



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO**  
**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHILPANCINGO**

**Maestría en Ciencias de la Ingeniería**

**BIODIGESTOR ANAEROBIO DOMÉSTICO PARA LA  
PRODUCCIÓN DE ABONO ORGÁNICO SUMINISTRADO  
CON RESIDUOS DE ALIMENTOS**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

**Presenta**

**Lizbeth Gómez Muñoz**

**Directora**

**Codirector**

**Dra. Mirna Castro Bello**  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHILPANCINGO

**Dr. Cornelio Morales Morales**  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SAN JUAN DEL RÍO

**Revisor 1**

**Revisor 2**

**Dr. Carlos V. Marmolejo Vega**  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHILPANCINGO

**Dra. Armida González Lorence**  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SAN JUAN DEL RÍO

Chilpancingo de los Bravo, Guerrero, febrero 2025

## **Agradecimientos**

A Dios por darme la fortaleza y sabiduría para completar esta tarea con éxito

A mi madre que me dio la vida y me enseñó a vivirla, Te amo Mamita

A mi padre que me enseñó que nunca debo rendirme

A mi hija Dasha que ha sido el motor de mí actividad

A mis hermanos y sobrinos por siempre confiar en mí, los amo

Al Instituto Tecnológico de Chilpancingo y sus directivos M.D.I.S Areli Bárcenas Nava y  
M.C Sergio Zagal Barrera por abrir mis horizontes

A la Maestría en Ciencias de la Ingeniería que fue el crisol en el que concluí esta formación

Al CONAHCYT que me otorgó la beca que me permitió obtener este grado

A la Dra. Mirna Castro Bello, con todo mi cariño, que como directora de mi proyecto ha sido  
inspiración y faro que ha iluminado la senda hacia mi destino académico

Al Dr. Cornelio Morales Morales, con todo mi cariño, quien sembró la semilla del proyecto de  
investigación que he concluido y me animó siempre a utilizar mi creatividad

Al Dr. Carlos Marmolejo Vega por ser mi maestro de vida y enseñarme que siempre puedo  
lograr lo que me proponga

A la Dra. Armida González Lorence por guiarme en este trabajo de investigación

A mis maestros y compañeros que contribuyeron a crear comunidad armoniosa en mi  
formación

Al Dr. Jesús Porras y la Señora Sandra Álvarez por su comprensión y motivación

A Víctor y Dominic con quienes descubrí una amistad sincera

A mi querido Dr. Jorge Fuentes por enseñarme que las emociones también cuentan



**Educación**  
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO



**Instituto Tecnológico de Chilpancingo**  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Chilpancingo, Guerrero **10/febrero/2025**  
Oficio No. 275/2025

**Lizbeth Gómez Muñoz**  
**Candidata a Maestra en Ciencias de la Ingeniería**  
**PRESENTE**

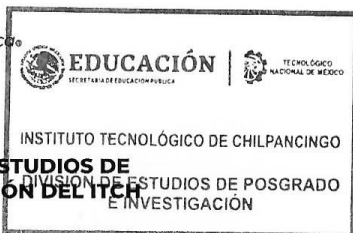
Por este conducto me es grato comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado “**Biodigestor anaerobio doméstico para la producción de abono orgánico suministrado con residuos de alimentos**”, ha informado a esta División de estudios de Posgrado e Investigación que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

**ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica*

**MIRNA CASTRO BELLO**

**JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN DEL ITCH**



C.c.p. Subdirección Académica.  
C.c.p. Archivo.  
MCB\*rlgr.



**2025**  
Año de  
La Mujer  
Indígena

Av. José Francisco Ruiz Massieu No. 5, Colonia Villa Moderna, Chilpancingo  
de los Bravo, Guerrero, México. Tel. (747) 45 4 1300, Ext. 1310  
Email: [dir@chilpancingo.tecnm.mx](mailto:dir@chilpancingo.tecnm.mx) <http://chilpancingo.tecnm.mx>  
<https://www.facebook.com/TecNMcampusChilpancingo>



**DRA. MIRNA CASTRO BELLO**

**JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**E INVESTIGACIÓN DEL ITCHILPANCINGO**

**PRESENTE**

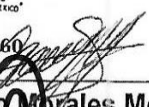
Por este medio los integrantes del comité Tutorial de la **C. Lizbeth Gómez Muñoz** con número de control **G23520004** de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado denominado **"Biodigestor anaerobio doméstico para la producción de abono orgánico suministrado con residuos de alimentos"**, una vez que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, hemos acordado aceptar el documento por lo que solicitamos la autorización de impresión definitiva.

Sin más por el momento, le enviamos un cordial saludo.

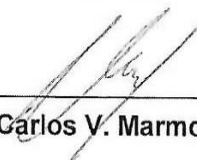
**Directora**

  
Dra. Mirna Castro Bello

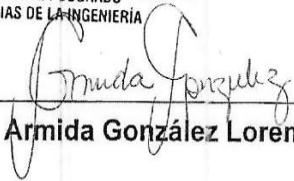
**Codirector**

  
Dr. Cornelio Morales Morales

**Revisor 1**

  
Dr. Carlos V. Marmolejo Vega

**Revisor 2**

  
Dra. Armida González Lorence



|                                                                                      |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Índice de cuadros .....                                                              | viii |
| Índice de figuras .....                                                              | ix   |
| Resumen .....                                                                        | xi   |
| Abstract.....                                                                        | xii  |
| Capítulo I. Introducción.....                                                        | 1    |
| Capítulo II. Antecedentes .....                                                      | 3    |
| 2.1 En el mundo .....                                                                | 4    |
| 2.2 En América.....                                                                  | 4    |
| 2.3 Sistemas de monitoreo de parámetros de la DA .....                               | 5    |
| 2.4 Estado de la técnica .....                                                       | 7    |
| 2.5 Conceptos.....                                                                   | 11   |
| 2.6 Clasificación de biodigestores.....                                              | 13   |
| 2.7 Sistemas de DA .....                                                             | 15   |
| 2.8 Etapas de la DA.....                                                             | 15   |
| 2.9 Microbiología de la DA .....                                                     | 16   |
| 2.10 Parámetros que intervienen en la DA.....                                        | 17   |
| Capítulo III. Justificación .....                                                    | 20   |
| Capítulo IV. Objetivos.....                                                          | 21   |
| Capítulo V. Metodología .....                                                        | 22   |
| 5.1 Materiales .....                                                                 | 22   |
| 5.2 Metodología .....                                                                | 22   |
| 5.2.1 Tipos de biodigestores domésticos.....                                         | 23   |
| 5.2.2 Parámetros requeridos .....                                                    | 23   |
| 5.2.2.1 Análisis de varianza de efectos fijos unifactorial para cada parámetro ..... | 24   |
| 5.2.2.1.1 Análisis de varianza de efectos fijos unifactorial para pH .....           | 25   |

|               |                                                                                     |    |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.2.2.1.2     | Análisis de varianza de efectos fijos unifactorial °C matutina.....                 | 28 |
| 5.2.2.1.3     | Análisis de varianza de efectos fijos unifactorial °C vespertina .....              | 30 |
| 5.2.2.2       | Intervalos simultáneos de Tukey al 90% de confianza .....                           | 31 |
| 5.2.2.3       | Análisis de Efectos Principales .....                                               | 33 |
| 5.2.3         | Diseño y Construcción del biodigestor con sistema de monitoreo en tiempo real ..... | 36 |
| 5.2.3.1       | Diseño del prototipo .....                                                          | 36 |
| 5.2.3.2       | Construcción del biodigestor doméstico .....                                        | 38 |
| 5.2.3.3       | Sistema de monitoreo .....                                                          | 39 |
| 5.2.3.4       | Validación del Biodigestor .....                                                    | 45 |
| Capítulo VI.  | Resultados.....                                                                     | 46 |
| 6.1           | Tipos de biodigestores domésticos.....                                              | 46 |
| 6.2           | Análisis estadístico por parámetro .....                                            | 48 |
| 6.2.1         | Resultados por parámetro.....                                                       | 48 |
| 6.2.1.1       | Distribución del pH en la experimentación.....                                      | 48 |
| 6.2.1.2       | Análisis de varianza de efectos fijos unifactorial para pH .....                    | 49 |
| 6.2.1.3       | Análisis de varianza de efectos fijos unifactorial °C matutina.....                 | 49 |
| 6.2.1.4       | Distribución de la temperatura matutina en la experimentación .....                 | 50 |
| 6.2.1.5       | Análisis de varianza de efectos fijos unifactorial °C vespertina .....              | 51 |
| 6.2.1.6       | Distribución de la temperatura vespertina en la experimentación .....               | 52 |
| 6.2.1.7       | Análisis de efectos principales .....                                               | 53 |
| 6.3           | Construcción del biodigestor.....                                                   | 54 |
| 6.3.1         | Visualización de parámetros.....                                                    | 56 |
| 6.4           | Validación del Biodigestor.....                                                     | 57 |
| 6.4.1         | Análisis de datos .....                                                             | 57 |
| Capítulo VII. | Discusión.....                                                                      | 60 |

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| Capítulo VIII. Conclusiones .....   | 61 |
| Referencias bibliográficas .....    | 62 |
| IX. Anexos .....                    | 69 |
| Anexo 1. Código Arduino uno .....   | 69 |
| Anexo 2. Código Esp32.....          | 72 |
| Anexo 3. Productos académicos ..... | 73 |

## Índice de cuadros

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Tabla 1 Patentes registradas sobre biodigestores</i>                        | 7  |
| <i>Tabla 2 Datos para un experimento unifactorial del factor pH</i>            | 24 |
| <i>Tabla 3 ANOVA pH</i>                                                        | 26 |
| <i>Tabla 4 Datos para un experimento unifactorial del factor °C matutina</i>   | 27 |
| <i>Tabla 5 ANOVA °C Matutina</i>                                               | 28 |
| <i>Tabla 6 Datos para un experimento unifactorial del factor °C vespertina</i> | 29 |
| <i>Tabla 7 ANOVA °C Vespertina</i>                                             | 30 |
| <i>Tabla 8 Intervalos simultáneos de Tukey's al 90% °C matutina</i>            | 31 |
| <i>Tabla 9 Cálculo de efectos principales</i>                                  | 34 |
| <i>Tabla 10 Tipos de biodigestores domésticos</i>                              | 46 |



## Índice de figuras

|                                                                                 |           |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Figura 1 Biodigestor de cúpula fija .....</i>                                | <i>13</i> |
| <i>Figura 2 Biodigestor de tambor flotante.....</i>                             | <i>14</i> |
| <i>Figura 3 Biodigestor portátil .....</i>                                      | <i>14</i> |
| <i>Figura 4 Etapas de la DA.....</i>                                            | <i>15</i> |
| <i>Figura 5 Proceso metodológico .....</i>                                      | <i>22</i> |
| <i>Figura 6 Reactores domiciliarios alimentados con residuos orgánicos.....</i> | <i>23</i> |
| <i>Figura 7 Gráfica de distribución F .....</i>                                 | <i>25</i> |
| <i>Figura 8 Gráfica de distribución .....</i>                                   | <i>32</i> |
| <i>Figura 9 Contenedor interno y externo del biodigestor.....</i>               | <i>36</i> |
| <i>Figura 10 Tapas interna y externa.....</i>                                   | <i>36</i> |
| <i>Figura 11 Agitador mecánico.....</i>                                         | <i>37</i> |
| <i>Figura 12 Carro de transporte-Biodigestor terminado .....</i>                | <i>37</i> |
| <i>Figura 13 Biodigestor doméstico con manivela.....</i>                        | <i>38</i> |
| <i>Figura 14 Sistema de monitoreo .....</i>                                     | <i>39</i> |
| <i>Figura 15 Arduino Mega - ATmega2560 microcontroller.....</i>                 | <i>40</i> |
| <i>Figura 16 ESP32 devkit v1.....</i>                                           | <i>40</i> |
| <i>Figura 17 Sensor de temperatura y humedad DHT11 .....</i>                    | <i>41</i> |
| <i>Figura 18 Sensor de Gas MQ-2 .....</i>                                       | <i>41</i> |
| <i>Figura 19 Sensor MG811 CO2 .....</i>                                         | <i>42</i> |

|                  |                                                                                      |           |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Figura 20</i> | <i>Termómetro digital DS18B20.....</i>                                               | <i>42</i> |
| <i>Figura 21</i> | <i>Sensor PH-4502C pH.....</i>                                                       | <i>43</i> |
| <i>Figura 22</i> | <i>Tft Lcd 3,5 inch, 320 X 480 .....</i>                                             | <i>43</i> |
| <i>Figura 23</i> | <i>Circuito electrónico del sistema de monitoreo.....</i>                            | <i>44</i> |
| <i>Figura 24</i> | <i>Distribución del pH en el Inóculo .....</i>                                       | <i>48</i> |
| <i>Figura 25</i> | <i>Intervalos simultáneos de Tukey's al 90% de confianza de pH.....</i>              | <i>49</i> |
| <i>Figura 26</i> | <i>Intervalos simultáneos de Tukey's 90% de confianza °C matutina .....</i>          | <i>50</i> |
| <i>Figura 27</i> | <i>Inferencia de temperatura por tipo de Inóculo .....</i>                           | <i>51</i> |
| <i>Figura 28</i> | <i>Intervalos simultáneos de Tukey's 90% de confianza °C vespertina .....</i>        | <i>52</i> |
| <i>Figura 29</i> | <i>Inferencia de temperatura vespertina por tipo de Inóculo.....</i>                 | <i>53</i> |
| <i>Figura 30</i> | <i>Efectos principales temperatura y pH.....</i>                                     | <i>54</i> |
| <i>Figura 31</i> | <i>Reactor terminado.....</i>                                                        | <i>55</i> |
| <i>Figura 32</i> | <i>Pantalla de las salidas de datos del sistema de monitoreo en tiempo real.....</i> | <i>56</i> |
| <i>Figura 33</i> | <i>Resumen estadístico del Metano .....</i>                                          | <i>57</i> |
| <i>Figura 34</i> | <i>Resumen estadístico Dióxido de Carbono.....</i>                                   | <i>57</i> |
| <i>Figura 35</i> | <i>Resumen estadístico Temperatura.....</i>                                          | <i>58</i> |
| <i>Figura 36</i> | <i>Resumen estadístico Temperatura Externa.....</i>                                  | <i>58</i> |
| <i>Figura 37</i> | <i>Resumen estadístico pH.....</i>                                                   | <i>59</i> |

## Resumen

El Banco Mundial estima que la generación de residuos sólidos urbanos para el año 2025 será de 3400 millones de toneladas, donde el 50% corresponden a desechos orgánicos, su gestión integral es una preocupación por su impacto directo e indirecto en el medio ambiente, para la eliminación y aprovechamiento de estos se han utilizado diversos métodos como la Digestión Anaeróbica (DA), siendo una tecnología respetuosa con el medio ambiente para convertir los desechos alimentarios y verdes en energía renovable, y abonos orgánicos en un biodigestor. Esta investigación presenta el diseño y construcción de un biodigestor doméstico con un sistema de monitoreo en tiempo real de parámetros que intervienen en el proceso de la DA, alimentado con residuos orgánicos domiciliarios y experimentado con un tiempo de retención hidráulica de 30 días. Mediante una metodología de cuatro fases: 1. Identificar los tipos de biodigestores: Revisión documental; 2. Establecer los parámetros requeridos: Construcción y experimentación de un biodigestor piloto; 3. Diseño de la geometría con SolidWorks, y su elaboración con materiales adecuados e implementación de un sistema de monitoreo de parámetros en tiempo real conectados a un microcontrolador Arduino Mega 2560; y 4. Validación del prototipo a través de un análisis estadístico descriptivo, exploratorio e inferencial. Los resultados obtenidos fueron un reactor vertical móvil de 50 x 70 cm, con capacidad de mezcla 60 L. Además de un estudio basado en análisis de varianza de efectos fijos unifactorial para evaluar el efecto del tipo de inóculo, intervalos simultáneos de Tukey para la diferencia de medias, intervalos al 90% de confianza para  $\mu$  en la temperatura y estiércol, así como el diseño de experimentos de efectos principales considerando los factores °C promedio y pH.

**Palabras Clave.** Residuos domésticos, Biodigestor, Digestión anaerobia, Sistema de monitoreo, Diseño de experimentos

## **Abstract**

The World Bank estimates that the generation of municipal solid waste by 2025 will be 3,400 million tons, with 50% corresponding to organic waste. Its comprehensive management is a concern due to its direct and indirect impact on the environment. Various methods have been used for its disposal and utilization, such as Anaerobic Digestion (AD), an environmentally friendly technology that converts food and green waste into renewable energy and organic fertilizers in a biodigester. This research presents the design and construction of a household biodigester with a real-time monitoring system for parameters involved in the AD process, fed with household organic waste and experimented with a hydraulic retention time of 30 days. Through a methodology of four phases: 1. Identifying the types of biodigesters: Documentary review; 2. Establishing the required parameters: Construction and experimentation of a pilot biodigester; 3. Design of the geometry with SolidWorks, and its construction with suitable materials and implementation of a real-time parameter monitoring system connected to an Arduino Mega 2560 microcontroller; and 4. Prototype validation through descriptive, exploratory, and inferential statistical analysis. The results obtained were a 50 x 70 cm mobile vertical reactor, with a 60 L mixing capacity. Additionally, a study based on a one-way fixed-effects analysis of variance to evaluate the effect of the type of inoculum, simultaneous Tukey intervals for mean differences, 90% confidence intervals for  $\mu$  in temperature and manure, as well as the design of experiments for main effects considering the factors average °C and pH.

**Keywords:** Household waste, Biodigester, Anaerobic digestion, Monitoring system, Design of experiments.

## Capítulo I. Introducción

En el marco de la sustentabilidad ambiental y de los procesos de urbanización, la gestión integral de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) hoy en día es una preocupación de mayor importancia por sus impactos directos e indirectos, algunos de ellos irreversibles y permanentes en el medio ambiente aire, agua, tierra, paisaje como en la salud de la población (CEPAL, 2016).

El Banco Mundial estima que la generación de residuos para 2025 será de 3400 millones de toneladas, donde el 33% de estos se gestionan de forma inadecuada al no recibir ningún tratamiento. Mientras que, la tasa de generación per cápita en los países de desarrollo es de 0.86 Kg por día, siendo los factores económicos, estacionales geográficos y culturales los que influyen en la cantidad de RSU generados a nivel local, nacional e internacional (Kaza et al., 2018). Para la eliminación de desechos orgánicos existen métodos reportados en la literatura como: el compostaje aeróbico, vertederos, incineración, digestión anaeróbica y otros (Ajay et al., 2021).

La Digestión Anaeróbica (DA) ha sido reconocida como una tecnología respetuosa con el medio ambiente para convertir los desechos alimentarios y otros en energía renovable y abonos orgánicos (Granzotto et al., 2021). La DA es un proceso que se realiza dentro de un biodigestor que se define como un contenedor cerrado herméticamente (Mutungwazi et al., 2018); dando como resultado dos productos principales: Biogás y composta orgánica lo que representa una alternativa para el tratamiento de los residuos orgánicos y la disminución de gases de efecto invernadero (Jyothilakshmi & Prakash, 2016). Cabe resaltar que este tratamiento se ve influenciado por diferentes factores como la temperatura, pH, Tiempo de Retención Hidráulica (TRH), inóculo y el sustrato, los cuales requieren de un control definido para que los microorganismos involucrados no se vean afectados (Granzotto et al., 2021).

Diversos autores proponen biodigestores alimentados con residuos de alimentos sin clasificarlos, usando como inóculo estiércol de bovino (Bhandari et al., 2018; Jyothilakshmi & Prakash, 2016; Nwankwo et al., 2017). Miller et al. (2020) elaboraron un biodigestor con calefacción pasiva alimentándolo con desechos de un restaurant universitario más estiércol

porcino con agua de lluvia; y Nuhu et al. (2021) lo diseñaron utilizando residuos de un comedor universitario, estiércol de pollo y lodos de aguas residuales.

Otro aspecto importante que considerar en el diseño de biodigestores es el análisis de parámetros de la DA a través de métodos estadísticos. Por ejemplo, Ventorino et al. (2018) evalúan las diferencias entre muestras en cada grupo microbiano con un Análisis de Varianza (ANOVA) unidireccional y la prueba post hoc de Duncan para la comparación de medias por pares. Nwankwo et al. (2017) calculan medias, desviación estándar, gráficos relevantes y aplicación de la ANOVA de una vía. Miller et al. (2020) aplican ANOVA con el fin de medir las relaciones entre masa, porcentaje de metano y temperatura exterior, así como pruebas de diferencia significativa de Tukey para la medición del metano generado en las diferentes etapas. Sillero et al. (2023) analizan la correlación de Pearson entre diferentes TRH probados y el desempeño de cada sistema en términos de producción de metano y su rendimiento, además de comparar las medias de los rendimientos de metano y la disminución de TRH. Granzotto et al. (2021) hacen un análisis descriptivo de promedios y la desviación estándar de sus muestras, una correlación entre los parámetros y la concentración de metano mediante un modelo de regresión lineal múltiple; y Gómez-Muñoz et al. (2024) aplican una metodología estadística diseño de experimentos de un factor y el análisis de efectos principales de los factores °C promedio y pH.

Esta investigación tuvo como objetivo diseñar y construir un biodigestor anaerobio discontinuo tipo Batch alimentado con residuos orgánicos domiciliarios e inoculado con estiércol caprino para la producción de abono orgánico. Analizando los parámetros pH, temperatura, tiempo de retención hidráulica, tipo de inóculo con el método estadístico diseño de experimentos, y su respectivo sistema de monitoreo para que los datos puedan ser interpretados por el usuario.

## Capítulo II. Antecedentes

El incremento de la población en el mundo ha ocasionado una generación excesiva de RSU que se generan diariamente. La poca o nula valorización de estos o su depósito en vertederos genera gases y lixiviados que amenazan la salud pública y el medio ambiente (CEPAL, 2016).

El volumen de producción de RSU está estrechamente ligado con el crecimiento demográfico y urbano, el grado de industrialización y las condiciones socioeconómicas, el estilo de vida y la educación, que en general son una mezcla de residuos sólidos orgánicos degradables como residuos de alimentos y papel, residuos inorgánicos como vidrio, metal y otros (Granzotto et al., 2021).

La existencia de reglamentos y normas que regulen la gestión de RSU fomenta un cambio en los sistemas lineales a sistemas circulares, lo que permite desviar el depósito en los vertederos a priorizar la recuperación de recursos mediante el procesamiento, en este sentido la DA ha demostrado ser particularmente efectiva para el aprovechamiento, la generación de energía renovable y así evitar la emisión descontrolada de gases de efecto invernadero (Rocamora et al., 2020). La DA ha sido reconocida como una tecnología respetuosa con el medio ambiente para convertir los desechos de alimentos, así como otros desechos orgánicos en energía renovable en forma de biogás y fertilizante orgánico estable, este proceso es biológico natural en el que una comunidad de microorganismos coopera para una fermentación estable, autorregulada y en ausencia de oxígeno (Kuczman et al., 2018).

El proceso de DA se observó con la emisión de biogás de los terrenos húmedos y pantanosos y fue utilizado al principio por los antiguos habitantes del imperio Asirio para calentar los baños de agua hace más de 3000 años, posteriormente se utilizó en las pilas de estiércol de ganado para producir fertilizante maduro que originaba gases al desenterrarlo, así mismo en el siglo XVI, Jan Baptista van Helmont descubrió que al degradar materia orgánica se podían generar gases inflamables. Pero fue Volta, científico italiano, quien descubre la relación entre el gas generado y la degradación de materia orgánica y Sir HumpHry Davy descubrió que el gas contiene metano (Guvvala & Maurya, 2022).

En Latinoamérica la implementación de los biodigestores domésticos se vio impulsado después de la crisis energética de la década de 1970, sin embargo, el número de estos instalados está muy por detrás de Asia, debido a la falta de aceptación social, los nulos subsidios financieros y la falta de apoyo institucional; cabe resaltar que el diseño depende de las condiciones climáticas, los desechos orgánicos disponibles, los materiales y las habilidades del usuario (Garfí et al., 2016). Actualmente se han reportado en la literatura distintas propuestas de tratamiento de la DA en biodigestores que contribuyen a la disminución del impacto ambiental, convirtiendo los residuos orgánicos en Biogás y abono orgánico. Siendo una alternativa para el tratamiento de residuos de hogares, económica, práctica y factible.

## **2.1 En el mundo**

En África desarrollaron un biodigestor automático horizontal alimentado con residuos de hogares sin clasificar con estiércol bovino (Saber et al., 2021; Nwankwo et al., 2017). En Nigeria se hizo un biodigestor manual vertical usando residuos orgánicos provenientes de un comedor universitario, estiércol de pollo y lodos de aguas residuales (Nuhu et al., 2021). Kouya-Takala et al. (2019) propone un biodigestor alimentado con residuos de cocina, hojas de *tithoniadiversifolia* y estiércol bovino. En la India construyeron un biodigestor manual vertical suministrado con residuos de alimentos de un albergue comunitario, estiércol bovino y agua; otro similar, automático vertical donde agregan cartón más lodo de tratamientos de aguas residuales (Jyothilakshmi & Prakash, 2016; Kesharwani & Bajpai, 2021; Bhandari et al., 2018; y Begum et al., 2021). En Italia Ventorino et al. (2018) realizaron una serie de biodigestores manuales verticales nutridos con desechos de alimentos, estiércol animal previamente tratado. Y en China construyen otro de tres etapas con residuos de un restaurant universitario y lodo de una planta de tratamiento de aguas residuales (Zhang et al., 2017).

## **2.2 En América**

En Estados Unidos Miller et al. (2020) analizan el rendimiento de biogás resultante de operar un sistema de DA en un invernadero con calefacción pasiva alimentado con desechos de restaurant universitario, estiércol porcino y agua de lluvia. Oshik Moshe (2015) describe un dispositivo de ensamblaje que incluye una envoltura exoesquelética estructurada flexible, digestor anaeróbico plegable, flexible y tanque de gas.



Por otra parte, en Brasil refieren un biodigestor operado con un sistema de alimentación continuo, agitación, temperatura constante, alimentado con residuos orgánicos clasificados y estiércol porcino (Kuczman et al., 2018); otra referencia es un biodigestor semicontinuo para el tratamiento de residuos de un restaurante universitario más estiércol bovino (Granzotto et al., 2021); y Dos Santos et al. (2020) desarrollan un biodigestor de desechos orgánicos de un mercado con estiércol caprino, bovino y lodo de un planta de tratamiento de aguas residuales.

### **2.3 Sistemas de monitoreo de parámetros de la DA**

La incorporación de sistemas para el monitoreo de parámetros fisicoquímicos que intervienen en la DA en el diseño de reactores a pequeña escala permite garantizar un funcionamiento eficiente y eficaz del proceso, detectar problemas y mejorar la eficiencia energética (Issahaku et al., 2024); debido a que el proceso de la DA es delicado y puede afectar la estabilidad del reactor y, en consecuencia, la obtención de biogás y fertilizantes orgánicos (Cruz et al., 2021; Kumar & Samadder, 2020; Tonanzi et al., 2020).

Investigaciones han abordado el tema de monitoreo en reactores, por ejemplo, Abdurrahman et al. (2020) desarrollaron un sistema para monitorear el volumen de biogás producido utilizando Internet de las Cosas (IoT), módulo de comunicación GSM/, reloj en tiempo real (RTC), fuente de alimentación, módulo SIM800L, con una frecuencia de lectura de datos en periodos de 15 minutos almacenándolos en una tarjeta SD. Mukasine et al. (2023) implementaron un marco de IoT para la recopilación de parámetros ambientales como la temperatura ambiente e interior, humedad, pH y contenido de humedad del sustrato a través de sensores, microcontrolador Raspberry Pi 3 B+ personalizado con un módulo Wi-Fi integrado, actuadores y almacenamiento en la nube en una base de datos NoSQL (MongoDB) utilizando el protocolo MQTT, los datos se recopilaron durante 30 días y una frecuencia de 16 minutos. Nagahage et al. (2021) desarrollaron un sistema de monitoreo de metano de bajo costo con sensores TGS 2611, MQ-4, para medir la humedad, temperatura SHT3x, con una unidad de microcontrolador STC89C52RC y un bus I2C implementado con un software para interconectar un módulo LCD de  $16 \times 2$ , un convertidor analógico digital (ADC) ADS1115 de 16 bits, además vincularon un módulo WiFi de bajo costo ESP8266-12E utilizando la API ThingSpeak para la adquisición de datos basada en la nube. Yang et al. (2019) construyeron un dispositivo portátil para medir el

contenido de metano en biogás, utilizando un sensor de metano MQ-4, sensores de humedad, temperatura y presión dentro de un frasco de vidrio hermético conectado a un clon programable de Arduino Uno, la respuesta se registró cada segundo y se almacenó en una tarjeta SD. Radu et al. (2022) diseñaron y probaron un sistema creando una red de dos sitios independientes de generación de biogás situados en Reino Unido y Tailandia, con sensores digitales de temperatura (DS18B20), un transductor de presión del espacio de cabeza (TE Connectivity U7139-150PA-5W000); presión barométrica (BMP180 Bosch), y humedad (DHT AM2302), los datos fueron registrados en una computadora usando las bibliotecas de ciencia de datos del lenguaje de programación Python. Y (Logan et al., 2019) desarrollaron un sistema de monitoreo remoto en tiempo real para la supervisión centralizada de plantas de DA, instalaron sondas de pH, temperatura y potencial de oxidación-reducción (ORP) (código de electrodo: EC100GTSO05B, ECHTPPTSO05B) y se monitorearon en línea mediante un controlador lógico programable (PLC) (EUTECH Thermo Scientific AlpHa 190 Series), calibrando los electrodos cada seis meses para registrar y transmitir la información a través de un servidor central. Donde los datos del PLC se podían monitorear cada segundo en la ubicación centralizada en un registrador de datos programable V130 con una tarjeta microSD de 512 GB, y con la aplicación Team Viewer el usuario podía rastrear el rendimiento del sistema.

## 2.4 Estado de la técnica

**Tabla 1**

*Patentes registradas de biodigestores*

| No. | Nombre                                                                                                                                   | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | País      | Patente           | Autor                                        |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------------------|----------------------------------------------|
| 1   | Biodigestor Orbicular Bifásico                                                                                                           | Digestor anaeróbico que incluye un solo recipiente orbicular con dos cámaras configuradas para el tratamiento separado de materia orgánica con alto y bajo contenido de sólidos.                                                                                                                                            | USA       | US 6,982,035 B1   | (O'Keefe M. David, 2006)                     |
| 2   | Biodigestor portátil más barato para la producción de biogás                                                                             | Biodigestor económico suministrado con estiércol para la producción de biogás, combustible limpio y electricidad entre 6-7 horas por día.                                                                                                                                                                                   | India     | 201821029617      | (Shyamsing Vijaysing Thakura et al., 2018)   |
| 3   | Biodigestor anaerobio prefabricado                                                                                                       | Biodigestor anaeróbico prefabricado con cámara de biodigestión para contener biolodos y biogás.                                                                                                                                                                                                                             | Australia | WO 2018/102847 A1 | (Ben Jeffreys & Lachlan Harris, 2018)        |
| 4   | Biodigestor compacto                                                                                                                     | Biodigestor compacto para generación de fertilizante orgánico y biogás a partir de reciclaje doméstico de basura orgánica, comprende: una estructura basal, dispositivo receptor dispuesto en la zona superior, salida de afluente inferior, salida de afluente superior y un estanque retráctil de acumulación del biogás. | Chile     | WO 2022/120505 A1 | (Rodríguez Godoy Francisca, 2022)            |
| 5   | Digestor anaeróbico                                                                                                                      | Digestor anaeróbico y un método para tratar desechos orgánicos y recuperar de ellos gas metano de calidad utilizable.                                                                                                                                                                                                       | USA       | US20040055952A1   | (Baumgartner John W. & Kubesh Mark K., 2004) |
| 6   | Aparato ligero con soporte exoesquelético con su respectivo juego de piezas y método para la producción de biogás y fertilizante líquido | Dispositivo de ensamblaje y un método para reciclar desechos orgánicos y obtener biogás y fertilizante líquido incluye: una envoltura exoesquelética estructurada flexible, digestor anaeróbico plegable y un tanque de gas.                                                                                                | USA       | US15/632,367      | (Oshik Moshe Efrati, 2015)                   |

|    |                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |           |                     |                                                                         |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 7  | Digestor anaerobio con agitación y monitoreo remoto                                                                                                                            | Biodigestor, cuenta con un tanque de entrada de materia orgánica, conexión en la parte superior y una bomba manual que recircula la materia orgánica.                                                                                                                                                                                                                                  | Bolivia   | WO 2023/079441 A1   | (Arango Osorio Sergio Andres & Bustamante Cheverra Carlos Andres, 2022) |
| 8  | Método y aparato para el tratamiento de residuos orgánicos                                                                                                                     | La invención muestra un método para tratar material de desecho orgánico usando un proceso de DA y una parte del producto del proceso se utiliza en la lombricultura, dando como resultado la producción de fertilizantes sólidos y líquidos.                                                                                                                                           | Australia | WO2022/058996 A1    | (Fusarelli Peter & Pluck Attorneys Adams, 2021)                         |
| 9  | Dispositivo para procesar residuos de alimentos y método para operar un dispositivo para procesar residuos de alimentos                                                        | La invención refiere un método de funcionamiento del dispositivo para el tratamiento de residuos alimentarios que se basa en el concepto de "aprendizaje automático.                                                                                                                                                                                                                   | Brasil    | WO 2023/279181 A1   | (Prates Filho & FSalim Lopes, 2023)                                     |
| 10 | Biodigestor domestico integrable de cocina                                                                                                                                     | Biodigestor doméstico para cocina, consiste en un paralelepípedo rectangular de 30 cm de anchura, 60 cm de profundidad y 87 cm de altura, dotado de 4 patas telescópicas. Cuenta con una Cámara de digestión, un sistema de paletas ancladas a un eje de mezclado, motor instalado en la placa central, sistema de calefacción por placa térmica y un sistema de circulación de gases. | España    | ES1259794U          | (Pérez-Chirinos Sanz Francisco Javier, 2020)                            |
| 11 | Biorreactor anaerobio continuo de tanque agitado modificado con estructuras para mezcla homogénea con fluido de baja velocidad para el tratamiento de residuos sólidos urbanos | El modelo de utilidad combina adaptaciones en un biorreactor anaeróbico continuo de tanque agitado (CSTR) con estructuras para realizar una mezcla homogénea de residuos sólidos urbanos (RSU) realizada con fluidos de baja velocidad en el interior del tanque.                                                                                                                      | Brasil    | BR202020008951-5 U2 | (Anderson Cardoso Sakuma & Silva Deggerone Igor Da, 2021)               |
| 12 | Mini biodigestor                                                                                                                                                               | Su sistema se ubica dentro de una caja del tamaño aproximado de un electrodoméstico para producir energía eléctrica limpia.                                                                                                                                                                                                                                                            | Brasil    | BR102021004129-3 A2 | (Ruggiero Cotait Flavius, 2021)                                         |
| 13 | Procedimiento y dispositivo para el tratamiento de residuos orgánicos, incluida la digestión anaerobia de los                                                                  | La invención se refiere a un proceso continuo para el tratamiento de residuos orgánicos que tiene lugar en una planta, el proceso de tratamiento de residuos orgánicos comprende las etapas de recogida de digestato y biogás.                                                                                                                                                         | Francia   | WO2022013808A1      | (Sallustro Jean-Luc & Schmidt, 2022)                                    |

|    |                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |        |                  |                                                   |
|----|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|------------------|---------------------------------------------------|
|    | mismos y el compostaje de los digestatos                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |        |                  |                                                   |
| 14 | Modelo industrial de biodigestor                                    | Se caracteriza por su forma y configuración especiales que le proporcionan un aspecto peculiar y propio.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | México | 56208            | (Ren Yuqian; Yuasa Rangel Alejandro Isidro, 2019) |
| 15 | Modelo de utilidad de biorreactor anaerobio                         | Biorreactor anaerobio de flujo ascendente conformado por un contenedor principal y un tanque de fondo cónico que definen internamente una zona de manto de lodos, de sedimentación y de separación gas-líquido-sólido.                                                                                                                                                                                                                                                                          | México | 3520             | (Díaz Romero Diana Nahyeli, 2016)                 |
| 16 | Biorreactor anaerobio                                               | Biorreactor RAFA O UASB conformado por un contenedor principal y uno superior que forman un cuerpo base, en cuyo interior se define una zona de manto de lodos y de separación gas-líquido-sólido.                                                                                                                                                                                                                                                                                              | México | 4289             | (Toscano Villicaña Xicotencatl Fernando, 2020)    |
| 17 | Sistema de tratamiento mixto para aguas residuales                  | El biodigestor tiene la finalidad de reducir al máximo la carga masiva que contiene los desechos vegetales, jabonosos, frutales y heces humanas, todo diluido en agua. La mezcla se degrada con microorganismos produciendo principalmente metano y un subproducto líquido.                                                                                                                                                                                                                     | México | MX/a/2018/006634 | (Barreto Castro Maria del Rocio, 2018)            |
| 18 | Biodigestor autolimpiable                                           | El Modelo de Utilidad de biodigestor autolimpiable provisto con elementos de filtración y multiconexión fabricado en una sola pieza, tiene como innovación el filtro, cuyo diseño ayuda a mejorar la calidad del agua tratada.                                                                                                                                                                                                                                                                  | México | MX/u/2014/000673 | (Medina Blake Fernando, 2020)                     |
| 19 | Biodigestor experimental de biogás mezclado por burbujeo            | Biodigestor de biogás mezclado por burbujeo, caracterizado como un aparato generador de biogás metano, sin uso de energía eléctrica y puede operar con temperaturas de 25 °C, se alimenta con cualquier sustrato orgánico para la producción de gas metano a través de un serpentín helicoidal cónico perforado.                                                                                                                                                                                | México | MX/a/2018/015215 | (Gomez Victor Alfredo, 2020)                      |
| 20 | Homogeneizador para biodigestor con dispersión de materia integrado | Dispositivo que permite la agitación incluso con efecto vórtice a la vez que puede emplearse como canal de distribución y dispersión del sustrato tanto en la parte inferior como superior. Con una manivela que sirve para hacer rotar el homogeneizador que se encuentra en un canal de distribución en el que pueden colocarse los cables de los sensores. El diseño del homogeneizador evita la formación de natas que impidan la salida de gas y garantiza una temperatura y concentración | México | MX/a/2019/000485 | (De la cruz Ascencio Johana Kristhel, 2019)       |

|    |                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |        |                  |                                   |
|----|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|------------------|-----------------------------------|
|    |                                                                    | homogénea de la materia prima en diferentes puntos del reactor anaeróbico, además de evitar que haya depósitos de sedimentos.                                                                                                                                                                                                                                                                                       |        |                  |                                   |
| 21 | Biodigestor móvil                                                  | La invención costa de un tanque que permite un sellado hermético para generar un ambiente anaerobio que a la vez posee un mecanismo de llenado y vaciado de residuos orgánicos, sistema de filtrado de biogás para retirar los sulfuros generados por la biodigestión, permite el retirado periódico de los óxidos generados en el filtro.                                                                          | México | MX/u/2018/000451 | (Hurtado Rivera Jacob, 2018)      |
| 22 | Sistema integral de tratamiento y desinfección de desechos humanos | La invención trata de un sistema para el tratamiento y desinfección de desechos humanos que comprenden residuos sólidos y líquidos, contiene un equipo de colección de residuos sólidos y líquidos, biodigestor junto al equipo de colección, estabilizador de lodos, una celda de combustible microbiana conectada al biodigestor y un filtro electro-desinfectante acoplado a la celda de combustible microbiana. | México | MX/a/2019/003119 | (Robles Gutiérrez Irma, 2019)     |
| 23 | Modelo industrial de coraza para biodigestor                       | La invención se refiere a un modelo de coraza para biodigestor, totalmente diferente, caracterizado por su forma especial que brinda un aspecto peculiar y propio.                                                                                                                                                                                                                                                  | México | 61199            | (Gutierrez Vargas Santiago, 2021) |
| 24 | Biodigestor para nopal                                             | La invención consiste en un dispositivo biodigestor para procesar los productos y subproductos de la planta de nopal, genera biogás, biofertilizantes, lodos, humus y energía eléctrica.                                                                                                                                                                                                                            | México | Mx/a/2012/013531 | (Karlett Olarte Jorge Adam, 2021) |
| 25 | Modelo industrial de biodigestor                                   | La invención refiere un diseño industrial de biodigestor biológico totalmente diferente caracterizado por su forma especial y ornato que le da un aspecto peculiar y propio.                                                                                                                                                                                                                                        | México | MX 21576 B       | (Miyamonte Mex, 2021)             |
| 26 | Reactor para sistema biodigestor y método para su fabricación      | Se revelan métodos, sistemas y/o aparatos relacionados con la fabricación y aprovechamiento de biodigestores.                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | México | MX 399807 B      | (Buen manejo del campo, 2023)     |

## **2.5 Conceptos**

- **Residuos**

En México la Ley General del equilibrio Ecológico y Protección al medio ambiente (LGEEPA) en su artículo 3° (Frac. XXXII), define como residuo a “Cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó” (LGEEPA, 2024); mientras que la ley General para la Prevención y Gestión de los residuos (LGPGIR) lo define como cualquier material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final (LGPGIR, 2023).

- **Residuos Sólidos Urbanos y su clasificación**

Así mismo la ley General para la prevención y gestión de los residuos en su título tercero, artículo 15 clasifica los residuos en residuos peligrosos, de manejo especial y sólidos urbanos. Estos últimos a su vez los define como los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos (LGPGIR, 2023). Estos residuos de igual forma podrán subclasificarse en orgánicos e inorgánicos con objeto de facilitar su separación primaria y secundaria (LGPGIR, 2023).

A nivel mundial, se producen anualmente alrededor de 2 mil millones de toneladas de residuos sólidos urbanos, de los cuales entre el 32% y 56% son residuos orgánicos biodegradables (Negri et al., 2020). Estos son comúnmente conocidos como basura, desecho o residuo, están compuestos por residuos orgánicos (alimentos, excedentes de comida y otras), cartón, papel, madera y en general materiales inorgánicos como vidrio, plástico y metales.

- **Digestión Anaeróbica**

La digestión anaerobia, también denominada biometanización, es un proceso biológico que ocurre en ausencia de oxígeno, en el cual la materia orgánica compleja se descompone gracias

a la acción de varios grupos de microorganismos, dando como productos finales biogás y digestato. El biogás está conformado por metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y las proporciones presentes están relacionadas al tipo de residuo tratado. El digestato obtenido es fuertemente estable y por lo tanto puede utilizarse como fertilizante en la agricultura (Munisamy et al., 2017). Este proceso resulta ser económicamente factible y de bajo costo, dado que se emplea para tratar residuos con alto contenido orgánico y de humedad, que se ha convertido en una tecnología aceptada mundialmente para el tratamiento de materiales orgánicos porque ofrece ventajas significativas como un menor consumo de energía, de espacio y de costos generales. Se caracteriza por ser un proceso relativamente lento y se equilibra cuando los parámetros que la afectan se mantienen dentro del rango deseado (Ajay et al., 2021).

- **Biodigestor**

Es un contenedor cerrado herméticamente diseñado para mejorar la digestión anaeróbica de desechos biodegradables como estiércol animal, alimentos, aguas negras o lodos, utilizados para la producción de biogás y abono orgánico (Mutungwazi et al., 2018). Mientras que Ajay et al. (2021) lo define como una estructura simple donde ocurren reacciones bioquímicas en presencia de microorganismos para generar biogás en condiciones anaeróbicas llamado digestor dado que el contenido orgánico presente en la biomasa es consumido y digerido por bacterias.

- **Biodigestor doméstico**

Definidos como biodigestores de pequeña escala instalados para hogares o pequeñas instalaciones (Mutungwazi et al., 2018). Mientras que Kamp & Bermúdez Forn (2016) los definen como reactores semicontinuos de pequeña escala controlados por microorganismos que procesan los compuestos orgánicos con los que alimentan, produciendo así una mezcla de 50-70% de metano y 30-40% de dióxido de carbono, que pueden variar en tamaño y forma, pero los principios de su funcionamiento son similares.



## 2.6 Clasificación de biodigestores

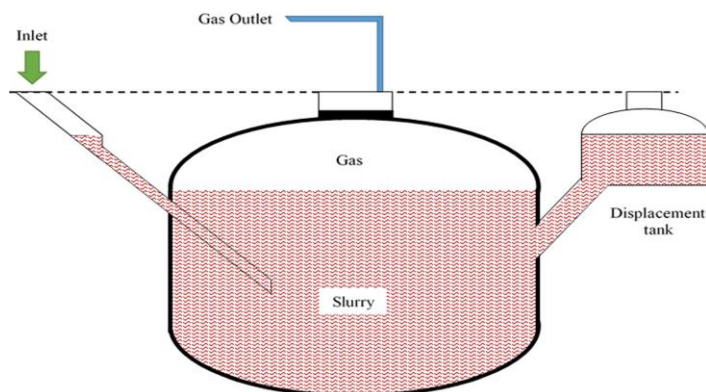
### ○ Biodigestor de cúpula fija o Biodigestor tipo chino

Consta de una cámara cilíndrica, una entrada de materia prima y una salida que también sirve como tanque de compensación, se construye bajo tierra con ladrillo y hormigón, donde su sistema opera sin calefacción y no cuenta con agitador. El biogás se acumula en la parte superior de la cámara, una tubería lo transporta desde el digestor hasta un depósito, donde se almacena y luego se usa para cocinar, calentar o iluminar (Garfí et al., 2016).

Las dimensiones dependen de su ubicación y la cantidad de materia prima disponible todos los días, Figura 1.

**Figura 1**

*Biodigestor de cúpula fija*



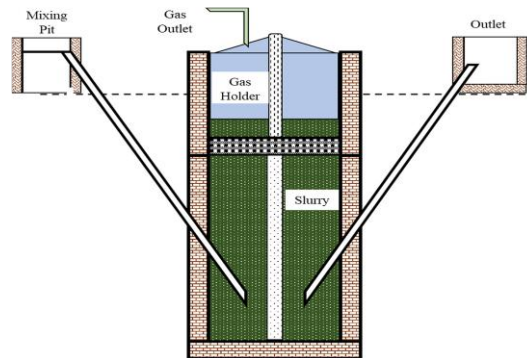
Nota. Adaptado de Decentralized energy from portable Biogás digesters using domestic kitchen waste: A review, (Ajay et al., 2021), Waste Management, 125.

### ○ Biodigestor de tambor flotante

Conocido como KVIC se originó en India en 1962. Su construcción en general es de mampostería colocada bajo suelo, un soporte móvil de acero para la recolección de gas. Este tipo de biodigestor demanda mano de obra calificada para su instalación, lo que lo vuelve sumamente costoso, Figura 2, (Ajay et al., 2021).

**Figura 2**

*Biodigestor de tambor flotante*



Nota. Adaptado de Decentralized energy from portable Biogás digesters using domestic kitchen waste: A review, (Ajay et al., 2021), Waste Management, 125.

○ **Biodigestor portátil**

Elaborados con PVC duradero reforzado, material flexible extremadamente fuerte que proporciona operaciones a largo plazo, libre de mantenimiento, y resistentes a las bacterias para el tratamiento de residuos de cocina generados a pequeña escala, es decir para casas, hoteles, restaurantes, empresas y otros, Figura 3.

**Figura 3**

*Biodigestor portátil*



Nota. Adaptado de Decentralized energy from portable Biogás digesters using domestic kitchen waste: A review, (Ajay et al., 2021), Waste Management, 125.

## 2.7 Sistemas de DA

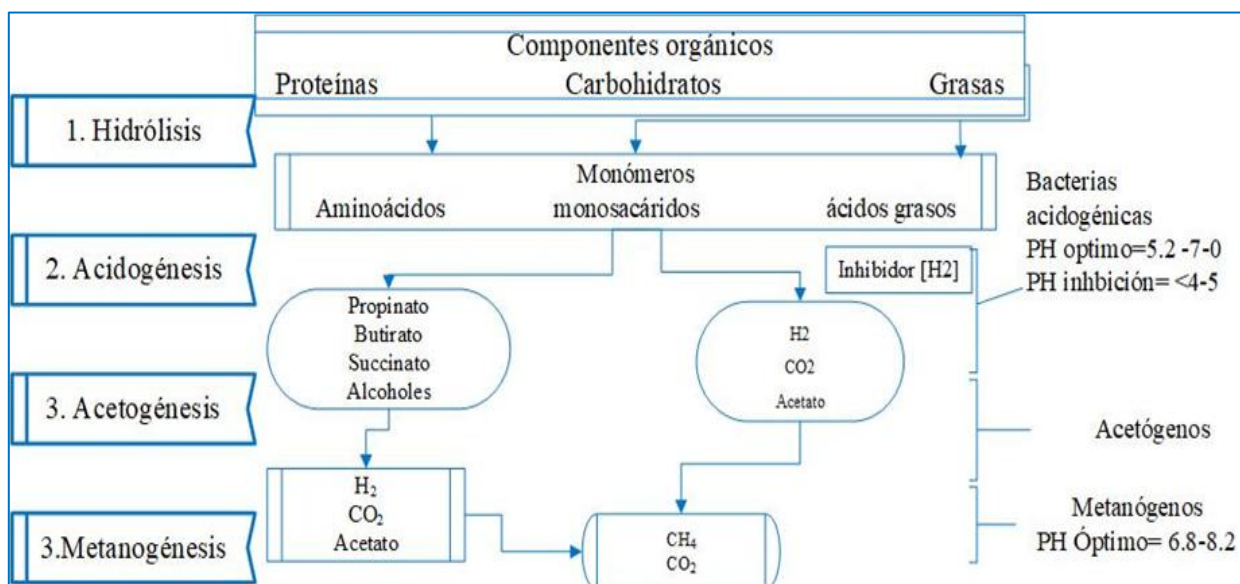
Los procesos de DA se pueden clasificar según el contenido de Sólidos Totales (ST) presentes en el digestor, los cuales pueden ser, húmedo donde el contenido de ST oscila entre el 10 al 15% y seco donde el contenido de ST fluctúa entre el 25 al 45% (Luning et al., 2003). También se pueden clasificar de acuerdo con el número de reactores utilizados en monoetapa donde el proceso ocurre en un solo reactor, mientras que en la multietapa se hace uso de dos o más reactores que separan las etapas de acetogénesis y metanogénesis. Una última clasificación de acuerdo con su alimentación cuando los reactores son alimentados al inicio del proceso y se descargan al final son denominados reactores discontinuos, mientras que en los reactores donde la materia prima se carga y descarga continuamente son llamados de flujo continuo (Themelis J.N, 2002).

## 2.8 Etapas de la DA

La base de la DA es una compleja red alimenticia que se puede dividir en cuatro pasos, figura 4, (Mortier et al., 2016).

**Figura 4**

*Etapas de la DA*



Nota. Adaptado de Organic Recycling of Agricultural Waste Today: Composting and Anaerobic Digestion, por (Mortier et al., 2016), Elsevier Inc.

## **2.9 Microbiología de la DA**

### **1. Hidrólisis**

En este paso las estructuras complejas, insolubles y de alto peso molecular, como proteínas, carbohidratos y grasas se degradan enzimáticamente a sus componentes básicos: Proteínas a aminoácidos, Carbohidratos a monosacáridos y grasas a ácidos grasos. Se considera generalmente como la etapa limitante de la velocidad del proceso. Una vez formados los productos solubles las bacterias acidogénicas degradarán más a estos productos a otros menos complejos ácidos orgánicos, alcoholes  $H_2$  y  $CO_2$  (Ometto et al., 2019). En términos generales, en la hidrólisis una temperatura óptima oscila entre 30 y 50 °C y un PH de 5 a 7 (Meegoda et al., 2018).

### **2. Acidogénesis**

Los oligo- y monómeros (azúcares, aminoácidos y lípidos) se fermentan a acetato, dióxido de carbono e hidrógeno, así como a otros ácidos orgánicos y alcoholes. Estas transformaciones son generalmente rápidas, lo que puede conducir a la acumulación de ácidos grasos volátiles y otros productos intermedios, si la renovación de las fases de la acetogénesis y especialmente en la metanogénesis no es lo suficientemente alta. Los organismos activos en la acidogénesis pertenecen típicamente a los bacteroidetes, Firmicutes, Chloroflexi y Proteobacteria (Ometto et al., 2019).

### **3. Acetogénesis**

En esta etapa es la formación de acetato,  $H_2$  y  $CO_2$  a partir de los productos de fermentación de la acidogénesis. Las bacterias activas en este paso incluyen los géneros *Pelotomaculum*, *Smithella* y *Syntrophobacter*, así como organismos especializados en la degradación (Ometto et al., 2019). Los principales ácidos producidos son el ácido acético ( $CH_3COOH$ ), ácido propiónico ( $CH_3CH_2COOH$ ), ácido butírico ( $CH_3CH_2CH_2COOH$ ) y etanol ( $C_2H_5OH$ ) (Themelis J.N, 2002).

### **4. Metanogénesis**

La metanogénesis marca la etapa final de la DA, donde los microorganismos metanogénicos producen metano. En esta última fase el PH varía entre 6.8 y 8.2 y se distingue por dos grupos

de bacterias: metanógenos acetoclásticos que degradan acetato a metano y CO<sub>2</sub>, los metanógenos hidrogenotróficos producen metano, agua a partir de hidrogeno y CO<sub>2</sub>, (Ometto et al., 2019).

## **2.10 Parámetros que intervienen en la DA**

Un **parámetro** (del griego antiguo *παρά*, *para*: "al lado", "subsidiario"; y *μέτρον*, *metron*: "medir"), característica que ayuda a definir o clasificar un sistema específico para evaluar su rendimiento, estado, condición, otros.

El proceso de la DA se ve afectado por diversos parámetros físicos químicos como: materia prima, inóculo, Temperatura, PH, Relación Carbono-Nitrógeno (C: N), tasa de carga orgánica (OLR), tiempo de retención hidráulica (TRH) y agitación. Es importante monitorear por métodos estadísticos o matemáticos estos parámetros con la finalidad de optimizar la obtención de los productos como el biogás y abono orgánico.

- **Materia prima**

Para el funcionamiento de un biodigestor la proporción materia prima a estiércol debe ser de 2:1, dentro del siguiente periodo de tres semanas, la cantidad debe reducirse gradualmente. Donde la eficiencia del inóculo depende del tipo de material, pero en comparación con otras materias primas el estiércol de cabra tiene una mayor población microbiana anaeróbica y se considera más eficiente (Mahmudul et al., 2021).

- **Temperatura**

La temperatura, parámetro clave que afecta la DA que influye en el crecimiento microbiano, las actividades enzimáticas y en consecuencia en el rendimiento del metano, aunque convencionalmente la DA se realiza a temperaturas mesófilas de 35 a 37 °C, la DA termófila tiene las ventajas de una mayor tasa de crecimiento específico, un metabolismo más rápido, una mayor capacidad de carga y, en consecuencia, da como resultado una mayor producción de metano (Uçkun Kiran et al., 2016). Sin embargo, para una mejor actividad microbiana la temperatura debe estar alrededor de los 35°C y 55° en condiciones mesófilas y termófilas respectivamente (Mahmudul et al., 2021).

- **pH**

Medida que indica la acidez o alcalinidad del agua, se define como la concentración de iones de hidrógeno en el agua, su escala es logarítmica con valores de 0 a 14. Las bacterias anaeróbicas, en especial las metanógenas son sensibles al ácido, el proceso de DA puede hacer

frente a la materia prima de biogás entre 5.5 a 8.5 y cercano a 7.0 da como resultado una digestión eficiente. EL pH óptimo para la hidrólisis es de 5.5 a 6.5 y en la acidogénesis está entre 6.5 y 8.5 (Mahmudul et al., 2021).

- **Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)**

La relación entre la cantidad de carbono y nitrógeno presente en los compuestos orgánicos está representada por la relación C/N. Consideradas relaciones óptimas de C/N, en digestores anaerobios entre 20 y 30, relaciones altas de C/N indican un consumo rápido de Nitrógeno por los metanógenos, obteniendo como resultado una menor producción de gas; mientras que una relación baja provoca acumulación de amoníaco y valores de pH superiores a 8.5, lo que resulta ser tóxico para las bacterias metanogénicas. Para lograr una relación óptima de C/N de la materia prima es necesario mezclarla con relaciones C/N altas y bajas, como los sólidos orgánicos, residuos mezclados con aguas residuales o estiércol animal (Themelis J.N, 2002).

- **Tasa de carga orgánica (OLR)**

Cantidad de desechos orgánicos que se introducen en el biodigestor todos los días por unidad de volumen, donde el OLR para la digestión de residuos de alimentos más estiércol, es de 3 gVS/L/d (Mahmudul et al., 2021). Alimentar el sistema por encima de su OLR da como resultado un nivel bajo de biogás debido a la acumulación de sustancias inhibitoras como ácidos grasos en el digestor (Themelis J.N, 2002).

- **Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)**

El TRH cantidad promedio de tiempo que la materia prima permanecerá en el biodigestor antes de ser expulsada a través de la tubería, se mide en días. Un TRH adecuado depende principalmente de la forma del sustrato para evitar el lavado de microbios el TRH debe ser al menos de 10 días (Mahmudul et al., 2021). El TRH para los residuos tratados en digestores mesófilos oscilan entre 10 y 40 días. Y en digestores operados en rangos termófilos tienen un TRH de 14 días (Themelis J.N, 2002).

- **Agitación**

Se refiere a la distribución adecuada de la digestión, es importante agitar la materia prima para proporcionar uniformidad de microorganismos y calor y aumentar la conexión entre las bacterias y alimentos. La agitación puede realizarse de forma mecánica o eléctrica con

agitadores colocados de manera vertical u horizontal en el costado de biodigestor (Mahmudul et al., 2021). Mezclarlos previene la formación de espuma y evita gradientes de temperatura dentro del digestor. Sin embargo, una mezcla excesiva puede alterar a los microbios, por lo que se prefiere una mezcla lenta. El tipo de mezcla y la cantidad varía según el tipo de reactor y el contenido de sólidos en el mismo (Themelis J.N, 2002).

### **Capítulo III. Justificación**

Los RSU son una mezcla de residuos orgánicos degradables (desechos de alimentos) y residuos sólidos inorgánicos (plásticos, vidrio, metal, papel, etc.), que requieren del uso y aplicación de tecnologías innovadoras que ayuden a tratarlos para minimizar el impacto al ambiental y de la salud pública. Su generación aumenta cada año y la gestión se ha convertido en un desafío mundial, por su volumen y composición que están vinculados a varios factores, como el crecimiento demográfico, el grado de industrialización, las condiciones socioeconómicas, el estilo de vida y la educación (Granzotto et al., 2021).

La DA se ha convertido en una tecnología innovadora y una alternativa de solución para el aprovechamiento de los residuos orgánicos, junto con la producción de biogás y la recuperación de nutrientes que se lleva a cabo en biodigestores a pequeña y gran escala (Karki et al., 2021).

Al revisar la literatura sobre el diseño y construcción de biodigestores a pequeña escala y monitoreo, la información disponible no es del todo clara, ya que la generalidad de los trabajos carece de procedimientos replicables, sin mencionar que, en su mayoría, los trabajos son realizados fuera de México.

Resulta importante considerar que las condiciones ambientales influyen de manera considerable en la operación de los biodigestores. Caso del estado de Guerrero y en especial la ciudad de Chilpancingo de los Bravo que presenta graves problemas respecto al tratamiento de los RSU y de su gestión. Por lo que, este trabajo de investigación busca brindar una propuesta de aprovechamiento de los residuos orgánicos domésticos.

Por lo anterior, esta investigación propone el diseño y construcción de un biodigestor anaerobio doméstico para la producción de abono orgánico suministrado con residuos de alimentos como alternativa de tratamiento, valorización y mitigación de la contaminación ambiental. Estudia las reacciones que ocurren dentro proceso de la DA con el fin de conocer el grado de incidencia de los parámetros e identificar los valores óptimos que eficienten la generación de la composta y biogás. De esta manera se busca disminuir el volumen de materia orgánica en los rellenos sanitarios.



## **Capítulo IV. Objetivos**

### **General**

Construir un biodigestor anaerobio doméstico para la producción de abono orgánico suministrado con residuos de alimentos.

### **Específicos**

1. Analizar los tipos de biodigestores domésticos para la producción de abono orgánico.
2. Establecer los parámetros requeridos para el diseño del biodigestor anaerobio doméstico.
3. Diseñar y construir el biodigestor doméstico según las especificaciones técnicas establecidas, incorporando sistemas de control y monitoreo de las variables del proceso.
4. Validar el funcionamiento del biodigestor.

## Capítulo V. Metodología

### 5.1 Materiales

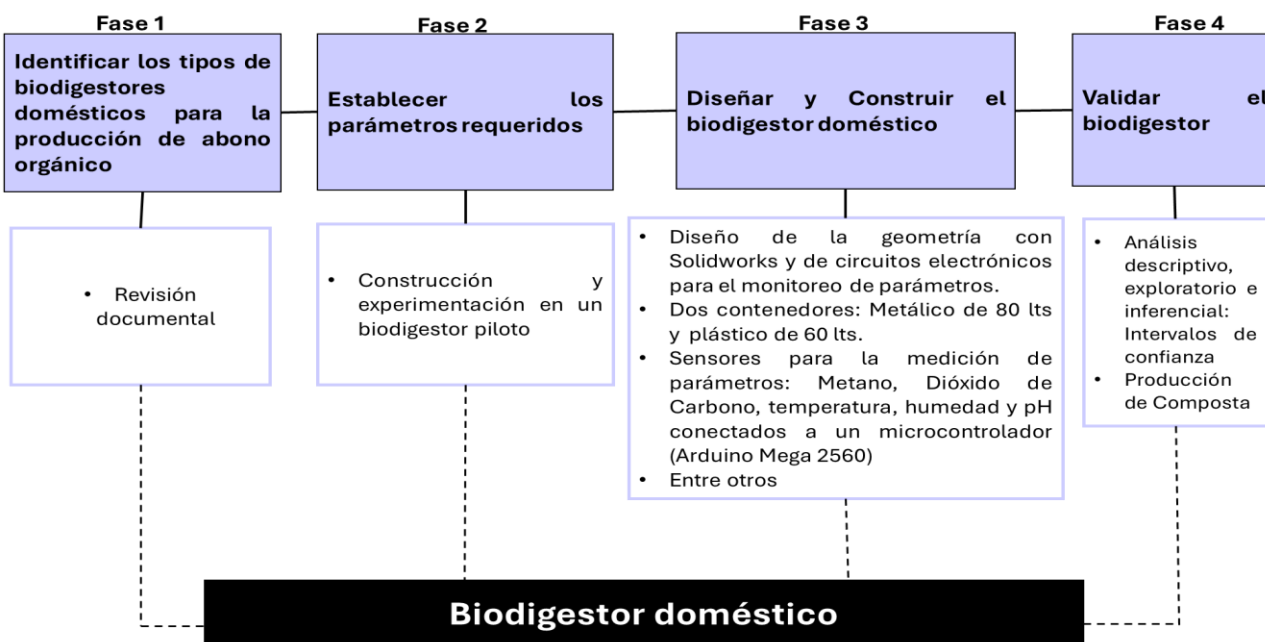
Para la construcción del biodigestor se utilizaron dos contenedores con capacidad de 80 y 60 L, uno metálico en el exterior y otro interno de plástico reforzado; agitador de acero inoxidable con manivela, alimentador de PVC; salidas de gas, de lodos y de fertilizantes foliares; receptor de gas; display lcd y una base metálica con ruedas de poliolefina de uso pesado, tres metros de manguera para gas, cuatro abrazaderas, niples  $\frac{1}{2}$  con rosca, llave de paso de  $\frac{1}{2}$ , tubos de PVC  $\frac{3}{4}$  y 2"; un tapón metálico y 2 bolsas de miniesferas de unicel, silicón industrial, cinta teflón, y para el monitoreo de parámetros se instalaron sensores de metano (MQ2), Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) (MG811), temperatura y humedad (DHT11), temperatura interna (DS18B20), pH (PH-4502C) conectados a un microcontrolador (Arduino Mega 2560) con una comunicación serial al módulo (ESP32 DevKit 1), y un display (TFT LCD 3.5") para la visualización. Además, los softwares Minitab versión 20 para el análisis de datos y Solid Works 2023 para el diseño del prototipo.

### 5.2 Metodología

La metodología aplicada en el diseño y construcción del biodigestor anaerobio doméstico se presenta en cuatro etapas, figura 5.

**Figura 5**

#### *Proceso metodológico*



### 5.2.1 Tipos de biodigestores domésticos

En la identificación de los tipos de biodigestores domésticos se realizó una revisión bibliográfica en bases de datos indexadas en Scopus y Elsevier, considerando la información publicada en los últimos cinco años, utilizando en la búsqueda las palabras “Biodigester”, “Anaerobic biodigester”, “Anaerobic reactor”, “Biodigester Desing”, “Biodigester kitchen waste” y Bioreactor in Mexico”.

### 5.2.2 Parámetros requeridos

Para establecer los parámetros fisicoquímicos requeridos y el efecto del tipo de inóculo en la DA, se experimentó en tres reactores inoculados con estiércol caprino, cunícola y canino cada uno, y un reactor testigo sin inóculo por 30 días consecutivos. Aplicando la metodología estadística diseño de experimentos, análisis de varianza de efectos fijos unifactorial en los factores pH, °C matutina y °C vespertina, intervalos simultáneos de Tukey para la diferencia de medias, intervalos de confianza para  $\mu$  °C matutina y vespertina por tipo de inóculo y el análisis de efectos principales de dos factores (Juárez et al., 2020; Montgomery Douglas C, 1991), figura 6.

**Figura 6**

*Reactores domiciliarios alimentados con residuos orgánicos*



Nota. Adaptado de Design of experiments to evaluate pH and temperature parameters with different inoculums in domestic biodigester, por (Gómez-Muñoz et al., 2024), Heliyon 10.

### 5.2.2.1 Análisis de varianza de efectos fijos unifactorial para cada parámetro

La comparación de a tratamientos o niveles de un factor único, la respuesta que se observa en cada uno de los tratamientos es una variable aleatoria. Donde los datos aparecerían como en las tablas 2,3 y 4 con una entrada  $y_{ij}$  representa la j-ésima observación del tratamiento i, y n observaciones del tratamiento i (Juárez et al., 2020; Montgomery Douglas C, 1991).

**Tabla 2**

*Datos para un experimento unifactorial del factor pH*

| Tratamiento | Observaciones |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Totales | Promedio |      |      |
|-------------|---------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---------|----------|------|------|
| PH_R1       | 5             | 6 | 7 | 5 | 5 | 6 | 6 | 7 | 7 | 7 | 7 | 8 | 8 | 7 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 9 | 9 | 8 | 8 | 8 | 9 | 8       | 222      | 7.40 |      |
| PH_R2       | 6             | 8 | 6 | 6 | 6 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 7 | 8 | 8 | 7 | 7 | 8 | 7 | 7 | 8 | 7 | 8 | 8 | 8 | 8 | 7 | 9 | 9 | 7 | 8       | 8        | 225  | 7.50 |
| PH_R3       | 7             | 6 | 6 | 6 | 6 | 7 | 8 | 8 | 6 | 7 | 8 | 8 | 8 | 6 | 8 | 8 | 8 | 7 | 6 | 8 | 8 | 7 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8       | 221      | 7.37 |      |
| PH_R4       | 6             | 8 | 5 | 7 | 5 | 6 | 7 | 8 | 7 | 8 | 9 | 8 | 8 | 7 | 7 | 8 | 7 | 8 | 8 | 8 | 6 | 7 | 8 | 8 | 8 | 9 | 8 | 8 | 8       | 8        | 223  | 7.43 |

*Nota. pH observado en la experimentación*

### 5.2.2.1.1 Análisis de varianza de efectos fijos unifactorial para pH

a) Planteamiento de hipótesis

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$$

$H_1$ : No todas las medias son iguales

$\mu_1$ : Media PH\_R1 con inóculo canino

$\mu_2$ : Media PH\_R2 con inóculo caprino

$\mu_3$ : Media PH\_R3 con inóculo cunícola

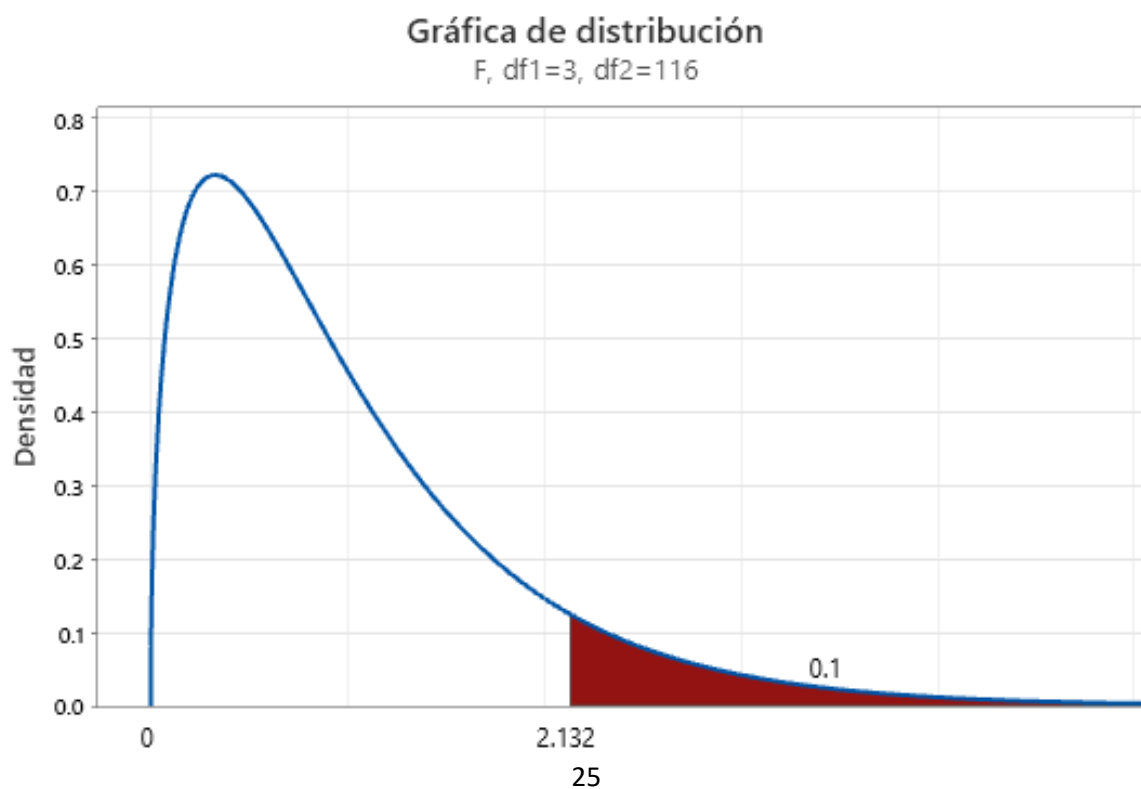
$\mu_4$ : Media PH\_R4 sin inóculo

b) Nivel de significancia  $\alpha=0.1$

c) Calcular el valor crítico  $F = F_{0.05,4-1,120-4}=2.132$ , figura 7.

**Figura 7**

Gráfica de distribución F



d) Cálculo de  $F_0$ , mediante ANOVA **efectos fijos unifactorial**, tabla 3.

**Tabla 3**

ANOVA pH

| Fuente de variación                | Suma de cuadrados                | Grados de libertad | Media de cuadrados                 | $F_0$ | Valor de P |
|------------------------------------|----------------------------------|--------------------|------------------------------------|-------|------------|
| Entre tratamientos                 | $SS_{\text{Tratamientos}}=0.292$ | $a-1=3$            | $MS_{\text{Tratamientos}}=0.09722$ | 0.11  | 0.957      |
| Error (dentro de los tratamientos) | $SS_E=107.033$                   | $N-k=116$          | $MS_E=0.92270$                     |       |            |
| Total                              | $SS_T=107.325$                   | $N-1=119$          |                                    |       |            |

Nota: Cálculo ANOVA pH

$SS_{\text{Tratamientos}}$ : Suma de cuadrado de los tratamientos

$$SS_{\text{Tratamientos}} = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i.}^2}{n} - \frac{y_{..}^2}{N}$$

$SS_T$ : Suma de cuadrado total

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N}$$

$SS_E$ : Suma de cuadrados del error

$$SS_E = SS_T - SS_{\text{Tratamientos}}$$

$a-1$ : Número de tratamientos menos uno,  $N$ : Total de observaciones en los tratamientos

$MS_{\text{Tratamientos}}$ : Cuadrado medio debido a los tratamientos

$MS_E$ : Cuadrado medio debido al error

**Tabla 4***Datos para un experimento unifactorial del factor °C matutina*

| Tratamiento | Observaciones |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | Totales | Promedio |        |       |
|-------------|---------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---------|----------|--------|-------|
| °C M_R1     | 23            | 22 | 22 | 21 | 21 | 23 | 21 | 22 | 22 | 22 | 20 | 23 | 22 | 22 | 21 | 21 | 21 | 22 | 26 | 24 | 21 | 22 | 23 | 21 | 20 | 20 | 22 | 21 | 21      | 22       | 651.86 | 23.28 |
| °C M_R2     | 23            | 22 | 21 | 21 | 20 | 22 | 21 | 21 | 22 | 22 | 21 | 23 | 21 | 22 | 21 | 22 | 22 | 22 | 25 | 24 | 21 | 22 | 23 | 21 | 20 | 21 | 22 | 21 | 21      | 22       | 652.45 | 23.30 |
| °C M_R3     | 22            | 21 | 21 | 21 | 20 | 23 | 21 | 22 | 23 | 22 | 22 | 23 | 21 | 21 | 20 | 22 | 21 | 21 | 27 | 25 | 21 | 22 | 23 | 21 | 21 | 20 | 21 | 21 | 21      | 22       | 652.77 | 23.31 |
| °C M_R4     | 23            | 23 | 22 | 21 | 20 | 23 | 21 | 21 | 22 | 22 | 21 | 23 | 22 | 22 | 21 | 22 | 22 | 22 | 25 | 25 | 22 | 22 | 24 | 22 | 20 | 21 | 22 | 21 | 22      | 23       | 659.68 | 23.56 |

Nota: Temperatura matutina observada en la experimentación

### 5.2.2.1.2 Análisis de varianza de efectos fijos unifactorial °C matutina

e) Planteamiento de hipótesis

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$$

$$H_1: \text{No todas las medias son iguales}$$

$\mu_1$ : Media °C M\_R1 con inóculo canino

$\mu_2$ : Media °C M\_R2 con inóculo caprino

$\mu_3$ : Media °C M\_R3 con inóculo cunícola

$\mu_4$ : Media °C M\_R4 sin inóculo

f) Nivel de significancia  $\alpha=0.1$

g) Calcular el valor crítico  $F = F_{0.05,4-1,120-4}=2.132$

h) Calcular  $F_0$ , mediante ANOVA efectos fijos unifactorial, tabla 5.

**Tabla 5**

ANOVA °C Matutina

| Fuente de variación                | Suma de cuadrados                 | Grados de libertad | Media de cuadrados                 | F <sub>0</sub> | Valor P |
|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|------------------------------------|----------------|---------|
| Entre tratamientos                 | SS <sub>Tratamientos</sub> =1.354 | a-1=3              | MS <sub>Tratamientos</sub> =0.4513 | 0.32           | 0.810   |
| Error (dentro de los tratamientos) | SS <sub>E</sub> =162.613          | N-k=116            | MS <sub>E</sub> =1.4018            |                |         |
| Total                              | SS <sub>T</sub> =163.967          | N-1= 119           |                                    |                |         |

Nota: ANOVA de la temperatura Matutina



**Tabla 6***Datos para un experimento unifactorial del factor °C vespertina*

| Tratamiento | Observaciones |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | Totales | Promedio |        |        |       |
|-------------|---------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---------|----------|--------|--------|-------|
| °C V_R1     | 25            | 25 | 24 | 22 | 24 | 24 | 24 | 25 | 24 | 25 | 25 | 24 | 23 | 22 | 23 | 23 | 23 | 23 | 22 | 23 | 24 | 23 | 21 | 22 | 22 | 23 | 24 | 23 | 22      | 23       | 700.38 | 23.35  |       |
| °C V_R2     | 25            | 25 | 23 | 23 | 24 | 23 | 24 | 24 | 23 | 24 | 24 | 24 | 23 | 22 | 23 | 22 | 23 | 23 | 22 | 23 | 24 | 23 | 22 | 22 | 22 | 23 | 24 | 23 | 22      | 23       | 696.37 | 23.21  |       |
| °C V_R3     | 24            | 25 | 23 | 22 | 24 | 23 | 24 | 25 | 23 | 24 | 24 | 24 | 23 | 22 | 23 | 22 | 23 | 24 | 22 | 23 | 24 | 23 | 21 | 22 | 22 | 23 | 25 | 23 | 22      | 23       | 692.79 | 23.09  |       |
| °C V_R4     | 25            | 25 | 24 | 22 | 24 | 23 | 25 | 25 | 24 | 25 | 25 | 24 | 23 | 23 | 24 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 24 | 25 | 24 | 21 | 21 | 22 | 24 | 25 | 24      | 23       | 23     | 706.19 | 23.54 |

*Nota: Temperatura vespertina observada en la experimentación*

### 5.2.2.1.3 Análisis de varianza de efectos fijos unifactorial °C vespertina

i) Planteamiento de hipótesis

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$$

$$H_1: \text{No todas las medias son iguales}$$

$\mu_1$ : Media °C V\_R1 con inóculo canino

$\mu_2$ : Media °C V\_R2 con inóculo caprino

$\mu_3$ : Media °C V\_R3 con inóculo cunícola

$\mu_4$ : Media °C V\_R4 sin inóculo

j) Nivel de significancia  $\alpha=0.1$

k) Calcular el valor crítico  $F = F_{0.05,4-1,120-4}=2.132$

l) Calcular  $F_0$ , mediante ANOVA efectos fijos unifactorial, tabla 7.

**Tabla 7**

ANOVA °C Vespertina

| Fuente de variación                | Suma de cuadrados                | Grados de libertad | Media de cuadrados                | $F_0$ | Valor P |
|------------------------------------|----------------------------------|--------------------|-----------------------------------|-------|---------|
| Entre tratamientos                 | $SS_{\text{Tratamientos}}=3.302$ | $a-1=3$            | $MS_{\text{Tratamientos}}=1.1007$ | 1.19  | 0.316   |
| Error (dentro de los tratamientos) | $SS_E=107.011$                   | $N-k=116$          | $MS_E=0.9225$                     |       |         |
| Total                              | $SS_T=110.313$                   | $N-1= 119$         |                                   |       |         |

Nota: ANOVA de la temperatura vespertina

### 5.2.2.2 Intervalos simultáneos de Tukey al 90% de confianza

Para complementar el análisis de varianza de efectos fijos unifactorial se aplicó la prueba Tukey que declara un par de medias  $\bar{Y}_i - \bar{Y}_j$  significativamente diferentes, si el intervalo no incluye al cero, ecuación (1) y tabla 8.

$$(\bar{Y}_i - \bar{Y}_j) - HSD \leq \mu_i - \mu_j \leq (\bar{Y}_i - \bar{Y}_j) + HSD \quad (1)$$

Donde, 
$$HSD = q_{\alpha; I, N - I} \sqrt{\frac{\hat{S}_R^2}{n}}, \hat{S}_R^2 = \sqrt{\frac{MSE}{n}}$$

I: Pares de medias; N: Total de datos;  $\hat{S}_R^2$ : Estimación de la varianza; n: Tamaño medio de las muestras;  $N - I$ : Número de grados de libertad asociado a  $\hat{S}_R^2$ ;  $\bar{Y}_i$ : Media mayor;  $\bar{Y}_j$ : Media menor;  $\alpha$ : Nivel de significancia; y  $q = \frac{\bar{Y}_{max} - \bar{Y}_{min}}{\sqrt{\frac{MSE}{n}}}$

**Tabla 8**

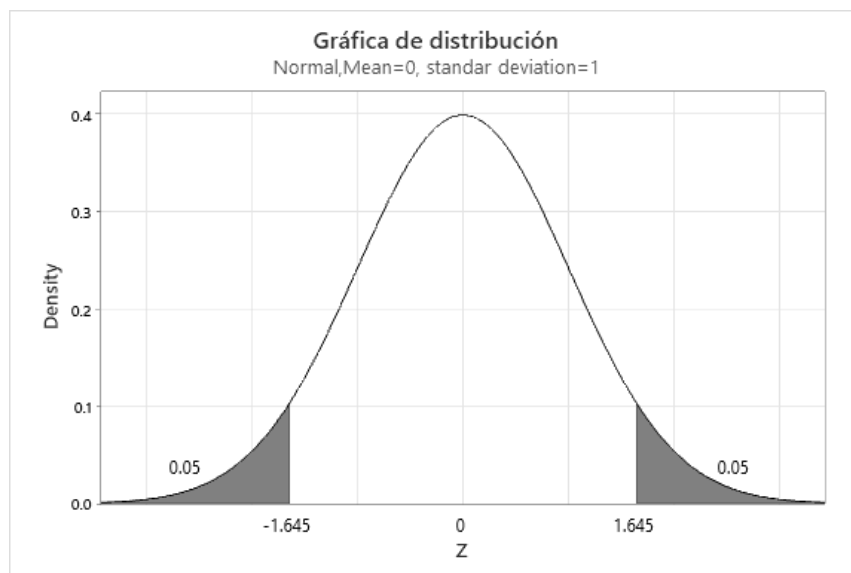
Intervalos simultáneos de Tukey's al 90% °C matutina

| Factor            | Estimación | CI                  |
|-------------------|------------|---------------------|
| °C M_R2 - °C M_R1 | 0.0196667  | -0.689360, 0.728693 |
| °C M_R3 - °C M_R1 | 0.0303333  | -0.678693, 0.739360 |
| °C M_R4 - °C M_R1 | 0.260667   | -0.448360, 0.969693 |
| °C M_R3 - °C M_R2 | 0.0106667  | -0.698360, 0.719693 |
| °C M_R4 - °C M_R2 | 0.241      | -0.468026, 0.950026 |
| °C M_R4 - °C M_R3 | 0.230333   | -0.478693, 0.939360 |

## Intervalo al 90% de confianza para $\mu$ para °C matutina por tipo de inóculo

**Figura 8**

*Gráfica de distribución*



$$\bar{X} - Z_{\alpha/2} \left( \frac{S}{\sqrt{n}} \right) \leq \mu \leq \bar{X} + Z_{\alpha/2} \left( \frac{S}{\sqrt{n}} \right) \quad (2)$$

$$21.73 - 1.645 \left( \frac{1.206}{\sqrt{30}} \right) \leq \mu \leq 21.73 + 1.645 \left( \frac{1.206}{\sqrt{30}} \right) = 21.370 \leq \mu \leq 22.087 \text{ °C CI Inóculo canino}$$

$$21.75 - 1.645 \left( \frac{1.026}{\sqrt{30}} \right) \leq \mu \leq 21.75 + 1.645 \left( \frac{1.026}{\sqrt{30}} \right) = 21.390 \leq \mu \leq 22.107 \text{ °C CI Inóculo caprino}$$

$$21.76 - 1.645 \left( \frac{1.413}{\sqrt{30}} \right) \leq \mu \leq 21.76 + 1.645 \left( \frac{1.413}{\sqrt{30}} \right) = 21.401 \leq \mu \leq 22.117 \text{ °C CI Inóculo única}$$

$$21.99 - 1.645 \left( \frac{1.050}{\sqrt{30}} \right) \leq \mu \leq 21.99 + 1.645 \left( \frac{1.050}{\sqrt{30}} \right) = 21.631 \leq \mu \leq 22.348 \text{ °C CI Sin Inóculo}$$

$\bar{X}$ : Media muestral observada

$Z = \pm 1.645$  desviaciones estándar

$\alpha$ : Margen de error,  $S$ : Desviación estándar muestral,

$n = 30$  observaciones,  $\mu$ : Parámetro media poblacional

### Intervalo al 90% de confianza para $\mu$ para °C vespertina por tipo de inóculo

$$23.34 - 1.645 \left( \frac{1.004}{\sqrt{30}} \right) \leq \mu \leq 23.35 + 1.645 \left( \frac{1.004}{\sqrt{30}} \right) = 23.055 \leq \mu \leq 23.637 \text{ °C CI Inóculo Canino}$$

$$23.21 - 1.645 \left( \frac{0.824}{\sqrt{30}} \right) \leq \mu \leq 23.35 + 1.645 \left( \frac{0.824}{\sqrt{30}} \right) = 22.922 \leq \mu \leq 23.503 \text{ °C CI Inóculo Caprino}$$

$$23.09 - 1.645 \left( \frac{0.997}{\sqrt{30}} \right) \leq \mu \leq 23.09 + 1.645 \left( \frac{0.997}{\sqrt{30}} \right) = 22.802 \leq \mu \leq 23.384 \text{ °C CI Inóculo Cunicola}$$

$$23.54 - 1.645 \left( \frac{1.005}{\sqrt{30}} \right) \leq \mu \leq 23.54 + 1.645 \left( \frac{1.005}{\sqrt{30}} \right) = 23.249 \leq \mu \leq 23.830 \text{ °C CI Sin Inóculo}$$

#### 5.2.2.3 *Análisis de Efectos Principales*

En el diseño factorial es importante hacer el análisis de los efectos principales, mediante la comparación del efecto entre los niveles de un factor A (°C promedio) promediados para todos los niveles de otro factor B (PH), mediante el cálculo (2, 3 y 4).

- Media de  $A_1$  para ambos niveles de  $B_1$ :  $\mu_1 = \frac{1}{2} (A_1B_1 + A_1B_2)$  (2)

- Media de  $A_2$  para ambos niveles de  $B_2$ :  $\mu_1 = \frac{1}{2} (A_2B_1 + A_2B_2)$  (3)

- Efecto principal:  $I3 = \frac{1}{2} (A_2B_1 + A_2B_2) - \frac{1}{2} (A_1B_1 + A_1B_2)$  (4)

Para el cálculo de efectos principales del factor °C promedio vs el factor PH\_R1; °C promedio vs PH\_R2; °C promedio vs PH\_R3 y °C promedio vs PH\_R4 se realizó el procedimiento mediante la tabla 9.

**Tabla 9**

*Cálculo de efectos principales*

| pH_R1 | °C promedio | Efecto principal | pH_R2 | °C promedio | Efecto principal | pH_R3 | °C promedio | Efecto principal | pH_R4 | °C promedio | Efecto principal |
|-------|-------------|------------------|-------|-------------|------------------|-------|-------------|------------------|-------|-------------|------------------|
| 6     | 22.64       | 21.72            | 6     | 20.41       | 21.39            | 6     | 20.41       | 21.47            | 6     | 21.05       | 21.69            |
| 6     | 21.47       |                  | 6     | 21.05       |                  | 6     | 21.05       |                  | 6     | 21.39       |                  |
| 6     | 21.05       |                  | 6     | 21.47       |                  | 6     | 21.39       |                  | 6     | 22.64       |                  |
| 7     | 21.94       | 21.40            | 6     | 22.64       | 21.58            | 6     | 21.47       | 21.99            | 7     | 20.41       | 21.41            |
| 7     | 20.41       |                  | 7     | 20.56       |                  | 6     | 21.73       |                  | 7     | 20.56       |                  |
| 7     | 22.56       |                  | 7     | 21.21       |                  | 6     | 21.94       |                  | 7     | 20.72       |                  |
| 7     | 20.72       |                  | 7     | 21.48       |                  | 6     | 22.34       |                  | 7     | 21.47       |                  |
| 7     | 21.57       |                  | 7     | 21.56       |                  | 7     | 21.36       |                  | 7     | 21.61       |                  |
| 7     | 21.21       |                  | 7     | 21.65       |                  | 7     | 21.56       |                  | 7     | 22.09       |                  |
| 8     | 22.34       |                  | 7     | 21.73       |                  | 7     | 21.81       |                  | 7     | 23.00       |                  |
| 8     | 21.81       |                  | 7     | 22.09       |                  | 7     | 22.56       |                  | 8     | 20.27       |                  |
| 8     | 23.00       |                  | 7     | 22.34       |                  | 7     | 22.64       |                  | 8     | 21.21       |                  |
| 8     | 21.61       |                  | 8     | 20.27       |                  | 8     | 20.27       |                  | 8     | 21.23       |                  |
| 8     | 21.73       |                  | 8     | 20.52       |                  | 8     | 20.52       |                  | 8     | 21.33       |                  |
| 8     | 20.56       |                  | 8     | 20.72       |                  | 8     | 20.56       |                  | 8     | 21.36       |                  |
| 8     | 21.33       |                  | 8     | 21.33       |                  | 8     | 20.72       |                  | 8     | 21.42       |                  |
| 8     | 21.48       |                  | 8     | 21.36       |                  | 8     | 21.21       |                  | 8     | 21.48       |                  |

|   |       |       |   |       |       |   |       |       |   |       |       |
|---|-------|-------|---|-------|-------|---|-------|-------|---|-------|-------|
| 8 | 21.56 | 21.56 | 8 | 21.39 | 21.62 | 8 | 21.23 | 21.49 | 8 | 21.56 | 21.64 |
| 8 | 21.39 |       | 8 | 21.57 |       | 8 | 21.33 |       | 8 | 21.57 |       |
| 8 | 22.09 |       | 8 | 21.61 |       | 8 | 21.42 |       | 8 | 21.65 |       |
| 8 | 20.27 |       | 8 | 21.81 |       | 8 | 21.48 |       | 8 | 21.73 |       |
| 8 | 20.52 |       | 8 | 21.94 |       | 8 | 21.57 |       | 8 | 21.81 |       |
| 8 | 21.65 |       | 8 | 22.56 |       | 8 | 21.61 |       | 8 | 21.94 |       |
| 8 | 21.42 |       | 8 | 23.00 |       | 8 | 21.65 |       | 8 | 22.16 |       |
| 8 | 22.16 |       | 8 | 23.05 |       | 8 | 22.09 |       | 8 | 22.56 |       |
| 9 | 23.05 | 21.88 | 9 | 21.23 | 21.60 | 8 | 22.16 |       | 8 | 23.05 | 21.43 |
| 9 | 21.36 |       | 9 | 21.42 |       | 8 | 23.00 |       | 9 | 20.52 |       |
| 9 | 21.23 |       | 9 | 22.16 |       | 8 | 23.05 |       | 9 | 22.34 |       |

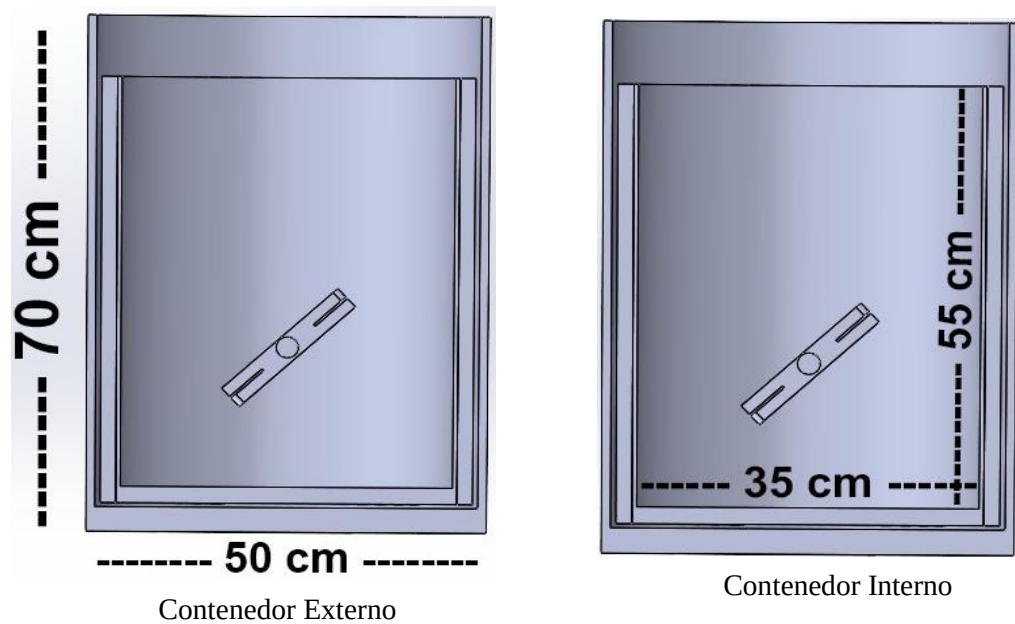
## 5.2.3 Diseño y Construcción del biodigestor con sistema de monitoreo en tiempo real

### 5.2.3.1 Diseño del prototipo

El prototipo del biodigestor se diseñó en el software Solid Works 2023, figuras 9,10, 11 y 12.

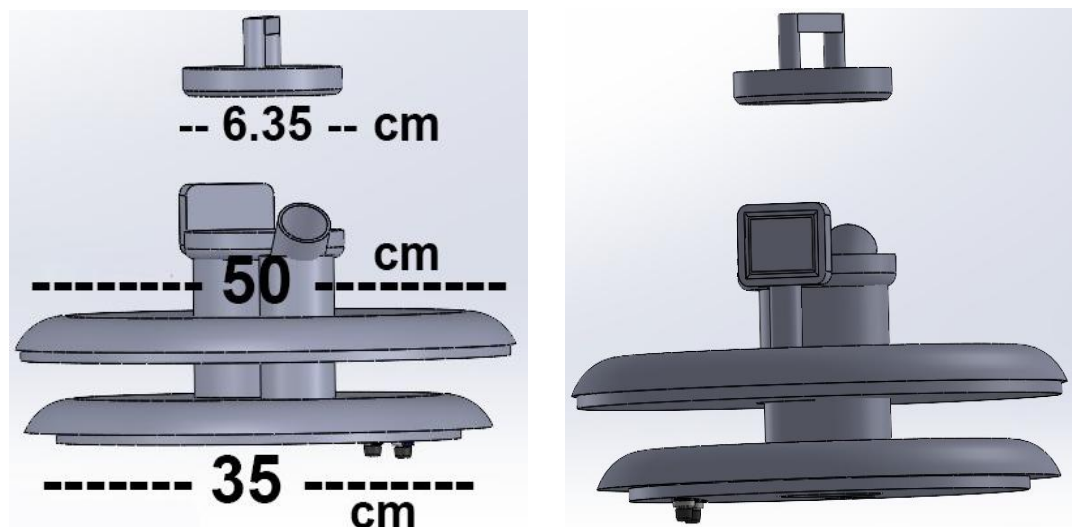
**Figura 9**

*Contenedor interno y externo del biodigestor*



**Figura 10**

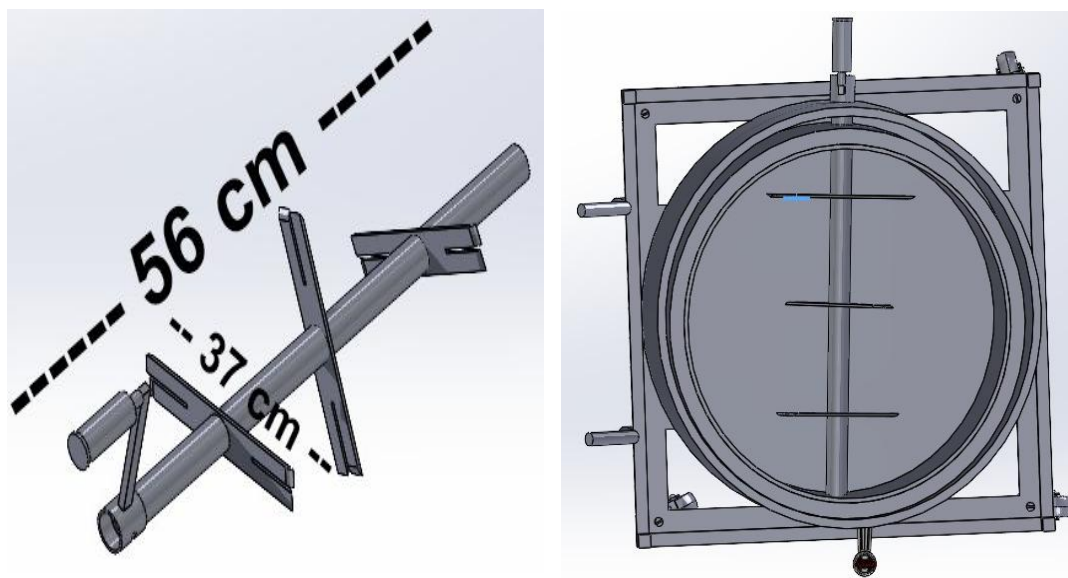
*Tapas interna y externa*





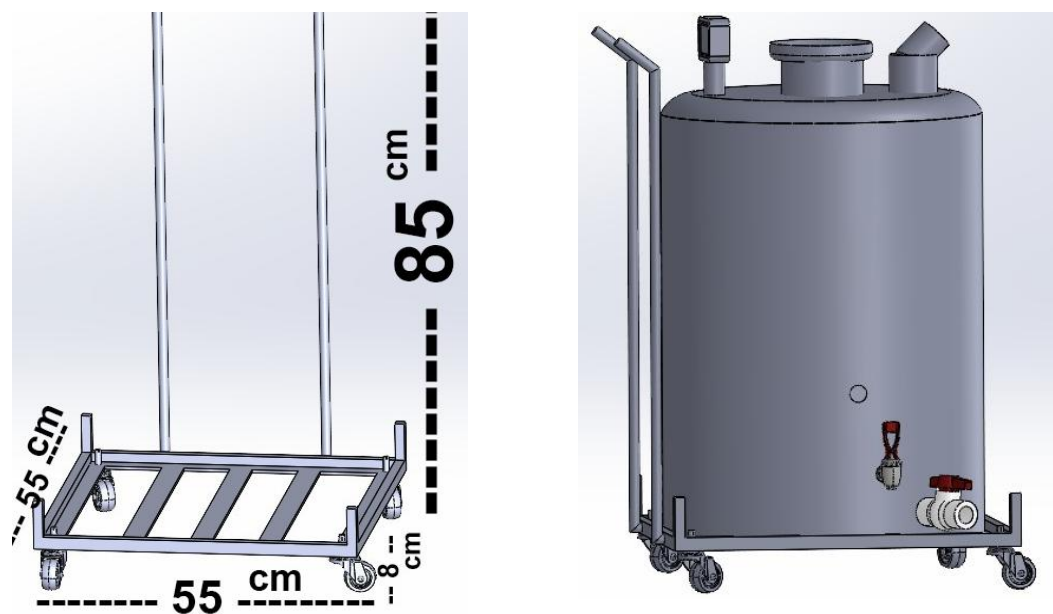
**Figura 11**

*Agitador mecánico*



**Figura 12**

*Carro de transporte-Biodigestor terminado*



### 5.2.3.2 Construcción del biodigestor doméstico

La elaboración del reactor tipo Batch consistió en un tambo de plástico fabricado con polietileno de alta densidad grado alimenticio con capacidad de 60 L en su interior con una tapa de 35 cm. El exterior, un contenedor metálico con capacidad de 80 L y una cubierta de 50 cm. También se instaló una pantalla LCD de 3.5" para visualización de parámetros, un alimentador de materia orgánica de 4" que atraviesa la tapa interna y externa, una llave de salida de biogás, y una instalación de sensores e instrumentación, un agitador mecánico de 35 cm fabricado con dos amortiguadores, aspas de solera metálica de 1" y 37 cm de largo, una llave de 2" para extracción de fertilizantes sólidos, y otra de 1" para la salida del fertilizante foliar. Además de una estructura metálica con cuatro ruedas de poliolefina de 4" para su transportación, figura 13.

**Figura 13**

*Biodigestor doméstico con manivela*

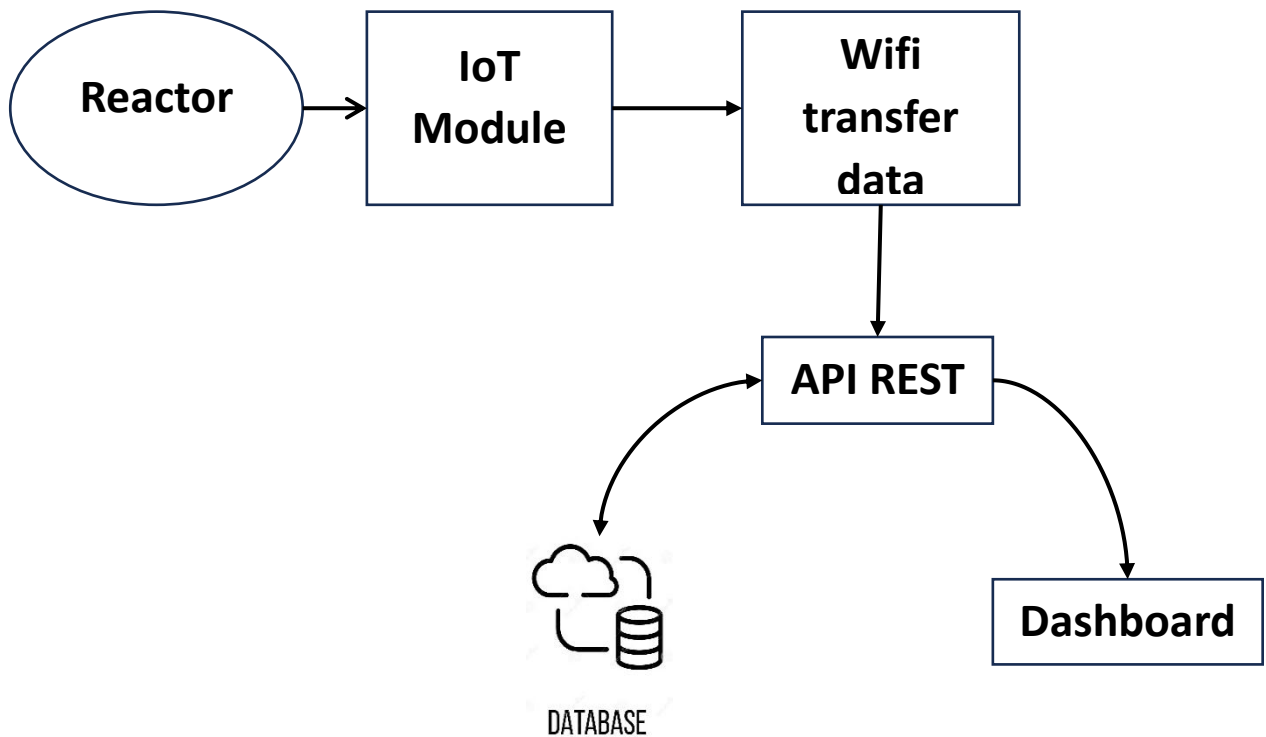


### 5.2.3.3 Sistema de monitoreo

El sistema de monitoreo se desarrolló con la arquitectura que se presenta en la figura 14.

**Figura 14**

*Sistema de monitoreo*

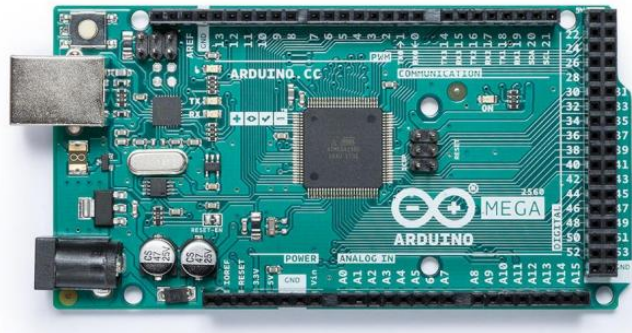


Para el monitoreo en tiempo real de los parámetros que intervienen en la DA, se utilizaron los siguientes componentes:

- **Arduino Mega 2560**, placa de microcontrolador basada en ATmega2560 ampliamente utilizada en sistemas interconectados para funcionalidades de monitoreo en IoT para el control de parámetros: pH, temperatura y humedad, cuenta con 54 pines entrada/salidas digitales, 16 entradas analógicas, 4 UART puertos de serie de hardware, un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, conector de alimentación, conector ICSP y un botón de reinicio, figura 15 (Andrianto et al., 2020; Banzi et al., 2024) .

**Figura 15**

*Arduino Mega - ATmega2560 microcontroller*



*Nota. Adaptado de Arduino .cc, <https://store.arduino.cc/>*

- **ESP32 devkit v1** microcontrolador de bajo costo con un chip wifi, bluetooth aplicado en proyectos de IoT por su eficiencia y economía, es un procesador de 2 núcleos, conjunto de 30 pines GPIO, con una alimentación de 5V, figura 16 (Cameron, 2023).

**Figura 16**

*ESP32 devkit v1*

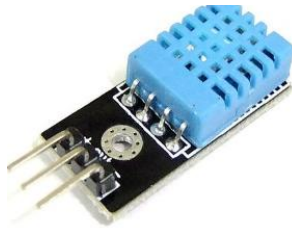


*Nota. Adaptado de Unit electronics <https://uelectronics.com/>*

- **DHT11 Humidity & Temperature Sensor**, mide la Humedad Relativa (HR) en un ambiente de rango entre 20% y 90%, una precisión  $\pm 5\%$  en intervalo de temperatura de  $0^{\circ}$  a  $50^{\circ}$  y exactitud  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ , regresando valores con una resolución de 8-bit y un voltaje de funcionamiento de 3.3 a 5.5v, figura 17 (Gay, 2018).

### Figura 17

*Sensor de temperatura y humedad DHT11*



*Nota. Adaptado de Unit electronics <https://uelectronics.com/>*

- **MQ-2 Gas sensor**, detector de gas LP, propano, metano, hidrógeno, humo, alcohol y monóxido de carbono en concentraciones de 300 a 10,000 ppm, cuenta con una salida analógica, temperatura de trabajo de -20 °C a +50 °C y un voltaje de funcionamiento de 5V, figura 18 (Corporation, 2024).

### Figura 18

*Sensor de Gas MQ-2*



*Nota. Adaptado de Unit electronics <https://uelectronics.com/>*

- **MG811 Sensor** de concentración de gas CO<sub>2</sub>, con alta sensibilidad y selectividad al CO<sub>2</sub>, presenta bajo nivel de afectación por cambios de temperatura y humedad, buena estabilidad de rangos entre valores de 350 y 10,000 ppm, salida analógica con alimentación requerida de 3V a 5V, figura 19 (Liu & Zhang, 2019).

### Figura 19

*Sensor MG811 CO2*



*Nota. Adaptado de SDielect Electronica <https://ssdielect.com/gas/2462-md-mg81.html>*

- **DS18B20 Digital Thermometer** sensor de temperatura sumergible con punta de acero inoxidable, de bajo costo, rangos de medición -55 °C a 125 °C, precisión 0.1 °C, y funcionamiento de 3V a 5.5V, figura 20 (Jais et al., 2024).

### Figura 20

*Termómetro digital DS18B20*



*Nota. Adaptado de Unit electronics <https://uelectronics.com/>*

- **PH-4502C PH probe and sensor** módulo equipado con un electrodo E201 por conexión Bayonet Neill-Concelman (BNC), grado de laboratorio con tiempo de respuesta de 5 segundos. Recopila datos entre 0 – 14 pH, funciona con voltaje de 5V y temperaturas entre 10 y 50 °C, figura 21.

**Figura 21**

*Sensor PH-4502C pH*



*Nota. Adaptado de Unit electronics <https://uelectronics.com/>*

- **Tft Lcd 3,5 inch, 320 X 480** Modulo TFT Display ST7796S con tamaño de 3.5" diagonales, marco de acero que protege el Display, se conecta a través del protocolo SPI, figura 22.

**Figura 22**

*Tft Lcd 3,5 inch, 320 X*

*480*

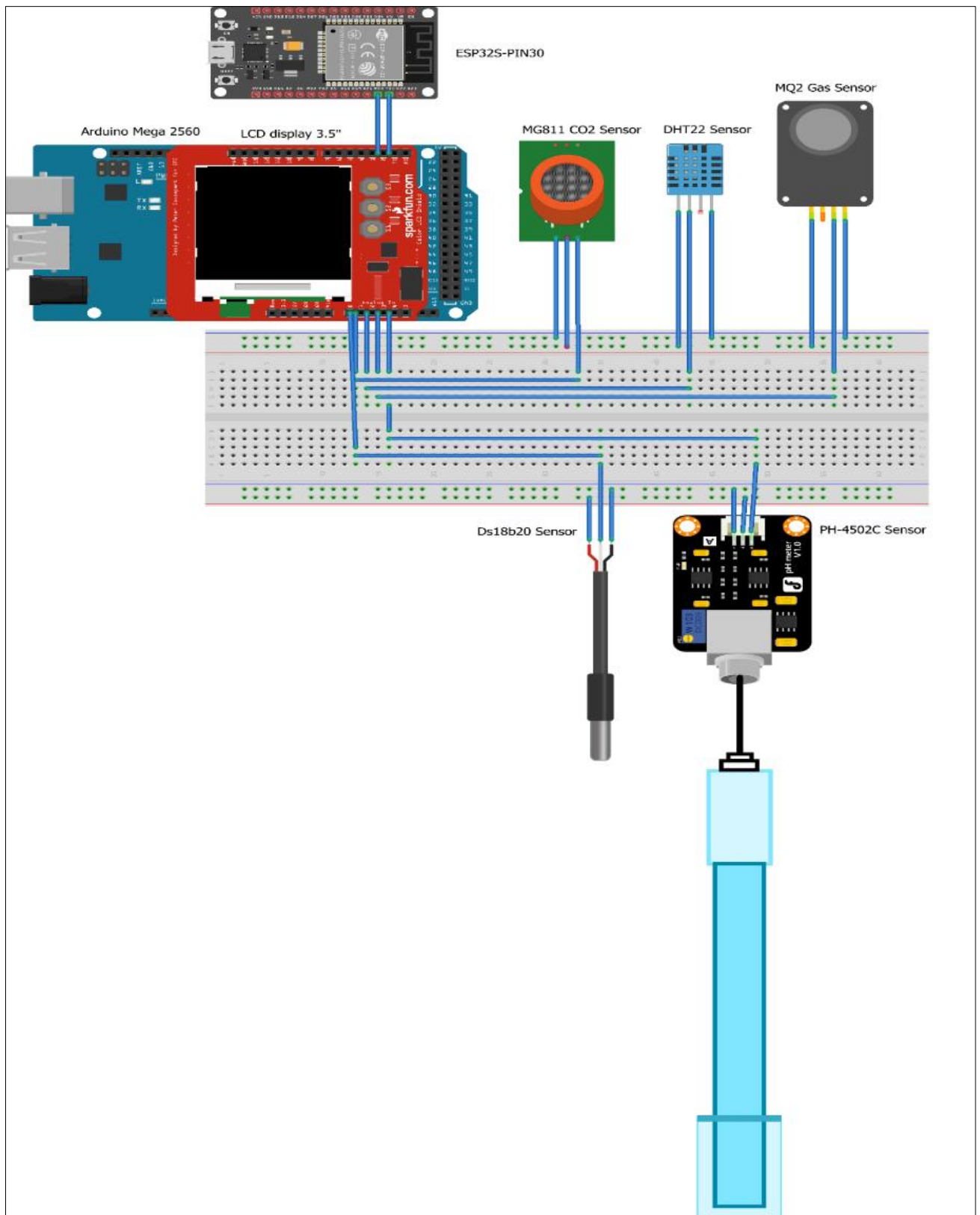


*Nota. Adaptado de FTVOGUE, <https://www.amazon.com.mx/stores/page/C34E0B1D-8FD1-4A21-AD18-EC122C4BF278>*



**Figura 23**

*Circuito electrónico del sistema de monitoreo*





#### 5.2.3.4 Validación del Biodigestor

Para la validación de los datos obtenidos del monitoreo en tiempo real del biodigestor doméstico, se aplicó un análisis descriptivo, exploratorio e inferencial: Intervalos de confianza al 95% para la media y desviación estándar.

$$\bar{X} - Z_{\alpha/2} \left( \frac{s}{\sqrt{n}} \right) \leq \mu \leq \bar{X} + Z_{\alpha/2} \left( \frac{s}{\sqrt{n}} \right) \quad (2)$$

$$\sqrt{\frac{(n-1)s^2}{X^2_{n-1, 1-\alpha/2}}} \leq \sigma \leq \sqrt{\frac{(n-1)s^2}{X^2_{n-1, \alpha/2}}} \quad (3)$$

La producción de composta se obtuvo con 20 kg de residuos orgánicos de cocina sin clasificar, 20 kg de estiércol caprino y 20 L de agua con un TRH de 30 días. Obteniendo entre 4 y 5 kg de abono orgánico.

## Capítulo VI. Resultados

### 6.1 Tipos de biodigestores domésticos

En la tabla 10 se presentan los diferentes tipos de reactores en función de su capacidad, material de construcción, materia prima, producto obtenido y características especiales del diseño.

**Tabla 10**

*Tipos de biodigestores domésticos*

| No | Tipo de Biodigestor               | Referencia                  | Volumen            | Material                     | Materia Prima                           | TRH     | Producto | Otras características                                                       |
|----|-----------------------------------|-----------------------------|--------------------|------------------------------|-----------------------------------------|---------|----------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Biodigestor tipo portátil AGET    | (Mutungwazi et al., 2018)   | 2.5 m <sup>3</sup> | Biobolsa                     | Residuos de cocina                      |         | Biogás   | Incluye manómetro y bomba fotovoltaica para hacer funcionar la bomba de gas |
| 2  | Digestor EZ                       | (Mutungwazi et al., 2018)   | 1.5 m <sup>3</sup> | Plástico de alta resistencia | 25 kg de cocina                         |         | Biogás   | Sin agitador, ausencia de mecanismo de control de temperatura,              |
| 3  | Biodigestor móvil                 | (Kouya-Takala et al., 2019) | 220 L              | Barril de PVC                | Residuos de cocina más estiércol vacuno | 40 días | Biogás   | Implica sólo dos fases: acidogénesis y metanogénesis                        |
| 4  | Biodigestor doméstico de plástico | (Nwankwo et al., 2017)      | 3.6 m <sup>3</sup> | Tanque cilíndrico de PVC     | Residuos de cocina más estiércol vacuno | 28 días | Biogás   | Agitador, cámara de fermentación y recolección de gas                       |
| 5  | Digestor de Biogás portátil       | (Nkoi et al., 2018)         |                    | Acero                        | Estiércol vacuno                        | 12 días | Biogás   | Bomba de bicicleta usada para mantener la presión y                         |

|           |                                           |                                 |                                        |                              |                                              |         |                                |                                                                                                  |
|-----------|-------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------|---------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
|           |                                           |                                 |                                        |                              |                                              |         |                                | el gas se recolecta usando tres recipientes, con manivela.                                       |
| <b>6</b>  | Biodigestor portátil                      | (Bhandari et al., 2018)         | 200 L                                  | Tanque de plástico           | Residuos de cocina más estiércol vacuno      |         | Biogás                         | Digestor tipo cúpula cerrada                                                                     |
| <b>7</b>  | Biodigestor portátil autoprezurizado      | (Kumar Singh et al., 2019)      | Dos contenedores de 50 L y uno de 35 L | Polietileno de alta densidad | Residuos de cocina más estiércol vacuno      | 35 días | Biogás                         | Se utilizan resortes para mantener la presión                                                    |
| <b>8</b>  | Biodigestor doméstico piloto automatizado | (Saber et al., 2021)            | 50 L                                   | Acero inoxidable             | Residuos de cocina más estiércol vacuno      |         | Biogás                         | Agitación continua a 40 rpm y temperatura termófila                                              |
| <b>9</b>  | Biodigestor anaerobio a pequeña escala    | (Jyothilakshmi & Prakash, 2016) | 30 L                                   | Tanque de PVC                | Residuos domésticos, estiércol más agua      |         | Biogás                         | Entrada para alimentación, salida de recogida y almacenamiento de gases.                         |
| <b>10</b> | Biodigestor semicontinuo                  | (Granzotto et al., 2021)        | 200 L                                  | Acero inoxidable             | Residuos de restaurante más estiércol bovino | 30 días | Biogás y fertilizante orgánico | Biodigestor modelo indio                                                                         |
| <b>11</b> | Biodigestor anaerobio doméstico           | (Kesharwani & Bajpai, 2021)     | 28 L                                   | Polietileno de alta densidad | Residuos de restaurante más estiércol bovino | 35 días | Biogás                         | Estudio de rendimiento del digestor en temperatura ambiente sin ningún control de la temperatura |

## 6.2 Análisis estadístico por parámetro

Los resultados del análisis estadístico en la experimentación muestran:

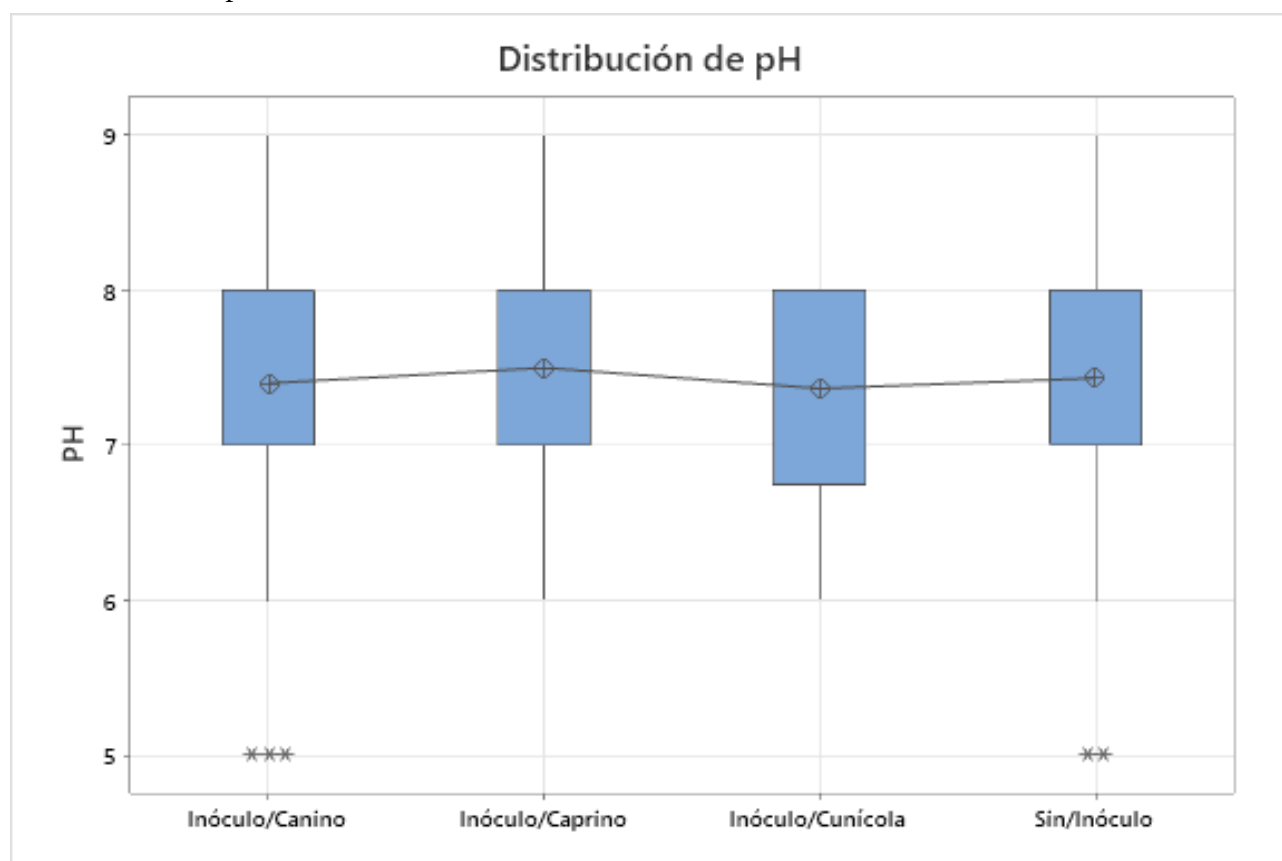
### 6.2.1 Resultados por parámetro

#### 6.2.1.1 Distribución del pH en la experimentación

La distribución del pH en la DA inoculado con estiércol canino, caprino y sin inóculo muestra que el 25% oscila entre  $6 \leq \text{PH} < 7$ , el 50%  $7 \leq \text{PH} \leq 8$  y el 25%  $8 < \text{PH} \leq 9$ . Por otra parte, el PH en la DA con estiércol cunícola presenta un 25% entre  $6 \leq \text{PH} < 6.75$  y el 75% oscila  $6.75 \leq \text{PH} \leq 8$ . De acuerdo con los resultados anteriores la distribución del PH es ideal en la DA, sin embargo, la inoculación cunícola presenta menos variación, figura 24.

**Figura 24**

*Distribución del pH en el Inóculo*

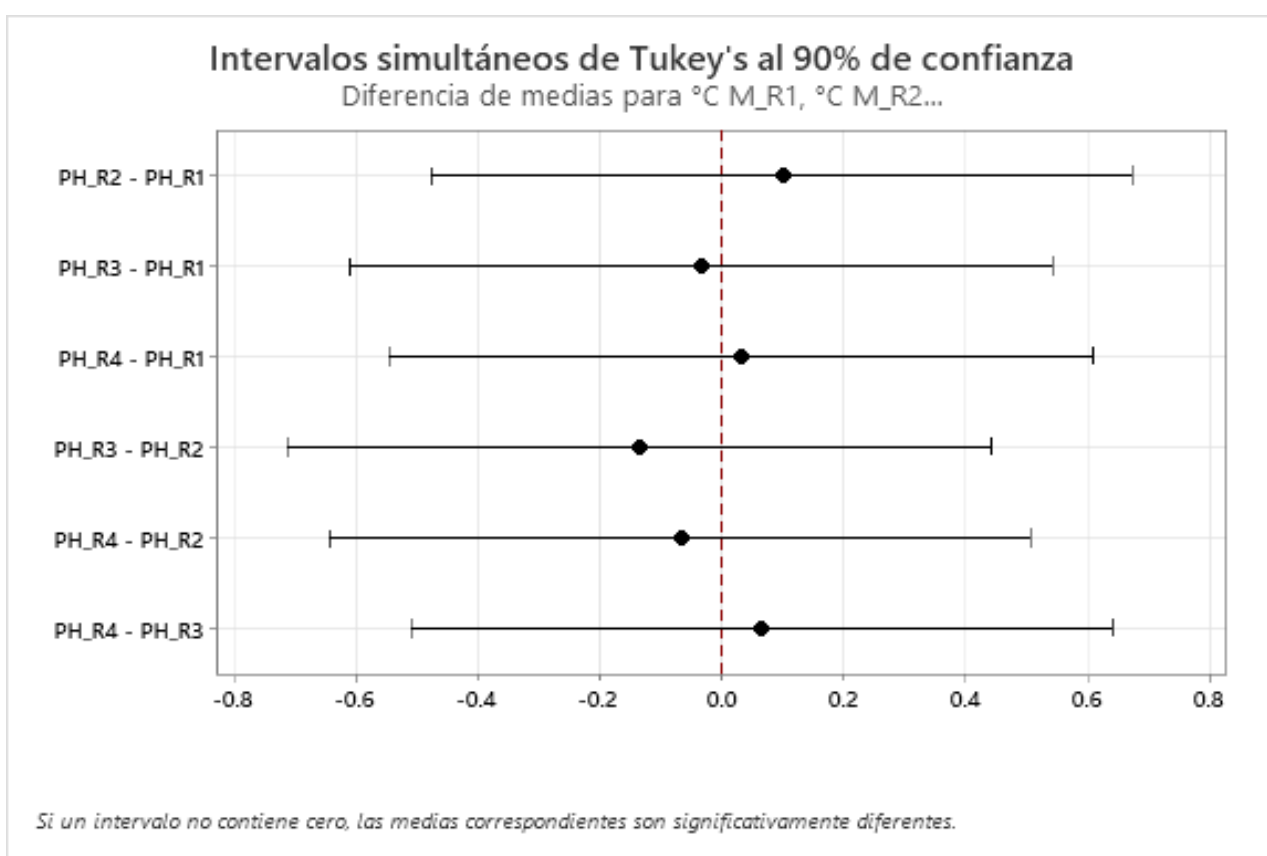


### 6.2.1.2 Análisis de varianza de efectos fijos unifactorial para pH

Los resultados de la prueba ANOVA indican la aceptación  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$  con un 90% de confiabilidad, lo que se observa que el tipo de inóculo no influye de manera significativa en la variación del pH en el proceso de la DA, lo que se corrobora con el intervalo de confianza simultáneo de Tukey, figura 25.

**Figura 25**

*Intervalos simultáneos de Tukey's al 90% de confianza de pH*

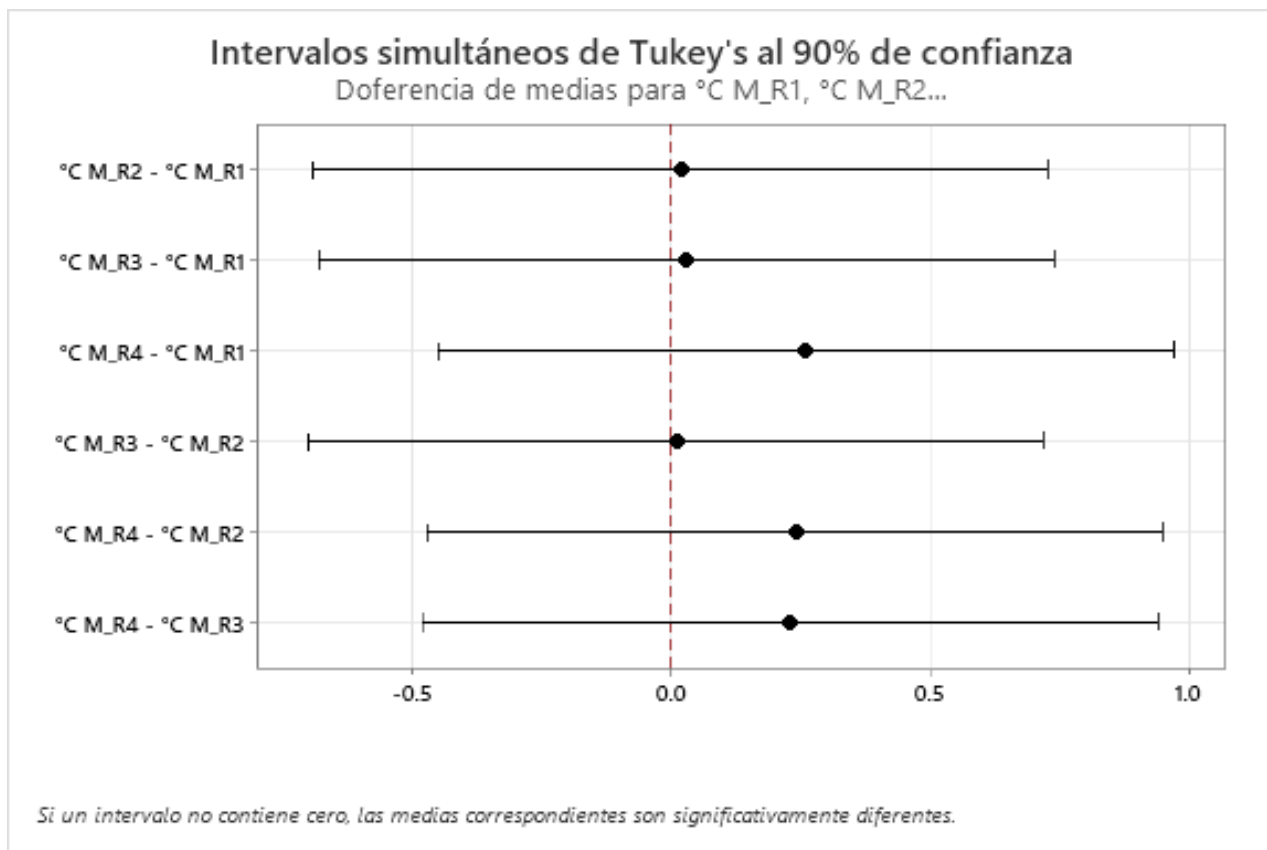


### 6.2.1.3 Análisis de varianza de efectos fijos unifactorial °C matutina

Los resultados indican la aceptación  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$ , lo que significa que la temperatura se mantiene sin variaciones significativas en el proceso de la DA, figura 26.

**Figura 26**

*Intervalos simultáneos de Tukey's 90% de confianza °C matutina*

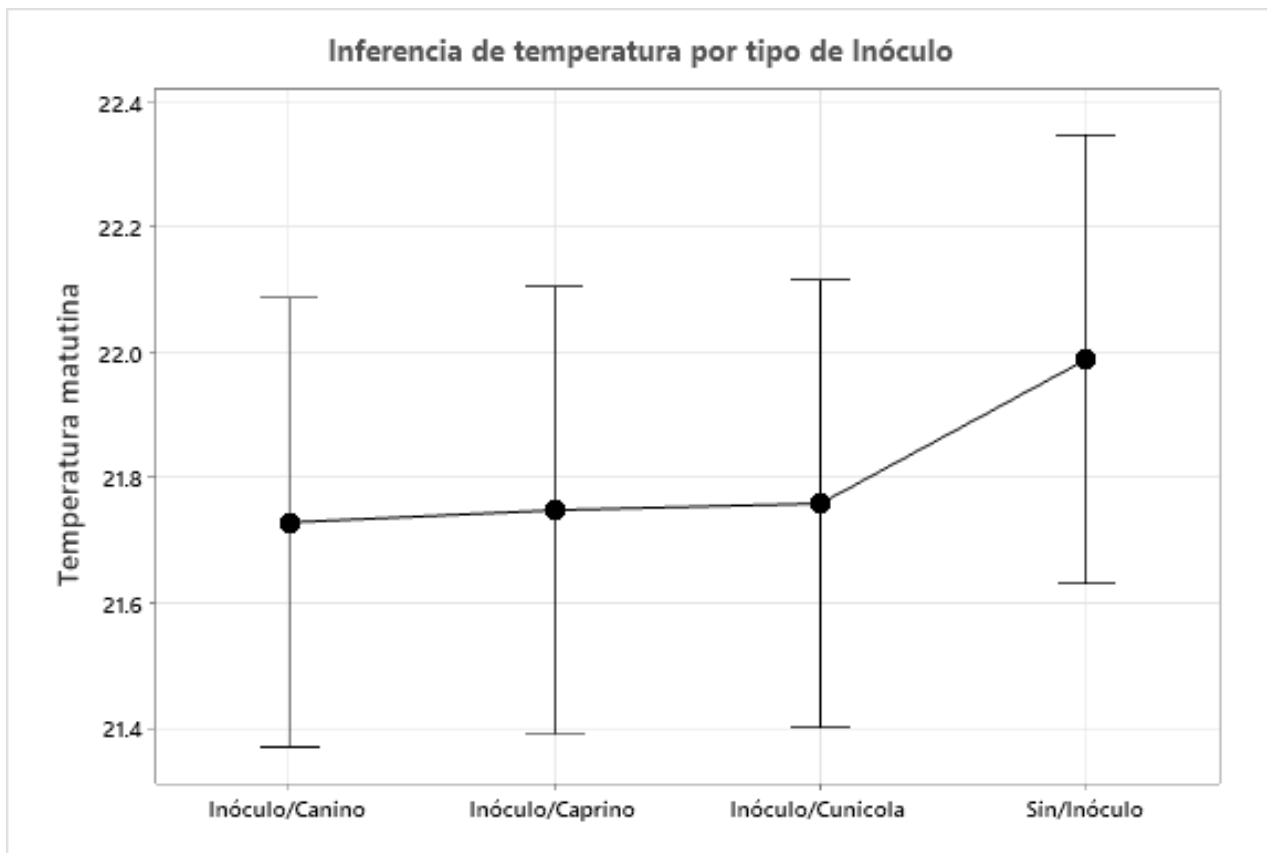


#### 6.2.1.4 Distribución de la temperatura matutina en la experimentación

La distribución de los intervalos de confianza en el parámetro temperatura matutina ( $21.370 \leq \mu \leq 22.087$  °C) se mantiene constante entre los reactores con inóculo; en tanto la temperatura en la DA sin inóculo aumenta de  $21.631 \leq \mu \leq 22.348$  °C , figura 27.

**Figura 27**

*Inferencia de temperatura por tipo de Inóculo*

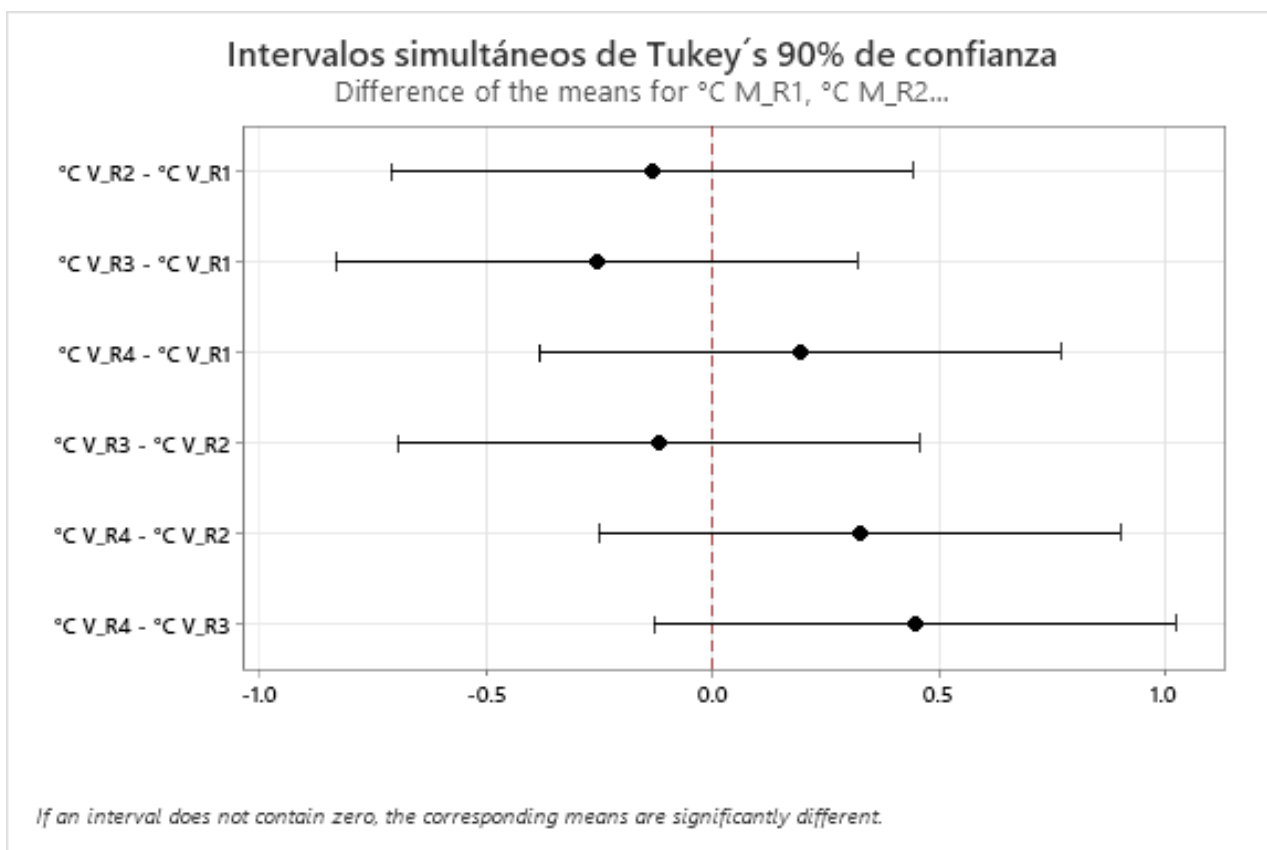


#### **6.2.1.5 Análisis de varianza de efectos fijos unifactorial °C vespertina**

Los resultados de la prueba ANOVA indican la aceptación  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$ , lo que significa que los promedios de las temperaturas vespertinas no varían, figura 28.

**Figura 28**

*Intervalos simultáneos de Tukey's 90% de confianza °C vespertina*



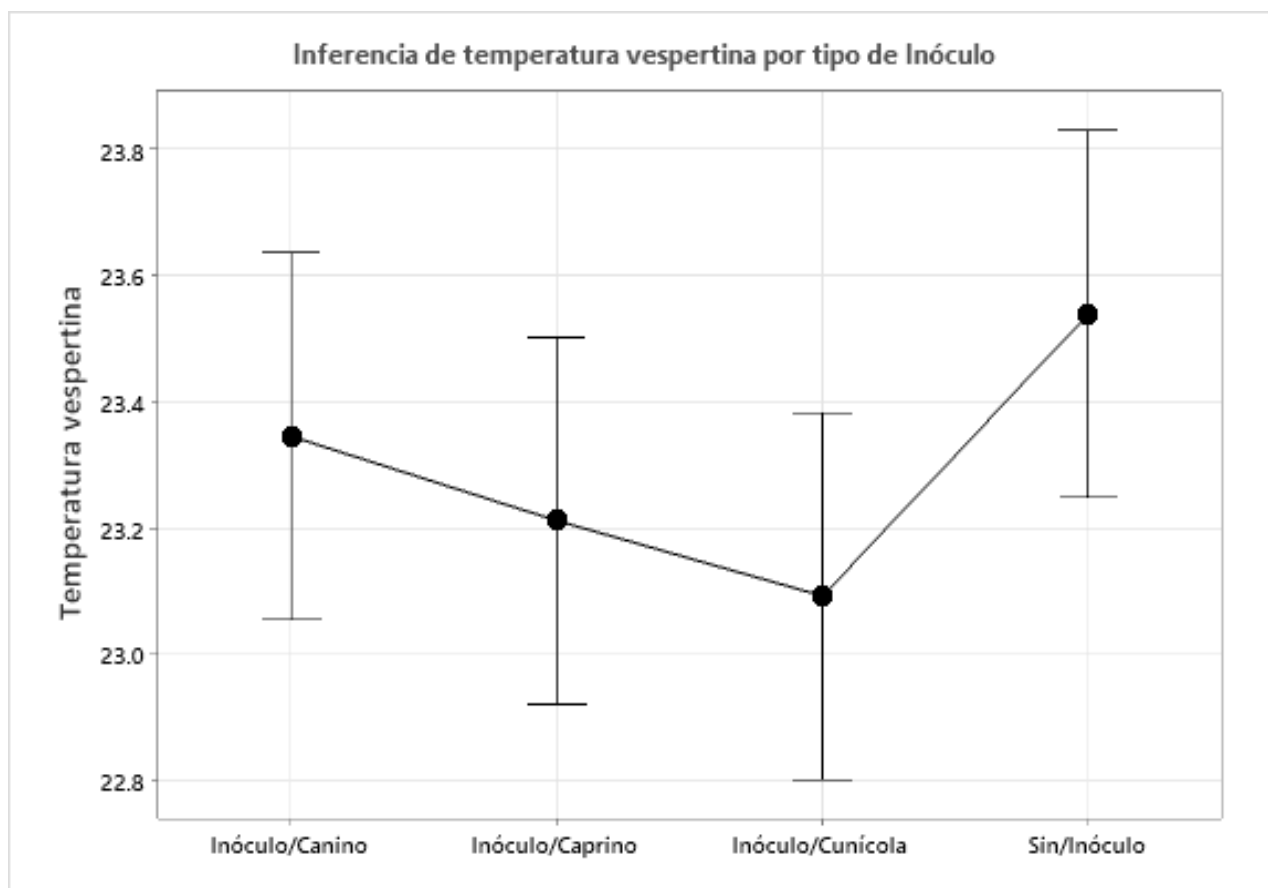
#### 6.2.1.6 Distribución de la temperatura vespertina en la experimentación

La distribución de los intervalos de confianza en el parámetro temperatura vespertina se mantiene relativamente constante, dado que la variación de los intervalos de la temperatura no es significativa, figura 29.



**Figura 29**

*Inferencia de temperatura vespertina por tipo de Inóculo*

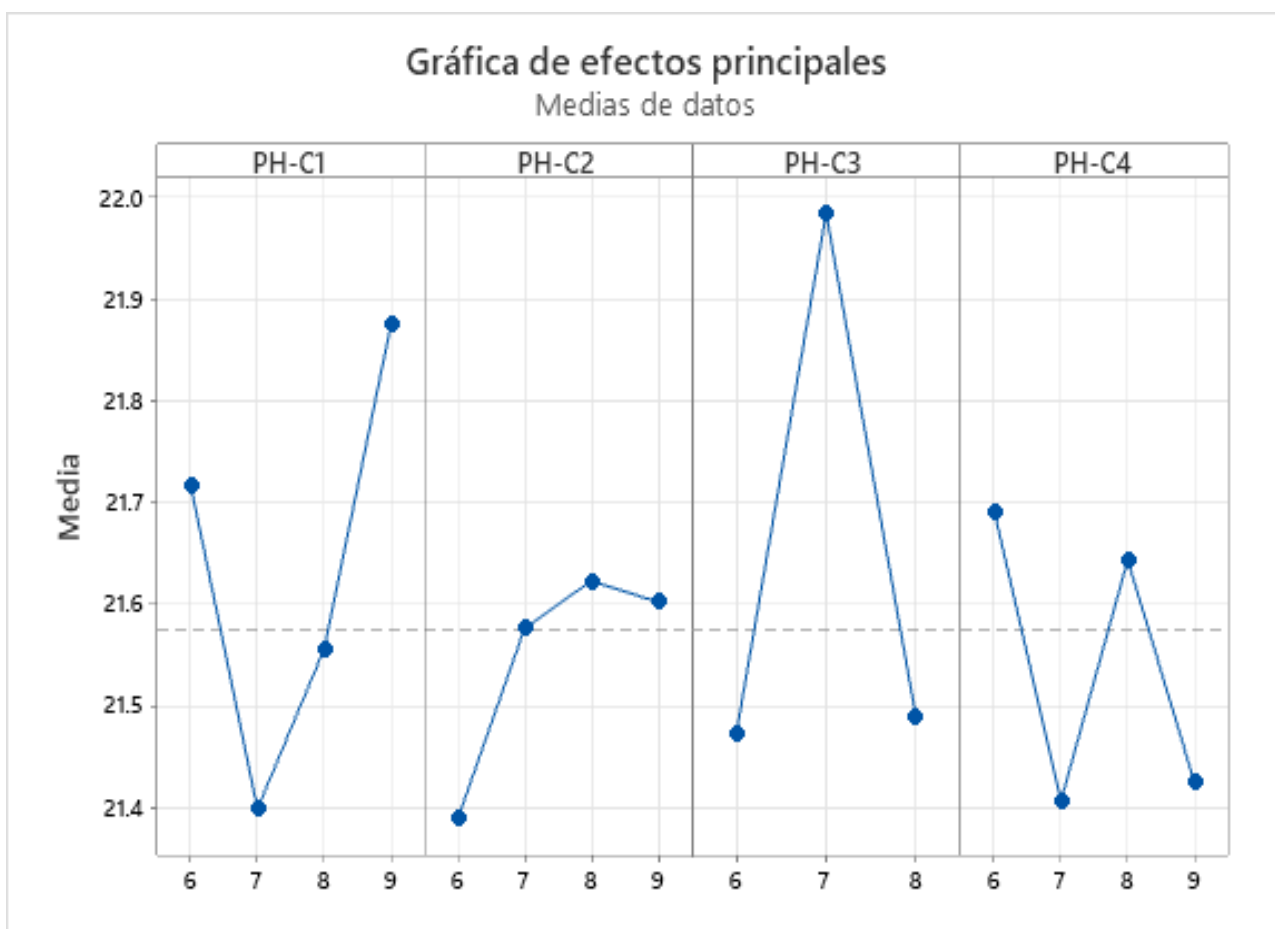


#### 6.2.1.7 Análisis de efectos principales

El análisis de efectos principales entre temperatura y PH por tipo de inóculo, indica que el PH canino de 9 eleva la temperatura a 21.87 °C mientras que el de cabra estabiliza la temperatura con una mínima variación. Se destaca que se obtuvieron niveles de PH de 6, 7 y 8 en el proceso de la DA en los cuatro reactores óptimos para generar biogás, y un PH cercano a 7 da como resultado una digestión eficiente (Mahmudul et al., 2021), figura 30.

**Figura 30**

*Efectos principales temperatura y pH*



### 6.3 Construcción del biodigestor

Se construyó un biodigestor doméstico con capacidad de mezcla de 60 L, con manivela de acero inoxidable, con una pantalla LCD de 3.5" para visualización de parámetros, alimentador de materia orgánica, llave de salida de biogás y su instrumentación, un agitador mecánico de 35 cm fabricado con dos amortiguadores, aspas de solera metálica de 1" y 37 cm de largo, una llave de 2" para extracción de fertilizantes sólidos, y otra de 1" para la salida del fertilizante foliar, se agregó una cámara de carretilla como contenedor de gas, además de una estructura metálica con cuatro ruedas de poliolefina de 4" para su transportación, figura 31.

En la experimentación del reactor se alimentó con 20 kilogramos de una mezcla de residuos orgánicos de frutas, verduras, harinas, leguminosas, carnes y cereales recolectados en hogares en una semana,

que procedían de residuos de comida, triturados en una licuadora casera durante 5 minutos, hasta alcanzar 8 mm de partícula, e inoculados con 20 kilogramos de estiércol caprino diluidos en 20 L de agua potable y un TRH de 30 días.

**Figura 31**

*Reactor terminado*



### 6.3.1 Visualización de parámetros

Figura 32

*Pantalla de las salidas de datos del sistema de monitoreo en tiempo real*

Browse

Structure

SQL

Search

Insert

Export

Import

Privileges

Operations

Tracking

Triggers

Showing rows 0 - 24 (12805 total, Query took 0.0034 seconds.)

SELECT \* FROM `biodomestics`

Profiling

Edit inline

Edit

Explain SQL

Create PHP code

Refresh

1

>

>>

Number of rows: 25

Filter rows: Search this table

Sort by key: None

Extra options

id

hora

fecha

metano

dioxido\_carbono

temperatura

tempExterna

humedad

ph

createdAt

updatedAt

Edit

Copy

Delete

262

01:44:53

2024-05-16

1650.640137

408.0000305

27.37000275

33.80000305

100.0000076

6.380000591

2024-05-16

2024-05-16

Edit

Copy

Delete

263

01:59:03

2024-05-16

1771.190186

404.0000305

27.31000137

33.90000153

100.0000076

6.340000629

2024-05-16

2024-05-16

Edit

Copy

Delete

264

02:06:07

2024-05-16

1837.450073

408.0000305

27.31000137

33.90000153

100.0000076

5.700000286

2024-05-16

2024-05-16

Edit

Copy

Delete

265

02:13:11

2024-05-16

1905.090088

408.0000305

27.31000137

33.90000153

100.0000076

6.120000362

2024-05-16

2024-05-16

Edit

Copy

Delete

266

02:20:15

2024-05-16

1939.430176

408.0000305

27.31000137

33.90000153

100.0000076

5.920000553

2024-05-16

2024-05-16

Edit

Copy

Delete

267

02:27:19

2024-05-16

2189.560059

424.0000305

27.31000137

34.10000229

100.0000076

5.490000248

2024-05-16

2024-05-16

Edit

Copy

Delete

268

02:34:24

2024-05-16

2189.560059

424.0000305

27.25000191

34.10000229

100.0000076

5.570000172

2024-05-16

2024-05-16

Edit

Copy

Delete

269

02:41:28

2024-05-16

2189.560059

424.0000305

27.31000137

34.00000381

100.0000076

5.950000286

2024-05-16

2024-05-16

Edit

Copy

Delete

270

02:48:32

2024-05-16

2217.380127

399.0000305

27.25000191

34.00000381

100.0000076

5.690000534

2024-05-16

2024-05-16

Edit

Copy

Delete

271

02:55:37

2024-05-16

2217.380127

399.0000305

27.31000137

34.00000381

100.0000076

5.610000061

2024-05-16

2024-05-16

Edit

Copy

Delete

272

03:02:41

2024-05-16

2217.380127

399.0000305

27.25000191

34.00000381

100.0000076

5.440000534

2024-05-16

2024-05-16

Edit

Copy

Delete

273

03:09:45

2024-05-16

2236.040039

404.0000305

27.31000137

34.10000229

100.0000076

5.680000305

2024-05-16

2024-05-16

Edit

Copy

Delete

274

03:16:49

2024-05-16

2236.040039

404.0000305

27.31000137

34.00000381

100.0000076

5.570000172

2024-05-16

2024-05-16

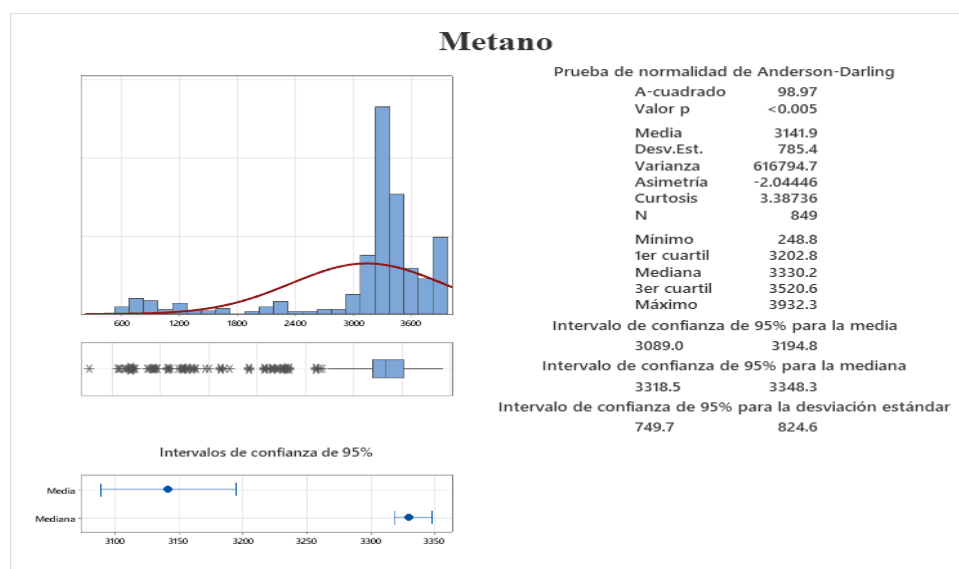
## 6.4 Validación del Biodigestor

### 6.4.1 Análisis de datos

El estudio estadístico de 849 datos obtenidos del monitoreo en tiempo real del biodigestor doméstico en un periodo de 30 días consecutivos se muestra en figura 33, 34, 35, 36 y 37.

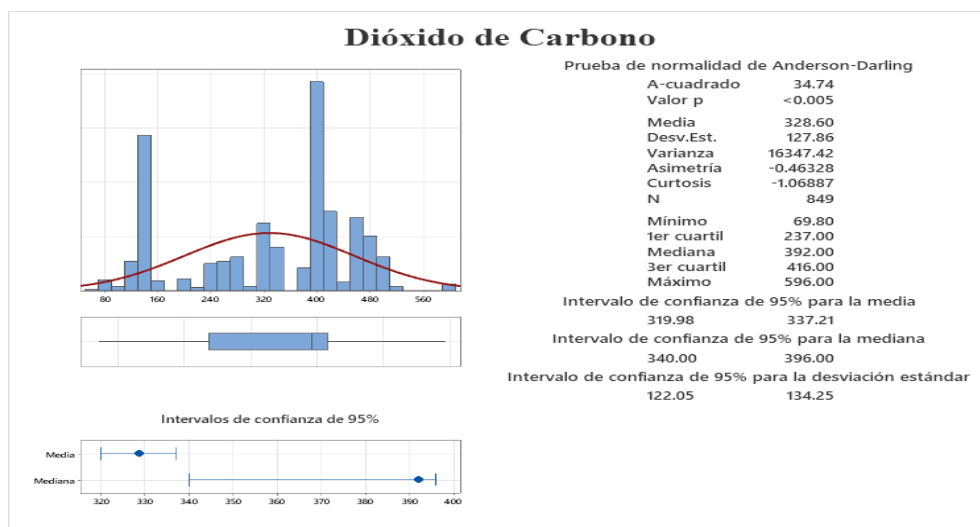
**Figura 33**

*Resumen estadístico del Metano*



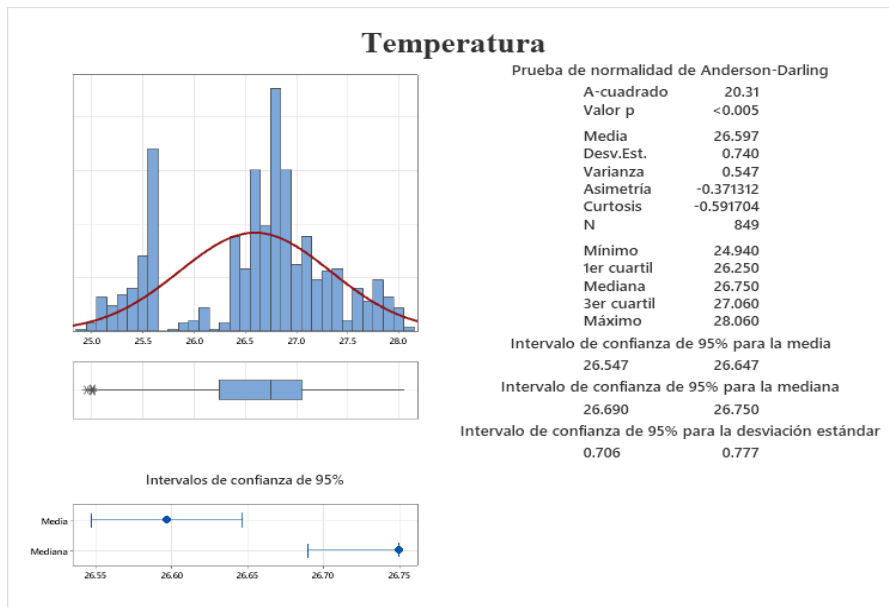
**Figura 34**

*Resumen estadístico Dióxido de Carbono*



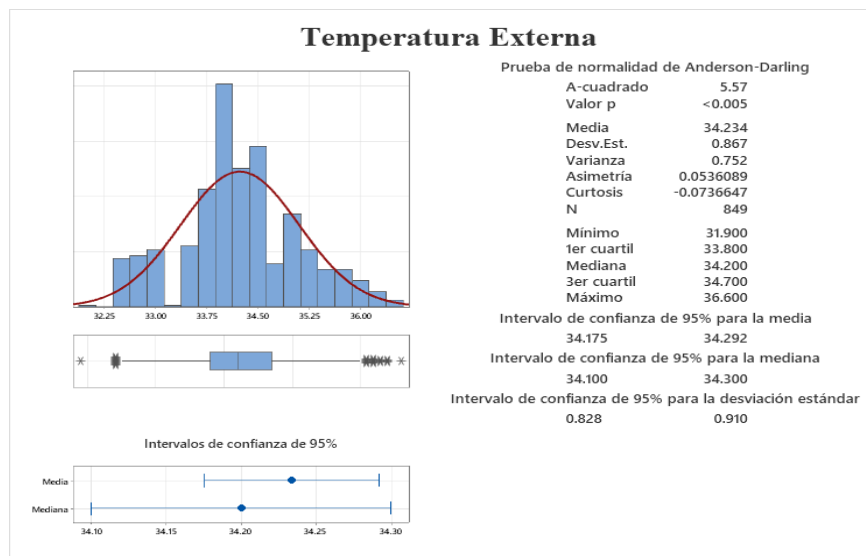
**Figura 35**

*Resumen estadístico Temperatura*



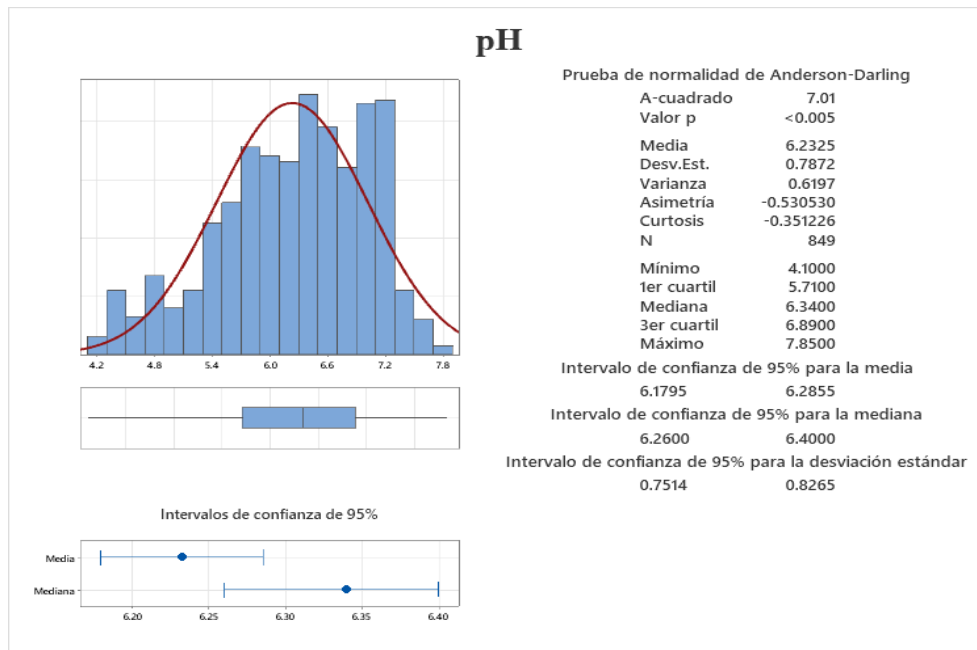
**Figura 36**

*Resumen estadístico Temperatura Externa*



**Figura 37**

*Resumen estadístico pH*



## Capítulo VII. Discusión

El biorreactor anaerobio doméstico con agitador mecánico manual podrá ser utilizado para realizar diferentes pruebas, monitoreando los parámetros críticos en el proceso de la DA, facilitando la comparación de datos obtenidos entre cargas de residuos de cocina como sustrato e inoculado con estiércol animal, semejante a los diseños realizados por Bhandari et al. (2018); Kesharwani & Bajpai (2021); Kumar Singh et al. (2019); Mutungwazi et al. (2018) quienes utilizaron plástico de alta resistencia como contenedor del biodigestor. Referente a la incorporación del agitador instalado también, Nwankwo et al. (2017); Rodríguez Godoy Francisca. (2022); Saber et al. (2021) incorporan un agitador en sus biodigestores para prevenir la formación de espuma y evitar gradientes de temperatura. Respecto al sistema de monitoreo con IoT instalado, transmite la lectura en tiempo real de los parámetros pH, temperatura, humedad, Dióxido de carbono y producción de biogás para visualizarlos en la interfaz, coincidiendo con Abdurrahman et al. (2020); Mukasine et al. (2023); Nagahage et al. (2021), difiriendo en la placa de desarrollo utilizada, y concordando con Yang et al. (2019) en el uso de Arduino.

Y referente al análisis experimental que se realizó de los parámetros temperatura y pH en la DA de cuatro reactores, condujo a algunos hallazgos significativos en el análisis de varianza de efectos fijos unifactorial y la prueba Tukey, identificando que el tipo de inóculo no influyó de manera significativa en la variación del pH, la temperatura mostró una variación mínima, coincidiendo con (Jyothilakshmi & Prakash, 2016; Miller et al., 2020). El pH se mantuvo sin variaciones significativas PH-R1=7.4, PH-R2=7.5, PH-R3=7.37 y PH-R4=7.43 casi neutro que permite el inicio óptimo de la DA (Saber et al., 2021), y se diferencia con (Granzotto et al., 2021; Jyothilakshmi & Prakash, 2016) quienes en su experimento mantienen un PH=6.5 ácido. Con respecto al tipo de inóculo Miller et al. (2020) inoculan con estiércol porcino y estudian la temperatura ambiente, calidad del biogás y tasas de producción de metano, obtienen como resultado que la fuente del inóculo utilizado afecta el rendimiento, así mismo, sugieren llevar a cabo un análisis profundo para saber la frecuencia de inoculación en la experimentación; mientras que dos Santos Filho et al. (2020) aplicaron inóculo de estiércol caprino y bovino, en el análisis del pH y Tiempo de Retención Hidráulica utilizaron la técnica de regresión no lineal entre dos parámetros, lo que difiere con los inóculos utilizados en la experimentación del estudio. Analizar todos los factores en su conjunto que intervienen en el proceso de la DA, permitirá el control de parámetros, obtención de digestato estable y estimar la producción de metano.



## **Capítulo VIII. Conclusiones**

El diseño y construcción del biodigestor cumple con las condiciones óptimas específicas que dará como resultado el buen funcionamiento de la generación de composta orgánica y de su sistema de monitoreo en tiempo real. Lo que da cumplimiento a la hipótesis planteada: El diseño del biodigestor de residuos orgánicos permitirá producir composta orgánica manipulando el proceso de DA para aumentar la conversión de materia orgánica.

El costo y los problemas asociados con la construcción pueden evitarse estimando el tamaño óptimo del biodigestor. Respecto al tratamiento anaeróbico de residuos de cocina generados, escasa literatura aborda el procedimiento de diseño.

Esta investigación presenta un procedimiento de diseño generalizado para la construcción de un biodigestor. En cuanto a la experimentación se utilizaron tres tratamientos con inóculo: canino, caprino, cunícola y un testigo sin estiércol en reactores domésticos, los cuales fueron alimentados con residuos orgánicos domésticos sin clasificar y agua de lluvia, que facilitó la evaluación de los efectos de cada tipo de inóculo en el proceso de la DA. El análisis de varianza de efectos fijos unifactorial mostró que el tipo de inóculo no influye en los parámetros pH y temperatura. Sin embargo, el análisis de efectos principales de la °C promedio y pH indican que el inóculo caprino tiende a estabilizar la temperatura con mínima variación. Mientras que en otros experimentos la variación es más heterogénea.

Para trabajos futuros esta investigación sienta las bases para el desarrollo de un modelo multifactorial donde intervengan los parámetros más representativos de la DA y así poder establecer la eficiencia del reactor doméstico.

## Referencias bibliográficas

1. Abdurrahman, A. H., Kirom, M. R., & Suhendi, A. (2020). Biogas Production Volume Measurement and Internet of Things based Monitoring System. 2020 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite, Comnetsat 2020 - Proceedings, 213–217. <https://doi.org/10.1109/COMNETSAT50391.2020.9328948>
2. Ajay, C. M., Mohan, S., & Dinesha, P. (2021). Decentralized energy from portable biogas digesters using domestic kitchen waste: A review. In Waste Management (Vol. 125, pp. 10–26). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.031>
3. Anderson Cardoso Sakuma, & Silva Deggerone Igor Da. (2021). BR20202008951-Biorreactor anaeróbico continuo de tanque agitado modificado con estructuras para la ejecución de una mezcla homogénea con baja velocidad de fluido para el tratamiento de residuos sólidos urbanos.
4. Andrianto, H., Suhardi, & Faizal, A. (2020). Development of smart greenhouse system for hydroponic agriculture. 2020 International Conference on Information Technology Systems and Innovation, ICITSI 2020 - Proceedings, 335–340. <https://doi.org/10.1109/ICITSI50517.2020.9264917>
5. Banzi, M., Cuartielles, D., Igoe, T., & Mellis, D. (2024). Arduino. <https://www.arduino.cc>
6. Barreto Castro Maria del Rocio. (2018). Sistema de tratamiento mixto para aguas residuales.
7. Begum, S., Das, T., Anupoju, G. R., & Eshtiaghi, N. (2021). Solid-state anaerobic co-digestion of food waste and cardboard in a pilot-scale auto-fed continuous stirred tank reactor system. Journal of Cleaner Production, 289. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125775>
8. Bhandari, J., Pradhan, P. M., & Choudhary, R. K. (2018). Experimental investigation and fabrication of biogas digester. Lecture Notes in Electrical Engineering, 435, 485–493. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-4286-7\\_48](https://doi.org/10.1007/978-981-10-4286-7_48)
9. Buen manejo del campo, S. A. de C. V. (2023). Reactor para sistema biodigestor y método para su fabricación.
10. Cameron, N. (2023). ESP32 Microcontroller. In ESP32 Formats and Communication: Application of Communication Protocols with ESP32 Microcontroller (pp. 1–54). Apress. [https://doi.org/10.1007/978-1-4842-9376-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4842-9376-8_1)

11. CEPAL. (2016). Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios (CEPAL).
12. Corporation, H. E. G. (2024). TECHNICAL DATA MQ-2 GAS SENSOR (pp. 1–2). <https://www.haoyuelectronics.com/Attachment/MQ-2/MQ-2.pdf>
13. Cruz, I. A., Andrade, L. R. S., Bharagava, R. N., Nadda, A. K., Bilal, M., Figueiredo, R. T., & Ferreira, L. F. R. (2021). An overview of process monitoring for anaerobic digestion. *Biosystems Engineering*, 207, 106–119. <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2021.04.008>
14. De la cruz Ascencio Johana Kristhel. (2019). Homogeneizador para biodigestor con dispersión de materia integrado.
15. Díaz Romero Diana Nahyeli. (2016). Modelo de utilidad biorreactor anaerobio.
16. dos Santos Filho, D. A., Oliveira, L. R. G., Fraga, T. J. M., da Motta Sobrinho, M. A., & Jucá, J. F. T. (2020). Development of a horizontal reactor with radial agitation to synthesize bio-methane from biomass waste and domestic sewage sludge. *Journal of Cleaner Production*, 257. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120616>
17. Garfí, M., Martí-Herrero, J., Garwood, A., & Ferrer, I. (2016). Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 60, pp. 599–614). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.071>
18. Gay, W. (2018). DHT11 Sensor. In *Advanced Raspberry Pi: Raspbian Linux and GPIO Integration* (pp. 399–418). Apress. [https://doi.org/10.1007/978-1-4842-3948-3\\_22](https://doi.org/10.1007/978-1-4842-3948-3_22)
19. Gomez Victor Alfredo. (2020). Biodigestor experimental de biogás mezclado por burbujeo.
20. Gomez-Muñoz, L., Castro-Bello M., Morales-Morales C., Jiménez-Alejo A., Marmolejo-Vega C.V, & González-Lorence A. (2023). Peasant Environmental Education Program for the Agroecological. *Tecnología y Ciencia Aplicada*, 6, 147–150.
21. Gómez-Muñoz, L., Morales-Morales, C., Castro-Bello, M., González-Lorence, A., Marmolejo-Vega, C. V., & Zagal-Barrera, S. R. (2024). Design of experiments to evaluate pH and temperature parameters with different inoculums in domestic biodigester. *Heliyon*, 10(9), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30542>
22. Granzotto, F., Aita, C., Silveira, D. D., Mayer, F. D., Pujol, S. B., Piñas, J. A. V., & Hoffmann, R. (2021). Use of anaerobic biodigestor in the treatment of organic waste from a

- university restaurant. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 105795. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2021.105795>
23. Gutierrez Vargas Santiago. (2021). Modelo industrial de coraza para biodigestor. [www.gob.mx/impi](http://www.gob.mx/impi).
  24. Guvvala, H., & Maurya, N. S. (2022). Art of anaerobic digestion: An overview. *Research Journal of Chemistry and Environment*, 25(8), 168–176. <https://doi.org/10.25303/258rjce168176>
  25. Hurtado Rivera Jacob. (2018). Biodigestor movil.
  26. Issahaku, M., Derkyi, N. S. A., & Kemausuor, F. (2024). A systematic review of the design considerations for the operation and maintenance of small-scale biogas digesters. *Heliyon*, 10(1), e24019. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2024.E24019>
  27. Jais, N. A. M., Abdullah, A. F., Kassim, M. S. M., Karim, M. M. A., M, A., & Muhadi, N. 'Atirah. (2024). Improved accuracy in IoT-Based water quality monitoring for aquaculture tanks using low-cost sensors: Asian seabass fish farming. *Heliyon*, 10(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29022>
  28. Juárez, L., Rodríguez, C., Castro, M., Aparicio, J. L., & Marmolejo, C. V. (2020, May 27). Environmental Prospective for the Tres Palos Lagoon, Municipality of Acapulco, Guerrero, Mexico. <https://doi.org/10.5821/ctv.8610>
  29. Jyothilakshmi, R., & Prakash, S. V. (2016). Design, Fabrication and Experimentation of a Small Scale Anaerobic Biodigester for Domestic Biodegradable Solid Waste with Energy Recovery and Sizing Calculations. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 749–755. <https://doi.org/10.1016/J.PROENV.2016.07.085>
  30. Karlett Olarte Jorge Adam. (2021). Biodigestor para nopal.
  31. Kaza, S., YaoLisa C., Bhada Tata, P., Van Woerden, F., Ionkova, K., Mortón, J., Poveda, R. A., Saraf, M., Malkawi, F., Harinath, A., Banna, F., An, G., Imoto, H., & Levin, D. (2018). What a Waste 2.0. In *What a Waste 2.0: Una instantánea global de la gestión de residuos sólidos hasta 2050*. <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/d3f9d45e-115f-559b-b14f-28552410e90a/full>
  32. Kesharwani, N., & Bajpai, S. (2021). Pilot scale anaerobic co-digestion at tropical ambient temperature of India: Digester performance and techno-economic assessment. *Bioresource Technology Reports*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100715>

33. Kouya-Takala, G., Jacques Nguimbous-Kouoh, J., D'aquin Biyindi, T., & Manguelle-Dicoum, E. (2019). Biogas and Digestate Production in a Portable Anaerobic Digester by Methanization. 4. <http://www.ias.org/ias/journals/ijres>
34. Kuczman, O., Gueri, M. V. D., De Souza, S. N. M., Schirmer, W. N., Alves, H. J., Secco, D., Buratto, W. G., Ribeiro, C. B., & Hernandez, F. B. (2018). Food waste anaerobic digestion of a popular restaurant in Southern Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 196, 382–389. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.282>
35. Kumar, A., & Samadder, S. R. (2020). Performance evaluation of anaerobic digestion technology for energy recovery from organic fraction of municipal solid waste: A review. *Energy*, 197, 117253. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.117253>
36. Kumar Singh, A., Kumar Jha, V., Pratap Singh, V., & Goel, D. (2019). Fabrication and design of self pressurised portable biogas plant for kitchen waste. 14. <http://www.ripublication.com>
37. LGEEPA, Pub. L. No. Última Reforma DOF 01-04-2024, 1 (2024).
38. LGPGIR, Pub. L. No. Última Reforma DOF 08-05-2023, 1 (2023).
39. Liu, M., & Zhang, C. (2019). Design of Hierarchical Monitoring System for Crop Growth Environment Based on Arduino Yún Development Platform. 2019 2nd International Conference on Safety Produce Informatization (IICSPI), 515–519. <https://doi.org/10.1109/IICSPI48186.2019.9095958>
40. Logan, M., Safi, M., Lens, P., & Visvanathan, C. (2019). Investigating the performance of internet of things based anaerobic digestion of food waste. *Process Safety and Environmental Protection*, 127, 277–287. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2019.05.025>
41. Luning, L., Van Zundert, E. H. M., & Brinkmann, A. J. F. (2003). Comparison of dry and wet digestion for solid waste. <https://iwaponline.com/wst/article-pdf/48/4/15/45350/15.pdf>
42. Mahmudul, H. M., Rasul, M. G., Akbar, D., Narayanan, R., & Mofijur, M. (2021). A comprehensive review of the recent development and challenges of a solar-assisted biodigester system. In *Science of the Total Environment* (Vol. 753). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141920>
43. Medina Blake Fernando. (2020). Biodigestor autolimpiabe.

44. Meegoda, J. N., Li, B., Patel, K., & Wang, L. B. (2018). A review of the processes, parameters, and optimization of anaerobic digestion. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 15, Issue 10). <https://doi.org/10.3390/ijerph15102224>
45. Miller, K. E., Grossman, E., Stuart, B. J., & Davis, S. C. (2020). Pilot-scale biogas production in a temperate climate using variable food waste. *Biomass and Bioenergy*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105568>
46. Miyamonte Mex, S. A. de C. V. (2021). Diseño industrial de biodigestor biológico.
47. Montgomery Douglas C. (1991). Design and analysis of experiments (Grupo editorial Iberoamérica, Ed.; Tercera).
48. Mortier, N., Velghe, F., & Verstichel, S. (2016). Organic Recycling of Agricultural Waste Today: Composting and Anaerobic Digestion. In *Biotransformation of Agricultural Waste and By-Products: The Food, Feed, Fibre, Fuel (4F) Economy* (pp. 69–124). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803622-8.00004-5>
49. Mukasine, A., Sibomana, L., Jayavel, K., Nkurikiyeyezu, K., & Hitimana, E. (2023). Correlation Analysis Model of Environment Parameters Using IoT Framework in a Biogas Energy Generation Context. *Future Internet* 2023, Vol. 15, Page 265, 15(8), 265. <https://doi.org/10.3390/FI15080265>
50. Munisamy, P., Ravichandran, M., Natarajan, S. D., & Varadhaaraju, C. (2017). Biological aspects of anaerobic digestion and its kinetics: An overview. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 6(4). <https://doi.org/10.15414/jmbfs.2017.6.4.1090-1097>
51. Mutungwazi, A., Mukumba, P., & Makaka, G. (2018). Biogas digester types installed in South Africa: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 81, pp. 172–180). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.051>
52. Nagahage, I. S. P., Nagahage, E. A. A. D., & Fujino, T. (2021). Assessment of the applicability of a low-cost sensor-based methane monitoring system for continuous multi-channel sampling. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(8). <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09290-w>
53. Negri, C., Ricci, M., Zilio, M., D'Imporzano, G., Qiao, W., Dong, R., & Adani, F. (2020). Anaerobic digestion of food waste for bio-energy production in China and Southeast Asia: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 133). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110138>

54. Nuhu, S. K., Gyang, J. A., & Kwarbak, J. J. (2021). Production and optimization of biomethane from chicken, food, and sewage wastes: The domestic pilot biodigester performance. *Cleaner Engineering and Technology*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100298>
55. Nwankwo, C. S., Eze, J. I., & Okoyeuzu, C. (2017). Design and fabrication of 3.60 m<sup>3</sup> household plastic bio digester loaded with kitchen waste and cow dung for biogas generation. *Scientific Research and Essays*, 12(14), 130–141. <https://doi.org/10.5897/sre2017.6516>
56. Ometto, F., Karlsson, A., Ejlerstson, J., Björn, A. V., & Shakeri, S. Y. (2019). Anaerobic digestion: An engineered biological process. In *Substitute Natural Gas from Waste: Technical Assessment and Industrial Applications of Biochemical and Thermochemical Processes* (pp. 63–74). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815554-7.00005-2>
57. Oshik Moshe. (2015). Lightweight appliance with exoskeletal support respective kit-of- parts and method for production of biogas and liquid fertilizer.
58. Radu, T., Smedley, V., Yadav, D., Blanchard, R., Rahaman, S. A., Salam, A., & Visvanathan, C. (2022). The Design, Development and Assessment of a Novel De-centralised IoT-Based Remote Monitoring of a Small-Scale Anaerobic Digester Network. *Journal of Energy and Power Technology* 2022, Vol. 4, 039, 4(4), 1–17. <https://doi.org/10.21926/JEPT.2204039>
59. Ren Yuqian; Yuasa Rangel Alejandro Isidro. (2019). Modelo industrial de biodigestor. [www.gob.mx/impi](http://www.gob.mx/impi)
60. Robles Gutiérrez Irma. (2019). Sistema integral de tratamiento y desinfección de desechos humanos.
61. Rocamora, I., Wagland, S. T., Villa, R., Simpson, E. W., Fernández, O., & Bajón-Fernández, Y. (2020). Dry anaerobic digestion of organic waste: A review of operational parameters and their impact on process performance. In *Bioresource Technology* (Vol. 299). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122681>
62. Rodríguez Godoy Francisca. (2022). WO 2022-120505. Biodigestor compacto.
63. Ruggiero Cotait Flavius. (2021). BR102021004129-3. MINI BIODIGESTOR.
64. Saber, M., Khitous, M., Kadir, L., Abada, S., Tirichine, N., Moussi, K., Saidi, A., Akbi, A., & Aziza, M. (2021). Enhancement of organic household waste anaerobic digestion performances in a thermophilic pilot digester. *Biomass and Bioenergy*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105933>

65. Sallustro Jean-Luc, & Schmidt, M. (2022). WO2022013808A1- Method and device for treating organic waste, including the anaerobic digestion there of and the composting digestates.
66. Sillero, L., Perez, M., & Solera, R. (2023). Temperature-phased enhanced the single-stage anaerobic co-digestion of sewage sludge, wine vinasse and poultry manure: Perspectives for the circular economy. *Fuel*, 331, 125761. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2022.125761>
67. Themelis J.N. (2002). Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes [Columbia University]. <https://www.researchgate.net/publication/239614760>
68. Tonanzi, B., Braguglia, C. M., Gallipoli, A., Montecchio, D., Pagliaccia, P., Rossetti, S., & Gianico, A. (2020). Anaerobic digestion of mixed urban biowaste: The microbial community shift towards stability. *New Biotechnology*, 55, 108–117. <https://doi.org/10.1016/J.NBT.2019.10.008>
69. Toscano Villicaña Xicotencatl Fernando. (2020). Biorreactor anaerobio.
70. Uçkun Kiran, E., Stamatelatos, K., Antonopoulou, G., & Lyberatos, G. (2016). Production of biogas via anaerobic digestion. In *Handbook of Biofuels Production: Processes and Technologies: Second Edition* (pp. 259–301). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100455-5.00010-2>
71. Ventorino, V., Romano, I., Pagliano, G., Robertiello, A., & Pepe, O. (2018). Pre-treatment and inoculum affect the microbial community structure and enhance the biogas reactor performance in a pilot-scale biodigestion of municipal solid waste. *Waste Management*, 73, 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.12.005>
72. Yang, S., Liu, Y., Wu, N., Zhang, Y., Svoronos, S., & Pullammanappallil, P. (2019). Low-cost, Arduino-based, portable device for measurement of methane composition in biogas. *Renewable Energy*, 138, 224–229. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.01.083>
73. Zhang, J., Loh, K. C., Li, W., Lim, J. W., Dai, Y., & Tong, Y. W. (2017). Three-stage anaerobic digester for food waste. *Applied Energy*, 194, 287–295. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2016.10.116>



## IX. Anexos

### Anexo 1. Código Arduino uno

#### Código Sensor de PH-4502C

```
1 float calibration_value = 36.42875; // Valor de calibración obtenido
2 int buffer_arr[10], temp;
3 unsigned long int avgval;
4
5 void leerPH() {
6     for (int i = 0; i < 10; i++) {
7         buffer_arr[i] = analogRead(A13); // Leer el valor del sensor de pH
8         delay(30);
9     }
10    for (int i = 0; i < 9; i++) {
11        for (int j = i + 1; j < 10; j++) {
12            if (buffer_arr[i] > buffer_arr[j]) {
13                temp = buffer_arr[i];
14                buffer_arr[i] = buffer_arr[j];
15                buffer_arr[j] = temp;
16            }
17        }
18    }
19    avgval = 0;
20    for (int i = 2; i < 8; i++) {
21        avgval += buffer_arr[i]; // Promedio de valores para eliminar ruido
22    }
23    float volt = (float)avgval * 5.0 / 1024 / 6;
24    float ph_act = (-8.90625 * volt) + calibration_value; // Cálculo del pH basado en la fórmula de calibración
25    Serial.print("pH: ");
26    Serial.println(ph_act);
27 }
28 |
```

#### Código Sensor MQ-2

```
1 // Pin donde está conectado el sensor MQ-2
2 const int mq2Pin = A12;
3
4 // Función para leer y calcular la concentración del sensor MQ-2
5 void leerMQ2() {
6     // Leer el valor analógico del sensor MQ-2
7     int sensorValue = analogRead(mq2Pin);
8
9     // Convertir el valor analógico a voltaje
10    float voltage = sensorValue * (5.0 / 1023.0);
11
12    // Calcular la concentración de gas en ppm (ajusta esta fórmula según calibración)
13    float mq2 = 230.0 * pow(voltage, 2.3);
14
15 }
16
```

## Código sensor **MG811**

```
1  #include "CO2Sensor.h"
2
3  CO2Sensor co2Sensor(A10, 0.99, 100);
4
5  void setup(void)
6  {
7      co2Sensor.calibrate();
8      // ... otros elementos del setup ...
9  }
10
11 void loop(void)
12 {
13     int val = co2Sensor.read();
14
15     // ... otros elementos del loop ...
16 }
17
```

## Código Sensor **DS18B20**

```
1  #include <OneWire.h>
2  #include <DallasTemperature.h>
3
4  // Configuración para el sensor Dallas Temperature
5  OneWire ourWire(19); // Se establece el pin 19 como bus OneWire
6  DallasTemperature sensors(&ourWire); // Se declara una variable u objeto para el sensor
7
8  void setup() {
9      Serial.begin(115200); // Inicializa la comunicación serie
10     sensors.begin(); // Inicializa el sensor Dallas Temperature
11 }
12
13 void loop() {
14     sensors.requestTemperatures(); // Enviar comando para leer la temperatura
15     float temp = sensors.getTempCByIndex(0); // Obtener la temperatura en °C
16     Serial.print("Temperatura sumergida: ");
17     Serial.print(temp);
18     Serial.println(" °C");
19     delay(1500); // Tiempo de espera antes de la próxima lectura
20 }
21
```

## Código sensor DHT22

```
1  #include <DHT.h>           // Cargamos la librería DHT
2  #define DHTTYPE DHT22      // Definimos el modelo del sensor DHT22
3  #define DHTPIN A11         // Se define el pin para conectar el sensor DHT22
4
5  DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE); // Inicializamos el objeto DHT
6
7  void setupDHT() {
8      dht.begin(); // Iniciamos el sensor DHT
9  }
10
11 void leerDHT() {
12     float h = dht.readHumidity(); // Leemos la Humedad
13     float t = dht.readTemperature(); // Leemos la temperatura en grados Celsius
14     float f = dht.readTemperature(true); // Leemos la temperatura en grados Fahrenheit
15
16     // Mostrar los valores en el TFT
17     tft.setCursor(100, 140);
18     tft.fillRect(100, 140, 80, 20, BLACK);
19     tft.setCursor(100, 140);
20     tft.print(t);
21     tft.print(" *C");
22
23     tft.setCursor(120, 180);
24     tft.fillRect(120, 180, 80, 20, BLACK);
25     tft.setCursor(120, 180);
26     tft.print(h);
27     tft.print(" %");
28 }
```

## Anexo 2. Código Esp32

```
1  #include <WiFi.h>
2  #include <WiFiClientSecure.h>
3  #include <ArduinoJson.h>
4  #include <WebServer.h>
5  #include <HTTPClient.h>
6  #define HOST "https://backesp32.onrender.com"
7  const char* ssid = "Tu red WIFI";
8  const char* password = "Tu password";
9  float receivedData[6];
10 WebServer server(80);
11 StaticJsonDocument<200> doc;
12 StaticJsonDocument<200> postJson;
13 void setup()
14 {
15     Serial.begin(115200);
16     Serial.printf("Connecting to %s ", ssid);
17     WiFi.begin(ssid, password);
18     while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
19         delay(500);
20         Serial.print(".");
21     }
22     Serial.println(" CONNECTED");
23     Serial.println("Ready to receive data from Arduino");
24
25
26 void loop(){
27     if (Serial.available() >= 6 * sizeof(float)) {
28         // Read and store received data
29         for (int i = 0; i < 6; i++) {
30             receivedData[i] = Serial.parseFloat();
31         }
32         Serial.println();
33         for (int i = 0; i < 6; i++) {
34             Serial.print(receivedData[i]);
35             Serial.print(" ");
36         }
37         Serial.println();
38     }
39     delay(60000);
40     jsonDataPost();
41 }
```

### **Anexo 3. Productos académicos**

1. Artículo de Revista Indizado en Scopus y Web of Science (JCR), Design of experiments to evaluate pH and temperature parameters with different inoculums in domestic biodigester, (Gómez-Muñoz et al., 2024).
2. Artículo en Revista Arbitrada, Peasant Environmental Education Program for the Agroecological, (Gomez-Muñoz et al., 2023).
3. Artículo en extenso en congreso Nacional, Peasant Environmental Education Program for the agroecological en 1er Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada, desarrollado en el Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, TecNM/CENIDET, del 15 al 17 de noviembre de 2023.
4. Artículo en congreso Nacional en el XXIX Foro de Estudios sobre Guerrero, Análisis de parámetros en reactores alimentados con residuos orgánicos domésticos del área Físico Matemáticas y Ciencias de la Tierra.
5. Artículos en congreso Internacional, “Diseño de un biodigestor doméstico para el tratamiento de residuos orgánicos2”, “Análisis de parámetros fisicoquímicos en la digestión anaerobia de residuos orgánicos” y “Programa de Educación Ambiental Campesina”, en el V Congreso Latino Americano sobre conflictos ambientales:” Justicia Climática, Transiciones Socio ecológicas y Movimientos Sociales realizado en el centro de convenciones Vasco Vazques, en Manaus, Brasil del 21 al 25 de octubre de 2024.
6. Artículo corto en congreso Nacional “Propuesta de un biodigestor anaerobio para la elaboración de composta orgánica” en el marco de la X Jornada de Ciencia y Tecnología aplicada, celebrada del 26 al 28 de abril de 2023, en el TECN/CENIDET.
7. Participación en la CUMBRE NACIONAL DE DESARROLLO TECNOLÓGICO, EMPRENDIMIENTO E INNOVACIÓN INNOVATECNM 2024, con el proyecto BIODOMESTIC-WASTE en la categoría Cambio Climático, del 19 al 22 de noviembre de 2024 en la Ciudad Villa de Álvarez, Colima.