

# VALORIZACIÓN ENERGÉTICA Y AGRONÓMICA DE AGUAS RESIDUALES Y LODOS DE MATADEROS



**LAURA MELISSA BALLESTEROS ORJUELA**

**2024**



## UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

Se autoriza a la alumna **D<sup>a</sup>. Laura Melissa Ballesteros Orjuela**, a realizar el Trabajo Fin de Máster titulado: “Valorización energética y agronómica de aguas residuales y lodos de mataderos”, bajo la dirección de D<sup>a</sup> Montserrat Pérez García de la Universidad de Cádiz (profesora externa UMH), debiendo cumplir las normas establecidas para la redacción del mismo que están a su disposición en la página Web específica del Master.

Orihuela, 24 de mayo de 2024

La Directora del Máster Universitario de Investigación en Gestión, Tratamiento y Valoración de Residuos Orgánicos

Firmado digitalmente por  
CONCEPCION | PAREDES | GIL  
Fecha: 2024.06.26  
09:00:22 +02'00'

Fdo.: Concepción Paredes Gil

TRIBUNAL	
FECHA:	
PRESIDENTE:	FIRMA:
VOCAL:	FIRMA:
VOCAL:	FIRMA:

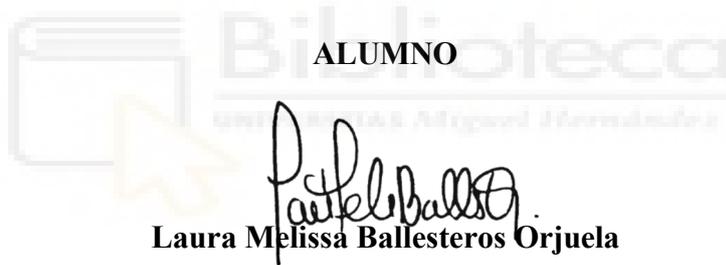


ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE ORIHUELA

Máster Universitario de Investigación en  
Gestión, Tratamiento y Valorización de Residuos Orgánicos



## Valorización energética y agronómica de aguas residuales y lodos de mataderos



ALUMNO

Laura Melissa Ballesteros Orjuela

Vº Bº DIRECTOR

Montserrat Pérez García

Curso 2023-2024

## REFERENCIAS DEL TRABAJO FIN DE MASTER

### IDENTIFICACIONES

**Autor:** Laura Melissa Ballesteros Orjuela

**Título:** Valorización energética y agronómica de aguas residuales y lodos de mataderos

**Title:** Energy and agronomic recovery of wastewater and slaughterhouse sludge

**Director/es del TFM:** Montserrat Pérez García

**Año:** 2024

**Titulación:** Máster en Gestión, Tratamiento y Valorización de Residuos Orgánicos

**Tipo de proyecto:** Experimental

**Palabras claves:** Co-digestión Anaerobia, Lodos de matadero, Biometano, Valorización energética

**Keywords:** Anaerobic co-digestion, Slaughterhouse sludge, Biomethane, Energy recovery

**Nº citas bibliográficas:** 19

**Nº de gráficos:** 16

**Nº de tablas:** 19

**Nº de figuras:** 14

**Nº de anexos:** 0

Este trabajo Fin de Máster forma parte del proyecto **PID2021-123174OB-I00**, financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER/UE.



Beca Master Universitario, Curso 2023 – 2024

## RESUMEN

En este estudio se realiza la co-digestión anaerobia de lodos (L) y vertido de matadero de cerdo (V) (Lodo:Vinaza, L:V) en una proporción 50:50, en dos digestores monoetapa de 2L de capacidad, en condiciones ideales termófilas (55°C) y mesófilas (35°C). Se hacen estudios variando los tiempos hidráulicos de retención de 30, 25 y 20 días con el fin de evaluar las mejores condiciones para garantizar la mayor generación de biogás (específicamente metano) así como una mayor eficacia en la remoción de la carga orgánica de los residuos de interés. Además, se ha estudiado el efecto de la adición de un cosustrato (vinaza de vino) a la alimentación, sobre la generación y rendimiento de metano. Para ello se ha añadido en ambos reactores mesofílico y termofílico, un 50% v/v de vinaza al sustrato Lodo:Vertido para obtener una alimentación (Lodo:Vertido:Vinaza, L:V:Vi) en una proporción 25:25:50 y se ha analizado la eficacia de eliminación de materia orgánica así como la generación y rendimiento de metano. Dentro de los principales resultados se obtuvo una producción de biometano entre 257 a 514 mL CH<sub>4</sub>/d para el sustrato L:V, y entre 191 y 413 mL CH<sub>4</sub>/d para el sustrato L:V:Vi, predominando las condiciones termofílicas. Sin embargo en cuanto a rendimiento, se obtuvo entre 0,190 y 0,296 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg DQO eliminada para el sustrato L:V, y entre 0,099 y 0,111 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg DQO eliminada para el sustrato L:V:Vi, predominando las condiciones mesofílicas en ambos casos. Para los cuatro digestatos se cumplen las condiciones de patógenos reguladas por la legislación para el uso agrícola. Sin embargo, la baja concentración final de nitrógeno, no lo hace un fertilizante agrícola de interés.

## ABSTRACT

In this study of anaerobic co-digestion of sludge (L) and pig slaughterhouse discharge (V) 50:50 is carried out in two single-stage digesters of 2L capacity, under ideal thermophilic (55°C) and mesophilic conditions (35°C) varying the hydraulic retention times of 30, 25 and 20 days, in order to evaluate the best conditions to guarantee the greatest generation of biogas, specifically methane, as well as efficiency in the removal of the organic load from the waste of interest, as well as the behavior in the generation of biomethane in two reactors by adding 50% v/v of wine wastes to the feed, that is, Sludge: Discharge: Wine Wastes (L:V:Vi), in a proportion of 25 :25:50, in two reactors, one thermophilic and the other mesophilic. Among the main results, biomethane production was obtained between 257 to 514 mL CH<sub>4</sub>/d for the L:V substrate, and between 191 and 413 mL CH<sub>4</sub>/d for the L:V:Vi substrate, thermophilic conditions predominating, however In terms of performance, between 0.190 and 0.296 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg COD removed for the L:V substrate was obtained, and between 0.099 and 0.111 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg COD removed for the L:V:Vi substrate, mesophilic conditions predominating in both. cases. For the four digestates, the pathogen conditions for agricultural use are met; however, the low final concentration of nitrogen does not make it an agricultural fertilizer of interest.

## INFORME DE EVALUACIÓN DE INVESTIGACIÓN RESPONSABLE DE 2. TFM (Trabajo Fin de Máster)

Elche, a 25 de octubre del 2023

Nombre del tutor/a	Montserrat Pérez García
Nombre del alumno/a	Laura Melissa Ballesteros Orjuela
Tipo de actividad	Sin implicaciones ético-legales
Título del 2. TFM (Trabajo Fin deMáster)	Valorización energética y agronómica de aguas residuales y lodos de mataderos
Código/s GIS estancias	No solicitado/No procede
<b>Evaluación Riesgos Laborales</b>	
Evaluación Etica	
Registro provisional	231024081747
<b>Código de Investigación Responsable</b>	<b>TFM.MGT.RSDR.LMBO.231024.</b>
Caducidad	2 años

Una vez atendidas las observaciones/condiciones mencionadas en el informe adjunto del Servicio de Prevención de Riesgos Laborales, en caso de que las hubiera, se considera que el presente proyecto/contrato/prestación de servicios carece de riesgos laborales significativos para las personas que participan en el mismo, ya sean de la UMH o de otras organizaciones y, por tanto, es conforme.

La necesidad de evaluación ética del trabajo titulado: **Valorización energética y agronómica de aguas residuales y lodos de mataderos** ha sido realizada en base a la información aportada en el formulario online: “TFG/TFM: Solicitud Código de Investigación Responsable (COIR)” y “Condiciones de prevención de riesgos laborales” (si procede). Es importante destacar que si la información aportada en dichos formularios no es correcta este informe no tiene validez.

Por todo lo anterior, se **autoriza** la realización de la presente actividad.

Atentamente,

## AGRADECIMIENTOS

*A Dios por darme la oportunidad de vivir esta experiencia de estudiar y vivir fuera de mi país por un largo periodo de tiempo, con todas las comodidades posibles para llevarlo a cabo con buena salud física y mental, y con excelentes resultados.*

*A mis padres Doris y Carlos, por el apoyo incondicional en este reto que asumí al salir de mi zona de confort, por sus amorosos consejos, su paciencia, y constante compañía, siempre guiándome a ser mejor que ayer. A mi hermano Sebastián, por motivarme a cumplir mis sueños pese lo que pese.*

*A Christiam Díaz, mi compañero de viaje, estudios y de vida, esencial para mí en toda esta experiencia.*

*A la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo - AECID, que me brindó la beca Máster Universitario, facilitando mi acceso al Máster, para mis estudios y bienestar durante todo este tiempo aquí en España.*

*A la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos de la Alcaldía de Bogotá - UAESP, por brindarme la comisión de estudios para poder estudiar en el exterior este Máster que aporta a la misión propia de la entidad.*

*A la Universidad de Cádiz, especialmente a mis Directoras Montserrat Pérez García y Rosario Solera del Río por brindarme un espacio para colaborar en su proyecto y así permitirme desarrollar mi TFM, con su acompañamiento técnico y emocional durante todo el proceso.*

*A la empresa Montesierra de Jerez, por facilitar los insumos de este estudio con los lodos y vertidos de matadero y al Instituto de Investigación Vitivinícola y Agroalimentaria/IVAGRO-UCA en las identificaciones.*

*A María Candel que, aunque llegó un poco antes de mi salida, me brindó una amistad sincera tal vez cuando más lo necesitaba, a quién le pido que no cambie nunca su esencia ni su sonrisa, porque, aunque los días parezcan grises, su personalidad le llevará a lugares inimaginables.*

*Y a las demás personas que me brindaron su apoyo con un cafelillo, unas galletitas, un abrazo y una sonrisa en toda mi estadía en Cádiz, mil gracias.*

## ÍNDICE

1.	ANTECEDENTES .....	1
1.1	CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS Y LODOS DE MATADERO.....	2
1.2	EFFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE MATADERO .....	6
1.3	PRETRATAMIENTOS DE LOS LODOS Y RESIDUOS DE MATADERO .....	7
1.4	POTENCIAL VALORIZACIÓN AGRONÓMICA DE LOS RESIDUOS DE MATADERO .....	8
2	OBJETIVOS.....	10
3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	10
3.1	SUSTRATOS E INÓCULO UTILIZADOS .....	10
3.2	REACTORES UTILIZADOS. ....	14
3.3	ENSAYOS EXPERIMENTALES EN REACTORES OPERADOS EN SEMICONTINUO.....	14
3.4	MÉTODOS ANALÍTICOS.....	15
3.4.1	pH .....	16
3.4.2	Demanda química de oxígeno (DQO) total y soluble .....	17
3.4.3	Sólidos totales y volátiles (ST y SV).....	19
3.4.4	Ácidos grasos volátiles (AGV) .....	20
3.4.5	Volumen y composición del biogás .....	21
3.4.6	Nitrógeno Total.....	22
3.4.7	Relación C/N.....	23
3.4.8	Microorganismos patógenos .....	23
4	RESULTADOS Y DISCUSION .....	26
4.1	Resultados de los experimentos individualmente .....	26
4.1.1	Experimento 1. Efecto del tiempo hidráulico de retención en condiciones termofílicas para el sustrato L:V.....	26
4.1.2	Experimento 2. Efecto del tiempo hidráulico de retención en condiciones mesofílicas para el sustrato L:V. ....	30
4.1.3	Experimento 3. Efecto del tiempo hidráulico de retención en condiciones termofílicas para el sustrato L:V:Vi.....	34

4.1.4	Experimento 4. Efecto del tiempo hidráulico de retención en condiciones mesofílicas para el sustrato L:V:Vi.....	38
4.2	Análisis del efecto de la temperatura para el mismo sustrato .....	42
4.2.1	Efecto de la temperatura, con el sustrato L:V .....	42
4.2.2	Efecto de la temperatura, con el sustrato L:V:Vi .....	44
4.3	Análisis de la co-digestión de los lodos y vertido de matadero con la vinaza. ....	46
4.4	Análisis de viabilidad de aprovechamiento del digestato para uso agrícola .....	48
5	CONCLUSIONES.....	49
6	BIBLIOGRAFIA .....	51



## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización de los sustratos utilizados.....	11
Tabla 2. Caracterización de la alimentación L:V.....	11
Tabla 3. Caracterización del sustrato Vinaza.....	12
Tabla 4. Caracterización del sustrato L:V:Vi .....	12
Tabla 5. Contenido de Nitrógeno, Carbono y relación C/N de los sustratos L:V y L:V:Vi.....	13
Tabla 6. Caracterización del inóculo .....	13
Tabla 7. Datos de operación del reactor termofílico con sustrato L:V.....	26
Tabla 8. Datos de depuración del reactor termofílico con sustrato L:V.....	27
Tabla 9. Datos de operación del reactor mesofílico con sustrato L:V.....	31
Tabla 10. Datos de depuración del reactor mesofílico con sustrato L:V .....	32
Tabla 11. Datos de operación del reactor termofílico con sustrato L:V:Vi .....	35
Tabla 12. Datos de depuración del reactor termofílico con sustrato L:V:Vi .....	36
Tabla 13. Datos de operación del reactor mesofílico con sustrato L:V:Vi .....	39
Tabla 14. Datos de depuración del reactor mesofílico con sustrato L:V:Vi .....	40
Tabla 15. Producción y rendimiento de CH <sub>4</sub> en rango termofílico y mesofílico para L:V	43
Tabla 16. Producción y rendimiento de CH <sub>4</sub> en rango termofílico y mesofílico para L:V:Vi	44
Tabla 17. Producción y rendimiento de CH <sub>4</sub> para los dos sustratos en condiciones termofílicas	46
Tabla 18. Producción y rendimiento de CH <sub>4</sub> para los dos sustratos en condiciones mesofílicas	47
Tabla 19. Contenido de nitrógeno en el digestato final y la relación C/N .....	49

## LISTADO DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Rendimiento del reactor con L:V a 55°C para cada THR.....	27
Gráfico 2. Comportamiento DQO en reactor L:V a 55°C .....	28
Gráfico 3. Comportamiento de AGV en reactor L:V a 55°C.....	29
Gráfico 4. Rendimiento del reactor reactor con L:V a 35 °C para cada THR.....	31
Gráfico 5. Comportamiento DQO en reactor L:V a 35°C .....	33
Gráfico 6. Comportamiento de AGV en reactor L:V a 35°C.....	33
Gráfico 7. Rendimiento del reactor con L:V:Vi a 55 °C para cada THR.....	35
Gráfico 8. Comportamiento DQO en reactor L:V:Vi a 55°C .....	37
Gráfico 9. Comportamiento de AGV en reactor L:V:Vi a 55°C.....	37
Gráfico 10. Rendimiento del reactor con L:V:Vi a 35 °C para cada THR.....	39
Gráfico 11. Comportamiento DQO en reactor L:V:Vi a 35°C .....	41
Gráfico 12. Comportamiento de AGV en reactor L:V:Vi a 35°C.....	41
Gráfico 12. Comparación del rendimiento de producción de CH <sub>4</sub> para condiciones de 55°C y 35°C con L:V .....	44
Gráfico 14. Comparación del rendimiento de producción de CH <sub>4</sub> para condiciones de 55°C y 35°C con L:V:Vi.....	45
Gráfico 15. Comparación del rendimiento de producción de CH <sub>4</sub> para los sustratos L:V y L:V:Vi, en condiciones termofílicas.....	47
Gráfico 16. Comparación del rendimiento de producción de CH <sub>4</sub> para los sustratos L:V y L:V:Vi, en condiciones mesofílicas.....	48

## LISTADO DE IMÁGENES

<i>Imagen 1. Reactores utilizados para el experimento .....</i>	<i>14</i>
<i>Imagen 2. Métodos analíticos implementados .....</i>	<i>16</i>
<i>Imagen 3. Equipo portátil Hach SensION+ PHI – pHmetro .....</i>	<i>16</i>
<i>Imagen 4. Campana de reactivos químicos para la DQO.....</i>	<i>17</i>
<i>Imagen 5. Termo reactor, viales con resultado y equipo de medición de absorbancia.....</i>	<i>18</i>
<i>Imagen 6. Crisoles con muestra de efluente para introducir en la estufa .....</i>	<i>19</i>
<i>Imagen 7. Cromatógrafo de masas para determinación de AGV's.....</i>	<i>21</i>
<i>Imagen 8. Metanómetro – BIOGAS 5000 Geotech.....</i>	<i>22</i>
<i>Imagen 9. Bandejas Multipocillo Quanti Tray/2000 .....</i>	<i>25</i>
<i>Imagen 10. Placas con Agar de Xilosa-Lisina-Desoxicolato .....</i>	<i>25</i>
<i>Imagen 11. Bandejas Multipocillo con Muestras <math>T_1</math> y <math>T_2</math>.....</i>	<i>30</i>
<i>Imagen 12. Bandejas Multipocillo Muestras mesofílicas .....</i>	<i>34</i>
<i>Imagen 13. Placas para Salmonella sp con muestras <math>T_1</math>, <math>M_1</math>, <math>T_2</math> y <math>M_2</math>.....</i>	<i>38</i>
<i>Imagen 14. Determinación de presencia de Escherichia Coli en lámpara UV .....</i>	<i>42</i>



## ACRÓNIMOS

**AGV:** Ácidos grasos volátiles

**AGCL:** Ácidos grasos de cadena larga

**BPM:** Potencial de biometanización

**CH<sub>4</sub>:** Metano

**C/N:** Carbono / Nitrógeno

**CO:** Monóxido de carbono

**CO<sub>2</sub>:** Dióxido de carbono

**DQO:** Demanda Química de Oxígeno

**EDAR:** Estación depuradora de aguas residuales

**EPSs:** Sustancias poliméricas extracelulares solubles

**H<sub>2</sub>:** Hidrógeno

**H<sub>2</sub>S:** Sulfuro de hidrógeno

**OLR:** Tasa de carga orgánica

**O<sub>2</sub>:** Oxígeno

**PTAR:** Planta de tratamiento de aguas residuales

**SST:** Sólidos suspendidos totales

**SSV:** Sólidos suspendidos volátiles

**SV:** Sólidos volátiles

**SM:** Masa esterilizada

**TAC:** Capacidad de compensación alcalina

**THR:** Tiempo hidráulico de retención

**RPM:** Revoluciones por minuto

**NH<sub>4</sub><sup>+</sup>:** Ion Amonio

**NH<sub>3</sub>:** Amoníaco

**NMP:** Número más probable

**NT:** Nitrógeno Total

**UFC:** Unidades formadoras de colonias

## 1. ANTECEDENTES

Debido a la industrialización de la industria cárnica a nivel mundial, se están generando grandes cantidades de residuos sólidos y líquidos en los procesos de matanza, despiece y limpieza que se realizan en los mataderos. Se promedia que el 25% del peso del animal se lleva a vertedero como inservible debido a su alta carga orgánica e infecciosa. Dentro de los residuos, se contabilizan desde animales enteros, partes y sustancias compuestas por grasa, pelo, sangre, entre otros. Asimismo, de la actividad de lavado se generan grandes cantidades de aguas residuales para las cuales han implementado sistemas de tratamiento que, a su vez, generan lodos con bastante carga orgánica, sólidos suspendidos y sustancias más complejas como proteínas y lípidos. En este sentido, el consumo de aguas es bastante elevado en las operaciones de limpieza, lavado, corte, despacho, deshuesado en los mataderos. Estas aguas residuales se caracterizan por contener altas concentraciones de DQO y oxígeno bioquímico, carbono orgánico total, nitrógeno total, SST y fósforo total. (Granada et al., 2018), siendo los procesos de digestión anaerobia especialmente indicados para la gestión y valorización de este tipo de residuos de naturaleza orgánica.

En la literatura se encuentra que la mayor parte de estudios de digestión anaerobia se han realizado con los residuos sólidos de la matanza donde incluyen intestinos, tejidos cárnicos, sangre, piel, cerdas (pelo), los cuales son higienizados en cumplimiento de la normativa europea con altas temperaturas y presión para, posteriormente, ser triturados y en diferentes composiciones analizando su potencial de biometanización y digestión anaerobia en reactores semicontinuos. La alta DQO, alta DBO y alto contenido de humedad de estos residuos hacen que sean ideales para la digestión anaeróbica. (Granada et al., 2018)

Asimismo, se ha referenciado que la monodigestión de estos residuos presenta un alto riesgo de inhibición de la actividad metanogénica debido a la acumulación de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y ácidos grasos volátiles (AGV) como de ácidos grasos de cadena larga (AGCL) que se generan en las primeras fases de descomposición, siendo una etapa limitante para su implementación en la escala industrial. Otros estudios han demostrado que la co-digestión con otros residuos permite una mayor estabilidad del proceso. Los residuos de matadero han sido utilizados en cogestión con estiércol de cerdo, desechos de frutas y

verduras, fracción orgánica de desechos municipales, residuos sólidos, residuos farmacéuticos, residuos de alimentos. (Borowski & Kubacki, 2015). Así, se puede alcanzar un mejor balance de macro y micronutrientes, consorcios microbianos más robustos, relación C/N más equilibrada, mejor capacidad de amortiguación, dilución de inhibidores, mejor carga orgánica y por ende mejor rendimiento en la producción de biogás (Salehiyoun et al., 2020).

Respecto a los lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de los mataderos, debido a su alta carga orgánica se comporta como un sustrato de gran interés para la generación de biometano. Sin embargo, se ha evidenciado que la etapa limitante para la digestión anaerobia de estos es la hidrólisis, puesto que aproximadamente el 80% de la materia orgánica del lodo de matadero está contenida en compuestos como proteínas, carbohidratos, lípidos y AGVs. Las paredes celulares protegen a las proteínas y carbohidratos de la hidrólisis enzimática, y los polímeros de alto peso molecular impactan en la sedimentación, biofloculación, tamaño y estabilidad de los lodos. Se estima que en condiciones normales se necesitan de 20 a 30 días para que del 30 al 50% de los sólidos volátiles del crudo se descompongan. (Siddiqui et al., 2023)

Por lo anterior, surge la necesidad de estudiar el proceso de codigestión anaerobia de estos residuos con el fin de reducirlos y evaluar alternativas que sean más económicas para su gestión. Interesa, por tanto, estudiar el potencial de las diferentes mezclas de residuos para producir biometano por medio de digestión anaerobia. El estudio del potencial de biometanización se realiza en ensayos discontinuos, y posteriormente, la optimización del proceso se lleva a cabo en reactores semicontinuos con diferentes mezclas y condiciones de operación.

## **1.1 CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS Y LODOS DE MATADERO**

Dentro de los estudios de investigación relacionados, se evidencia en mayoría el tratamiento anaeróbico de residuos sólidos y semisólidos de matadero por separado y en codigestión con lodos de depuradora, en reactores semicontinuos y en su mayoría en condiciones mesofílicas (35 – 37 °C). Los resultados evidencian que estos residuos de

matadero son una buena alternativa para la producción de metano, y aún más cuando se realiza codigestión, ya que se valorizan y potencian otro tipo de residuos como es el caso de los lodos de EDAR u otros subproductos de la agroindustria. En concreto, según investigaciones anteriores, la codigestión con este tipo de residuos aumenta la generación de metano en comparación por ejemplo con un reactor que solamente se alimenta con lodo EDAR. Sin embargo, a partir de tasas de alimentación como  $3,55 \text{ kg SV/m}^3 \cdot \text{d}$  y  $0,25 \text{ kg NT/m}^3 \cdot \text{d}$  se empieza a evidenciar inestabilidad y reducción en la producción de metano posiblemente por aumento de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), acumulación de ácidos grasos de cadena larga (AGCL), entre otros. (Pitk et al., 2013) indicó que la tasa de carga orgánica (OLR) óptima fue de  $2,68 \text{ kg SV/m}^3 \cdot \text{d}$  con una producción de  $618,9 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t SV}$ .

Borowski estudia la codigestión de lodos de depuradora combinados con residuos de matadero en 50% en peso, y reporta un rendimiento superior a  $0,600 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$  y que el proceso empieza a inhibirse al superar la carga de  $4 \text{ kg SV/m}^3 \cdot \text{d}$ , sin desestabilizarse. Asimismo, OLR de 2,98 y  $3,97 \text{ kg SV/m}^3$  (20 y 15 días de THR, respectivamente), mejora la digestión con un aumento del rendimiento de 0,611 a  $0,750 \text{ m}^3/\text{Kg SV}$ , con producciones de metano entre  $0,473$  y  $0,560 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$ , con un porcentaje de depuración de SV entre el 61,3 y el 57%. (Borowski & Kubacki, 2015)

Seguido a lo anterior, con OLR de 3,10 y  $4,10 \text{ kg SV/m}^3$ , se demostró mayor eficiencia de digestión y eliminación de SV a un THR de 20 días. El rendimiento y la producción de biogás y metano aumentó a  $0,893 \text{ m}^3/\text{kg SV}$  y  $0,609 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$  y la eliminación de SV alcanzo un 62,2%. Por el contrario, con THR de 15 días y ORL de  $4,10 \text{ kg SV/m}^3 \cdot \text{d}$ , se evidenció la inhibición de biogás ligeramente por presencia de  $\text{NH}_3$  ( $2000\text{-}29000 \text{ gN/m}^3$ ) y AGV ( $1900\text{-}5550 \text{ g/m}^3$ ). (Borowski & Kubacki, 2015)

Adicionalmente, Hernández en su tesis doctoral, demostró que un alto caudal de alimentación cercano al caudal de inhibición ( $537 \text{ ml/d}$  en un THR de 12 días) genera la mayor cantidad de metano ( $0,527 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg DQO}$ ), aunque el menor tiempo de retención supone una mayor DQO en el efluente. (Hernández, 2016)

También Hernández realiza un experimento de codigestión de residuos de matadero (80%) con suero lácteo (20%). Los resultados muestran la comparación de datos para el tratamiento biológico y la producción de biogás, que indican que el mayor rendimiento se logra obteniendo una producción de  $750 \text{ ml/h}$  para una tasa de alimentación de 350

mL/d. Por lo tanto, este autor concluye que es más rentable la codigestión de residuos de matadero con los sueros lácteos en términos de valorización energética, favoreciéndose la fase metanogénica, aumentando la relación C/N y provocando un aumento considerable en la producción de biogás. En términos de rendimiento, Hernández presentó datos importantes como  $1.089 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg DQO}$ , que se traducen en  $0,2116 \text{ kWh/d}$ , comparado con  $0,0805 \text{ kWh/d}$  en el caso de codigestión única de residuos de matadero. (Hernández, 2016)

Por tanto, la capacidad de generar biogás por parte de los residuos de mataderos es mayor que a partir de otros residuos animales (estiércol animal) estimando una producción de  $120\text{-}160 \text{ m}^3$  de biogás por tonelada de residuos. El biogás se compone principalmente de  $60\%$  de  $\text{CH}_4$ ,  $35\text{-}40 \%$  de  $\text{CO}_2$  y una pequeña proporción de otros gases. (Granada et al., 2018)

Asimismo, la Universidad de Cádiz ha adelantado investigaciones sobre el potencial de biometanización de las aguas de matadero en co-digestión con grasas y aceites, en ensayos discontinuos, mostrando una biodegradabilidad de  $66\text{-}70\%$  de DQO removida y producciones específicas de biometano de  $0,56$  y  $0,77 \text{ L CH}_4/\text{g DQO}$  eliminada, respectivamente. (Agabo-García et al., 2020). No obstante, otros estudios de valorización de lodos de matadero en codigestión con las aguas residuales de la misma industria en ensayos batch y diferentes THR, arrojan producciones de metano y rendimientos menores, entre  $0,31 \pm 0,03 \text{ L CH}_4/\text{g DQOt}$  y  $0,51 \pm 0,06 \text{ L CH}_4/\text{g SVT}$  con porcentajes de eliminación comprendida entre  $16$  y  $22\%$  para DQO y entre  $47$  y  $34\%$  para SVT. (Agabo-García et al., 2022)

Adicionalmente, otro estudio similar arrojó resultados experimentales interesantes donde la mejor OLR fue entre  $1,16$  a  $2,16 \text{ kg/m}^3\cdot\text{d}$ , con eliminación del  $87,8\%$  de DQO y una tasa de producción de metano de  $0,23 \text{ L CH}_4/\text{L digester}\cdot\text{d}$  y una OLR superior a  $2,88 \text{ kg/m}^3\cdot\text{d}$ , provocó la desestabilización del biorreactor. El porcentaje de metano en el biogás fue superior al  $73\%$ . Un aumento de carga superior a  $4,27 \text{ kg/m}^3$  supone una reducción drástica en la producción de biometano y desestabilización del experimento. (Ripoll et al., 2023)

En conclusión, a partir de la bibliografía consultada se recogen datos de interés tanto para las tasas de carga orgánicas óptimas en los procesos de codigestión anaerobia de residuos

de matadero con lodos de EDAR por el rango de  $2,68 \text{ kg SV/ m}^3 \cdot \text{d}$  a  $3,97 \text{ kg SV/ m}^3 \cdot \text{d}$  así como las OLR que desestabilizan o inhiben el proceso, entre  $3,55 \text{ kg SV/ m}^3 \cdot \text{d}$  y  $4,10 \text{ kg SV/ m}^3 \cdot \text{d}$ . Respecto a la producción de metano se evidenciaron rangos entre  $0,473$  y  $0,619 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$ , en diferentes condiciones operativas (tasas de alimentación y THR). En cuanto a rendimientos se evidenciaron rangos entre  $0,611$  y  $0,893 \text{ m}^3/\text{kg SV}$ , y en el caso especial de codigestión con suero lácteo por un valor de  $1,089 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg DQO}$ . Los porcentajes de remoción se encuentran entre  $55\%$  y  $62,2\%$  para DQO, específicamente.

Para el caso de residuos de matadero únicamente (sólidos y líquidos), se encontraron rendimientos de  $0,527 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg DQO}$ , así como también entre lodos y aguas residuales de matadero la mejor OLR estuvo entre  $1,16$  a  $2,16 \text{ kg/ m}^3 \cdot \text{d}$ , siendo  $2,88 \text{ kg/ m}^3 \cdot \text{d}$ , desestabilizante para el proceso; con una producción de metano de  $0,23 \text{ CH}_4/\text{L digestor} \cdot \text{d}$ , es decir, entre  $0,31 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg DQO}$  y  $0,51 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$ , con porcentajes de remoción entre  $16$  y  $22\%$  para DQO y entre  $47$  y  $34\%$  para SVT.

En el presente estudio se ha seleccionado, como sustrato de codigestión, un vertido biodegradable de gran interés en la zona de Jerez, como es la vinaza de vino, aportando alta carga orgánica soluble a la mezcla de lodos y vertidos de matadero.

Por su parte la vinaza, es uno de los principales residuos líquidos producidos por la industria vinícola a partir del proceso de destilería, donde su manejo es una gran preocupación medioambiental. En España, se conocen cifras de producción de vino de  $35,8$  millones de hectolitros “hL” al año (2022), y específicamente en la provincia de Cádiz con aproximadamente  $178$  bodegas (ubicadas cerca de la ciudad de Jerez en su mayoría) que generan aproximadamente entre  $500.000$  y  $700.000$  hL de vino al año. La producción de vinaza se estima entre  $0,7$  y  $14$  L por cada litro de vino producido y se caracteriza por tener una alta carga orgánica, con valores aproximados de DQOt entre  $20$  y  $40$  g/L, y contaminantes recalcitrantes como los polifenoles, melanoidinas, fertilizantes, pesticidas, entre otros. (Zahedi et al., 2020)

## 1.2 EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE MATADERO

La temperatura es un factor importante en los procesos de digestión anaerobia, pudiéndose desarrollar en diferentes rangos: mesofílico (25 – 45 °C), termofílico (45 – 70 °C) e hipertermofílico (superior a 70 °C). Estudios reportan que el incremento de la temperatura da lugar a un aumento en las reacciones de los procesos biológico como es la tasa de crecimiento de los microorganismos, favoreciendo el uso de cargas orgánicas más altas en los reactores. Además, el incremento de la temperatura produce la reducción de los tiempos de retención, mayor producción de biogás y aumento de la velocidad de las reacciones bioquímicas (Yepez, 2017). Sin embargo, los procesos biológicos dependen de la velocidad de crecimiento de microorganismos responsables, que a su vez dependen de la temperatura; asimismo, al aumentar la temperatura también aumenta la solubilidad de sales y, en caso de compuestos tóxicos, puede provocar la inhibición de determinados compuestos orgánicos como los AGCL. (Campos A, 2001) Adicionalmente, a mayor temperatura puede favorecer la producción de  $\text{NH}_3$ , desestabilizando el proceso y/o inhibiendo la actividad metanogénica, además de requerir mayor demanda energética para mantener las condiciones termofílicas. (Chae et al., 2008)

Hernández (2016) evalúa el efecto de la temperatura en rangos mesófilos entre 36, 37, 38 y 40 °C, donde se evidencia en los resultados finales que a mayor temperatura la DQO final es menor, y el volumen de producción de biogás es mayor, incluyendo el porcentaje de metano. Es decir, que a mayor temperatura hay un mayor rendimiento energético y una mayor degradación orgánica, y disminuye la acidez y la alcalinidad, debido a que aumenta la actividad metanogénica y, en consecuencia, crece la población microbiana (SSV). Entre los datos de generación de metano se tienen que para el rango de temperatura estudiado se inicia con  $0,465 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg DQO}$  en 36°C y para 40 °C alcanza  $0,635 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg DQO}$ . Sin embargo, desde el punto de vista de balance energético el autor indica que a medida que se acercan al régimen termofílico el control de la biodigestión es más difícil, haciendo más difíciles las condiciones de la planta y aumentando considerablemente el gasto económico en este apartado. (Hernández, 2016)

Por lo anterior, varios estudios concluyen que la digestión anaerobia es estable en rangos mesofílicos conllevando tiempos de retención más extensos. No obstante, el rango termofílico, sin inhibidores, puede determinar una mayor producción de biogás, así como un mejor rendimiento del sistema.

En el presente trabajo se va a llevar a cabo un estudio comparativo del proceso de codigestión anaerobia de vertidos y lodos de matadero en rangos de operación mesofílico y termofílico.

### **1.3 PRETRATAMIENTOS DE LOS LODOS Y RESIDUOS DE MATADERO**

Entre los pretratamientos a los residuos de matadero se han implementado la higienización con esterilización con vapor a 133 °C y 4 bar durante 20 minutos. Estas condiciones mejoran la eficiencia de eliminación de SV y aumentan la producción de metano. (Salehiyoun et al., 2020)

Adicionalmente, se ha evidenciado la implementación de tecnologías de pretratamiento como la termoalcalina, la ultrasónica Fenton, la electroquímica y el hipoclorito de sodio, Foto-Fenton y microondas-ozono. Estos pretratamientos provocan la ruptura de los flóculos del lodo, destruyendo las paredes celulares microbianas y transfiriendo las sustancias poliméricas extracelulares y materia orgánica a la fracción soluble de los desechos, acelerando la etapa de hidrólisis de lodos y solubilizando partículas complicadas. La oxidación Fenton se ha utilizado para aumentar la generación de biogás, la deshidratación de lodos y la reducción de su peso. (Siddiqui et al., 2023)

En el año 2023, la Universidad Musulmana de Aligarh en India, realizó un estudio de pretratamiento y digestión de los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales de un matadero de ganado. El pretratamiento utilizado fue el electro-fenton para solubilizar la materia orgánica y mejorar la producción de biogás en la digestión anaerobia. En concreto, el pretratamiento se realiza para aumentar la disponibilidad de los componentes del sustrato para las enzimas microbianas y, como consecuencia, mejorar la eliminación de los componentes del sustrato, mejorando la cinética de la reacción y aumentando la generación total del biogás.

El resultado del pretratamiento efectivo demuestra que aumentan las concentraciones de DQO soluble y sustancias poliméricas extracelulares solubles “EPSs”, y disminuye la concentración de Sólidos Suspendidos Volátiles “SSV”.

En la aplicabilidad de este pretratamiento, un lodo crudo procedente de un matadero de búfalos en el ensayo de BPM se obtuvo que el lodo sin pretratar presenta una etapa de retraso al inicio del proceso produciendo aproximadamente 110 mL/g-SV, mientras que el lodo pretratado con Electro-Fenton no tuvo retraso al comienzo y produjo 460 NmL/g-TS de biogás. Asimismo, se evidenció que el 90% del biogás para el lodo crudo se produjo en los 21 días, y para los lodos pretratados en 15 días. La eficiencia máxima de eliminación de SSV fue del 68,1%. (Siddiqui et al., 2023)

También se ha evidenciado en la mayoría de los estudios mencionados en el apartado anterior que realizan la trituración de los residuos de matadero con el fin de reducir el tamaño de partícula, lo que facilita el proceso de mezcla y por ende la hidrólisis inicial para la descomposición de las sustancias más complejas. Por ejemplo, triturando los residuos de matadero hasta alcanzar un tamaño de partícula de 6 mm, y un porcentaje de sólidos totales (%) y sólidos volátiles (% SV/TS) entre un 25,6% y 96,6% respectivamente. (Salehiyoun et al., 2020)

Por su simplicidad y buenos resultados, los residuos de matadero del presente estudio se van a someter a este tratamiento de trituración.

#### **1.4 POTENCIAL VALORIZACIÓN AGRONÓMICA DE LOS RESIDUOS DE MATADERO**

En el año 2019, la Universidad politécnica de Cataluña en Barcelona realizó una investigación relacionada con la valorización agronómica de los lodos depurados procedentes de un matadero de porcino, debido a su alto potencial contaminante y tóxico que se ha venido evidenciando, determinando el grado de estabilidad y el potencial agronómico de estos lodos. Del estudio los resultados indicaron que, en las condiciones estudiadas, los lodos de matadero no cumplen con los requisitos de estabilidad según la normatividad y que, en cuanto al crecimiento o desarrollo vegetal de las plantas, no tienen gran incidencia. (Palacios. A et al., 2019)

Sin embargo, en uno de los estudios señalados se evidencia que en el digestato producto de la digestión anaerobia de residuos de matadero aumenta la concentración de Nitrógeno total ( $2450 \text{ g N/m}^3$ ) comparado con la mono digestión de lodos de depuradora ( $1560 \text{ g N/m}^3$ ). El sustrato crudo de lodos de depuradora contenía  $3,77 \text{ g N/kg}$ , mientras que con los residuos de matadero aumentó a  $5,76 \text{ g/kg}$ . (Borowski & Kubacki, 2015)

La posibilidad de utilización agronómica de estos efluentes viene determinada por la ausencia de determinados microorganismos patógenos en ellos. De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), se establece un valor límite para la presencia de coliformes fecales y *Salmonella sp.*

- ✓ **Biosólidos clase A:** Se considera solido clase A aquellos biosólidos que tengan una densidad de coliformes fecales menor a  $1.000 \text{ NMP/ g ST}$ , o tener una densidad de *salmonella sp.* menor a  $3 \text{ NMP / 4 g ST}$ , tener un contenido de huevos de helmintos viable menor a  $1 / 4 \text{ g de ST}$ . (EPA, 1994)
- ✓ **Biosólidos clase B:** Se consideran solido clase B aquellos biosólidos que contengan una densidad de coliformes fecales inferior a  $2 \times 10^6 \text{ NMP /g ST}$  o  $2 \times 10^6 \text{ UFC /g de ST}$ . Este tipo de biosólidos deberá recibir tratamiento y será el que mayores restricciones presente para uso agrícola. (EPA, 1994)

A su vez, el Reglamento (UE) 2019/1009 del 5 de junio de 2019, el parlamento europeo establece que la densidad de *Escherichia Coli* no debe superar el límite de  $1000 \text{ UFC/g ST}$  y la *Salmonella sp* debe estar ausente en  $25 \text{ g o ml}$  de muestra en un fertilizante orgánico.

En el presente estudio vamos a comprobar que el rango termofílico de operación permite reducir los valores de los patógenos hasta niveles adecuados para su aprovechamiento con fines agronómicos.

## 2 OBJETIVOS

El objetivo general del presente trabajo es evaluar la potencial valorización energética y agronómica de subproductos y lodos de matadero mediante codigestión anaerobia para la obtención de metano y otros productos finales de valor añadido. Este objetivo general se desglosa en diferentes objetivos parciales:

- Analizar el efecto de la temperatura (mesofílica y termofílica) sobre el comportamiento de digestores anaerobios para la codigestión de lodos y vertidos de matadero.
- Evaluar el efecto de la adición de un cosustrato (vinaza de vino) sobre el comportamiento de los digestores anaerobios operando en condiciones mesofílicas y termofílicas para la codigestión de lodos y vertidos de matadero.
- Analizar la viabilidad de aprovechamiento de los digestatos para uso agrícola

## 3 MATERIALES Y MÉTODOS

Para dar respuesta a los objetivos planteados, se desarrollan diferentes estudios de codigestión anaerobia en reactores monoetapa con flujo semicontinuo, en dos condiciones de temperatura.

### 3.1 SUSTRATOS E INÓCULO UTILIZADOS

Los sustratos utilizados proceden de la empresa Monte Sierra ubicada en Jerez de la Frontera, Andalucía, España. El vertido de la empresa y el lodo generado en el sistema de tratamiento de aguas residuales industriales del matadero de porcinos son los sustratos principales del presente estudio. Las características de los dos sustratos se relacionan en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización de los sustratos utilizados.

<b>Parámetro</b>	<b>Vertido</b>	<b>Lodo</b>
pH	6,85	7,75
Demanda Química de Oxígeno Total - DQOt (g/L)	4,55	127,14
Demanda Química de Oxígeno Soluble – DQOs (g/L)	1,31	12,06
Sólidos Suspendidos Totales SST - (g/L)	1,17	125,62
Sólidos Volátiles - SV (g/L)	0,48	97,73

Fuente: Propia, 2024

Como puede observarse en la Tabla 1, ambos residuos tienen un pH adecuado para el proceso de digestión anaerobia. El lodo aporta mayor contenido en DQOt y DQOs, además de presentar un alto contenido en SST y SSV frente al vertido, con gran contenido en material inorgánico, aproximadamente 28 g/L.

A partir del test BMP donde la mejor relación entre vertido y lodo de matadero para la producción de CH<sub>4</sub> fue 50:50 V/V (Ripoll et al., 2023), para el presente estudio se decidió utilizar la misma relación 50:50 en volumen Lodo:Vertido (L:V), y como pretratamiento se realiza la trituración con el fin de homogenizar y minimizar el tamaño de partícula, de tal forma que facilite un poco la hidrólisis en el proceso de digestión anaerobia. Las características del sustrato mezclado y triturado son:

Tabla 2. Caracterización de la alimentación L:V

<b>Parámetro / Unidad</b>	<b>L:V</b>
Ph	7,48
Demanda Química de Oxígeno Total (DQOt) – g/L	47,59
Demanda Química de Oxígeno Soluble (DQOs) – g/L	5,59
Sólidos Suspendidos Totales (g/L)	57,68
Sólidos Volátiles (g/L)	46,78

Fuente: Propia, 2024

La mezcla de vertido y lodo proporciona un valor de pH (7,48) muy adecuado para los procesos de digestión anaerobia en rango mesofílico y termofílico. Asimismo, el vertido diluye la alta carga orgánica del lodo hasta valores de 47,6 gDQOt/L y 5,6 gDQOs/L y el contenido en sólidos a 46,8 g/L, favoreciendo sus características para la digestión anaerobia húmeda.

Otro sustrato adicional que se utilizó en el experimento fue la vinaza, como subproducto de la industria vitivinícola del tratamiento de las aguas residuales.

Tabla 3. Caracterización del sustrato Vinaza

<b>Parámetro</b>	<b>Vinaza</b>
Ph	3,13
Demanda Química de Oxígeno Total (DQOt) – g/L	28,69
Demanda Química de Oxígeno Soluble (DQOs) – g/L	27,79
Sólidos Suspendidos Totales (g/L)	12,96
Sólidos Volátiles (g/L)	10,30

Fuente: Propia, 2024

Como se observa en la Tabla, la vinaza presenta un pH muy ácido (3,13) no adecuado para procesos de digestión anaerobia. Asimismo, presenta una DQOt del orden de 28,7 g/L, de la cual la mayor parte es soluble (27,8 g/L). Asimismo, el contenido en sólidos es bajo, siendo la mayor parte de naturaleza orgánica o volátil (10,3g/L).

Se realizó la mezcla 50:50 con el sustrato de L:V, obteniendo una mezcla de 25:25:50 Lodo:Vertido:Vinaza (L:V:Vi). A continuación, se detalla la caracterización de la mezcla.

Tabla 4. Caracterización del sustrato L:V:Vi

<b>Parámetro</b>	<b>L:V:Vi</b>
pH	7,4
Demanda Química de Oxígeno Total (DQOt) – g/L	45,65
Demanda Química de Oxígeno Soluble (DQOs) – g/L	14,23
Sólidos Suspendidos Totales (g/L)	40,77
Sólidos Volátiles (g/L)	33,89

Fuente: Propia, 2024

La muestra L:V:Vi presenta alta carga orgánica 45,65 gDQOt/L, de la cual solo el 31% es soluble (14,23 gDQOs/L). Por otro lado, presenta un elevado contenido en ST, de los cuales el 83% son volátiles (33,9 gSV/L).

Por tanto, la adición de vinaza a mezcla L:V no supone grandes cambios en la DQOt pero aporta DQOs de forma que pasamos de 5,59 g DQOs/L a 14,23 g DQOs/L en la mezcla L:V:Vi. Por otro lado, se reducen los sólidos de 57 g ST/L a 40 g ST/L y los volátiles de 46 a 33 g SV/L.

En cuanto a Nitrógeno y relación C/N, la caracterización del sustrato L:V, y del sustrato L:V:Vi, contiene lo siguiente:

Tabla 5. Contenido de Nitrógeno, Carbono y relación C/N de los sustratos L:V y L:V:Vi

Sustrato	N (g/L)	C (g/L)	C/N
L:V	1,2	27,13	22
L:V:Vi	0,2	19,65	98

Fuente: Propia, 2024

Las concentraciones de N en los sustratos son demasiado bajas para el inicio de la actividad microbiana, lo que conlleva a relaciones C/N demasiado altas posiblemente porque se encuentre contenido dentro de los compuestos proteicos más complejos del sustrato, conllevando a una lenta estabilización del sistema dado que depende de la hidrólisis de las proteínas para obtener formas de N accesibles para los microorganismos. El inóculo utilizado para iniciar y acondicionar los reactores al sustrato es procedente de reactores anaerobios propios de la Universidad de la UCA, del laboratorio húmedo del Departamento de Tecnologías del Medio Ambiente el cual es alimentado con lodos de EDAR. A continuación, se detallan sus características.

Tabla 6. Caracterización del inóculo

Parámetro	Inóculo
pH	7,61
Demanda Química de Oxígeno Total (DQOt) – g/L	21,53
Demanda Química de Oxígeno Soluble (DQOs) – g/L	11,80
Sólidos Suspendidos Totales (g/L)	14,50
Sólidos Volátiles (g/L)	9,92

Fuente: Propia, 2024

### 3.2 REACTORES UTILIZADOS.

El presente estudio se realizó con reactores de digestión anaerobia a escala de laboratorio; cada uno está compuesto por un vaso de acero inoxidable con una capacidad de 3 L y un volumen de trabajo de 2 L. La cabeza del reactor es de cristal y dispone de 3 puertos utilizados para colocar una sonda de temperatura, para evacuar el efluente e ingresar la alimentación y para la salida del biogás, el cual es captado en una bolsa tedlar que está conectada con una manguera. Cada reactor está ubicado sobre una placa calefactora con temperatura constante y controlada. El sistema está provisto de un dispositivo de agitación constante, con 30 revoluciones por minuto “rpm”.

### 3.3 ENSAYOS EXPERIMENTALES EN REACTORES OPERADOS EN SEMICONTINUO

Para alcanzar los objetivos previstos, se aborda un estudio experimental en el que se utilizan 4 reactores operando en semicontinuo, con diferentes condiciones de operación y alimentación:

- Reactor monoetapa Termofílico ( $55^{\circ}\text{C}$ ) alimentado con sustrato L:V, 50:50.
- Reactor monoetapa Mesofílico ( $35^{\circ}\text{C}$ ) alimentado con sustrato L:V, 50:50.
- Reactor monoetapa Termofílico ( $55^{\circ}\text{C}$ ) alimentado con sustrato L:V:Vi, 25:25:50.
- Reactor monoetapa Mesofílico ( $35^{\circ}\text{C}$ ) alimentado con sustrato L:V:Vi, 25:25:50.

*Imagen 1. Reactores utilizados para el experimento*



Fuente: Propia, 2024

Se analizaron diferentes tiempos hidráulicos de retención (THR) comprendidos entre 30 y 20 días (THR: 30d; THR: 25d; THR: 20d). Las condiciones de operación se modifican cuando se alcanza estabilidad en las condiciones de operación previas, considerando la estabilización en la generación de biogás (metano) y en la eficacia depurativa.

En ese orden se organizaron los experimentos de la siguiente manera:

- ✓ **Experimento 1.** Efecto del tiempo hidráulico de retención en condiciones termofílicas para el sustrato L:V.
- ✓ **Experimento 2.** Efecto del tiempo hidráulico de retención en condiciones mesofílicas para el sustrato L:V.
- ✓ **Experimento 3.** Efecto del tiempo hidráulico de retención en condiciones termofílicas para el sustrato L:V:Vi.
- ✓ **Experimento 4.** Efecto del tiempo hidráulico de retención en condiciones mesofílicas para el sustrato L:V:Vi.

Una vez realizados los experimentos y obtenidos los datos se realizan los siguientes estudios comparativos:

- a) Efecto de la temperatura mesofílica-termofílica: comparación de los experimentos 1 y 2 frente a los experimentos 3 y 4, para los sustratos L:V y L:V:Vi, respectivamente.
- b) Efecto de la adición de cosustrato L:V y L:V:Vi (vinaza de vino): comparación de los experimentos 1 y 3 respecto de los experimentos 2 y 4 para las condiciones mesofílicas y termofílicas.
- c) Viabilidad del aprovechamiento de los digestatos para uso agrícola

### 3.4 MÉTODOS ANALÍTICOS

Durante el desarrollo de la experimentación, se llevaron a cabo numerosos análisis, divididos en caracterización de sustratos y mezclas para alimentación, caracterización periódica de los efluentes y del biogás, así como cálculos de rendimientos, eficiencias

depurativas, análisis cinético, entre otros. A continuación, se detallan los análisis realizados en cada etapa de cada ensayo.

*Imagen 2. Métodos analíticos implementados*

Diarios	Semanales	Alimentación	Finales
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Composición Biogás</li> <li>• Volumen Biogás</li> <li>• pH</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DQOs, DQOt</li> <li>• ST, SV</li> <li>• AGV's</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DQOs, DQOt</li> <li>• ST, SV</li> <li>• AGV's</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nitrógeno</li> <li>• Patógenos</li> </ul>

Fuente: Propia, 2024

### 3.4.1 pH

La medición de pH se realiza de forma directa de acuerdo con el método normalizado 4500-H+ de la APHA-AWWA\_WPFC [114], por inmersión del electrodo de pH en la muestra previamente agitada. La determinación del pH es una técnica de medida potenciométrica. El equipo utilizado fue SensION+ PH1 calibrado con patrones de pH 4,7 y 10, con un sistema autocalibrante de reconocimiento de soluciones patrón. Este equipo se compone de un sistema de referencia de Ag/AgCl normalizado, un electrodo de vidrio y una sonda de compensación automática de temperatura. Las muestras analizadas fueron los sustratos al ser pretratados y el efluente de cada uno de los reactores con periodicidad diaria.

*Imagen 3. Equipo portátil Hach SensION+ PH1 – pHmetro*



Fuente: <https://es.hach.com/>

### 3.4.2 Demanda química de oxígeno (DQO) total y soluble

Dentro de los insumos para la determinación de la demanda química de oxígeno se realizó la preparación de soluciones que se describen a continuación:

- Solución de digestión: En un matraz aforado de 1000 mL de capacidad se añaden 500 mL de agua destilada, 10,216 g de dicromato de potasio “ $K_2Cr_2O_7$ ” (secado previamente a 103 °C durante 2 horas), 167 mL de ácido sulfúrico “ $H_2SO_4$ ” concentrado y 33,3 g de Sulfato de Mercurio “ $HgSO_4$ ”. Se introduce una “pluma” y se deja en agitación en la oscuridad, para evitar su posible fotólisis, hasta que se completa la disolución del compuesto, se enfría a temperatura ambiente y se enrasa con agua destilada. Esta disolución se caracteriza por su color naranja.
- Reactivo ácido sulfúrico/sulfato de plata: Se añade a un matraz de 1000 mL 5,5g Sulfato de plata “ $Ag_2SO_4$ ”/kg  $H_2SO_4$ , enrasando con ácido sulfúrico. Se mantiene en agitación durante 1 o 2 días hasta su completa disolución. Esta disolución se caracteriza por su color transparente.
- Disolución para el Calibrado de la solución de digestión: Se utiliza Ftalato de hidrógeno de potasio (FHP) previamente triturado y secado a 120°C. Posteriormente en un matraz aforado de 500 mL de capacidad, se añaden 2,125 g de FHP y se enrasa con agua destilada. Esta disolución tiene una DQO teórica de 5000 mg  $O_2/L$ . A partir de esta disolución madre se preparan las distintas disoluciones patrón para realizar la curva de calibrado para la determinación de DQO.

Imagen 4. Campana de reactivos químicos para la DQO



Fuente: Propia, 2024

### Proceso de medición:

Para la estimación de la DQO se realizó mediante espectrofotometría, mediante el método colorimétrico normalizado 5220D de la APHA-AWWA-WPFC. Para cada muestra previamente diluida (1:50) se realizaron dos mediciones diferentes, DQO total, analizando las muestras directamente, y la DQO soluble, sometiendo las muestras diluidas a una centrifugación, analizando el sobrenadante. Este método colorimétrico empleado se basa en la oxidación de la materia orgánica por medio de un fuerte oxidante ( $K_2Cr_2O_7$ ).

El procedimiento de análisis se realiza añadiendo 2,5 mL de la muestra, 1,5 mL de solución de digestión (color naranja) y 3,5 mL de reactivo de ácido sulfúrico con sulfato de plata (color transparente) en cada vial por triplicado. Una vez mezclados, se agitan y se colocan en un termoreactor DQO, ECO 25, VELP SCIENTIFICA, previamente calentado a  $150^{\circ}C$ , durante dos horas. Una vez enfriados los tubos se agitan y se mide la absorbancia a  $\lambda=575$  nm en un espectrofotómetro UV-3100PC, VWR TM. El resultado de la absorbancia se compara con la curva de calibrado previamente realizada para obtener la medida en g/L de DQO.

*Imagen 5. Termo reactor, viales con resultado y equipo de medición de absorbancia*



Fuente: Propia, 2024

### 3.4.3 Sólidos totales y volátiles (ST y SV)

La concentración en sólidos totales y volátiles de las muestras se analizó siguiendo el método 2540G de la APHA-AWWA-WPFC. Se trata de una técnica gravimétrica que se realiza con una balanza de precisión autocalibrante OHAUS Explorer. Para el desarrollo de la medida de sólidos totales se dispone de crisoles de porcelana previamente secados en estufa a 105°C en una estufa INDELAB. Los crisoles a temperatura ambiente se pesan y se añaden aproximadamente 10 gramos de muestra tomando nota de los valores registrados por la balanza. Posteriormente, los crisoles se introducen en una estufa INDELAB a 105°C durante 24 horas. Transcurridas las 24 horas, los crisoles son enfriados en un desecador, y pesados.

Posteriormente, para realizar la medida de sólidos volátiles, los crisoles del paso anterior se introducen en un horno muffle modelo ELF14 de CARBOLITE a una temperatura de 550°C durante dos (2) horas para su completa incineración. Por último, los crisoles se pesan con el material restante (cenizas).

*Imagen 6. Crisoles con muestra de efluente para introducir en la estufa*



Fuente: Propia, 2024

### 3.4.4 Ácidos grasos volátiles (AGV)

Se determinaron los ácidos grasos de cadena corta: acético, propiónico, isobutírico, butírico, isovalérico, valérico, isocaproico, caproico y heptanoico. La determinación se efectuó sobre las muestras deseadas, realizando previamente su dilución (1:2) y centrifugación dos veces, donde el sobrenadante se filtró mediante filtros Millipore de 0,22  $\mu\text{m}$ . En un vial, se añaden 0,5 mL de la muestra filtrada, y 0,5 mL de la dilución de ácido fosfórico y fenol (1:4) aportando una concentración conocida (500-600 mg/L) como patrón interno. Cada muestra se hace por duplicado, y se ingresan al equipo de medición.

El equipo para la medición fue un cromatógrafo Zhimadzu GC-2010 dotado de un inyector Shimadzu AOC-20i y un detector de llama (FID). El equipo utiliza una columna de fase fija de Nukol (polietilenglicol modificado con ácido nitrotereftálico) de 30 metros de longitud, 25mm de diámetro interno y 25  $\mu\text{m}$  de película, que logra separar los componentes de la muestra, según su fuerza ácida. Como gas portador se utiliza hidrógeno y como gas de fondo se utiliza nitrógeno.

Las características del método cromatográfico son las siguientes:

- Inyección automática de 1  $\mu\text{L}$  de muestra a 250°C con Split 1:25 y purga de 5 mL/min.
- El gas portador fluye a 42,1 ml/min y 75,5 kPa. En las condiciones de purga y Split empleadas en los análisis supone una velocidad lineal de 45 cm/s, y un flujo en columna de 1,43 mL/min. La llama se genera a partir de aire sintético (400mL/min y 50 kPa) e hidrógeno (40mL/min y 60 kPa).
- Programación de temperaturas en el horno:
  - Temperatura inicial de 115°C durante 0,5 minutos.
  - Rampa de temperatura de 30°C/minuto hasta alcanzar 150°C.
  - Rampa de temperatura de 15°C/minuto hasta alcanzar 180°C.
  - Temperatura constante (180°C) durante 4 minutos.

Imagen 7. Cromatógrafo de masas para determinación de AGV's



Fuente: Propia, 2024

### 3.4.5 Volumen y composición del biogás

La recogida del biogás producido diariamente se hace en bolsas de muestreo Tedlar (SKC232) de 5 y 10 litros de capacidad provista de válvula doble de polipropileno con septum que permite controlar el flujo del biogás.

La cuantificación del volumen de biogás en la bolsa se llevó a cabo empleando un sistema de extracción de dos componentes: Bomba de succión de gases Laboport KNF (KT-18) con un flujo de 5,5 L/min en condiciones estándar de presión y temperatura; y flujómetro de gases de precisión Ritter TG-1 tipo tambor rotatorio sumergido en aceite sintético Rixol-III con error máximo del 0,2%. Este equipo lleva incorporado un termómetro y un manómetro de aceite para poder realizar la compensación de volumen debida a las diferentes condiciones de temperatura y presión de las muestras.

### Composición de biogás con metanómetro:

Consiste en un analizador de biogás por infrarrojos BIOGAS 5000 Geotech. Este equipo permite la medición de la composición del biogás directamente, mediante la succión de una pequeña alícuota del gas recogido en la bolsa Tedlar y muestra en resultado en % de composición de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, y en ppm de CO, H<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S. Este equipo fue utilizado para las muestras con el fin de conocer la composición de metano.

*Imagen 8. Metanómetro – BIOGAS 5000 Geotech*



Fuente: <https://www.envicq.com/fr/store/geotech-biogas-5000/>

### **3.4.6 Nitrógeno Total**

El nitrógeno fue medido con la ayuda de un fotómetro multiparamétrico compacto HANNA HI-83399. El nitrógeno total fue medido seguido el método del ácido comotrópico “NITROGENO TOTAL, RANGO ALGO (VIAL DE 16 mm)”, con ayuda de un kit para Nitrógeno Total Rango alto. El kit dispone de dos viales de digestión de nitrógeno total, rango alto (HI 93767B-B) – etiqueta roja, 2 sobres de reactivo de persulfato de potasio (PERSULFATE/N), 2 sobres de reactivo metabisulfito de sodio (BISULFITE/N), 2 sobres de reactivo Nitrógeno Total (HI 93767-0), y dos viales de digestión de nitrógeno Total (HI 93766V-0HR) – etiqueta verde. En los viales de etiqueta roja (HI 93767B-B) se añade un sobre de PERSULFATEN/N, y 0,5 mL de muestra, y 0,5 mL de agua desionizada para el blanco, respectivamente, y se agitan. Ambos viales se llevan al termo reactor previamente precalentado a 105 °C por 30 minutos.

Al finalizar el proceso de digestión, se dejan enfriar a temperatura ambiente y se agrega a cada vial un sobre de BISULFITE/N, se agitan y se dejan reaccionar por 3 minutos.

Posteriormente a cada vial se agrega un sobre de reactivo nitrógeno total HI 93767-0, se agita y se deja reaccionar por dos minutos. Posteriormente, se añaden 2 mL del blanco y la muestra digerida respectivamente a cada vial de nitrógeno total HI 93766V-0HR (etiqueta verde), se agitan y se espera por 5 minutos. El blanco se utiliza para varias muestras del mismo lote de preparación. Finalmente, en el multiparamétrico compacto HANNA HI-83399 se selecciona el método Nitrógeno Total HR (16), se introduce el Blanco, y se oprime la tecla Cero (Zero). Una vez se muestra el 0,0 mg/L en la pantalla, se introduce el vial correspondiente con la muestra y se oprime la tecla Lectura, y se evidencia el valor de Nitrógeno Total en mg/L de “N”. Al oprimir las teclas de  $\wedge$  o  $\vee$ , se permite convertir la concentración de N a valores de amoníaco (mg/L NH<sub>3</sub>) y de nitrato (NO<sub>3</sub>-). El equipo detecta todas las formas orgánicas e inorgánicas de nitrógeno que se encuentran en la muestra.

### 3.4.7 Relación C/N

Para realizar el cálculo de la relación C/N, inicialmente se determinó el porcentaje de carbono orgánico, por el método por calcinación. En este método inicialmente se determina la concentración de Materia Orgánica (g/L) a partir del contenido de SV (g/L) de cada muestra, al multiplicarse por el factor de conversión de 58% de carbono en la Materia orgánica (Pribyl, 2010), como se registra en la siguiente fórmula:

$$MO = SV \times 0,58$$

Y finalmente se halla la relación C/N, con el valor Nitrógeno Total (N) en g/L.

### 3.4.8 Microorganismos patógenos

#### 3.4.8.1 Coliformes totales y *Escherichia Coli*

A partir del método Colilert-18/Quanti-Tray estándar ISO de nivel mundial para detectar los coliformes totales y E. coli en agua (ISO 9308-2:2012), en muestras de 100 ml, en 18

horas. Se utiliza el reactivo colilert-18, un frasco de 100 ml estéril transparente, una bandeja multipocillo Quanti Tray/2000 de 97 pocillos, molde de goma, un sellador Quanti-Tray, estufa a 37 °C, lámpara UV, y el programa IDEXX para determinar el NMP/UFC-100 mL. El método inicia con la esterilización del material a utilizar en autoclave. Posteriormente se realiza la dilución 1:10 de la muestra a analizar y se lleva a agitación por 30 minutos. Posteriormente, de la dilución se toma 1 ml y se lleva a un vial estéril donde se enraza con agua destilada a 10 mL, es decir, se realiza dilución a 1:10 de nuevo (-1) y, más tardes, de esa dilución se toma 1 ml y se vierte en el frasco transparente estéril y se enraza con agua destilada a 100 mL (dilución 1:100, -2). En el frasco transparente estéril se vierte el contenido del reactivo “Colilert-18” y se agita fuertemente para su mezcla, tomando un color amarillo claro. El contenido del frasco transparente se vierte en la bandeja multipocillo, se ubica en el molde de goma encajando los pocillos y en el equipo para sellar la bandeja. Finalmente, se lleva a incubación a 37 °C por 18 horas (o hasta 22 horas en total).

Al día siguiente las bandejas mostrarán un cambio de color en algunos de los pocillos, según la presencia de coliformes. Se contabilizan los pocillos con un color amarillo fuerte y posteriormente se llevan a la lámpara UV para determinar los fluorescentes. Si coinciden con un pocillo de color amarillo fuerte indicarán presencia de *Escherichia Coli* y también se contabilizarán. Una vez contabilizados, se utiliza el programa IDEXX para determinar el NMP/UFC-100 mL, y de acuerdo con la dilución, se ajusta el resultado con la siguiente ecuación:

$$Mh = N \times b \times d/v$$

Donde,

Mh = Número coliformes (totales o fecales) por g de muestra húmeda

N = coliformes (totales o fecales) obtenido del programa IDEXX (NMP/UFC-100 MI)

b = Factor inicial de dilución

d = factor de diluciones seriadas seleccionadas y seriadas

v = volumen muestra diluida o inoculada

Imagen 9. Bandejas Multipocillo Quanti Tray/2000



Fuente: Propia, 2024

#### 3.4.8.2 *Salmonella sp*

La detección de *Salmonella sp.* se llevó a cabo mediante el método 9260B de la APHA-AWWA-WPFC. El medio de cultivo empleado fue Agar de Xilosa-Lisina-Desoxicolato (XLD Agar). Para llevar a cabo este método, se realizan diferentes disoluciones de la muestra, y se siembran en las placas que contienen el medio XLD Agar solidificado. Posteriormente, se invierten las placas y se incuban en una estufa durante 24 horas a 37°C. Transcurrido el tiempo de incubación se procede a su visualización y conteo. Para identificar si existe presencia de *Salmonella sp.*, las colonias aparecen ennegrecidas y amarillentas.

Imagen 10. Placas con Agar de Xilosa-Lisina-Desoxicolato



Fuente: Propia, 2024

## 4 RESULTADOS Y DISCUSION

A continuación, se presentan los resultados de cada uno de los experimentos por separado, como reactores monoetapa con diferentes condiciones de temperatura, y de sustrato.

### 4.1 Resultados de los experimentos individualmente

#### 4.1.1 Experimento 1. Efecto del tiempo hidráulico de retención en condiciones termofílicas para el sustrato L:V.

Para este experimento, se trabajó con el sustrato L:V en condiciones termofílicas (55 °C) en THR de 30, 25 y 20 días. Es importante precisar que debido a que el sustrato no es homogéneo, las cargas orgánicas pueden variar incluso en el mismo tiempo de retención. Por ello en la tabla 7 se relacionan los datos promedio y más representativos de la carga orgánica y de producción de metano y de rendimiento:

Tabla 7. Datos de operación del reactor termofílico con sustrato L:V

THR (d)	Tasa alimentación (mL/d)	OLR (kg DQO/m <sup>3</sup> .d)	OLR (kg SV/m <sup>3</sup> .d)	Producción Metano (mL CH <sub>4</sub> /d)	Rendimiento (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg SV)	Rendimiento (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg DQO eliminada)
30	66,6	1,44	1,59	397,24	0,116	0,248
25	80,0	2,22	2,31	514,65	0,132	0,278
20	100,0	2,38	2,85	273,08	0,048	0,190

Fuente: Propia, 2024

En el gráfico 1 se evidencia el comportamiento del rendimiento de producción de CH<sub>4</sub>, a partir de los gramos de SV que ingresan en la alimentación diaria. Para el tiempo de retención de 20 días se evidencia una disminución en la producción de metano para este experimento.

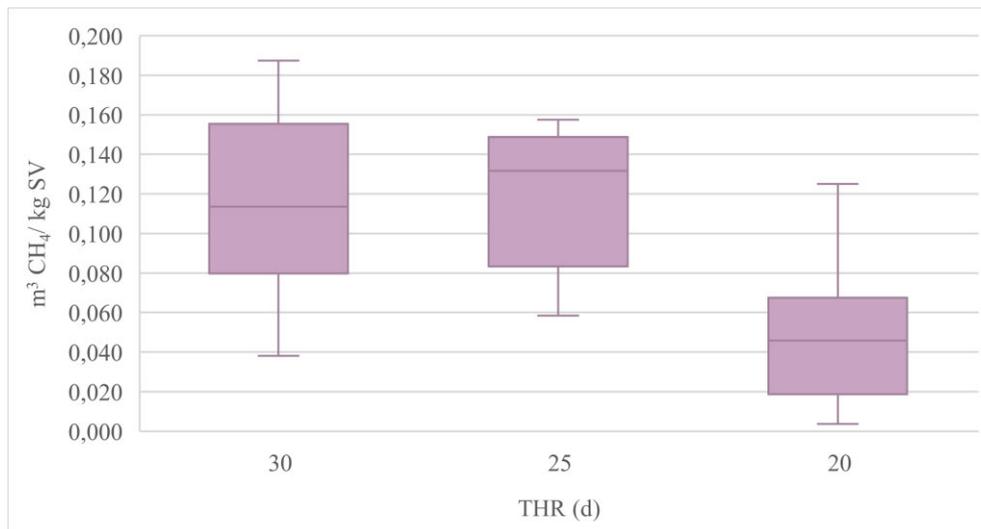


Gráfico 1. Rendimiento del reactor con L:V a 55°C para cada THR

Para este experimento, el mejor rendimiento corresponde a 0,132 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV y 0,278 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg DQO eliminada, para un THR de 25 días, lo que se encuentra por debajo de los valores de referencia (0,310 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg DQO eliminada - 0,600 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV) indicando dificultades para la digestión anaerobia de este tipo de residuos. Respecto a las referencias de carga orgánica, para el THR de 20 días la OLR es de 2,85 kg SV/m<sup>3</sup>.d, lo que puede iniciar la inhibición de la actividad metanogénica en este reactor, acercándose a la tasa de desestabilización de 2,88 kg/m<sup>3</sup>.d como lo indica la investigación de Ripoll. Respecto a la eficiencia de remoción de DQO y de ST, en la tabla 8 se relacionan los promedios de depuración, siendo más alta para el THR de 30 días para la remoción de DQO, y para ST en el THR de 20 días, siendo valores coherentes de acuerdo con los valores de referencia.

Tabla 8. Datos de depuración del reactor termofílico con sustrato L:V

THR (d)	Remoción DQO total (%)	Remoción ST (%)
30	48,0	42,0
25	42,2	40,6
20	35,3	47,8

Fuente: Propia, 2024

#### 4.1.1.1 Análisis de variables de control

El pH para este reactor se mantuvo en un rango de operación favorable para la actividad metanogénica, entre 7,60 y 8,08, en promedio general de 7,90 para todo el experimento. En el gráfico 2 se representan los valores de DQOt y DQOs para la alimentación y el efluente para los diferentes THR estudiados, así como las tendencias (en línea discontinua). La Demanda Química de Oxígeno en este experimento se relaciona con un leve aumento de la DQOt a medida que se disminuye el tiempo de retención y en general un porcentaje de remoción promedio de 43%. Sin embargo, para la DQOs se evidenció un incremento en el efluente en comparación con la alimentación. Esto debido a que los microorganismos se encargaron de descomponer las sustancias más complejas del sustrato provocando la solubilización de la materia orgánica y aumentando la DQOs, quedando más accesible para los microorganismos. Esto ocurre en con sustratos complejos, los cuales tienen que ser solubilizados para que puedan ser asimilados por los microorganismos. Dependiendo de la velocidad de ambas etapas, solubilización y consumo, la DQOs puede acumularse en el medio. Esta suele ocurrir con sustratos complejos, como es el caso de los lodos de matadero.

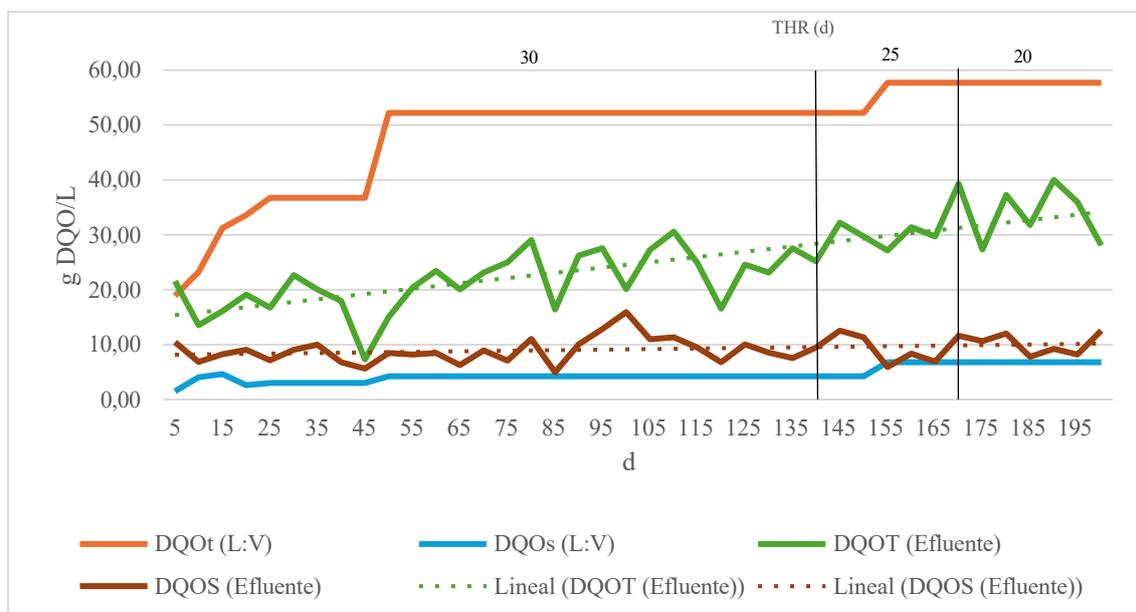


Gráfico 2. Comportamiento DQO en reactor L:V a 55°C

En cuanto al porcentaje de remoción de Sólidos Totales y Sólidos Volátiles, en general para el experimento se tiene un promedio del 49%, valor que se considera adecuado para lodos de depuración (Agabo-García et al., 2022)

En cuanto a los ácidos grasos volátiles en el gráfico 3, se representa el aumento considerable en la concentración al disminuir el THR desde 30 días, aumentando para 25 días y aún más para el THR de 20 días, coincidiendo con la menor producción de biogás para este último tiempo de retención. Hemos de tener en cuenta que los AGV son productos intermedios del metabolismo anaerobio y son generados en la etapa acidogénica. Su acumulación indica que no se están degradando por parte de la microbiota metanogénica y, por tanto, no generan CH<sub>4</sub>.

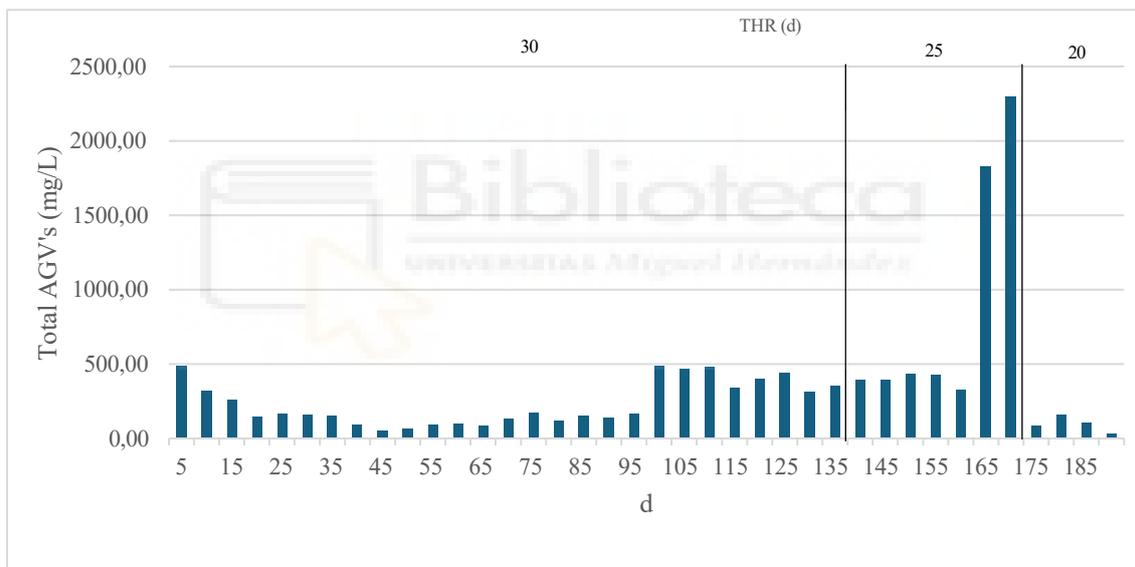


Gráfico 3. Comportamiento de AGV en reactor L:V a 55°C

#### 4.1.1.2 Concentración final de Nitrógeno

El análisis del efluente del reactor Termofílico con alimentación L:V, presentó una concentración de 1,35 g N/L al final del experimento. Esta concentración se evidencia levemente mayor a la concentración del sustrato inicial, sin representar riesgo, pues es un valor considerado como aceptable y no inhibitorio para que el proceso anaerobio se lleve a cabo de manera adecuada. (Flores, 2008)

#### 4.1.1.3 Presencia de patógenos

El análisis del efluente del reactor Termofílico con sustrato L:V determinó ausencia de Coliformes Totales, *Escherichia Coli* y *Salmonella sp.* El efluente cumple, por tanto, con las condiciones para ser usado como biosólido clase A en la agricultura (EPA, 1994). En la imagen 11, se presentan las bandejas de pocillo con las muestras analizadas de los efluentes de los reactores termofílicos, evidenciándose ausencia de Coliformes totales y fecales.

Imagen 11. Bandejas Multipocillo con Muestras  $T_1$  y  $T_2$



Fuente: Propia, 2024

#### 4.1.2 Experimento 2. Efecto del tiempo hidráulico de retención en condiciones mesofílicas para el sustrato L:V.

Para este experimento, se trabajó con el sustrato L:V en condiciones mesofílicas (35 °C) en THR de 30, 25 y 20 días. En este caso se mantienen las cargas orgánicas en el mismo orden que el experimento 1. En la tabla 9 se relacionan los datos promedio y más representativos de producción de metano y de rendimiento.

Tabla 9. Datos de operación del reactor mesofílico con sustrato L:V

THR (d)	Tasa alimentación (mL/d)	OLR (kg DQO/m <sup>3</sup> .d)	OLR (kg SV/m <sup>3</sup> .d)	Producción Metano (mL CH <sub>4</sub> /d)	Rendimiento (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg SV)	Rendimiento (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg DQO eliminada)
30	66,6	1,44	1,59	257,77	0,078	0,212
25	80,0	2,22	2,31	368,45	0,093	0,276
20	100,0	2,38	2,85	453,03	0,072	0,296

Fuente: Propia, 2024

En el gráfico 4 se evidencia el comportamiento del rendimiento de producción de m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> por cada kg de SV que ingresan en la alimentación diaria. Se observa un ligero aumento del parámetro para el THR de 25 días y un leve descenso posterior para el THR de 20 d.

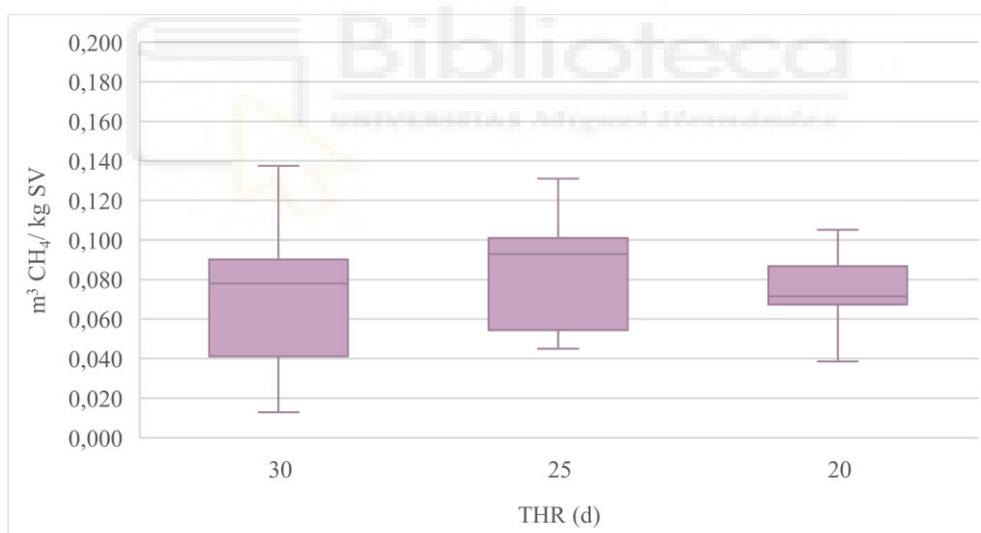


Gráfico 4. Rendimiento del reactor reactor con L:V a 35 °C para cada THR

Para este experimento, el mejor rendimiento corresponde a 0,093 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV y 0,296 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg DQO eliminada, para un THR de 25 y 20 días, respectivamente. Estos valores de rendimiento son bajos respecto a los valores de referencia (0,310 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg DQO eliminada - 0,600 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV) indicando dificultades para la digestión anaerobia de este tipo de residuos. Las referencias de carga orgánica, se mantienen las mismas condiciones del experimento 1, sin embargo, no se evidencia reducción en la producción de metano, por ende no se desestabiliza aún el sistema.

Respecto a la eficiencia de remoción de DQO y de ST, en la tabla 10 se relacionan los promedios de depuración, tanto de DQOt como de ST (ambos en en %) siendo más alta para el THR de 30 días para la remoción de DQO, y para ST en el THR de 20 días, siendo inversamente proporcional:

Tabla 10. Datos de depuración del reactor mesofílico con sustrato L:V

THR (d)	Remoción DQO total (%)	Remoción ST (%)
30	43,86	31,11
25	33,16	33,99
20	29,83	36,24

Fuente: Propia, 2024

#### 4.1.2.1 Análisis de las variables de control relacionadas con la producción de metano

El pH para este reactor se mantuvo en un rango de operación favorable para la actividad metanogénica, en un rango de 7,40 - 7,78, en promedio general de 7,59 para todo el experimento.

En el gráfico 5 se representan los valores de DQOt y DQOs para la alimentación y el efluente para los diferentes THR estudiados, así como las tendencias (en línea discontinua). La Demanda Química de Oxígeno total de entrada al reactor aumenta a medida que se disminuye el tiempo de retención, en general un porcentaje de remoción promedio de 43,9%, 33,2% y 29,9% para los THR de 30, 25 y 20 d, respectivamente. La DQOs en el efluente para los THR 30 y 25 días está por encima de los datos de DQOs alimentados, lo que significa que se produce la hidrólisis y solubilización, con un valor promedio de 38%. Sin embargo, para el THR de 20 días se alcanza un 26,9% de eliminación de DQOs.

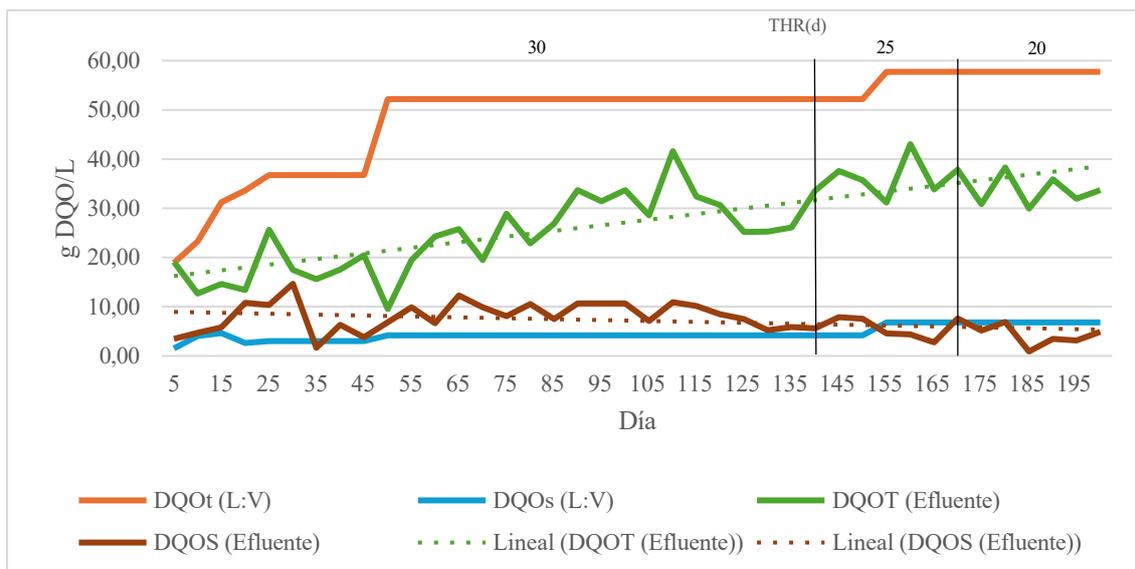


Gráfico 5. Comportamiento DQO en reactor L:V a 35°C

En cuanto al porcentaje de remoción de Sólidos Totales y Sólidos Volátiles, en general para el experimento se tiene un promedio del 34,7 y 36,5%, respectivamente. Estos valores se encuentran de acuerdo con las referencias citadas previamente (Agabo-García et al., 2022)

La evolución temporal de AGV para cada THR se muestra en el gráfico 6. Según la figura, se evidencia un aumento considerable en la concentración al interior especialmente para el THR de 20, que puede provocar inhibición de los microorganismos. De hecho, esta etapa coincide con el menor rendimiento de producción de biogás para el mismo tiempo de retención.

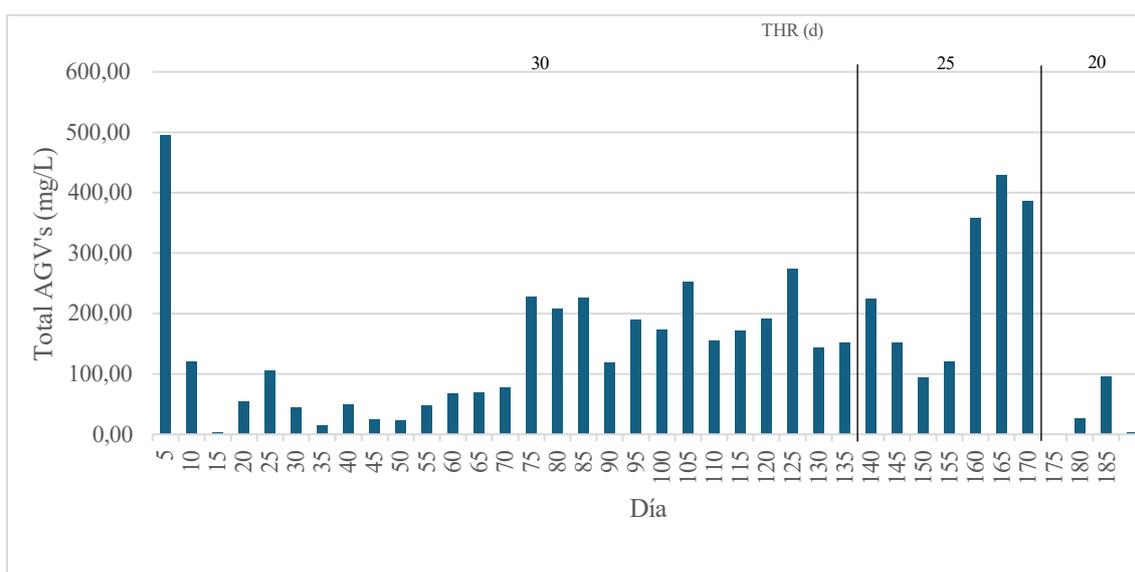


Gráfico 6. Comportamiento de AGV en reactor L:V a 35°C

#### 4.1.2.2 Concentración final de Nitrógeno

El análisis del efluente del reactor Mesofílico con alimentación L:V, al final del experimento, presentó una concentración de 1 g N/L. Esta concentración se evidencia levemente menor a la concentración del sustrato inicial, sin representar riesgo, pues es un valor considerado como aceptable y no inhibitorio para que el proceso anaerobio se lleve a cabo de manera adecuada. (Flores, 2008)

#### 4.1.2.3 Presencia de patógenos

El análisis de coliformes totales para los efluentes de los reactores mesofílicos se presenta en la imagen 12. Como puede observarse, se detecta presencia de coliformes Totales y *Escherichia Coli*, en concentraciones de 840 UFC/g de Coliformes y 630 UFC/g de E-Coli, y el análisis de *Salmonella sp* determinó ausencia.

Imagen 12. Bandejas Multipocillo Muestras mesofílicas



Fuente: Propia, 2024

#### 4.1.3 Experimento 3. Efecto del tiempo hidráulico de retención en condiciones termofílicas para el sustrato L:V:Vi.

Para este experimento, se trabajó con el sustrato L:V:Vi en condiciones termofílicas (55 °C) en THR de 30, 25 y 20 días. En la tabla 11 se relacionan los datos promedio y más representativos de la carga orgánica y de producción de metano y de rendimiento:

Tabla 11. Datos de operación del reactor termofílico con sustrato L:V:Vi

THR (d)	Tasa alimentación (mL/d)	OLR (kg DQO/m <sup>3</sup> .d)	OLR (kg SV/m <sup>3</sup> .d)	Producción Metano (mL CH <sub>4</sub> /d)	Rendimiento (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg SV)	Rendimiento (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg DQO eliminada)
30	66,6	1,48	0,85	207,55	0,063	0,099
25	80	1,74	1,12	231,18	0,110	0,109
20	100	2,73	1,37	413,37	0,149	0,101

Fuente: Propia, 2024

En el gráfico 7 se representa el rendimiento de CH<sub>4</sub> en relación con los SV alimentados. Como queda claramente representado, a medida que se va disminuyendo el THR desde 30 a 20 días se evidencia un aumento en el rendimiento para este experimento desde un valor de 0,063 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV a un valor de 0,149 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV.

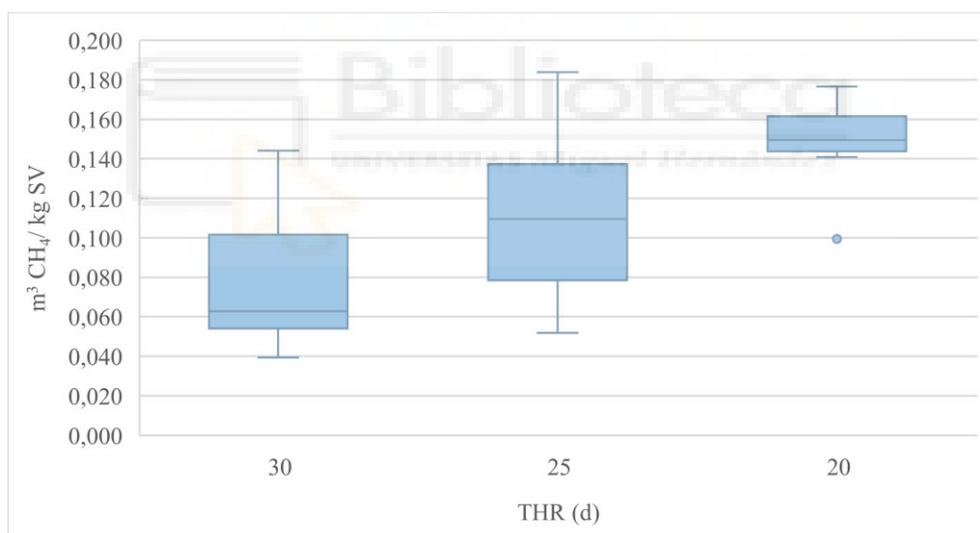


Gráfico 7. Rendimiento del reactor con L:V:Vi a 55 °C para cada THR

Para este experimento, el mejor rendimiento corresponde a 0,149 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV y 0,109 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg DQO eliminada, para un THR de 20 y 25 días, respectivamente. Estos valores de rendimiento son bajos respecto a los valores de referencia (0,310 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg DQO eliminada - 0,600 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV) indicando también dificultades para la digestión anaerobia de este tipo de residuos, sin embargo, tendiendo a aumentar conforme se reduce el THR. Las referencias de carga orgánica, con valores de 1,37 kg/m<sup>3</sup>.d se encuentran por debajo de los valores de referencia tanto para la OLR óptima, como para la

desestabilización del sistema, pudiéndose continuar disminuyendo el THR para evaluar mejores condiciones de producción de metano. En los THR evaluados, no se evidencia reducción en la producción de metano ni la desestabilización del sistema.

Respecto a la eficiencia de remoción de DQO y de ST, en la tabla 12 se relacionan los promedios de depuración de este ensayo termofílico con L:V:Vi, siendo más alta para el THR de 20 días para la remoción de DQO, y para ST en el THR de 30 días, siendo inversamente proporcional.

Tabla 12. Datos de depuración del reactor termofílico con sustrato L:V:Vi

<b>THR (d)</b>	<b>Remoción DQO total (%)</b>	<b>Remoción ST (%)</b>
<b>30</b>	67,56	52,58
<b>25</b>	60,98	40,47
<b>20</b>	70,61	44,91

Fuente: Propia, 2024

#### 4.1.3.1 Análisis de las variables de control relacionadas con la producción de metano

El pH para este reactor se mantuvo en un rango de operación favorable para la actividad metanogénica, entre 7,42 y 8,04, y en promedio general de 7,72 para todo el experimento. La alta acidez de la vinaza del sustrato alimentación L:V:Vi reduce un poco el pH del sistema. Sin embargo, al interior se mantiene estable para la digestión anaerobia.

La Demanda Química de Oxígeno en este experimento se representa en el gráfico 8, donde se evidencia un comportamiento estable en la DQOt sin interferencia de la reducción del tiempo de retención, con un porcentaje de remoción promedio de 66,6%; para la DQOs se evidencia una leve disminución a medida que disminuye el THR, con un porcentaje promedio de remoción del 53,2%.

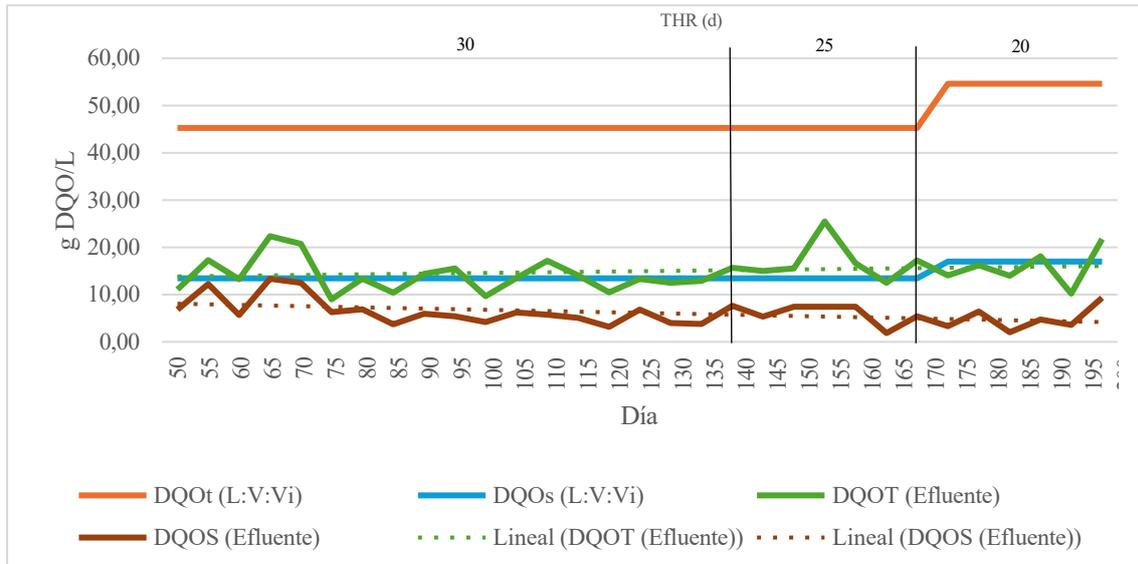


Gráfico 8. Comportamiento DQO en reactor L:V:Vi a 55°C

En cuanto al porcentaje de remoción de Sólidos Totales y Sólidos Volátiles, en general para el experimento se tiene un promedio del 53%. Estos valores se encuentran de acuerdo con las referencias citadas previamente (Agabo-García et al., 2022)

En cuanto a los ácidos grasos volátiles en el gráfico 9, para este experimento se evidenciaron menores variaciones en las concentraciones, manteniéndose por debajo de 100 mg/L en la mayor parte de los días, por ende, no se evidencia desestabilización del sistema en cuanto a la producción de biogás en ningún THR.

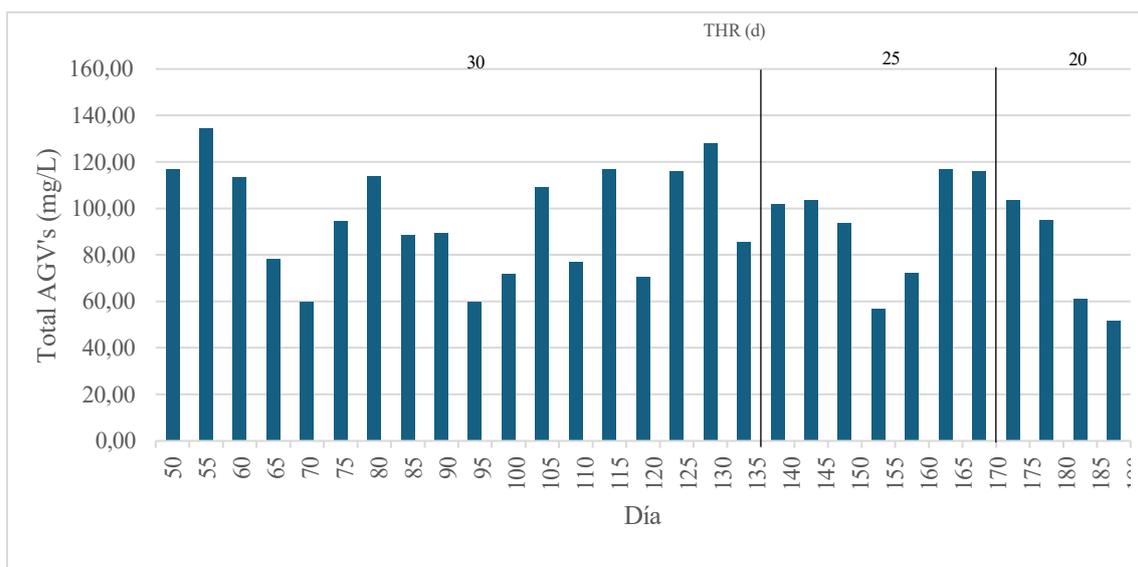


Gráfico 9. Comportamiento de AGV en reactor L:V:Vi a 55°C

#### 4.1.3.2 Concentración final de Nitrógeno

El análisis del efluente del reactor Termofílico 2, con alimentación L:V:Vi, al final del experimento, presentó una concentración 0,70 g N/L. Esta concentración se evidencia levemente mayor a la concentración del sustrato inicial, sin representar riesgo, pues es un valor considerado como aceptable y no inhibitorio para que el proceso anaerobio se lleve a cabo de manera adecuada. (Flores, 2008)

#### 4.1.3.3 Presencia de patógenos

El análisis del efluente del reactor Termofílico 2 L:V:Vi, determinó no presencia de Coliformes Totales, *Escherichia Coli*, ni *Salmonella sp*. En la Imagen 13 se evidencia el resultado del análisis de *Salmonella sp* para los cuatro experimentos. El efluente cumple con las condiciones para ser usado como biosólido en la agricultura.

Imagen 13. Placas para *Salmonella sp* con muestras T<sub>1</sub>, M<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> y M<sub>2</sub>



Fuente: Propia, 2024

#### 4.1.4 Experimento 4. Efecto del tiempo hidráulico de retención en condiciones mesofílicas para el sustrato L:V:Vi.

Para este experimento, se trabajó con el sustrato L:V:Vi en condiciones mesofílicas (35 °C) en THR de 30, 25 y 20 días. En la tabla 13 se relacionan los datos promedio y más representativos de la carga orgánica y de producción de metano y de rendimiento:

Tabla 13. Datos de operación del reactor mesofílico con sustrato L:V:Vi

THR (d)	Tasa alimentación (mL/d)	OLR (kg DQO/m <sup>3</sup> .d)	OLR (kg SV/m <sup>3</sup> .d)	Producción Metano (mL CH <sub>4</sub> /d)	Rendimiento (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg SV)	Rendimiento (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg DQO eliminada)
30	66,6	1,48	0,85	191,11	0,060	0,111
25	80	1,74	1,12	219,31	0,086	0,110
20	100	2,73	1,37	374,32	0,144	0,099

Fuente: Propia, 2024

En el gráfico 10 se evidencia el comportamiento del rendimiento de producción de CH<sub>4</sub> para cada gramo de SV que ingresan en la alimentación diaria. Para el tiempo de retención de 20 días se evidencia un aumento considerable en el rendimiento para este experimento, alcanzado valores de 144,20 ml CH<sub>4</sub>/L.

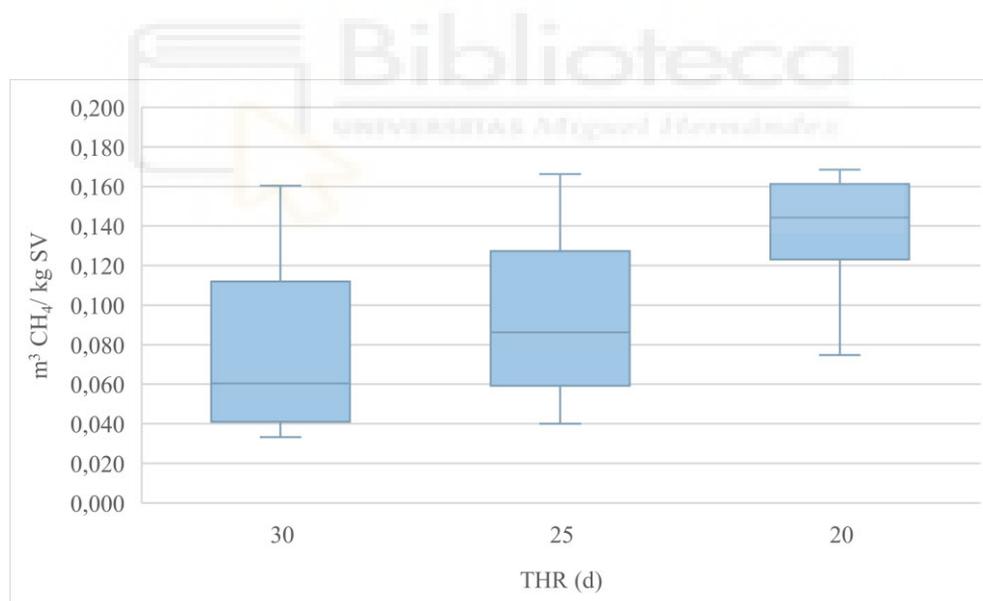


Gráfico 10. Rendimiento del reactor con L:V:Vi a 35 °C para cada THR

Para este experimento, el mejor rendimiento corresponde a 0,144 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV y 0,111 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg DQO eliminada, para un THR de 20 y 30 días, respectivamente. Estos valores de rendimiento son bajos respecto a los valores de referencia (0,310 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg DQO eliminada - 0,600 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV) indicando también dificultad para la digestión, sin embargo, también tiende a aumentar al reducir el THR. Las referencias de carga orgánica

se mantienen respecto al experimento 3, lo que indica que se puede continuar disminuyendo el THR para evaluar mejores condiciones de producción de metano. Igualmente, en los THR evaluados, no se evidencia reducción en la producción de metano ni la desestabilización del sistema.

Respecto a la eficiencia de remoción de DQO y de ST, en la tabla 14 se relacionan los promedios de depuración, aumentando desde 56,8% a 64,3% para la DQO y desde 25,1% al 29,2% para los ST al disminuir el THR.

Tabla 14. Datos de depuración del reactor mesofílico con sustrato L:V:Vi

<b>THR (d)</b>	<b>Remoción DQO total (%)</b>	<b>Remoción ST (%)</b>
<b>30</b>	56,76	25,11
<b>25</b>	50,88	28,35
<b>20</b>	64,32	29,22

Fuente: Propia, 2024

#### 4.1.4.1 *Análisis de las variables de control relacionadas con la producción de metano*

El pH para este reactor se mantuvo en un rango de operación favorable para la actividad metanogénica, entre 7,23 y 7,60, y en promedio general de 7,47 para todo el experimento. La vinaza presente en la alimentación L:V:Vi con menor pH reduce un poco el pH del sistema. No obstante, el proceso de digestión se mantiene estable durante todo el estudio. En el gráfico 11 se muestra la Demanda Química de Oxígeno, tanto total como soluble, en este experimento. Como puede observarse, los valores se mantienen estables para la DQOt sin interferencia de la reducción del tiempo de retención, con un porcentaje de remoción promedio de 57,15%; para la DQOs se evidencia una leve disminución a medida que disminuye el THR, con un porcentaje promedio de remoción del 72,06%.

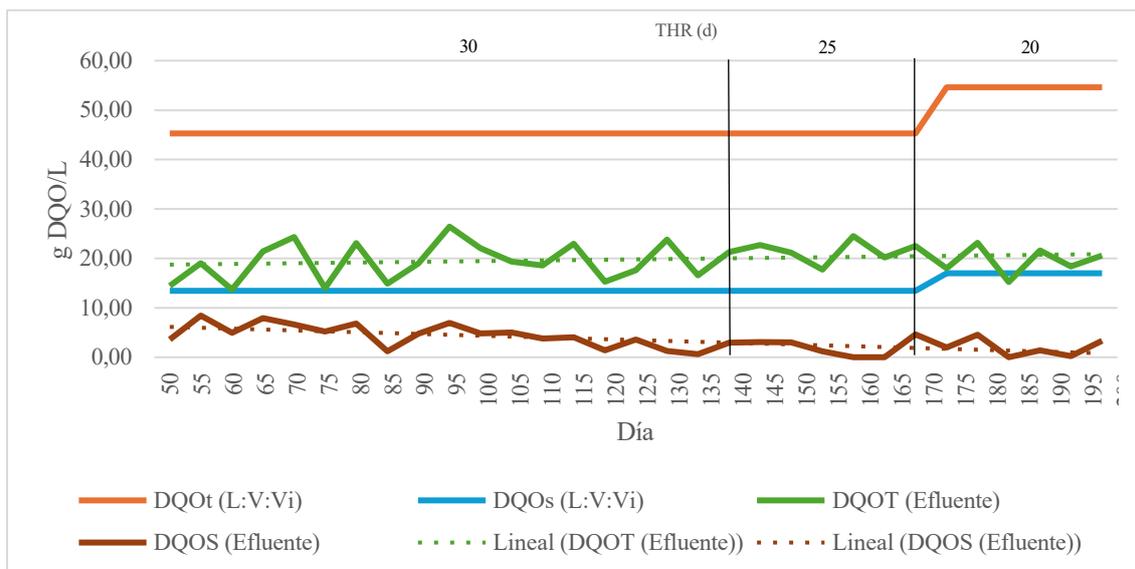


Gráfico 11. Comportamiento DQO en reactor L:V:Vi a 35°C

En cuanto al porcentaje de remoción de Sólidos Totales y Sólidos Volátiles, en general para el experimento se tiene un promedio del 29 y 34%, respectivamente. Estos valores son típicos para procesos de digestión de lodos. Estos valores se encuentran de acuerdo con las referencias citadas previamente (Agabo-García et al., 2022)

En cuanto a los ácidos grasos volátiles, para este experimento se evidenciaron menores variaciones en las concentraciones al interior, y concentraciones alrededor de 100 mg/L, y no se evidencia desestabilización en ningún THR.

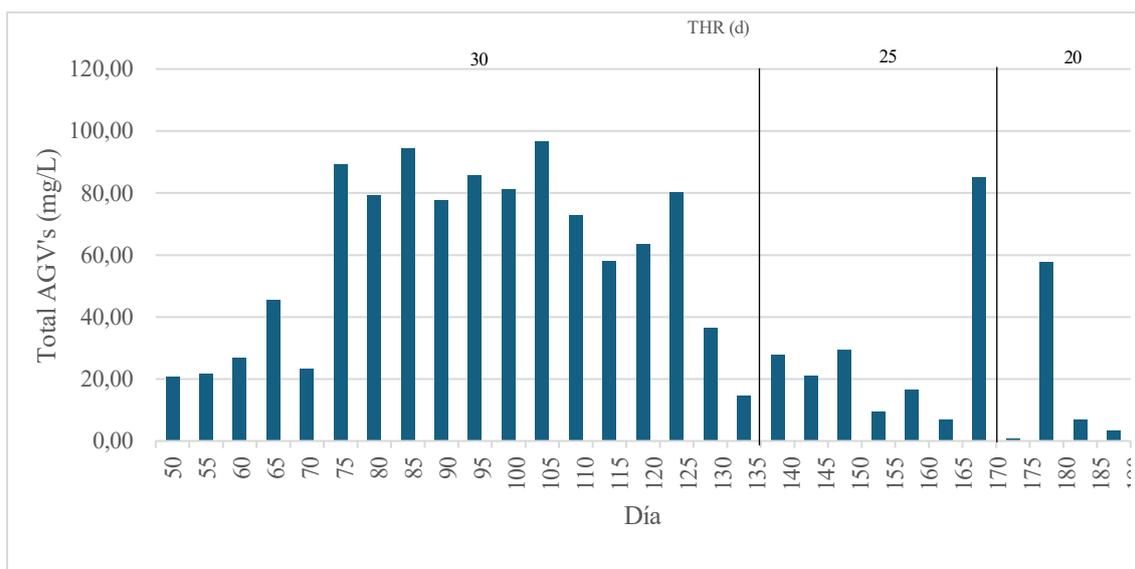


Gráfico 12. Comportamiento de AGV en reactor L:V:Vi a 35°C

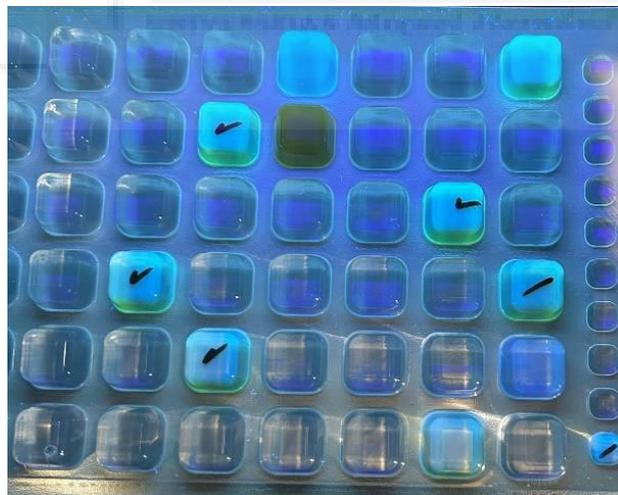
#### 4.1.4.2 Concentración final de Nitrógeno

El análisis del efluente del reactor Mesofílico con alimentación L:V:Vi, al final del experimento, presentó una concentración de 0,6 g N/L. Esta concentración se evidencia levemente mayor a la concentración del sustrato inicial, sin representar riesgo, pues es un valor considerado como aceptable y no inhibitorio para que el proceso anaerobio se lleve a cabo de manera adecuada. (Flores, 2008)

#### 4.1.4.3 Presencia de patógenos

En análisis de patógenos para el efluente del reactor Mesofílico 1 L:V:Vi determinó concentraciones de 860 UFC / g coliformes coliformes Totales y 860 UFC/g *E-Coli*, y ausencia de *Salmonella sp.* En la imagen 14 se representa la bandeja de pocillos con el resultado del análisis de Coliformes Fecales (*Escherichia Coli*) por medio de fluorescencia en la lámpara UV.

Imagen 14. Determinación de presencia de *Escherichia Coli* en lámpara UV



Fuente: Propia, 2024

## 4.2 Análisis del efecto de la temperatura para el mismo sustrato

### 4.2.1 Efecto de la temperatura, con el sustrato L:V

Los experimentos 1 y 2 se abordan para estudiar el efecto de la temperatura termofílica y mesofílica en la digestión anaerobia del sustrato L:V operando a diferentes THR (30, 25 y 20 días).

Dentro de las observaciones de interés para el THR de 30 y 25 días (ver tabla 15), las condiciones termófilas presentaron una mejor producción de metano en comparación con las condiciones mesofílicas, aproximadamente en un 35 y 28%, respectivamente. Sin embargo, para el THR de 20 días, el reactor mesofílico presentó una mayor producción de CH<sub>4</sub>, con una generación 40% superior respecto al termofílico. En estas condiciones termofílicas y THR 20 días, es posible que se haya producido una inhibición de los microorganismos por la presencia de AGV's (según se evidencia previamente). Esta inhibición no se observa en rango mesofílico: el reactor continuó estable y produciendo mayor volumen de metano que en THR menores. Por ello, al comparar la producción de metano por unidad de tiempo, se evidencia que la mayor generación de metano (453,03 ml CH<sub>4</sub>/día) se obtiene a THR: 20 días y condiciones mesofílicas.

Tabla 15. Producción y rendimiento de CH<sub>4</sub> en rango termofílico y mesofílico para L:V

THR (d)	Producción Metano (mL CH <sub>4</sub> /d)		Rendimiento (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg SV)		Rendimiento (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg DQO eliminada)	
	55 °C	35 °C	55 °C	35 °C	55 °C	35 °C
<b>30</b>	397,24	257,77	0,116	0,078	0,248	0,212
<b>25</b>	514,65	368,45	0,132	0,093	0,278	0,276
<b>20</b>	273,08	453,03	0,048	0,072	0,190	0,296

Fuente: Propia, 2024

Asimismo, los rendimientos de producción de metano, respecto tanto de los SV alimentados como de la DQO eliminada, presentan el mismo comportamiento que la producción de CH<sub>4</sub>.

En el gráfico 12 se presenta el valor promedio del rendimiento expresado en m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV. Como puede observarse, el reactor termofílico es mejor en condiciones de THR elevados (30 y 25 días). Sin embargo, para THR 20 días cambia la tendencia y son las condiciones mesofílicas las más favorables.

También para el rendimiento en  $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg DQO}$  eliminada, el mejor comportamiento se presenta en las condiciones mesofílicas con un THR de 20 días, con  $0,296 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{kg DQO}$  eliminada.

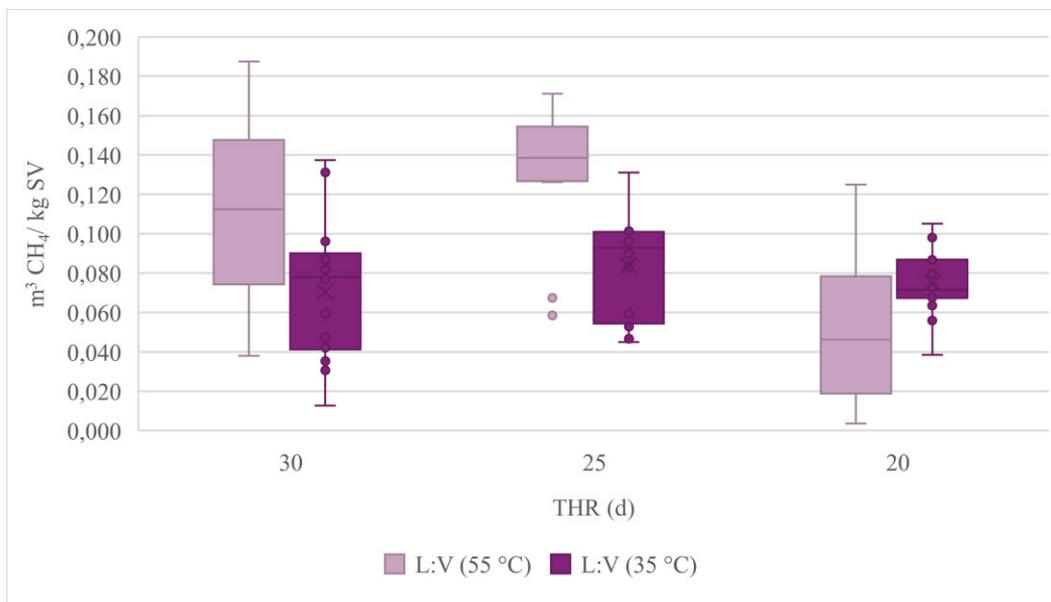


Gráfico 13. Comparación del rendimiento de producción de  $\text{CH}_4$  para condiciones de  $55^\circ\text{C}$  y  $35^\circ\text{C}$  con L:V

#### 4.2.2 Efecto de la temperatura, con el sustrato L:V:Vi

En la tabla 16, se evidencia la relación de los resultados de producción de metano y rendimiento para los experimentos 3 y 4, los cuales se desarrollan para estudiar el efecto de la temperatura para la digestión anaerobia del sustrato L:V:Vi (condiciones termofílicas y mesofílicas) a diferentes condiciones de THR (30, 25 y 20 días).

En general, se evidenció un ligero mejor comportamiento del sustrato L:V:Vi en condiciones termofílicas para los tres THR estudiados, con producciones de metano más elevadas de 8%, 5% y 9% respectivamente. Así, el mejor dato obtenido es  $413,37 \text{ mL CH}_4/\text{d}$  para las condiciones termofílicas y THR de 20 días.

Tabla 16. Producción y rendimiento de  $\text{CH}_4$  en rango termofílico y mesofílico para L:V:Vi

THR (d)	Producción Metano ( $\text{mL CH}_4/\text{d}$ )		Rendimiento ( $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg SV}$ )		Rendimiento ( $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg DQO}$ eliminada)	
	$55^\circ\text{C}$	$35^\circ\text{C}$	$55^\circ\text{C}$	$35^\circ\text{C}$	$55^\circ\text{C}$	$35^\circ\text{C}$
30	207,55	191,11	0,063	0,060	0,099	0,111

THR (d)	Producción Metano (mL CH <sub>4</sub> /d)		Rendimiento (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg SV)		Rendimiento (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg DQO eliminada)	
	55 °C	35 °C	55 °C	35 °C	55 °C	35 °C
	25	231,18	219,31	0,110	0,086	0,109
20	413,37	374,32	0,149	0,144	0,101	0,099

Fuente: Propia, 2024

Como puede observarse, el rendimiento de producción de metano por cada kg SV alimentados es mayor en condiciones termófilas con 0,149 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV. Sin embargo, respecto a los g de DQO eliminada, el mejor comportamiento se observa en condiciones mesofílicas (35 °C) para el THR de 30 d, con 0,111 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg DQO eliminada.

En el gráfico 14, se muestra el valor medio del rendimiento en m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV para cada reactor y cada THR. Como puede observarse, ambos reactores presentan un comportamiento similar independientemente de la temperatura para los tres THR estudiados, manteniéndose condiciones estables en la producción, sin inhibición de la actividad metanogénica.

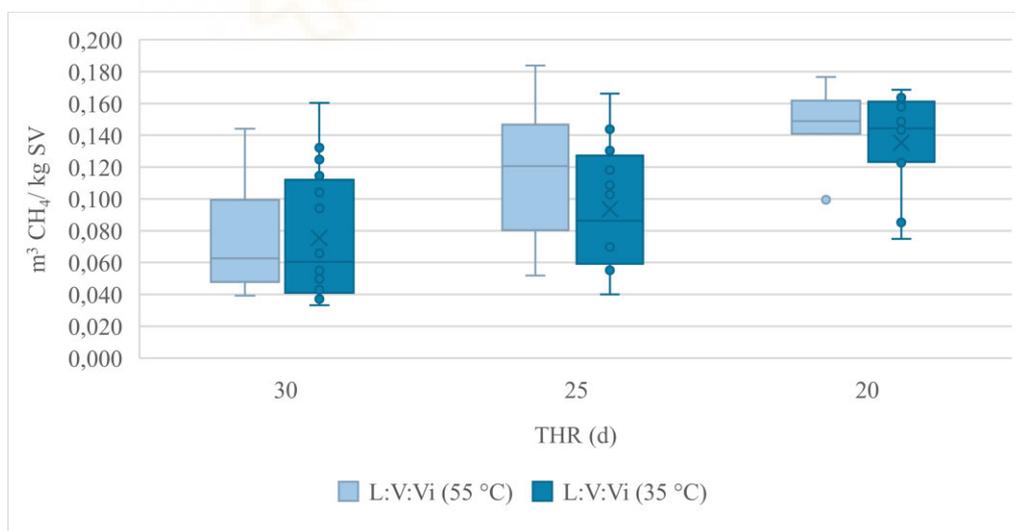


Gráfico 14. Comparación del rendimiento de producción de CH<sub>4</sub> para condiciones de 55°C y 35°C con L:V:Vi

### 4.3 Análisis de la co-digestión de los lodos y vertido de matadero con la vinaza.

En condiciones termofílicas, la adición de vinaza a la digestión de L:V no mejora el proceso cuando se opera a 30 y 25 días de THR, con producciones de CH<sub>4</sub> que superan en 48 y 55% respectivamente la producción del sustrato L:V:Vi. Sin embargo, para el THR de 20 días, la vinaza revierte la tendencia y mejora la generación de metano en un 34%. En la Tabla 17 se recogen los datos de producción de metano y de rendimiento respecto a los kg de SV ingresados, así como por los g de DQO eliminada, para los dos tipos de sustrato. Analizando los resultados se puede evidenciar que la mejor producción de metano se obtiene para las condiciones termofílicas de digestión del sustrato L:V en un THR de 25 días, con un valor de 514,65 mL CH<sub>4</sub>/d.

Tabla 17. Producción y rendimiento de CH<sub>4</sub> para los dos sustratos en condiciones termofílicas

THR (d)	Producción Metano (mL CH <sub>4</sub> /d)		Rendimiento (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg SV)		Rendimiento (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg DQO eliminada)	
	L:V	L:V:Vi	L:V	L:V:Vi	L:V	L:V:Vi
<b>30</b>	397,24	207,55	0,116	0,063	0,248	0,099
<b>25</b>	514,65	231,18	0,132	0,110	0,278	0,109
<b>20</b>	273,08	413,37	0,048	0,149	0,190	0,101

Fuente: Propia, 2024

Similar comportamiento se observa para los datos de m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV, como se representa en el gráfico 15, donde la vinaza solo mejora el rendimiento para el THR de 20 días, con un valor de 0,148 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV. Sin embargo, si se evalúa el rendimiento respecto a los kg de DQO eliminada, la vinaza no mejora el rendimiento en ninguno de los tres THR estudiados. Por tanto, en condiciones termofílicas, el mejor comportamiento se observa para el sustrato L:V, con un valor de 0,278 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg DQO eliminada para THR: 20 días.

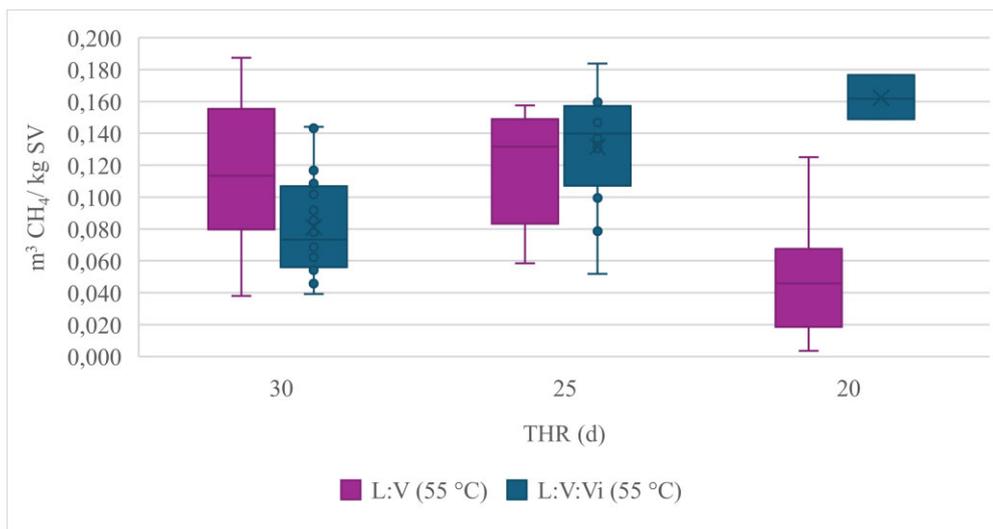


Gráfico 15. Comparación del rendimiento de producción de CH<sub>4</sub> para los sustratos L:V y L:V:Vi, en condiciones termofílicas.

En cuanto a la generación de CH<sub>4</sub> en condiciones mesófilas, los resultados de la Tabla 18 indican que la vinaza presente en el sustrato L:V:Vi (para los tres THR de 30, 25 y 20 días), no mejora la producción de CH<sub>4</sub>. Así, el sustrato L:V genera un 26, 40 y 17% más de CH<sub>4</sub> respectivamente que el sustrato con vinaza. Así, la mayor producción de metano se obtiene para la digestión de L:V en condiciones mesofílicas en un THR de 20 días, con 453,03 mL CH<sub>4</sub>/d. La mayor producción de CH<sub>4</sub> para L:V:Vi es 374,32 mL CH<sub>4</sub>/d.

Tabla 18. Producción y rendimiento de CH<sub>4</sub> para los dos sustratos en condiciones mesofílicas

THR (d)	Producción Metano (mL CH <sub>4</sub> /d)		Rendimiento (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg SV)		Rendimiento (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg DQO eliminada)	
	L:V	L:V:Vi	L:V	L:V:Vi	L:V	L:V:Vi
30	257,77	191,11	0,078	0,060	0,212	0,111
25	368,45	219,31	0,093	0,086	0,276	0,110
20	453,03	374,32	0,072	0,144	0,296	0,099

Fuente: Propia, 2024

Por su parte en el gráfico 16 se relaciona el rendimiento expresado como m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV en condiciones mesofílicas, el cual se comporta de forma contraria a la producción de metano. Es decir, para los tres THR, la vinaza mejora el rendimiento presentando un máximo de 0,144 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV para L:V:Vi a THR 20 días.

Sin embargo, si se evalúa el rendimiento expresado como  $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg DQO}$  eliminada, la vinaza no mejora el rendimiento en ningún THR estudiado. En este caso, el mejor valor es  $0,296 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{g DQO}$  eliminada para L:V a THR 20 días.

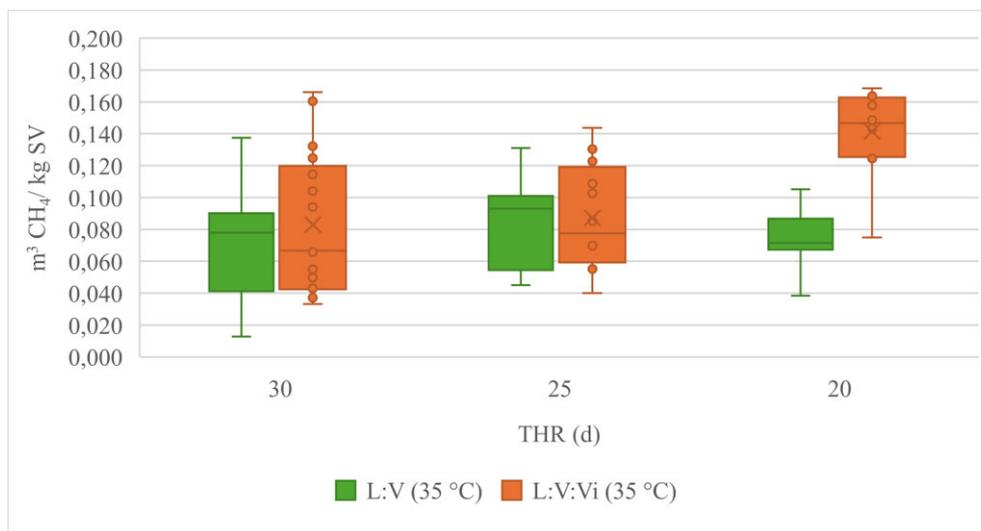


Gráfico 16. Comparación del rendimiento de producción de  $\text{CH}_4$  para los sustratos L:V y L:V:Vi, en condiciones mesofílicas.

#### 4.4 Análisis de viabilidad de aprovechamiento del digestato para uso agrícola

A partir de los resultados de las analíticas de patógenos realizadas a los efluentes de los cuatro experimentos, se logró constatar que las condiciones termofílicas permiten controlar la presencia de microorganismos patógenos en los efluentes finales (a THR\_20 días), al no presentar ni coliformes totales, *Escherichia Coli* ni *Salmonella sp.*, lo que le permite cumplir con los estándares normativos con potencial uso agrícola. (EPA, 1994) Por otro lado, las condiciones mesofílicas (35 °C) presentan ausencia de *Salmonella sp.*, y aunque sí se detectaron concentraciones de Coliformes Totales y *Escherichia Coli* en los dos casos (L:V y L:V:Vi), se encuentran dentro del rango permitido por la normatividad.

En cuanto a la concentración final de Nitrógeno en los diferentes experimentos, se evidencia que esta aumenta respecto a la concentración inicial en los sustratos, posiblemente por la hidrólisis de las proteínas y compuestos más complejos, liberando nitrógeno para la actividad microbiana, así como también la posible formación de nitrógeno inorgánico. Respecto a la normatividad española, en el grupo 2 “abonos

orgánicos” establece que, para productos de origen animal obtenidos a partir de un tratamiento, el contenido mínimo de nutrientes como el nitrógeno será del 6% en masa seca, y una relación C/N no mayor a 10, y para productos de origen animal y vegetal obtenidos a partir de un tratamiento será de 3% para N, y la relación C/N no mayor a 12. (BOE N 289, 2015)

Tabla 19. Contenido de nitrógeno en el digestato final y la relación C/N

Experimento	N final (g/L)	C (g/L)	C/N final
L:V (55 °C)	1,35	18,14	13,43
L:V (35 °C)	1,00	22,05	22,05
L:V:Vi (55 °C)	0,70	8,77	12,52
L:V:Vi (35 °C)	0,60	11,15	18,58

En ese orden, el contenido del digestato de los cuatro experimentos presenta una relación C/N supera el limite máximo por pocas unidades para ser utilizado como fertilizante orgánico en los suelos. Adicionalmente, el contenido final de nitrógeno es muy bajo para ser utilizado como nutriente en abonos orgánicos, que, comparado con la bibliografía inicial, el digestato tiene concentraciones muy bajas de nitrógeno a pesar del tipo de sustrato de origen animal utilizado. (Borowski & Kubacki, 2015)

## 5 CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que se pueden extraer del estudio desarrollado en las condiciones de operación indicadas ponen de manifiesto que:

- Para el sustrato L:V, las condiciones termofílicas favorecen la generación de metano a THR altos de 25 días (514,65 mL CH<sub>4</sub>/d). Sin embargo, en condiciones mesofílicas, las mejores producciones de metano se obtienen para bajos THR y altas cargas orgánicas (453,03 mL CH<sub>4</sub>/d). En cuanto a rendimientos, en ambas condiciones de temperatura se alcanzan los más altos rendimientos, presentando valores de 0,278 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg DQO eliminada y 0,296 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg DQO eliminada, para las condiciones termofílicas y mesofílicas respectivamente.

- Para el sustrato L:V:Vi, las condiciones termofílicas consiguen un mejor rendimiento de producción de metano para todos los THRs estudiados con valores de 0,063, 0,110 y 0,149 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV, para los THR: 30, 25 y 20 días respectivamente. Sin embargo, respecto a los kg DQO eliminada, se evidencia un mejor rendimiento en las condiciones mesofílicas. El mejor dato de rendimiento es 0,111 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ kg DQO eliminada para el THR de 30 d.
- Las temperaturas termofílicas favorecen el proceso de digestión anaerobia frente a las mesofílicas, mejorando las eficacias de eliminación tanto de SV como DQO para ambos sustratos. Para el sustrato L:V:Vi se obtienen eliminaciones de un 53% SV y 34% SV para las condiciones termofílicas y mesofílicas respectivamente, mientras que para L:V los datos son 49%SV y 36,5%SV para las condiciones termofílicas y mesofílicas, respectivamente.
- La adición de un cosustrato (vinaza) al sustrato L:V no mejora la producción de metano porque, aunque aporta DQO soluble al sustrato, reduce la carga orgánica total suministrada susceptible de transformarse en metano. No obstante, la vinaza mejora la eficacia de depuración tanto para DQOt como para ST. Además, para las condiciones de más altas cargas orgánicas y bajos THR estudiados, la adición de vinaza consigue sistemas más estables, especialmente en condiciones termofílicas.
- Los digestatos obtenidos a partir de la digestión anaerobia cumplen con las medidas de concentración de patógenos en ambos rangos de temperatura. No obstante, la concentración final de nitrógeno es muy baja, conllevando a una alta relación C/N, por lo que el digesto puede destinarse como insumo de un tratamiento adicional como el compostaje u otros procesos de digestión anaerobia donde pueda ser aporte de materia orgánica y microorganismos, y a su vez sea complementado con otros nutrientes esenciales para la planta, convirtiéndose en un sustrato de interés para el uso agrícola.

Por tanto, estas conclusiones indican que la digestión anaerobia bajo condiciones mesofílicas y termofílicas tiene comportamientos variables dependiendo del THR y el tipo de sustrato utilizado. En general, las condiciones mesofílicas presentan mejor estabilidad y producción de metano para THR más cortos, mientras que las condiciones termofílicas son más eficaces en THR más largos, salvo excepciones como la inhibición observada en THR de 20 días bajo condiciones termofílicas.

Como conclusión global, indicar que es necesario realizar más estudios a menores THR para determinar con mayor exactitud el efecto de la adición de vinaza sobre el comportamiento del sustrato base (L:V) en la producción de metano en ambas condiciones de temperatura. Esto permitirá optimizar el proceso y mejorar la eficiencia de la valorización de residuos.

## 6 BIBLIOGRAFIA

- Agabo-García, C., Solera, R., & Pérez, M. (2020). First approaches to valorize fat, oil and grease (FOG) as anaerobic co-substrate with slaughterhouse wastewater: Biomethane potential, settling capacity and microbial dynamics. *Chemosphere*, 259. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127474>
- Agabo-García, C., Solera, R., & Perez, M. (2022). Anaerobic sequential batch reactor for CO-DIGESTION of slaughterhouse residues: Wastewater and activated sludge. *Energy*, 255. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124575>
- BOE N 289. (2015). *Orden AAA/2564/2015, de 27 de noviembre, por la que se modifican los anexos I, II, III, IV y VI del Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes*. <http://www.boe.es>
- Borowski, S., & Kubacki, P. (2015). Co-digestion of pig slaughterhouse waste with sewage sludge. *Waste Management*, 40, 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.03.021>
- Campos A. (2001). *Tesis Doctoral - Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria*. <http://hdl.handle.net/10459.1/63733>

- Chae, K. J., Jang, A., Yim, S. K., & Kim, I. S. (2008). The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure. *Bioresource Technology*, *99*(1), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.063>
- EPA. (1994). *A Plain English Guide to the EPA Part 503 Biosolids Rule*. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-12/documents/plain-english-guide-part503-biosolids-rule.pdf>
- Flores, C. (2008). *Tesis Doctoral - Tratamiento de residuos sólidos provenientes de rastros mediante digestión anaerobia*. <https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/350/1/Tratamiento%20de%20residuos%20s%C3%B3lidos%20provenientes%20de%20rastros%20mediante%20digesti%C3%B3n%20anaerobia.pdf>
- Granada, C. E., Hasan, C., Marder, M., Konrad, O., Vargas, L. K., Passaglia, L. M. P., Giongo, A., de Oliveira, R. R., Pereira, L. de M., de Jesus Trindade, F., & Sperotto, R. A. (2018). Biogas from slaughterhouse wastewater anaerobic digestion is driven by the archaeal family Methanobacteriaceae and bacterial families Porphyromonadaceae and Tissierellaceae. *Renewable Energy*, *118*, 840–846. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.077>
- Hernández, A. M. (2016). *Tesis Doctoral - Biodegradación de los residuos de un matadero mediante un digestor continuo*. [https://dehesa.unex.es:8443/bitstream/10662/5151/1/TDUEX\\_2016\\_Marcos\\_Hernandez.pdf](https://dehesa.unex.es:8443/bitstream/10662/5151/1/TDUEX_2016_Marcos_Hernandez.pdf)
- Izquierdo Bautista, J., & Arévalo Hernández, J. J. (2021). Determinación del carbono orgánico por el método químico y por calcinación. *Ingeniería y Región*, *26*, 20–28. <https://doi.org/10.25054/22161325.2527>
- Palacios, A., Riba, N., & Comas, J. (2019). *Valorización agronómica de lodos depurados procedentes de un matadero de porcino trabajo final de grado ingeniería de sistemas biológicos*. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/172765/memoria.pdf;jsessionid=87284ACE9CFAB85B6F93AC271BDA1905?sequence=1>
- Pitk, P., Kaparaju, P., Palatsi, J., Affes, R., & Vilu, R. (2013). Co-digestion of sewage sludge and sterilized solid slaughterhouse waste: Methane production efficiency

- and process limitations. *Bioresource Technology*, 134, 227–232.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.02.029>
- Pribyl, D. W. (2010). A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. In *Geoderma* (Vol. 156, Issues 3–4, pp. 75–83).  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.003>
- Ripoll, V., Agabo-García, C., Solera, R., & Perez, M. (2023). Anaerobic digestion of slaughterhouse waste in batch and anaerobic sequential batch reactors. In *Biomass Conversion and Biorefinery* (Vol. 13, Issue 13, pp. 11457–11468). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02179-1>
- Salehiyoun, A. R., Di Maria, F., Sharifi, M., Norouzi, O., Zilouei, H., & Aghbashlo, M. (2020). Anaerobic co-digestion of sewage sludge and slaughterhouse waste in existing wastewater digesters. *Renewable Energy*, 145, 2503–2509.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.001>
- Siddiqui, M. I., Farooqi, I. H., Basheer, F., Rameez, H., & Isa, M. H. (2023). Pretreatment of Slaughterhouse Effluent Treatment Plant Sludge Using Electro-Fenton Process for Anaerobic Digestion. *Sustainability (Switzerland)*, 15(4).  
<https://doi.org/10.3390/su15043159>
- Yepez, L. E. (2017). *Evaluación del incremento de la temperatura en la digestión anaeróbica de King Grass y gallinaza para la producción de metano*.  
<https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/5ef97438-5863-467d-aa31-8386d2687a37/content>
- Zahedi, S., Solera, R., & Pérez, M. (2020). An eco-friendly way to valorize winery wastewater and sewage sludge: Anaerobic co-digestion. *Biomass and Bioenergy*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105779>