (2021), el TAN es la suma de las concentraciones de nitrógeno amónico ionizado ( $\text{NH}_4^+$  -N) y nitrógeno amónico libre ionizado (FAN), la acumulación de altas concentraciones de TAN dentro de los digestores anaeróbicos inhibe la metanogénesis, la inhibición de la metanogénesis por el amoniaco es causa principalmente por el FAN, en lugar de  $\text{NH}_4$  -N, ya que en condiciones de aumento de FAN, la molécula de FAN se difunde pasivamente en la célula microbiana través de la membrana a celular causando un desequilibrio de pH en el interior de la célula y esto inhibe las células metabólicas.

Varios investigadores estuvieron interesados en investigar la codigestión utilizando diversas mezclas de materiales de desechos industriales, agrícolas y ganaderas (Tasnim et al. 2017). La principal fuente de preocupación del proceso de codigestión anaerobia es mejorar la generación de biogás y metano. No obstante, la digestión anaeróbica puede mejorar la estabilización del proceso, el equilibrio de nutrientes y puede reducir los GEI y costos de procesamiento (Henard et al. 2017). Algunas características clave, que comprende el cosustrato, las inhibiciones provocadas por el sustrato y la tasa orgánica pueden afectar notoriamente el sistema de codigestión anaerobia (Xi et al. 2016).



**Tabla 2:** Composición del biogás

<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>O<sub>2</sub></b>	<b>H<sub>2</sub>S</b>	<b>Referencia</b>
66%	33%	0.5%	0.1%	103mg/L	Achinas y Euverink, 2019.

**Fuente:** Elaboración propia

Los modelos cinéticos suelen utilizar en procesos de digestión anaerobia para comprobar las hipótesis iniciales, evaluar los resultados experimentales y controlar y predecir el rendimiento del proceso optimizando el diseño de la planta (Parralejo et al. 2019, p. 308). Bari et al. (2021) indicó que los modelos cinéticos son un paso necesario para el diseño y dimensionamiento adecuado de los sistemas de DA (p. 272). Se fueron utilizando diferentes modelos junto con la digestión anaeróbica por ejemplo el modelo Gompertz modificado (Vats et al. 2020), el modelo cinético de primer orden (Himanshu et al. 2018). En la literatura se encuentran varios modelos sigmoidales, como los modelos de Gompertz, Richards, Stannard y el modelo logístico, los modelos que se utilizan en el crecimiento bacteriano y sus formas modificadas según (Ware y Power, 2017). Los datos experimentales sobre digestiones anaerobias se utilizan para obtener parámetros cinéticos, que son importantes para analizar el proceso en sí y para optimizar y escalar a fermentadores reales (Pecar y Gorzek, 2020).

**Tabla 3:** Modelos que se utilizan en el crecimiento bacteriano

Modelo cinético	Definición	Ecuación	Referencia
Modelo de Primer Orden	Es el modelo más utilizado cuando la hidrólisis es el paso que limita la velocidad en el proceso de digestión anaeróbica	$G = G_0 \cdot [1 - e(-kt)]$	Karki et al. 2022
Modelo de Gompertz Modificado	Este modelo se utiliza cuando se observa inhibición en el proceso de DA asumiendo que la producción de metano refleja el crecimiento bacteriano	$G = G_0 \cdot e\left\{-e\left[\frac{R_m \cdot e}{G_0}(\lambda - t) + 1\right]\right\}$	Mao et al. 2019
Modelo de Chen y Hashimoto	Este modelo es confiable cuando se usa para las predicciones de digestión anaerobia de materias primas con una cantidad de sólidos totales.	$G = G_0 \cdot \left[1 - \frac{k_{CH}}{(HRT \cdot \mu_m) + k_{CH} - 1}\right]$	Kafle y Chen, 2016.
Transferencia de modelo	Este modelo se deriva del modelo de primer orden donde la constante cinética sustituye entre la tasa máxima del metano y el potencial de metano.	$G = G_0 \cdot \left\{1 - e\left[\frac{-R_m}{G_0}(t - \lambda)\right]\right\}$	Zahan et al. 2018
Modelo de Cono	Este modelo se aplica para evaluar la producción de metano a partir de un sustrato específico en presencia de microorganismos ruminales.	$G = \frac{G_0}{1 + (kt)^{-n}}$	Lima et al. 2018

Gompertz modificado con ecuación de segundo orden	Este modelo se modificó para adaptarse a la dinámica de producción de metano en la codigestión anaerobia que muestran 2 etapas de producción de metano.	$G = G_{01} \left[ \frac{t}{k+t} \right] + G_{02} \cdot e \left\{ -e \left[ \frac{R_m \cdot e}{G_0} (\lambda - t) + 1 \right] \right\}$	Masih y TAO, 2018
Modelo exponencial de dos fases	Este modelo describe el comportamiento y evalúa la conversión del sustrato a biogás para cada fase	$G = G_{01} [1 - e(-k_1 \cdot t)] + G_{02} [1 - e(-k_2 \cdot t)]$	Lima et al. 2018

**Fuente:** Elaboración propia adaptado a Karki et al. 2022

En la tabla se puede apreciar una variedad de modelos cinéticos que se aplican en el proceso de DA para la producción de metano, uno de los modelos cinético más utilizado es el modelo de Gompertz modificado, según Wijesinghe et al. (2021) el modelo modificado de Gompertz se usa comúnmente para la simulación de la acumulación de CH<sub>4</sub> en el proceso de DA, este modelo esta descrito por:

**Figura 2:** Ecuación base de modelo cinético Gompertz

$$G = G_0 \cdot e \left\{ -e \left[ \frac{R_m \cdot e}{G_0} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad \text{ecuación (1)}$$

Donde G: es la producción acumulada de CH<sub>4</sub> (L/kgVSagregado), durante el tiempo de digestión t(días).

G<sub>0</sub>: es el potencial final de producción de CH<sub>4</sub> (L/kgVSagregado).

R<sub>m</sub>: es la tasa máxima producción de CH<sub>4</sub> (L/kgVSagregado), que describe la tasa de crecimiento específica de las bacterias metanogénicas.

(landan): es la fase de latencia (días) y “e” es el número de Euler (2.7183).

La fase de retraso indica el tiempo que tarda el CH<sub>4</sub> en producirse, lo que es una muestra del tiempo que demora la bacteria en adaptarse al ambiente. Todos estos parámetros que se muestran en la tabla 2, se describen como en la ecuación (1).

El análisis cinético es una forma eficaz de determinar los pasos clave en el proceso de digestión anaeróbica para la producción de metano, que ayuda en los estudios de plantas piloto a proporcionar mejores datos para el diseño y la operación de los reactores (Membere y Sallis, 2018, p. 3). Los modelos cinéticos se utilizan en sistemas de digestión anaeróbica para describir y predecir el desempeño de procesos anaeróbicos (Lama et al. 2017, p. 289). Los principales modelos de cinética de co-digestión anaerobia se basan en el crecimiento microbiano y las tasas de consumo de sustrato que dependen de una concentración de sustrato que limita el crecimiento (Tena et al. 2021, p. 2).

De igual forma estos modelos cinéticos mencionados, la cual hace referencia a cuál modelo se ajusta mejor a la producción del metano, se puede mencionar algunas investigaciones como Abudi, Hu y Abood (2022) investigaron la codigestión anaeróbica de hojas de mango (ML) y estiércol de cerdo (PM) a 37 °C con 5 relaciones ML:PM (1:0, 3:1, 1:1, 1:3 y 0:1). Utilizaron 5 modelos cinéticos diferentes (cinético de primer orden, cono, Gompertz modificado, logístico y de transferencia) para encontrar los parámetros cinéticos para la codigestión de ML y PM. Los resultados indicaron que la adición de estiércol de cerdo mejor mucho la producción de metano con las hojas de mango, obteniendo un rendimiento de metano del 86% y 465 mlCH<sub>4</sub>/gVS en una proporción de 1:3. El modelo cinético de cono se adecuó mejor a los ajustes de los datos experimentales.

Guo et al. (2020) que en su estudio investigo el efecto de la co-digestión anaerobia de estiércol de cerdo con lignito a 37 °C, donde utilizó el modelo cinético Gompertz que se ajustó bien en la producción de metano ( $R^2 \geq 0,9863$ ), este modelo de ecuación estructural le indico que el lignito representa principalmente el efecto indirecto en la producción acumulada del metano.

Pecar et al. (2020) en su estudio utilizo el modelo cinético de primer orden y Gompertz modificado para simular la fermentación anaeróbica de una mezcla de gallinaza con aserrín con paja de trigo pretratada donde el R<sup>2</sup> más bajo del modelo

cinético de primer orden fue 0,9780 y para el modelo Gompertz 0,9713, esta diferencia se explica por la aceleración instantánea de la concentración de metano al comienzo de la fermentación.

Gómez et al. (2022) en su trabajo realizó un estudio experimental sobre la producción de metano a partir de pulpa de remolacha azucarera secada al sol y estiércol de vaca, la codigestión anaerobia termófila (55°C) lo realizó en reactores semicontinuos probando 10 tiempos de TRH (30-3) días y tasas de carga orgánica (2-24 gVS/L reactor), sus resultados mostraron que el mejor rendimiento se logró con un TRH de tan solo 5 días (OLR 12,47gVS/L) con un rendimiento de metano de 315 mL/gVS.

Ali et al. (2021) en su estudio tuvo el objetivo de realizar un análisis comparativo del rendimiento de 5 modelos cinéticos (Gompertz, Logístico, Richards y redes neuronales de primer orden) para predecir la tasa de producción de metano de estiércol de ganado. Sus variables de entrada fueron el tiempo de fermentación, la temperatura de digestión, la temperatura del biogás, la temperatura del ambiente, el pH y la tasa específica de producción de biogás. Los contenidos de sólidos volátiles del estiércol de vaca y oveja fueron (77,6% y 64.7%), mientras que el potencial de producción de metano de estiércol de vaca fue 673.44 mLCH<sub>4</sub>/gVS fue mayor que de la oveja 320.32 mLCH<sub>4</sub>/gVS. Los coeficientes de determinación (R<sub>2</sub>) de todos los modelos coincidieron satisfactoriamente con sus datos experimentales.

Arifan, Abdullah y Sumardiono investigaron la fermentación de biogás a partir de estiércol animal y desechos orgánicos con una comparación porcentual de materia prima. Utilizaron estiércol de vaca y estiércol de pollo, y en los desechos orgánicos utilizaron desechos de tofu y col, utilizaron un proceso por lotes que operaron a una temperatura de 55 °C durante 90 días, sus resultados lo predijeron con el modelo de Gompertz modificado y modelo cinético de primer orden. Como resultado tuvieron que el modelo de Gompertz predijo 3273,20 ml/g de sólido total y el modelo cinético de primer orden predijo 3517.95 ml/g.

Ornelas, Astals y Pasos (2021) en su estudio de codigestión anaerobia pudieron observar que la monodigestión de los desechos de alimentos muestra un bajo

rendimiento de metano (35-68 mLCH<sub>4</sub>/gVS), esto es debido a la acumulación de los ácidos grasos volátiles y el bajo pH., optaron por amortiguar este resultado con la codigestión con microalgas en diferentes proporciones, donde tuvieron el mayor rendimiento de metano en una proporción 75:25 de residuos de alimentos con microalgas (514 mLCH<sub>4</sub>/gVS).

VENKATESHKUMAR et al. (2020) realizaron el estudio de la codigestión anaerobia por lotes en 5 reactores de alimentación a una temperatura mesófila a 35 °C durante un periodo de 45 días, sus reactores lo llenaron con diferentes combinaciones de sustratos de estiércol de vaca y cascara de semilla de algodón. La cinética de producción de biogás de estos reactores utilizó los modelos de Gompertz, modelo de cono, modelo Fitzhugh y la ecuación cinética logística. En sus resultados la producción de metano acumulada fue de 193 ml/gVS y 33 ml/gVS con una proporción de 1:1 de estiércol y semillas, basados en el coeficiente de determinación (R<sub>2</sub>) y el error cuadrático (RMSE), todos los modelos cinéticos se adecuaron correctamente al rendimiento de biogás experimental.

Meneses Quelal et al. (2021), tuvo como objetivo evaluar la codigestión anaeróbica de estiércol de cuy (GP) con residuos orgánicos andinos: amarantos (AM), quinua (QU) y trigo (TR) en digestores discontinuos en condiciones mesófilas durante 40 días. El mayor rendimiento de producción de metano que obtuvo en una proporción GP:AM (25:75) y GP:QU (25:75) con 341.86 mLCH<sub>4</sub>/gVS y 341.05 mLCH<sub>4</sub>/gVS respectivamente. La cinética de producción de metano utilizó 5 modelos: Gompertz modificado, ecuación logística, transferencia, cono y Richards. En sus resultados indicaron que el modelo de cono se ajustó mejor a los valores experimentales con los datos R<sub>2</sub>: 0.999 y RMSE de 1.16 mLCH<sub>4</sub>/gVS.

Meneses et al. (2021) evaluaron experimentalmente la codigestión anaerobia de residuos de matadero con residuos de paja de la agricultura: residuos de amaranto, residuos de quinua y residuos de trigo. Su estudio se realizó a escala de laboratorio en biodigestores de 311 ml en condiciones mesófilas 37°C, utilizaron lodos depuradoras como inóculo con dos relaciones de entre sustrato e inóculo 1:1 y 1:2, en su diseño completaron utilizando tres relaciones de entre sustrato y cosustrato (residuos), 25:75, 50:50 y 75:25. Los resultados en rendimientos de metano fue de

407 mLCH<sub>4</sub>/gVS con el contenido de metano en el biogás a 77% para la mezcla de 25:75, esto da como conclusión que existe una sinergia en los residuos de matadero y la quinua a medida que aumenta el % de este sustrato.

Nohari, Mahar y Sahito (2019) investigaron la optimización de la producción de metano a partir de paja de arroz y estiércol de búfalo, donde la paja de arroz se pretrató con peróxido de hidrogeno e hidrogeno de calcio antes de uso en reactores por lotes de digestión anaerobia. La relación que tomaron de estiércol y paja de arroz fue de 70:30, el experimento lo realizaron en condiciones mesófilas a 37 °C en botellas de cultivos de suero, la producción de metano que observaron fue 331,6 y 346,7 mLCH<sub>4</sub>/gVS y los modelos cinéticos que utilizaron fue Gompertz y Cono, donde el modelo de Gompertz se ajustó mejor a los resultados.

Shen et al. (2019) en su investigación utilizó como desperdicio de alimento la cascara de durian con estiércol de pollo, estiércol de ganado lechero y estiércol de cerdo en diferentes proporciones. El mayor rendimiento acumulativo de metano que tuvieron fue de 224.8 mL/gVS en una proporción de 1:1 de estiércol de cerdo y cascara de durian. La cinética de codigestión fue descrita por los modelos Gompertz modificado y modelo de Cono.

### **III. METODOLOGÍA**

#### **3.1 Tipo y diseño de investigación**

La investigación fue de tipo aplicada, según Rivera (2019) indicó que la investigación de tipo aplicada tiene por objetivo determinar la información utilizable para poder crear nuevos instrumentos como tecnologías, métodos de la cual se transforma y adhieren a la sociedad que vivimos (p. 7). El trabajo de investigación es aplicado ya que se basa en categorías según los principios que buscamos resolver e informar mediante artículos científicos y de revisión sobre los parámetros cinéticos de producción de metano y los diferentes modelos de aplicación que son importantes para analizar el proceso.

La investigación es de enfoque cualitativo, según Guerrero el enfoque cualitativo se concentra en profundizar y comprender todo fenómeno analizado desde los puntos de vista de los colaboradores dentro de su ambiente y en relación de sus aspectos. Generalmente son escogidos para comprender y buscar la perspectiva del individuo o grupos de la cual se desea investigar [...] (2018, p. 3).

El diseño de investigación utilizado es narrativo de tópicos, ya que consta de identificar los tipos de modelos cinéticos, los sustratos utilizados y los parámetros de control evaluados en la codigestión anaerobia. Según Cardona (2017) indicó que el reto principal del diseño de investigación narrativo de tópicos es apostar por una política y ética del indagador, teniendo como responsabilidad intelecto y posibilitar la opción de nuevas teorías que puedan surgir de la investigación ya sea que no coinciden con las teorías previas [...] (p. 177). En tal forma para nuestra recolección de información y datos se revisaron artículos científicos indexados en materia a modelos cinéticos de codigestión anaerobia de estiércol animal y residuos orgánicos, estas fuentes nos permitirán sistematizar las ideas y comparar los aportes de las diversas investigaciones relacionadas a nuestra investigación para luego analizar el resultado.

#### **3.2 Categorías, Subcategorías y matriz de categorización**

El objetivo es describir los modelos cinéticos, control para la producción óptima de metano, en la tabla 4 se mostrarán las categorías y subcategorías del estudio.



**Tabla 4:** Categorías, Subcategorías y matriz de categorización

OBJETIVO GENERAL	PROBLEMA GENERAL	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	PROBLEMAS ESPECÍFICOS	CATEGORÍA	SUBCATEGORÍA	FUENTE
		Identificar los tipos de modelos cinéticos que se aplican en la codigestión anaerobia para la producción optima de metano	¿Qué tipo de modelos cinéticos se aplican en la codigestión anaerobia para la producción optima de metano?	Modelos cinéticos	Modelo Gompertz y modelo cinético Primer orden Richards, Logístico Modelo de Cono	Pecar y Gorzek (2020) Guo et al. (2020) Alfa et al. (2020) Song et al (2019) Jiang et al. (2018) Ware et al. (2018)
Describir los modelos cinéticos aplicados en la co-digestión anaerobia usando estiércol y residuos orgánicos para la producción optima de metano	¿Cuáles son los modelos cinéticos aplicados en la co-digestión anaerobia usando estiércol y residuos orgánicos para la producción optima de metano?	Identificar los tipos de sustratos que son utilizados en la co-digestión anaerobia para la producción optima de metano.	¿Cuáles son los tipos de sustratos que son utilizados en la co-digestión anaerobia para la producción optima de metano?	Tipos de sustratos	Estiércol de cerdo, estiércol de vaca, estiércol de pollo, estiércol de cuy y estiércol oveja Residuos de cocina, residuos alimentarios, lignito, residuos de frutas.	CHOW et al. (2021) Pecar y Gorzek (2020) Guo et al. (2020) Jiang et al. (2018) Alfa et al. (2020) Meneses et al. (2022) Rubio et al. (2022) Zhao et al. (2021) Xing et al. (2020) Shen et al. (2019)
		Identificar los parámetros de control en el proceso de la codigestión anaerobia para la producción optima de metano.	¿Cuáles son los parámetros de control en el proceso de la codigestión anaerobia para la producción optima de metano?	Parámetros de control	ST, SV, %VS/TS, pH, C, N, C/N y TAN/FAN	BI et al. (2020) Elalami et al. (2020) Kainthola et al (2020). Kumari et al. (2018) Wang et al. (2018)

**Fuente:** Elaboración propia

### **3.3 Escenario de estudio**

La investigación al ser una revisión sistemática, donde se recolectó el análisis de datos de los artículos científicos indexados, no cuenta con un escenario que indique la zona de estudio, por ello se consideró la biblioteca virtual de la Universidad César Vallejo y las páginas de revistas indexadas para el escenario de estudio.

### **3.4 Participantes**

En esta investigación se realizó la búsqueda de los documentos de investigaciones previas que son de nuestro interés, por ello se recolectó y analizó cada información obtenida en los sitios con base de datos de artículos científicos indexadas en donde resaltan ProQuest, EBSCO, ScienceDirect, Scopus y Springer Link.

### **3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Esta investigación tiene la técnica aplicada análisis cualitativo ya que conlleva a la recolección de datos e información, la cual tiene los documentos como artículos científicos indexados de las cuales se obtuvo la información útil para nuestra investigación y su posterior análisis y síntesis mediante tablas del programa Microsoft Excel, Gómez (2016) sostuvo que el análisis cualitativo proceso de la cual se organiza y manipula la información recogida por los investigadores para establecer relaciones, interpretar, extraer significados y conclusiones (p. 115).

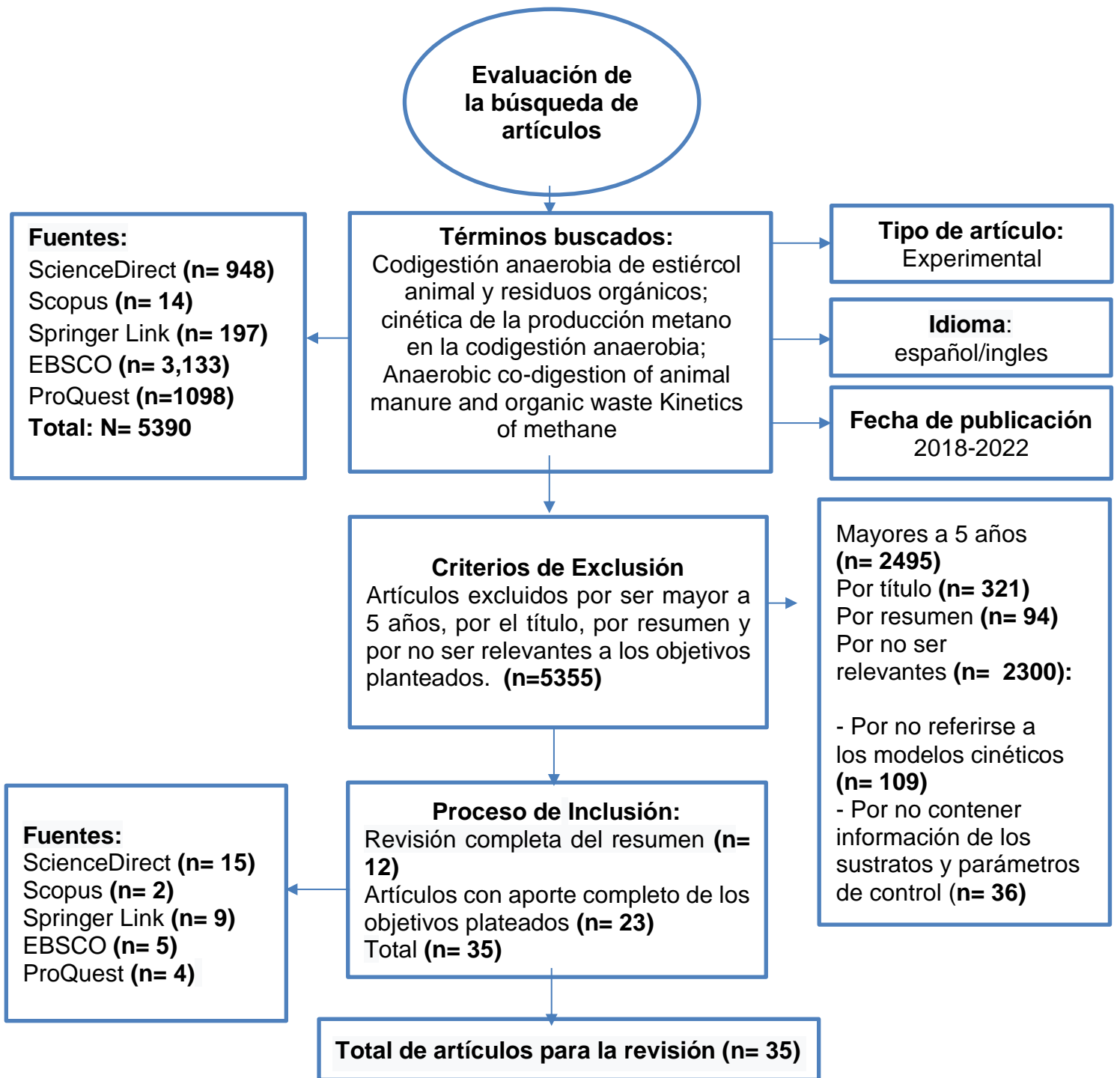
### **3.6 Procedimientos**

La presente investigación consta de 3 etapas: La primera etapa son todos los artículos científicos indexados que presentan las características de nuestro interés. No obstante, los datos y muestras recolectadas serán aquellos artículos que además de poseer las palabras claves específicas como \*kinetics\*, \*anaerobic codigestión\*, \*methane production\* \*manure animal\*, \*organic waste\*, se encontrarán en ProQuest, EBSCO, ScienceDirect, Scopus y Springer Link.

La segunda etapa consta de la búsqueda de los artículos científicos y de revisión en la base de datos electrónica fue adecuada para obtener datos de acceso abierto con un intervalo de tiempo del 2018 - 2022.

La tercera etapa consiste en estructurar correctamente los artículos científicos seleccionados con la información relevante y poder extraer los datos en nuestra investigación con los objetivos planteados.

**Grafico 1:**Procedimiento de la búsqueda de artículos científicos



Fuente: Elaboración propia

### 3.7 Rigor científico

El rigor científico con la metodología de la investigación están relacionados con la calidad de investigación que todo investigador tiene que alcanzar, según Henry sostuvo que la investigación cualitativa se centra en el rigor científico para garantizar la confiabilidad de la investigación, los investigadores tienen que plantearse esta cuestión de criterios para evaluar la confiabilidad de una investigación cualitativa [...] en estos criterios, para fortalecer la credibilidad de la investigación, los investigadores deben enfocarse en el compromiso prolongado, la observación persistente, la triangulación, el interrogatorio entre pares, el análisis de casos negativos y la verificación de miembros (2015, p. 2).

De esta forma Tracy (2010) menciona que la credibilidad de la investigación cualitativa se refiere a la confiabilidad, verosimilitud y plausibilidad de los hallazgos de la investigación (p. 842). Por lo cual este trabajo de investigación cumple con el criterio de credibilidad dado que los resultados recopilados de artículos indexados se obtuvieron de base datos confiables (Sciencedirect, Scopus, Springer Link, ProQuest y EBSCO).

Además, Johnson, Adkins y Chauvin (2020) mencionaron que la transferibilidad se basa en que el investigador proporciona información contextual detallada de modo que los lectores puedan determinar si los resultados son aplicables a su situación o a otras (p. 7). Bajo este concepto, al investigar los tipos de modelos cinéticos de estiércol y residuos orgánicos, se busca analizar el problema planteado de los diferentes artículos encontrados, con el objetivo de recolectar la información para aplicarlo a nuestra investigación.

Por otro lado, Anney (2014) indica que la confirmabilidad se refiere al grado en que los resultados de la investigación pueden ser confirmados o corroborados por otros investigadores (p. 15). En base a esto, nuestra presente investigación ha respetado las investigaciones de todos los autores ya que se encuentran debidamente citados.

Finalmente, Johnson, Adkins y Chauvin, (2020) indicaron que la confiabilidad es donde el investigador describe el proceso de estudio con suficiente detalle [...] para garantizar la confiabilidad, el método de investigación debe informarse en detalle

de manera que el lector pueda determinar las prácticas de investigación adecuadas y que los futuros investigadores puedan repetir el estudio (p. 16). La presente investigación en base al criterio de confiabilidad busca que los lectores e investigadores puedan adquirir la información proveniente de este estudio sobre los tipos de modelos cinéticos con estiércol y sustratos orgánicos, para fines de seguir continuando con la investigación o complemento de su interés.

### **3.8 Método de análisis de datos**

El método de análisis de información se realizó a través de una matriz de categorización apriorística que consta de 3 categorías:

La primera categoría se enfoca en identificar los tipos de tipo de modelos cinéticos que se aplican en la codigestión anaerobia para la producción óptima de metano las cuales fueron identificados algunos modelos cinéticos que son: Modelo Gompertz modificado, Modelo cinético de primer orden, Modelo de cono y Modelo Logístico.

La segunda categoría se enfocó en analizar los tipos de sustratos que son utilizados para la producción de metano por codigestión anaerobia de estiércol animal con otros residuos orgánicos, las cuales son: Estiércol de Pollo con *Miscanthus*, Estiércol de cerdo y lignito, Estiércol de cerdo y residuos alimentarios, estiércol de caballo, ternera, vaca y oveja.

La tercera categoría se enfocó en analizar los parámetros de control de los sustratos para la producción de metano por codigestión anaerobia de estiércol animal con residuos orgánicos, las cuales son: Sólido total, sólido volátil, pH, %TS/VS, C, N, C/N y nitrógeno amoniacal total (TAN).

### **3.9 Aspectos éticos**

En este trabajo de investigación se está respetando la información recolectada con sus fuentes citadas apropiadamente con la norma ISO 690 y el Código de Ética en la investigación de la Universidad Cesar Vallejo, Arias Chávez afirmó la norma ISO 690 está dentro de la categoría de la documentación e información para brindar las pautas de las referencias bibliográficas y citar la información [...] el objetivo de la norma ISO es la elaboración de las referencias que tiene como importancia un punto clave para recuperar la información. Por otra parte, el estudio de las citas es una táctica que busca confortar la integridad y originalidad en la redacción académica e investigativa (2019, p. 13).

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

Los resultados alcanzados se obtuvieron de los objetivos específicos planteados en la investigación, es por ello que se describió en una tabla de datos recolectados las siguientes categorías: tipos de modelos cinéticos, tipos de sustratos y los parámetros de control utilizados en la producción de metano por codigestión anaerobia

## OBJETIVO 1: Tipos de modelos cinéticos

**Tabla 5:** Tipos de modelos cinéticos aplicados en la codigestión

INVESTIGACIÓN	MODELO CINETICO	SUSTRATO	METODOLOGIA	RESULTADOS	REFERENCIA
Codigestión anaerobia del contenido ruminal del ganado y residuos de alimentos para la producción de biogás: Establecimiento de relaciones de co-digestión y estudios cinéticos	Primer orden Fitzhugh Gompertz modificado Cono	Ruminal de ganado y desechos de alimentos	<b>Material:</b> Digestores de 25L <b>pH:</b> 6.8 <b>Tiempo de operación:</b> 42 días <b>T°:</b> 37 °C	<b>Modelo de Cono:</b> <b>Bo:</b> 395.82 <b>Rm:</b> - <b>λ:</b> - <b>R²:</b> 0.992 <b>RMSE:</b> 7.935	Ihoeghian et al. 2022
La adición de lignito durante la digestión anaeróbica del estiércol porcino rico en amonio mejora la producción de biogás.	Gompertz modificado Logístico	Estiércol porcino y Lignito	<b>Material:</b> Botellas de 500ml <b>pH:</b> 7.0 <b>Tiempo de operación:</b> 63 días <b>T°:</b> 37 °C <b>Velocidad de agitación:</b> 100 rpm	<b>Modelo Gompertz modificado</b> <b>Bo:</b> 238.60 <b>Rm:</b> 13,11 <b>λ:</b> 2,49 <b>R²:</b> 0.999	Wijesinghe et al. 2021
Codigestión de paja de trigo y estiércol animal pretratado con hidróxido de calcio para la producción de biometano: estudio cinético	Gompertz modificado	Estiércol de vaca y paja de trigo	<b>Material:</b> Botellas de 1L <b>pH:</b> 7.0 <b>Tiempo de operación:</b> - <b>T°:</b> (25-30) °C <b>Velocidad de agitación:</b> -	<b>Modelo Gompertz:</b> <b>Bo:</b> 565.00 <b>Rm:</b> 4.3 <b>λ:</b> 0.22 <b>R²:</b> 0.99	Rani, Pathak y Bansal, 2021.



<p>Cinética de la producción de metano durante la fermentación anaerobia de gallinaza con aserrín y paja de trigo pretratada con hongos</p>	<p>Primer orden Gompertz modificado</p>	<p>Gallinaza con aserrín y paja de trigo</p>	<p><b>Material:</b> Botellas de 250 ml  <b>pH:</b> -  <b>Tiempo de operación:</b> 21 días  <b>T°:</b> 35, 40 y 45 °C</p>	<p>• <b>Modelo Gompertz modificado</b>  <b>Bo:</b> 56.28%  <b>Rm:</b> -  <b>λ:</b> -  <b>R²:</b> 0.9713</p> <p>• <b>Primer orden</b>  <b>Bo:</b> 58.95%  <b>Rm:</b> -  <b>R²:</b> 0.9780</p>	<p>Pecar, Pohleven y Gorsek, 2020.</p>
<p>La codigestión anaeróbica de alto contenido de sólidos de estiércol de cerdo con lignito promueve la producción de metano</p>	<p>Gompertz modificado</p>	<p>Estiércol de cerdo y lignito</p>	<p><b>Material:</b> Botellas de 150 ml  <b>pH:</b> 6.8-8.0  <b>T°:</b> 37±1 °C  <b>Tiempo de operación:</b> 30 días</p>	<p><b>Modelo Gompertz</b>  <b>Bo:</b> 179.89  <b>Rm:</b> 14.88  <b>λ:</b> 3,36  <b>R²:</b> 0.9912</p>	<p>Guo et al. 2020</p>
<p>Producción de metano por digestión de estiércol de aves de corral y biomasa lignocelulósica: evaluación cinética y energética</p>	<p>1. Gompertz modificado  2. Modelo de etapas múltiples (Groot's)</p>	<p>Estiércol de aves, materiales lignocelulósicos e inoculo</p>	<p><b>Material:</b> Botellas de vidrio de 120 ml  <b>pH:</b> 7.0  <b>T°:</b> 35°C (Mesófila)  <b>Velocidad de agitación:</b> 180 rpm  <b>Tiempo de operación:</b> 60 días</p>	<p>• <b>Modelo de Multietapas</b>  <b>A:</b> 238.64  <b>B:</b> -  <b>C:</b> 6.8  <b>R²:</b> 0.999  <b>RMSE:</b> 3.09</p> <p>• <b>Modelo Gompertz</b>  <b>Bo:</b> 276.18  <b>Rm:</b> 27.41  <b>λ:</b> 6.69  <b>R²:</b> 0.985  <b>RMSE:</b> 13.32</p>	<p>De Oliveira Paranhos et al. 2020</p>

Producción elevada del biogás a partir de la codigestión anaeróbica de desechos de granja: Información sobre el rendimiento y la cinética del proceso	Modelo de primer orden y modelo de cono	Estiércol de vaca, desperdicios de alimentos y residuos de jardín	<b>Material:</b> Botellas de vidrio de 500ml <b>T°:</b> 36°C (Mesófila) <b>Velocidad de agitación:</b> 150 rpm <b>Tiempo de operación:</b> 60 día	<b>Modelo Primer Orden</b> <b>k:</b> 0.1162 <b>R<sup>2</sup>:</b> 0.9876 <b>Modelo Cono</b> <b>k:</b> 0.1613 <b>R<sup>2</sup>:</b> 0.9948	Achinas y Euverink, 2019.
Producción de biogás a pequeña escala con excrementos animales y residuos orgánicos	Primer orden Gompertz Modificado Cono	Estiércol de cerdo Estiércol de Ternera Estiércol de cordero Pulpa de tomate, uva y oliva.	<b>Material:</b> Reactores cilíndricos 6L <b>T°:</b> 38 ° C <b>Tiempo de operación:</b> 45 días	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Modelo Primer Orden</b> <b>k:</b> 0.06 <b>R<sup>2</sup>:</b> 0.996</li> <li>• <b>Modelo Gompertz</b> <b>λ:</b> 11.02 <b>R<sup>2</sup>:</b> 0.99</li> <li>• <b>Modelo de Cono</b> <b>K:</b> 0.05 <b>n:</b> 3.07 <b>R<sup>2</sup>:</b> 0.95</li> </ul>	Parralejo et al. 2019
Producción de biogás a partir de la codigestión anaeróbica de cáscara de durian con estiércol de pollo, lechería y cerdo	Gompertz modificado Cono	Cascara de durian ( <b>DS</b> ), estiércol de pollo ( <b>CM</b> ), estiércol de lechería ( <b>MS</b> ) y estiércol de cerdo ( <b>PM</b> )	<b>Material:</b> Botellas de vidrio de 500 ml - con sustrato 20 gVS/L <b>T°:</b> 37 ° C <b>Tiempo de operación:</b> 20 días	<b>Modelo Gompertz DS:PM (1:1)</b> <b>Bo:</b> 216.1 <b>Rm:</b> 22.7 <b>λ:</b> 0.7 <b>R<sup>2</sup>:</b> 0.991 <b>Modelo de Cono</b> <b>Bo:</b> 229.6 <b>k:</b> 0.18 <b>R<sup>2</sup>:</b> 0.999	Shen et al. 2019
Codigestión anaeróbica para mejorar la producción de metano a partir de microalgas mixtas ( <i>Scenedesmus</i> sp., <i>Chlorella</i> sp.) y desperdicio de alimentos.	Cinética de primer orden Gompertz modificado Cono	Microalgas (MA), Desechos alimentarios (FW) e inóculo	<b>Material:</b> Frascos de vidrio de 120 ml <b>pH:</b> 7.0 <b>T°:</b> 35±1° <b>Tiempo de operación:</b> 40 días	<b>Modelo de Cono</b> <b>Bo:</b> 664.5 <b>Rm:</b> - <b>λ:</b> - <b>R<sup>2</sup>:</b> 0.993	Zhen et al. 2018

La información que fue recolectada en la presente investigación, se obtuvieron los siguientes resultados sobre los tipos de modelos cinéticos utilizados para describir los mecanismos de codigestión anaerobia de estiércol animal con residuos orgánicos.

Wijesinghe et al. (2021) estudió la adición de lignito en diferentes cantidades de (0, 10, 20, 40, 70, 100) g/L a escala de laboratorio, en botellas de 500 ml en un tiempo de operación de 63 días a condiciones mesófilas (37 °C), donde obtuvo como resultado que la producción de metano en tasas de 70 y 100 g/L aumenta significativamente la producción de metano en un 31%, utilizo 2 modelos cinéticos de Gompertz modificado y modelo logístico para evaluar y comparar la cinética de producción de CH<sub>4</sub> en cada digestor con diferentes velocidades de lignito, obteniendo como datos Bo: 238,60; R<sub>m</sub>: 13,11; λ: 2,49; R<sup>2</sup>: 0.999 para el caso del modelo de Gompertz que se adecuó correctamente para simular la producción de CH<sub>4</sub>. Por otro lado, Guo et al. (2020) en su investigación utilizó el mismo sustrato lignito en diferentes % de 2, 4, 8, 16, 32, 40, 50 y 64, con estiércol porcino en un tiempo de operación de 30 días donde obtuvo el mayor rendimiento de metano de 175,90 ml/gVS en el tratamiento del 2% de lignito con estiércol porcino, utilizó el modelo cinético Gompertz y obtuvo de como datos Bo: 179.89, R<sub>m</sub>: 14.88; λ: 3,36; R<sup>2</sup>: 0.9912.

De tal forma que al comparar estos resultados se puede determinar que utilizar el lignito en la codigestión anaerobia tiene un compromiso adecuado en términos de sostenibilidad ya que tiene una mejor capacidad de adsorción, y a la vez con un pH bajo disminuye el amoniacolibre y ayuda a reducir la inhibición del amonio del estiércol porcino durante la codigestión. Respecto al modelo cinético ambos utilizaron el mismo modelo cinético ya que se adecua mejor para simular la producción de CH<sub>4</sub>, donde la fase de retraso (λ) es menor en ambos estudios ya que si la fase de retraso es más corto conduce a altas tasas de producción de metano y el proceso de codigestión es más corta, si la fase de retraso es mayor entonces el proceso de inhibición es irreversible y complica la codigestión anaerobia, es por ello que el potencial de producción de metano, la tasa máxima de producción de metano y el tiempo de retraso son similares en ambos estudios,

se puede afirmar que es importante analizar estos parámetros cinéticos para determinar la producción óptima de metano.

Ihoeghian et al. (2022) estudió la codigestión por lotes del contenido ruminal y los desechos de alimentos para la producción de biogás en digestores de 25 L con un tiempo de operación de 42 días en condiciones mesófilas (37 °C), utilizó 4 modelos cinéticos: Primer orden, Fitzhugh, Gompertz modificado y Cono. Entre todos los modelos que aplicó el modelo cinético de Cono mostró el mejor desempeño de los rendimientos de biogás experimental y se corrobora por el hecho de que el modelo de cono tuvo el valor de  $R^2$ : 0.992 más alto y los valores de error más bajos (RMSE: 7.935) entre los modelos considerados. De igual forma Achinas y Euverink (2019), utilizaron 2 modelos cinéticos para predecir la producción de biogás con estiércol de vaca, desechos alimentario y residuos de jardín, de los cuales utilizaron el modelo de primer orden ( $R^2$ : 0.9876) y modelo de cono ( $R^2$ : 0.9948). De tal manera que ambos estudios tuvieron como modelo cinético al de Cono debido a que muestra el mejor desempeño entre las tendencias de los rendimientos de biogás experimental y las predicciones del estudio, debido que la situación deseable es tener un modelo con un valor  $R^2$  ajustado lo más cercano posible a la unidad, mientras que los términos de error (RMSE) deben ser lo más pequeños posible, es por ello que el modelo de cono se adecua correctamente a ambos estudios.

Shen et al. (2019) investigó la codigestión anaerobia de cascara de durian con estiércol de pollo, estiércol de ganado y estiércol de cerdo en diferentes proporciones, el mayor rendimiento de metano que obtuvieron fue de 224,8 mL/gVS con cascara durian y estiércol de cerdo en una proporción de 1:1 con una relación de sustrato/inoculo 0.5, la cinética de la codigestión anaerobia fue descrita por los modelos cinéticos modificados de Gompertz y Cono Modelo Gompertz  $R_m$ : 22.7  $\lambda$ : 0.7  $R^2$ : 0.991 - Modelo de Cono  $B_0$ : 229.6  $k$ : 0.18 y  $R^2$ : 0.999, De Oliveira Paranhos et al. 2020 realizó la codigestión de biomasa lignocelulósica (paja de arroz, mazorca de maíz, cascara de maní, aserrín, cascara de café y bagazo de caña de azúcar) con estiércol de aves con una relación de sustrato/inoculo 0.5, la cinética de la codigestión anaerobia que utilizaron fueron el modelo de multietapas de Groot ( $A$ : 238.64  $B$ : -  $C$ : 6.8  $R^2$ : 0.999 RMSE: 3.09) y el modelo de Gompertz modificado ( $B_0$ : 276.18  $R_m$ : 27.41  $\lambda$ : 6.69  $R^2$ : 0.985 RMSE: 13.32) en estiércol de aves con mazorca

de maíz que tuvo la mayor producción de metano. Pecar, Pohleven y Gorsek (2020), también implementó en su estudio como estiércol gallinaza con aserrín y hongos pretratadas, utilizando 2 modelos cinéticos para describir los datos experimentales de la producción de metano, utilizó el modelo de primer orden (Bo: 58.95% Rm: -, R<sup>2</sup>: 0.9780) y Gompertz modificado (Bo: 56.28%, Rm: - λ: - R<sup>2</sup>: 0.9713).

De tal manera que al comparar ambos estudios, se pudo determinar que usaron el modelo cinético de Gompertz modificado, tal que en el estudio de Shen et al. (2020) este modelo se adecuó correctamente debido a su factor del coeficiente de correlación R<sup>2</sup>: 0.991, en cambio en el estudio de Oliveira Paranhos et al. (2020), el modelo cinético de Gompertz marco un coeficiente de correlación R<sup>2</sup>: 0.985 y el modelo de Multietapas de Groot marco un coeficiente de correlación R<sup>2</sup>: 0.999, y este modelo fue el que mejor describió la producción de metano en base a al coeficiente de correlación, ya que la situación deseable es tener un modelo con un valor R<sup>2</sup> ajustado lo más cercano posible a la unidad. En el estudio de Pecar, Pohleven y Gorsek (2020) tuvieron los valores de R<sup>2</sup>: más bajo, la diferencia a comparación con los otros estudios puede explicarse por la aceleración instantánea de la concentración de metano al comienzo de la fermentación

## OBJETIVO 2: Tipos de sustrato en la producción de metano

**Tabla 6:** Tipos de sustratos que se utilizan para la producción metano

INVESTIGACIÓN	SUSTRATO	PROPORCIÓN	PRODUCCIÓN MAX. METANO/BIOGAS	REFERENCIA
Codigestión anaerobia del contenido ruminal del ganado y residuos de alimentos para la producción de biogás: Establecimiento de relaciones de co-digestión y estudios cinéticos	Contenido ruminal (CRC) y desechos de alimentos (FW)	CRC:FW(50:50)	320 ml/gVS	Ihoeghian et al. 2022
Evaluación de la producción de metano a partir de la codigestión anaeróbica de estiércol de cuy con residuos lignocelulósicos andinos.	Amaranto (AM), quinua (QU), Trigo (TR) y estiércol de cuy (GP)	GP:AM (25:75) GP:QU (25:75)	341,86ml/gVS 341,05 ml/gVS	Meneses et al. 2022
Optimización de la codigestión anaeróbica de residuos de fruta y verduras con materias primas de estiércol animal	Residuos de frutas y verduras (FVW), estiércol de vaca (CD) y estiércol de aves (PM)	FVM:CM:PM (0.54:0.16:0.3)	899 ml/gVS	Mlaik et al. 2022
Codigestión de orujo de almazara bifásico y estiércol vacuno: Influencia del contenido de sólidos en el rendimiento del proceso	Residuos de almazara bifásica (POMW) y estiércol de ganado (CM)	POMW:CM (75:25)	82,51 L/kgVS	Rubio et al. 2022
Potencial bioquímico del metano (BMP) de residuos de camélidos y cultivos agrícolas de la región andina	Estiércol de camélidos (CA) y residuos agrícolas (FW)	CA:FW (1:2)	377,02 ml/gVS	Meneses-Quelal et al. 2021

La adición de lignito durante la digestión anaeróbica del estiércol porcino rico en amonio mejora la producción de biogás.	Estiércol porcino (PM) y Lignito (L)	PM:L (0,10, 20, 40, 70, 100)g/L	Adición de Lignito al 70 y 100 g/L aumenta en un 31% la producción de metano.	Wijesinghe et al. 2021
Codigestión anaeróbica de estiércol de pollo y residuos de cartón: Centrándose en la producción de metano.	Estiércol de pollo (CM), cartón (CC)	CM:CC (35:65)	319,62 ml/gVS	Zhao et al. 2021
Producción de biogás a partir de codigestión anaeróbica utilizando desechos de cocina y estiércol de aves como sustrato	Estiércol de aves (PM) y desechos de cocina (KW)	PM:KW (1:3)	396 ml/gVS	Rahman et al. 2021
Evaluación del potencial de biometano de estiércol de oveja codigerido y desechos de cocina	Estiércol de oveja (SM) y desechos de cocina (KR)	SM:KR (40:60)	135.13 ml/gVS	Singh et al. 2021
Producción de metano por digestión de estiércol de aves de corral y biomasa lignocelulósica: evaluación cinética y energética	Estiércol de aves (EA), materiales lignocelulósicos (ML)	EA:ML (50:50)	291.4 ml/gVS	De Oliveira Paranhos et al. 2020
La codigestión anaeróbica de alto contenido de sólidos de estiércol de cerdo con lignito promueve la producción de metano	Estiércol de cerdo (PM) y lignito (L)	PM:L (2%, 4%, 8%, 16%, 32%, 40%, 50% y 64%)	Al 2% de lignito - 175.90ml/gVS	Guo et al. 2020

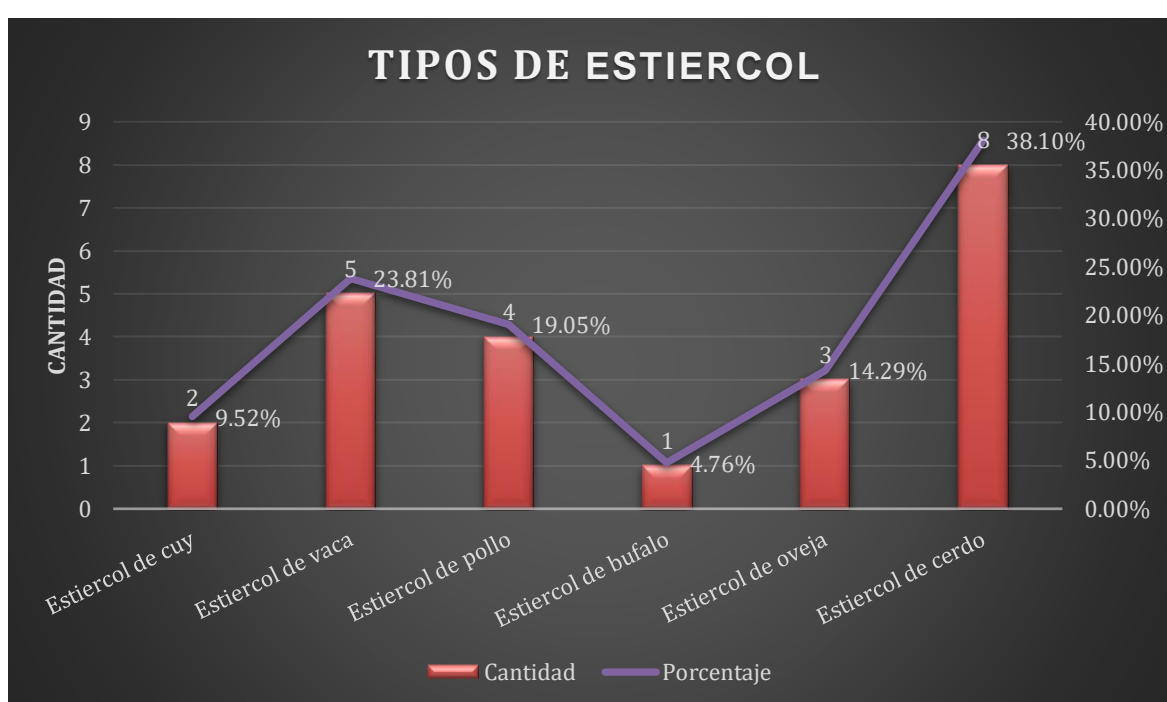
Cinética de la producción de metano durante la fermentación anaerobia de gallinaza con aserrín y paja de trigo pretratada con hongos	Gallinaza con aserrín (GA) y paja de trigo (PT)	GA:PT (50:50, 60:40 y 80:20)	Producción 50:50, máxima de metano 54.37%-58,95%	Pecar, Pohleven y Gorsek, 2020.
Codigestión anaeróbica estable y alta velocidad de alimentos y estiércol de vaca: optimización de las condiciones	Estiércol de vaca (MP) y residuos de alimentos (FW)	MP: FW(1:1)	441 ml/gVS	Xing et al. 2020
Producción de biogás a partir de la codigestión de diferentes proporciones de residuos de alimentos y estiércol bovino fresco	Estiércol bovino (BM) y residuos de alimentos (FW)	FW:BM (1:2)	273 ml/gVS	De Morias Andrade et al. 2020
Producción elevada del biogás a partir de la codigestión anaeróbica de desechos de granja: Información sobre el rendimiento y la cinética del proceso	Estiércol de vaca (CM), desperdicios de alimentos (FW) y residuos de jardín (GW)	CM:FW:GW (40:50:10)	455.1 ml/gVS	Achinas y Euverink, 2019.
Producción de biogás a pequeña escala con excrementos animales y residuos orgánicos	Estiércol combinado (AM) Estiércol de cerdo (PM) Estiércol de Ternera (VM) Estiércol de cordero (LM) Pulpa de tomate (T), uva (G) y oliva (O)	AM:G (1:1) AM:T (1:1)	348 NL/kgVS 404 NL/kgVS	Parralejo et al. 2019
Producción de biogás a partir de la codigestión anaeróbica de cáscara de durián con estiércol de pollo, leche y cerdo.	Cáscara de durián (DS), estiércol de pollo (CM), estiércol de vaca (SM) y estiércol de cerdo (PM)	DS:PM (1:1)	224,8ml/gVS	Shen et al. 2019



Inhibición de ácidos grasos volátiles en la cinética de producción de metano durante la codigestión seca de desechos alimentos y estiércol porcino	Desechos de alimentos (FW) y estiércol porcino (PM)	1. FW:PM (0:100) 2. FW:PM (25:75) 3. FW:PM (50:50) 4. FW:PM (75:25) 5. FW:PM (100:0)	FW:PM (50:50) 263 ml/gVS	Jiang et al. 2018
Codigestión anaeróbica para mejorar la producción de metano a partir de microalgas mixtas ( <i>Scenedesmus</i> sp., <i>Chlorella</i> sp.) y desperdicio de alimentos:	Microalgas (MA), Desechos alimentarios (FW) e inóculo	MA: FW (20:80)	639,8±1.3ml/gVS	Zhen et al. 2018
Optimización de la producción de metano a partir de paja de arroz y estiércol de Búfalo por H <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> y CA(OH) <sub>2</sub> : Pretratamientos y su cinética	Paja de arroz (RS), estiércol de búfalo (BD)	RS:BD (30:70)	346,7 ml/gVS	Noonari et al. 2018
Producción de metano mediante codigestión anaeróbica de estiércol de oveja y papel de desecho.	Estiércol de oveja (SD), cartón corrugado (CB) papel de oficina (OP)	SD:CB (4:1) SD:O P(2:3)	151.62 ml/gVS 198.85 ml/gVS	Li et al. 2018

Identificar los sustratos aplicados en la codigestión anaerobia es importante ya que se puede determinar la cantidad de metano que se puede generar de un solo sustrato o de la combinación de ambos sustratos, es por ello que una proporción adecuada en la aplicación de la codigestión es fundamental para que no se genere una inhibición en el proceso de codigestión por altos AGV de residuos orgánicos o por el NH<sub>4</sub> del estiércol que son parámetros que afectan el rendimiento de la producción de metano.

**Grafico 2:** Tipos de sustratos

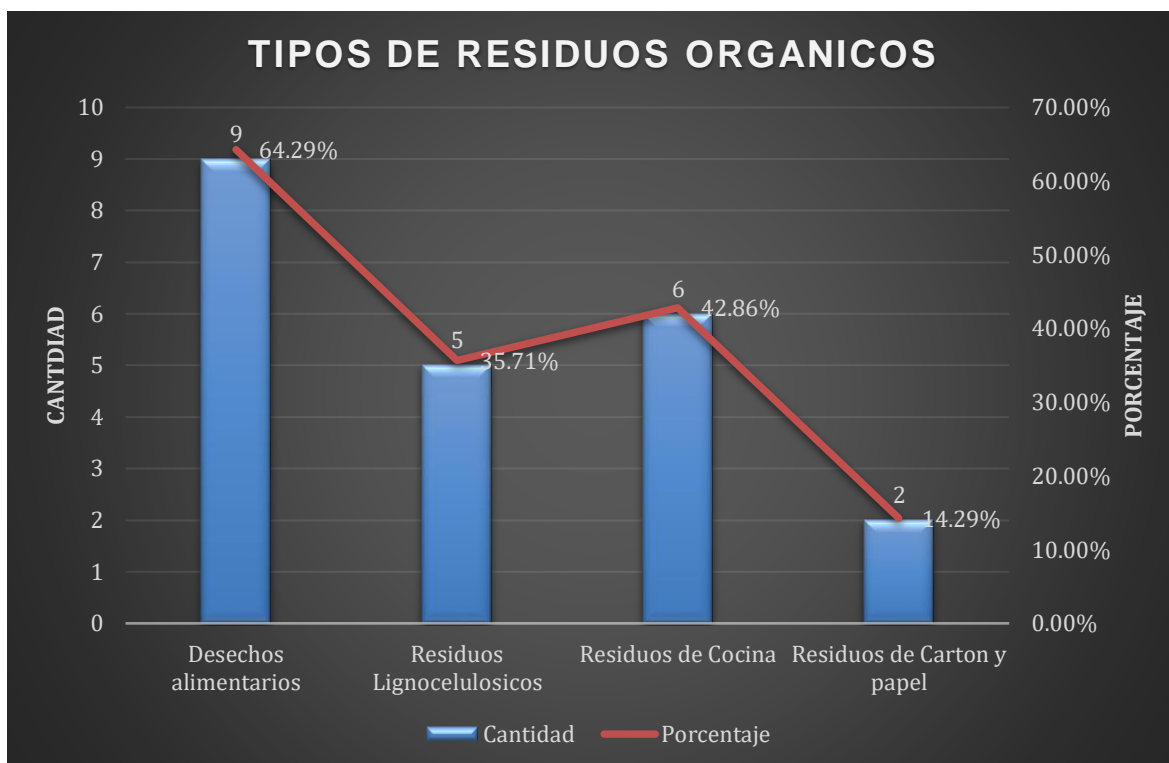


**Fuente:** Elaboración propia

En los artículos científicos se dan a conocer los tipos de estiércol que utilizaron en la codigestión anaerobia para la producción óptima de metano, donde la frecuencia de uso del sustrato fue de 38.10% estiércol de cerdo con una producción de metano 263 ml/gVS de Jiang et al. (2018) con una proporción de (50:50), estiércol de vaca con frecuencia de uso 23.81% en una proporción de (40:50:10) producción 455.1 ml/gVS de Achinas y Euverink (2019), estiércol de pollo con una frecuencia de 19.05% en una proporción de 1:3 de Raham et al. (2021) con una mayor producción de metano de 396 ml/gVS, estiércol de oveja con una frecuencia de 14.29% en una

proporción de (40:60) produjo 135.13 ml/gVS de Singh et al. (2021), estiércol de cuy con una frecuencia de 9.52% en una proporción de (25:75) produjo 341.46 ml/gVS y por último el estiércol de búfalo con una frecuencia de 4.76% en una proporción de (30:70) produjo 346,7 mLCH<sub>4</sub>/gVS de Noonari et al. (2018).

**Grafico 3:** Tipos de residuos orgánicos



**Fuente:** Elaboración propia

Es fundamental una proporción balanceada ya que la monodigestión de desechos de alimentos es propensa a la inhibición causada por las altas concentraciones de AGV y la monodigestión de estiércol tiene baja eficiencia y estabilidad en la producción de metano debido a la inhibición del amoníaco y la baja relación de C/N de los sustratos, es por ello que en los artículos recolectados el 64.29% utilizado como residuo orgánico es de desechos alimentarios debido a su abundancia y a su efecto negativo en el medio ambiente (Xing et al. 2020, De Morias Andrade 2020, Jiang et al. 2018 y Zhen et al. 2018), residuos de cocina con un 42.86% (Rahman et al. 2021, Singh et al. 2021,), otro sustrato prometedor es el lignito con una frecuencia de 35.71% que es un material de adsorción natural y tiene una mejor capacidad de adsorción que el carbono para el tratamiento de compuestos

orgánicos (Wijesinghe et al. 2021, Guo et al. 2020 y De Oliveira Paranhos et al. 2020) en sus estudios usan como sustrato el lignito, ya que contiene celulosa, lignina y ácidos húmicos que podría ser degradado a metano rápidamente que otros sustratos por las comunidades microbianas en condiciones anaerobias y por último en algunos estudios aplicaron de sustrato el de cartón y papel con una frecuencia de 14.29%, su producción de metano fue menor debido al % menor de parámetros de control (Zhao et al. 2021 y Li et al. 2018).

**OBJETIVO 3:** Parámetros de control en la producción óptima de metano

**Tabla 7:** Parámetros de control en la codigestión anaerobia para la producción de metano

ARTICULOS	Sustratos e inóculos	TS%	VS%	pH	VS/TS (%)	C%	N%	C/N	TAN/FAN	REFERENCIA
Codigestión anaerobia del contenido ruminal del ganado y residuos de alimentos para la producción de biogás: Establecimiento de relaciones de co-digestión y estudios cinéticos	<b>A:</b> Contenido ruminal <b>B:</b> Desechos de alimentos	<b>A:</b> 10.85 <b>B:</b> 26.53	<b>A:</b> 89 <b>B:</b> 86.83	<b>A:</b> 6.86 <b>B:</b> 4.12	-	<b>A:</b> 48.6 <b>B:</b> 45.5	<b>A:</b> 2.05 <b>B:</b> 2.9	<b>A:</b> 23.7 <b>B:</b> 15.7	<b>A:</b> 6493.33 <b>B:</b> 5350.67	Ihoeghian et al. 2022
Codigestión de orujo de almazara bifásico y estiércol vacuno: Influencia del contenido de sólidos en el rendimiento del proceso	<b>A:</b> Residuos de almazara bifásica <b>B:</b> Estiércol de ganado (CM)	<b>A:</b> 315 g/kg <b>B:</b> 182.95 g/kg	<b>A:</b> 282.64 g/kg <b>B:</b> 143.91 g/kg	<b>A:</b> 5.35 <b>B:</b> 7.52	<b>A:</b> 89.73 <b>B:</b> 78.66	<b>A:</b> 52.06 <b>B:</b> 45.62	<b>A:</b> 1.10 <b>B:</b> 2.18	<b>A:</b> 47.28 <b>B:</b> 20.90	-	Rubio et al. 2022
La adición de lignito durante la digestión anaeróbica del estiércol porcino rico en amonio mejora la producción de biogás.	<b>A:</b> Estiércol porcino <b>B:</b> Lignito	<b>A:</b> 2.14 <b>B:</b> 44.63	<b>A:</b> 72.95 <b>B:</b> 71.28	<b>A:</b> 7.0 <b>B:</b> 5.76	-	<b>A:</b> 28.5 <b>B:</b> 56.7	<b>A:</b> 4.01 <b>B:</b> 0.55	-	-	Wijesinghe et al. 2021

Codigestión de paja de trigo y estiércol animal pretratado con hidróxido de calcio para la producción de biometano: estudio cinético	<b>A:</b> Estiércol vaca <b>B:</b> Lignito	<b>A:</b> 32.4 <b>B:</b> 76.4	<b>A:</b> 21.2 <b>B:</b> 86.23	<b>A:</b> 6.2 <b>B:</b> 7.1	-	-	-	<b>A:</b> 47.05 <b>B:</b> 18.4	-	Rani, Pathak y Bansal, 2021.
Producción de biogás a partir de codigestión anaeróbica utilizando desechos de cocina y estiércol de aves como sustrato	<b>A:</b> Estiércol de aves <b>B:</b> Desechos de cocina	<b>A:</b> 54.9 <b>B:</b> 65.03	<b>A:</b> 48.75 <b>B:</b> 57.11	<b>A:</b> 8.3 <b>B:</b> 4.8	-	-	-	<b>A:</b> 9.5 <b>B:</b> 35.2	-	Rahman et al. 2021
Codigestión anaeróbica de estiércol de pollo y residuos de cartón: Centrándose en la producción de metano.	<b>A:</b> Estiércol de pollo <b>B:</b> Cartón	<b>A:</b> 39.6 <b>B:</b> 93.6	<b>A:</b> 20.6 <b>B:</b> 87.6	<b>A:</b> - <b>B:</b> -	<b>A:</b> 52.02 <b>B:</b> 93.59	<b>A:</b> 40.2 <b>B:</b> 40.7	<b>A:</b> 3.12 <b>B:</b> 0.37	-	-	Zhao et al. 2021
Efecto del tiempo de retención hidráulica en la codigestión anaeróbica de estiércol de ganado y desperdicios de alimentos	<b>A:</b> Estiércol de Ganado <b>B:</b> Desechos orgánicos	<b>A:</b> 7.7	<b>A:</b> 6.0	<b>A:</b> 7.4	<b>A:</b> 76.2	<b>A:</b> 49,4	<b>A:</b> 2,2%	<b>A:</b> 22.5	-	Bi et tal. 2020

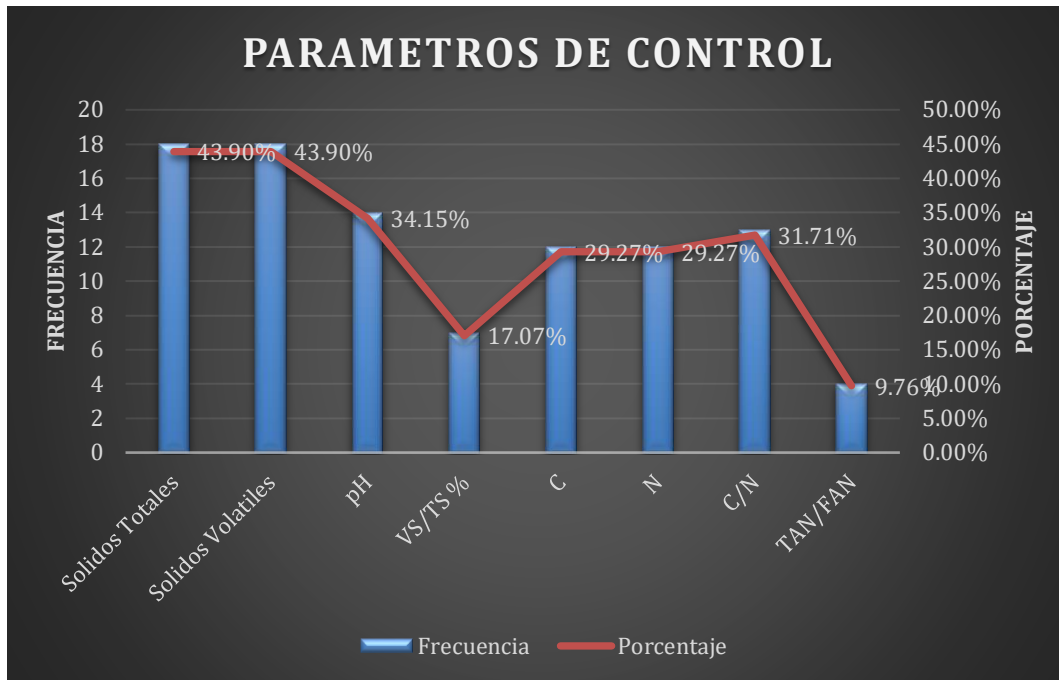
Producción de biogás a partir de la codigestión de diferentes proporciones de residuos de alimentos y estiércol bovino fresco	<b>A:</b> Estiércol bovino <b>B:</b> Residuos de alimentos (FW)	<b>A:</b> 15.0 <b>B:</b> 29.2	<b>A:</b> 54.0 <b>B:</b> 92.5	<b>A:</b> 7.9 <b>B:</b> 4.8	-	<b>A:</b> 43.8 <b>B:</b> 46.8	<b>A:</b> 1.69 <b>B:</b> 4.04	<b>A:</b> 25.9 <b>B:</b> 11.6	-	De Morias Andrade et al. 2020
La codigestión anaeróbica de alto contenido de sólidos de estiércol de cerdo con lignito promueve la producción de metano	<b>A:</b> Lignito <b>B:</b> Estiércol de cerdo	<b>A:</b> 52.51 <b>B:</b> 15.88	<b>A:</b> 88.90 <b>B:</b> 75.79	<b>A:</b> 5.76 <b>B:</b> 6.85	-	-	-	<b>A:</b> 84.45 <b>B:</b> 8.13	<b>A:</b> - <b>B:</b> 1032,41/9,32	Guo et al. 2020
Codigestión anaeróbica estable y de alta velocidad de residuos de alimentos y estiércol de vaca: optimización de las condiciones	<b>A:</b> Estiércol de vaca <b>B:</b> Residuos de alimentos	<b>A:</b> 113.7 <b>B:</b> 82.3	<b>A:</b> 95.9 <b>B:</b> 81.2	<b>A:</b> 7.08 <b>B:</b> 4.34	-	<b>A:</b> 40.1 <b>B:</b> 47.8	<b>A:</b> 2.01 <b>B:</b> 5.71	<b>A:</b> 19.95 <b>B:</b> 8.37	-	Xing et al. 2020
Producción de metano por digestión de estiércol de aves de corral y biomasa lignocelulósica: evaluación cinética y energética	<b>A:</b> Estiércol de vaca <b>B:</b> Desperdicios de alimentos <b>C:</b> Residuos de jardín	<b>A:</b> 19.37 <b>B:</b> 23.7 <b>C:</b> 87.11	<b>A:</b> 16.95 <b>B:</b> 20.4 <b>C:</b> 81.20	<b>A:</b> 7.63 <b>B:</b> 6.19 <b>C:</b> -	<b>A:</b> 88 <b>B:</b> 86 <b>C:</b> 93	-	-	-	-	Achinas y Euverink, 2019.

Producción de biogás a pequeña escala con excrementos animales y residuos orgánicos	<b>A:</b> Estiércol de Ternera <b>B:</b> Estiércol de cordero <b>C:</b> Estiércol de cerdo <b>D:</b> Tomate <b>E:</b> Uva <b>F:</b> Oliva	<b>A:</b> 30.66 <b>B:</b> 35.69 <b>C:</b> 0.8 <b>D:</b> 30.73 <b>E:</b> 33.06 <b>F:</b> 30.66	<b>A:</b> 85.99 <b>B:</b> 81.22 <b>C:</b> 51.89 <b>D:</b> 68.32 <b>E:</b> 60.20 <b>F:</b> 85.99	<b>A:</b> 8.0 <b>B:</b> 8.84 <b>C:</b> 7.5 <b>D:</b> 3.64 <b>E:</b> 4.56 <b>F:</b> 4.29	-	-	-	<b>A:</b> 19.05 <b>B:</b> 21.79 <b>C:</b> 13.00 <b>D:</b> 33.41 <b>E:</b> 42.13 <b>F:</b> 37.28	-	Parralejo et al. 2019
Producción de biogás a partir de la codigestión anaeróbica de cáscara de durian con estiércol de pollo, lechería y cerdo	<b>A:</b> Cáscara de durian <b>B:</b> Estiércol de pollo <b>C:</b> Estiércol de lechería <b>D:</b> Estiércol de cerdo	<b>A:</b> 18.5 <b>B:</b> 26.8 <b>C:</b> 44.3 <b>D:</b> 28.2	<b>A:</b> 17.8 <b>B:</b> 17.5 <b>C:</b> 32.7 <b>D:</b> 20.4	-	<b>A:</b> 96.3 <b>B:</b> 65.6 <b>C:</b> 73.9	<b>A:</b> 43.3 <b>B:</b> 38.3 <b>C:</b> 32.5	<b>A:</b> 0.9 <b>B:</b> 3.8 <b>C:</b> 2.2	<b>A:</b> 48.3 <b>B:</b> 10.1 <b>C:</b> 14.8	-	Shen et al. 2019
Producción mejorada de metano a partir de la codigestión anaeróbica de paja de arroz e hydrilla verticillata y su análisis cinético.	<b>A:</b> Paja de Arroz <b>B:</b> Hydrilla verticillata <b>C:</b> Estiércol de vaca digerido	<b>A:</b> 94.09 <b>B:</b> 9.18 <b>C:</b> 11.98	<b>A:</b> 80.5 <b>B:</b> 68.88 <b>C:</b> 32.62	<b>A:</b> 6.85 <b>B:</b> 7.40 <b>C:</b> 7.75	-	<b>A:</b> 31.39 <b>B:</b> 16.72 <b>C:</b> 20.45	<b>A:</b> 0.73 <b>B:</b> 2.44 <b>C:</b> 2.93	<b>A:</b> 43 <b>B:</b> 6.85 <b>C:</b> 6.98	-	Kainthola et al. 2019
Inhibición de ácidos grasos volátiles en la cinética de producción de metano durante la co-digestión seca de desperdicios de comida y estiércol de cerdo.	<b>A:</b> Desechos Alimentarios <b>B:</b> Estiércol de cerdo	<b>A:</b> 283.7g/kg <b>B:</b> 256.2g/kg	<b>A:</b> 283.7 <b>B:</b> 211.4	<b>A:</b> 4.5 <b>B:</b> 8.4	<b>A:</b> 96.6 <b>B:</b> 82.5	-	-	-	<b>A:</b> 386/- <b>B:</b> 3666/-	Jiang et al. 2018



Efectos de la codigestión de residuos de pepino a rastrojo de maíz y proporción de estiércol de cerdo en la producción de metano.	<b>A:</b> Estiércol de vaca <b>B:</b> Rastrojo de maíz <b>C:</b> Residuos de pepino	<b>A:</b> 22.75 <b>B:</b> 91.82 <b>C:</b> 21.40	<b>A:</b> 16.55 <b>B:</b> 78.91 <b>C:</b> 13.44	<b>A:</b> 7.77 <b>B:</b> - <b>C:</b> -	<b>A:</b> - <b>B:</b> - <b>C:</b> -	<b>A:</b> 39.5 <b>B:</b> 41.5 <b>C:</b> 32.9	<b>A:</b> 2.9 <b>B:</b> 1.0 <b>C:</b> 2.2	<b>A:</b> 13.6 <b>B:</b> 40.8 <b>C:</b> 14.8	<b>A:</b> - <b>B:</b> - <b>C:</b> -	Wang et al. 2018
Producción de metano mediante codigestión anaeróbica de estiércol de oveja y papel de desecho.	<b>A:</b> Estiércol de oveja <b>B:</b> Cartón corrugado <b>C:</b> Papel de oficina	<b>A:</b> 53.58 <b>B:</b> 93.78 <b>C:</b> 98.21	<b>A:</b> 44.16 <b>B:</b> 95.06 <b>C:</b> 74.17	<b>A:</b> 8.6 <b>B:</b> - <b>C:</b> -	<b>A:</b> 82.4 <b>B:</b> 98.22 <b>C:</b> 75.52	<b>A:</b> 38.36 <b>B:</b> 44.16 <b>C:</b> 35.12	<b>A:</b> 2.84 <b>B:</b> 0.15 <b>C:</b> 0.12	<b>A:</b> 13.51 <b>B:</b> 294.4 <b>C:</b> 292.67	Estiércol de oveja con cartón (311.7/-) Estiércol de oveja con papel (270.3/-)	Li et al. 2018
Codigestión anaeróbica para mejorar la producción de metano a partir de microalgas mixtas ( <i>Scenedesmus</i> sp., <i>Chlorella</i> sp.) y desperdicio de alimentos: modelado cinético y evaluación de impacto sinérgico.	<b>A:</b> Microalgas <b>B:</b> Desechos alimentarios	<b>A:</b> 0.56 <b>B:</b> 3.96	<b>A:</b> 90.23 <b>B:</b> 90.81	<b>A:</b> 7.9 <b>B:</b> 4.8	-	<b>A:</b> 5.8 <b>B:</b> -	<b>A:</b> 37.6 <b>B:</b> -	-	-	Zhen et al. 2018

**Grafico 4:** Parámetros de control en la codigestión anaerobia



**Fuente:** Elaboración propia

El primer parámetro que considerar son los ST, en el proceso de la codigestión anaerobia lo sólidos totales representa la cantidad de materia que quedara como residuo después del proceso y los sólidos volátiles representa la cantidad de materia que se va a convertir en biogás (metano), estos tienen la unidad que se representa en g/kg, g/L y %. El mayor valor se pudo observar (Rubio et al. 2022) con 315 g/kg del estiércol de ganado y en % de (Rahman et al. 2021) con 54.9% de estiércol de aves, y el más bajo de estiércol de vaca con 113.7 g/L (Xing et al. 2020), de igual forma con los sólidos volátiles el mayor % de SV es de 88.9% del sustrato lignito (Guo et al. 2020) y el menor valor de 13.44% del sustrato de residuos de pepino (Wang et al. 2018). A comparación con la baja digestión anaeróbica de un solo sustrato que se pudo analizar en otros estudios, la codigestión anaerobia de alto contenido sólido (el contenido total de sólidos >15%) tiene muchas ventajas, como un menor volumen del reactor (digestor) y menos entrada de energía para la producción de metano.

El pH es otro parámetro importante a considerar dentro del procedimiento de codigestión anaerobia ya que sus variaciones pueden ocasionar una alteración en

los resultados de la producción de metano de tal forma que en las investigaciones analizadas el pH mínimo utilizado fue de 4.12 (Ihoeghian et al. 2022) de los residuos de alimentos, del estiércol animal el pH mínimo fue de 6.86 (Ihoeghian et al. 2022) y el máximo de 8.6 en estiércol de oveja (Li et al. 2018) y de residuos orgánicos el pH máximo 7.1 de (Rani, Pathak y Bansal, 2021) y otros estudios estuvieron en el rango de 5.7 - 7.5. No obstante si el pH es menor al rango óptimo (6.8-8.0) puede existir una acumulación de AGV en el proceso de codigestión anaerobia. Es por ello que en los artículos analizados se puede determinar que si el valor del pH es inferior o superior al rango óptimo, la tasa de producción de metano es baja.

El carbono, nitrógeno y la relación de carbono/nitrógeno (C/N) es otro parámetro importante, ya que los sustratos ricos en carbono podría mejorar la relación de C/N del estiércol, aumentar la estabilidad y crear un cultivo adecuado para la codigestión anaerobia, como en el estudio de (Guo et al. 2020) la relación de C/N de lignito es de aproximadamente 50-80 mientras que del estiércol de cerdo es aproximadamente 10 (esto depende de la etapa de crecimiento de los animales), si la relación de C/N es baja puede ocasionar la formación de amonio que ocasiona la inhibición del proceso de codigestión anaerobia y si la relación de C/N es mayor la creación de microorganismos es lenta que afecta en la producción de metano, es por ello que algunos autores señalan que generalmente se acepta la relación óptima de C/N de un proceso digestión anaerobia se encuentre entre 15 y 30, por lo tanto la combinación de sustratos para tener una mejor relación de C/N es esencial antes de iniciar con el proceso de codigestión para obtener una óptima producción de metano.

Por ultimo tenemos al parámetro TAN y el FAN que la mayoría de los autores no considera en sus artículos, pero es importante su análisis ya que el TAN es el nitrógeno amoniacal total y es la suma del  $\text{NH}_4^{+-}\text{N}$  (nitrógeno amonio ionizado) y el FAN (nitrógeno de amoniaco libre); la acumulación de altas concentraciones de TAN inhibe la metanogénesis en los digestores anaeróbicos, en el estudio de Jiang et al. (2018) el FAN de estiércol de cerdo es 3666 mg/L y el FAN estudio de Guo et al. (2020) es 9,32 mg/kg, la inhibición de la metanogénesis por el amoniaco en el proceso de codigestión es causada principalmente por el FAN, según Wijesinghe (2021) el aumento de FAN, la molécula de FAN se difunde pasivamente en la célula

microbiana a través de la membrana celular causando un desequilibrio de pH dentro la célula y esto inhibe las enzimas metabólicas (p. 3). Li et al. (2018) indico que la inestabilidad de la digestión anaerobia puede ocurrir como resultado de niveles de TAN de 1500 mg/L, en su estudio las concentraciones de TAN oscilaron entre 253.9 mg/L y 334.3 mg/L y esto no inhiben el proceso de codigestión anaerobia de sus sustratos.

## V. CONCLUSIONES

Se concluye que el tipo de modelo cinético más utilizado en la codigestión anaerobia es el modelo Gompertz modificado, este modelo se aplica cuando se observa la inhibición en el proceso de digestión asumiendo que la producción de metano se refleja en el crecimiento bacteriano, el segundo modelo empleado es el de primer orden, este modelo se aplica cuando la hidrólisis es el paso que limita la velocidad en el proceso de digestión anaerobia y por último el modelo de cono, este modelo se aplica para evaluar la producción de metano a partir de un sustrato específico en presencia de microorganismos ruminales, esto quiere decir cuando la digestión anaerobia se utiliza como cosustrato estiércol de vaca. Los modelos cinéticos suelen utilizarse en procesos de digestión anaerobia para comprobar, controlar, evaluar los resultados experimentales, y predecir el rendimiento de la producción del metano, es por ello que la cinética es un proceso que relaciona la producción de metano con el crecimiento bacteriano.

Se concluye que el tipo de estiércol animal más utilizado es el estiércol de cerdo con un 38,1%, estiércol de vaca 23.81%, de pollo con un 19.05%, estiércol de oveja 14.29%, cuy con 9.52% y búfalo con 4.76%. El cosustrato de residuos orgánicos más utilizado para la producción óptima de metano son los desechos alimentarios con un 64.29%, residuos de cocina 42.86%, residuos lignocelulósicos con 35.71% y residuos de cartón y papel con 14.29%.

Se concluye que los parámetros de control identificados son los ST, SV, pH, C, N, C/N y el TAN ya que antes del proceso de la codigestión anaerobia son importantes, ya que de estos dependen una producción óptima de metano, es por ello que según los artículos analizados los autores determinaron que el pH óptimo está en el rango 6.8 a 8, si el rango es menor puede existir una acumulación de AGV y afectar la producción de metano, otro parámetro importante es la relación de C/N, algunos autores indican que la relación de C/N debe estar en una relación de 15 a 30, si la relación C/N es baja puede ocasionar la formación amonio que ocasiona la inhibición del proceso de codigestión anaerobia y si es mayor la creación de microorganismos es lenta y también afecta el proceso, de igual el nitrógeno amoniacal total que la mayoría de autores no considera en los estudios pero es un

parámetro importante ya que si los niveles son mayor a 1500 mg/L pueden inhibir en el proceso de la metanogénesis dando como resultado una inestabilidad en el proceso de la digestión, otros parámetros analizados son los ST que se encuentren en los valores 7.7% y 53.58%, SV en un rango de 6% y 95.9%.

## VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar más estudios aplicando los tipos de modelos cinéticos en la codigestión anaerobia, ya que estos modelos describen las características del proceso y permiten una mayor optimización en los resultados de los parámetros cinéticos para la producción de metano, además con los parámetros cinéticos es posible realizar diferentes simulaciones para explorar la influencia de las condiciones experimentales que pueden cambiar en el transcurso de la digestión anaerobia.

Se recomienda desarrollar más estudios de investigación utilizando otros tipos de estiércol animal, como aves de corral, vacunos, cuy y camélidos ya que la gran mayoría utiliza como experimento el estiércol de cerdo por su aporte en la producción óptima de metano, y la información respecto a los otros tipos de estiércol es muy escasa.

Se recomienda considerar e implementar más parámetros de control de los sustratos y estiércol, ya que un balance no proporcional puede generar la inhibición de la codigestión anaerobia por los AGV de los residuos orgánicos o por el alto contenido de amonio del estiércol animal. Se recomienda utilizar la investigación de la codigestión anaerobia, para tener un enfoque más amplio de que tipos de sustratos y estiércol son los que generan una mayor producción óptima de metano.

## REFERENCIA

1. ABUDI, Zaidun Najji; HU, Zhiquan; ABOOD, Alkhafaji R. Anaerobic co-digestion of mango leaves and pig manure: performance assessment and kinetic analysis. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2020, p. 1-11. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00665-6>
2. ACHINAS, Espiridón; EUVERINK, Gerrit Jan Willem. Producción elevada de biogás a partir de la codigestión anaeróbica de desechos de granja: información sobre el rendimiento y la cinética del proceso. *Gestión e investigación de residuos*, 2019, vol. 37, nº 12, pág. 1240-1249. Disponible en: <https://doi.org/10.1177/0734242X19873383>
3. Ali, M.M., Ndongo, M., Yetilmezsoy, K. *et al.* Appraisal of methane production and anaerobic fermentation kinetics of livestock manures using artificial neural networks and sinusoidal growth functions. *J Mater Cycles Waste Manag* **23**, 301–314 (2021). Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01130-2>
4. ALI, Mohamed Mahmoud, et al. Appraisal of methane production and anaerobic fermentation kinetics of livestock manures using artificial neural networks and sinusoidal growth functions. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2021, vol. 23, no 1, p. 301-314. ALFA,
5. ALMOMANI, Fares; BHOSALE, Rahul R. Enhancing the production of biogas through anaerobic co-digestion of agricultural waste and chemical pre-treatments. *Chemosphere*, 2020, vol. 255, p. 126805. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126805>.
6. ANNEY, Vicent N. Asegurando la calidad de los hallazgos de la investigación cualitativa: Mirando los criterios de confiabilidad. *Revista de tendencias emergentes en investigación educativa y estudios de políticas*, 2014, vol. 5, nº 2, pág. 272-281.
7. BI, Shaojie, et al. Effect of hydraulic retention time on anaerobic co-digestion of cattle manure and food waste. *Renewable Energy*, 2020, vol. 150, p. 213-220. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.091>
8. ARIFAN, Fahmi; ABDULLAH, Abdullah; SUMARDIONO, Siswo. Kinetic Study of Biogas Production from Animal Manure and Organic Waste in Semarang City



- by Using Anaerobic Digestion Method. *Indonesian Journal of Chemistry*, 2021, vol. 21, no 5, p. 1221-1230. Disponible en: <https://doi.org/10.22146/ijc.65056>
9. CARDONA, Ana María Arias; SALGADO, Sara Victoria Alvarado. Investigación narrativa: apuesta metodológica para la construcción social de conocimientos científicos. *Revista CES Psicología*, 2015, vol. 8, no 2, p. 171-181
  10. CHOW, Wei Ling, et al. Anaerobic co-digestion of wastewater sludge: a review of potential co-substrates and operating factors for improved methane yield. *Processes*, 2020, vol. 8, no 1, p. 39. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/pr8010039>
  11. CORTÉS CORTÉS, Manuel E.; IGLESIAS LEÓN, Miriam. *Generalidades sobre Metodología de la Investigación*. Universidad Autónoma del Carmen, 2004.
  12. DE LA LAMA, David; BORJA, Rafael; RINCÓN, Bárbara. Performance evaluation and substrate removal kinetics in the semi-continuous anaerobic digestion of thermally pretreated two-phase olive pomace or “Alperujo”. *Process Safety and Environmental Protection*, 2017, vol. 105, p. 288-296. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.11.014D>
  13. De Morais Andrade, M.M., Alencar, B.R.A., Leite, N.P. *et al.* Biogas production from co-digestion of different proportions of food waste and fresh bovine manure. *Biomass Conv. Bioref.* (2020). Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00833-8>
  14. DE OLIVEIRA PARANHOS, Aline Gomes, et al. Methane production by co-digestion of poultry manure and lignocellulosic biomass: kinetic and energy assessment. *Bioresource technology*, 2020, vol. 300, p. 122588. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122588>
  15. DUAN, Na, et al. Effect of organic loading rate on anaerobic digestion of pig manure: Methane production, mass flow, reactor scale and heating scenarios. *Journal of environmental management*, 2019, vol. 231, p. 646-652. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.062>
  16. ELALAMI, Doha, et al. Evaluation of agronomic properties of digestate from macroalgal residues anaerobic digestion: impact of pretreatment and co-digestion with waste activated sludge. *Waste Management*, 2020, vol. 108, p. 127-136. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.019>

17. GÓMEZ-QUIROGA, Xiomara, et al. Successful and stable operation of anaerobic thermophilic co-digestion of sun-dried sugar beet pulp and cow manure under short hydraulic retention time. *Chemosphere*, 2022, p. 133484. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133484>
18. GUO, Hai-Gang, et al. High-solid anaerobic co-digestion of pig manure with lignite promotes methane production. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 258, p. 120695. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120695>
19. GU, Juan, et al. Anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge under mesophilic and thermophilic conditions: Focusing on synergistic effects on methane production. *Bioresource technology*, 2020, vol. 301, p. 122765. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122765>
20. HASSANAT, F.; BENCHAAAR, C. Methane emissions of manure from dairy cows fed red clover-or corn silage-based diets supplemented with linseed oil. *Journal of Dairy Science*, 2019, vol. 102, no 12, p. 11766-11776. Disponible en: <https://doi.org/10.3168/jds.2018-16014>
21. HENARD, Calvin A.; SMITH, Holly K.; GUARNIERI, Michael T. Phosphoketolase overexpression increases biomass and lipid yield from methane in an obligate methanotrophic biocatalyst. *Metabolic engineering*, 2017, vol. 41, p. 152-158. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2017.03.007>
22. HERNÁNDEZ-SAMPIERI, Roberto; TORRES, Christian Paulina Mendoza. *Metodología de la investigación*. México^ eD. F DF: McGraw-Hill Interamericana, 2018.
23. HENRY, Poduthase. Rigor en la investigación cualitativa: Promoción de la calidad en la investigación en ciencias sociales. *Revista de investigación de ciencias recientes* ISSN, 2015, vol. 2277, pág. 2502
24. HIMANSHU, H., et al. Antagonistic effects on biogas and methane output when co-digesting cattle and pig slurries with grass silage in in vitro batch anaerobic digestion. *Biomass and Bioenergy*, 2018, vol. 109, p. 190-198. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.12.027>
25. HU, Yuansheng, et al. Filamentous microalgae as an advantageous co-substrate for enhanced methane production and digestate dewaterability in

- anaerobic co-digestion of pig manure. *Waste Management*, 2021, vol. 119, p. 399-407.
26. IHOEGHIAN, Newton A., et al. Anaerobic co-digestion of cattle rumen content and food waste for biogas production: Establishment of co-digestion ratios and kinetic studied. *Bioresource Technology Reports*, 2022, vol. 18, p. 10333. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101033>
  27. JEFFERY, Simon, et al. Biochar effects on methane emissions from soils: a meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, vol. 101, p. 251-258. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.07.021>
  28. JOHNSON, Jessica L.; ADKINS, Donna; CHAUVIN, Sheila. Una revisión de los indicadores de calidad del rigor en la investigación cualitativa. *Revista estadounidense de educación farmacéutica*, 2020, vol. 84, nº 1.
  29. JIANG, Yan, et al. Inhibition of volatile fatty acids on methane production kinetics during dry co-digestion of food waste and pig manure. *Waste Management*, 2018, vol. 79, p. 302-311. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.07.049>
  30. KAFLE, Gopi Krishna; CHEN, Lide. Comparison on batch anaerobic digestion of five different livestock manures and prediction of biochemical methane potential (BMP) using different statistical models. *Waste management*, 2016, vol. 48, p. 492-502. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.021>
  31. KAINTHOLA, Jyoti; KALAMDHAD, Ajay S.; GOUD, Vaibhav V. Enhanced methane production from anaerobic co-digestion of rice straw and hydrilla verticillata and its kinetic analysis. *Biomass and Bioenergy*, 2019, vol. 125, p. 8-16. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.04.011>
  32. KARKI, Renisha, et al. Anaerobic co-digestion of various organic wastes: Kinetic modeling and synergistic impact evaluation. *Bioresource Technology*, 2022, vol. 343, p. 126063. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126063>
  33. KASINATH, Archana, et al. Biomass in biogas production: Pretreatment and codigestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 150, p. 111509. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111509>
  34. KHALIL, Munawar, et al. Waste to energy technology: The potential of sustainable biogas production from animal waste in indonesia. *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews*, 2019, vol. 105, p. 323-331. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.011>
35. KUMARI, Khushboo, et al. Anaerobic co-digestion of different wastes in a UASB reactor. *Waste Management*, 2018, vol. 77, p. 545-554. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.007>
36. LI, Yangyang, et al. Solid state anaerobic co-digestion of tomato residues with dairy manure and corn stover for biogas production. *Bioresource technology*, 2016, vol. 217, p. 50-55. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.111>
37. LI, Ruirui, et al. Co-digestion of chicken manure and microalgae *Chlorella* 1067 grown in the recycled digestate: Nutrients reuse and biogas enhancement. *Waste Management*, 2017, vol. 70, p. 247-254. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.016>
38. LI, Yue; CHEN, Yinguang; WU, Jiang. Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: A review. *Applied energy*, 2019, vol. 240, p. 120-137. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.243>
39. LI, Wanwu, et al. Methane production through anaerobic co-digestion of sheep dung and waste paper. *Energy Conversion and Management*, 2018, vol. 156, p. 279-287. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.002>
40. LIMA, Diego Roberto Sousa, et al. Influence of different thermal pretreatments and inoculum selection on the biomethanation of sugarcane bagasse by solid-state anaerobic digestion: a kinetic analysis. *Industrial Crops and Products*, 2018, vol. 111, p. 684-693. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.048>
41. LUÍSA, O.F., ASTALS, S. and PASSOS, F., 2022. Anaerobic co-digestion of Food Waste and Microalgae in an Integrated Treatment Plant. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 06, vol. 97, no. 6, pp. 1545-1554 ProQuest Central. ISSN 02682575. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/jctb.6900>.
42. LUO, Xiaosha, et al. Methane production and characteristics of the microbial community in the co-digestion of spent mushroom substrate with dairy manure. *Bioresource technology*, 2018, vol. 250, p. 611-620. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.088>

43. MA, Guiling, et al. Methane yields during anaerobic co-digestion of animal manure with other feedstocks: A meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 2020, vol. 728, p. 138224. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138224>
44. MAO, Chunlan, et al. Biogas production and synergistic correlations of systematic parameters during batch anaerobic digestion of corn straw. *Renewable Energy*, 2019, vol. 132, p. 1271-1279. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.009>
45. MASIH-DAS, Jonathan; TAO, Wendong. Anaerobic co-digestion of foodwaste with liquid dairy manure or manure digestate: Co-substrate limitation and inhibition. *Journal of environmental management*, 2018, vol. 223, p. 917-924. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.016>
46. MATHERI, A. N., et al. Optimising biogas production from anaerobic co-digestion of chicken manure and organic fraction of municipal solid waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 80, p. 756-764. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.068>
47. MEHARIYA, Sanjeet, et al. Co-digestion of food waste and sewage sludge for methane production: Current status and perspective. *Bioresource technology*, 2018, vol. 265, p. 519-531. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.030>
48. MEMBERE, Edward; SALLIS, Paul. Effect of temperature on kinetics of biogas production from macroalgae. *Bioresource technology*, 2018, vol. 263, p. 410-417. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.023>
49. MENESES QUELAL, W.O., et al, 2022. Evaluation of Methane Production from the Anaerobic Co-Digestion of Manure of Guinea Pig with Lignocellulosic Andean Residues. *Environmental Science and Pollution Research International*, 01, vol. 29, no. 2, pp. 2227-2243 ProQuest Central. ISSN 09441344. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15610-x>.
50. Meneses-Quelal, W.O., Velázquez-Martí, B., Gaibor-Chávez, J. et al. Anaerobic Co-digestion of Slaughter Residues with Agricultural Waste of Amaranth Quinoa and Wheat. *Bioenerg. Res.* (2021). Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10350-9>

51. MENESES-QUELAL, W. O., et al. Biochemical potential of methane (BMP) of camelid waste and the Andean region agricultural crops. *Renewable Energy*, 2021, vol. 168, p. 406-415. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.071>
52. MLAIK, Najoua, et al. Optimization of anaerobic co-digestion of fruit and vegetable waste with animal manure feedstocks using mixture design. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2022, p. 1-10. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02620-z>
53. NESHAT, Soheil A., et al. Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 79, p. 308-322. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.137>
54. Noonari, A.A., Mahar, R.B., Sahito, A.R. et al. Optimization of Methane Production from Rice Straw and Buffalo Dung by H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and Ca(OH)<sub>2</sub>: Pretreatments and Its Kinetics. *Waste Biomass Valor* **10**, 899–908 (2019). Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0102-z>
55. ÖZER, Betül. Biogas energy opportunity of Ardahan city of Turkey. *Energy*, 2017, vol. 139, p. 1144-1152. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.052>
56. PAN, Junting, et al. Achievements of biochar application for enhanced anaerobic digestion: a review. *Bioresource technology*, 2019, vol. 292, p. 122058. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122058>
57. PARRALEJO, A. I., et al. Small scale biogas production with animal excrement and agricultural residues. *Industrial Crops and Products*, 2019, vol. 131, p. 307-314. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.01.059>
58. PEČAR, Darja; GORŠEK, Andreja. Kinetics of methane production during anaerobic digestion of chicken manure with sawdust and miscanthus. *Biomass and Bioenergy*, 2020, vol. 143, p. 105820. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105820>
59. PEČAR, Darja; POHLEVEN, Franc; GORŠEK, Andreja. Kinetics of methane production during anaerobic fermentation of chicken manure with sawdust and fungi pre-treated wheat straw. *Waste Management*, 2020, vol. 102, p. 170-178. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.046>

60. Rahman, M.A., Shahazi, R., Nova, S.N.B. *et al.* Biogas production from anaerobic co-digestion using kitchen waste and poultry manure as substrate— part 1: substrate ratio and effect of temperature. *Biomass Conv. Bioref.* (2021). Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01604-9>
61. RANI, Punam; PATHAK, Vinayak Vandan; BANSAL, Megha. Co-digestion of wheat straw and animal manure pretreated with calcium hydroxide for biomethane production: kinetic study. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 2021, vol. 4, p. 100145. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100145>
62. REN, Yuanyuan, et al. A comprehensive review on food waste anaerobic digestion: Research updates and tendencies. *Bioresource technology*, 2018, vol. 247, p. 1069-1076. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.109>
63. RIVERA, C., 2019. Investigación Básica e Investigación Aplicada. Singer Island: Newstex, Sep 09, ProQuest Central.
64. ROMERO, H. I., et al. Comparison of the methane potential obtained by anaerobic codigestion of urban solid waste and lignocellulosic biomass. *Energy Reports*, 2020, vol. 6, p. 776-780. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.10.013>
65. ROMERO, H. I., et al. Methane production through anaerobic co-digestion of tropical fruit biomass and urban solid waste. *Energy Reports*, 2020, vol. 6, p. 351-357. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.170>
66. RUBIO, J. A., et al. Start-up of the mesophilic anaerobic co-digestion of two-phase olive-mill waste and cattle manure using volatile fatty acids as process control parameter. *Fuel*, 2022, vol. 325, p. 124901. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124901>
67. SATHISH, S., et al. sAnaerobic co-digestion of canteen waste with cattle manure for methane production. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 37, p. 3446-3449. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.290>
68. SHEN, Jian, et al. Biogas production from anaerobic co-digestion of durian shell with chicken, dairy, and pig manures. *Energy Conversion and Management*, 2019, vol. 198, p. 110535. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.099>

69. SIDDIQUE, Md Nurul Islam; WAHID, Zularisam Ab. Achievements and perspectives of anaerobic co-digestion: A review. *Journal of cleaner production*, 2018, vol. 194, p. 359-371. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.155>.
70. Singh, P.K., Srichandan, H., Ojha, S.K. *et al.* Evaluation of biomethane potential of codigested sheep manure and kitchen refuse. *Biomass Conv. Bioref.* (2021). Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01961-5>.
71. SONG, Liuying, *et al.* Optimizing biomethane production of mesophilic chicken manure and sheep manure digestion: Mono-digestion and co-digestion kinetic investigation, autofluorescence analysis and microbial community assessment. *Journal of environmental management*, 2019, vol. 237, p. 103-113.
72. SCANO, Efsio Antonio, *et al.* An in-depth analysis of biogas production from locally agroindustrial by-products and residues. An Italian case. *Renewable Energy*, 2021, vol. 179, p. 308-318. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.050>
73. TASNIM, Farzana; IQBAL, Salma A.; CHOWDHURY, Aminur Rashid. Biogas production from anaerobic co-digestion of cow manure with kitchen waste and Water.
74. TRACY, Sarah J. Qualitative quality: Eight “big-tent” criteria for excellent qualitative research. *Qualitative inquiry*, 2010, vol. 16, no 10, p. 837-851. Disponible en: <https://doi.org/10.1177/1077800410383121>
75. TENA, Miriam; PEREZ, Montserrat; SOLERA, Rosario. Effect of hydraulic retention time on the methanogenic step of a two-stage anaerobic digestion system from sewage sludge and wine vinasse: Microbial and kinetic evaluation. *Fuel*, 2021, vol. 296, p. 120674. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120674>
76. VATS, Neelam; KHAN, Abid Ali; AHMAD, Kafeel. Anaerobic co-digestion of thermal pre-treated sugarcane bagasse using poultry waste. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2019, vol. 7, no 5, p. 103323. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103323>
77. XING, Bao-Shan, *et al.* Effects of long-term acclimatization on the optimum substrate mixture ratio and substrate to inoculum ratio in anaerobic codigestion



- of food waste and cow manure. *Bioresource Technology*, 2020, vol. 317, p. 123994. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123994>
78. XING, Bao-Shan, et al. Stable and high-rate anaerobic co-digestion of food waste and cow manure: Optimisation of start-up conditions. *Bioresource Technology*, 2020, vol. 307, p. 123195. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123195>
79. XU, Rong, et al. A critical review on the interaction of substrate nutrient balance and microbial community structure and function in anaerobic co-digestion. *Bioresource technology*, 2018, vol. 247, p. 1119-1127. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.095>
80. XIE, Sihuang, et al. Anaerobic co-digestion: A critical review of mathematical modelling for performance optimization. *Bioresource Technology*, 2016, vol. 222, p. 498-512. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.015>
81. WARE, Aidan; POWER, Niamh. Modelling methane production kinetics of complex poultry slaughterhouse wastes using sigmoidal growth functions. *Renewable Energy*, 2017, vol. 104, p. 50-59. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.045>
82. WANG, Yaya, et al. Effects of co-digestion of cucumber residues to corn stover and pig manure ratio on methane production in solid state anaerobic digestion. *Bioresource technology*, 2018, vol. 250, p. 328-336. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.055>
83. WIJESINGHE, Dona Thushari N., et al. Lignite addition during anaerobic digestion of ammonium rich swine manure enhances biogas production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, vol. 9, no 1, p. 104669. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104669>
84. ZAHAN, Zubayeda; OTHMAN, Maazuza Z.; MUSTER, Tim H. Anaerobic digestion/co-digestion kinetic potentials of different agro-industrial wastes: A comparative batch study for C/N optimisation. *Waste Management*, 2018, vol. 71, p. 663-674. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.014>
85. ZHANG, Jiaying, et al. Enhancing biogas production from livestock manure in solid-state anaerobic digestion by sorghum-vinegar residues. *Environmental Technology & Innovation*, 2022, p. 102276. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102276>

86. ZHAO, Shunan, et al. Anaerobic co-digestion of chicken manure and cardboard waste: Focusing on methane production, microbial community analysis and energy evaluation. *Bioresource Technology*, 2021, vol. 321, p. 124429. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124429>
87. ZHEN, Guangyin, et al. Anaerobic co-digestion on improving methane production from mixed microalgae (*Scenedesmus* sp., *Chlorella* sp.) and food waste: kinetic modeling and synergistic impact evaluation. *Chemical Engineering Journal*, 2016, vol. 299, p. 332-341. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.118>
88. ZHOU, Jialiang, et al. Meta-analysis of anaerobic co-digestion of livestock manure in last decade: Identification of synergistic effect and optimization synergy range. *Applied Energy*, 2021, vol. 282, p. 116128. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116128>

## ANEXOS

### ANEXO 1: Instrumento de recolección de datos

 <b>UCV</b> UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO	<b>FICHA DE ANALISIS DE CONTENIDO</b>
--	---

#### TITULO:

<b>BASE DE DATOS</b>	<b>AÑO DE PUBLICACION</b> <input type="text"/>	<b>LUGAR DE PUBLICACION</b> <input type="text"/>
----------------------	---	--

<b>TIPO DE INVESTIGACION:</b>	<b>AUTORES:</b>
<b>PALABRAS CLAVES:</b>	
<b>OBJETIVO:</b>	
<b>MODELO CINETICO :</b>	
<b>TIPO DE ESTIERCOL/ RESIDUO ORGANICO:</b>	
<b>RESULTADOS:</b>	
<b>CONCLUSIONES:</b>	