

# Design of discontinuous biodigesters for the production of biofertilizers from organic solid waste from the Casa Grande district market, La Libertad Region, 2021

## Diseño de biodigestores discontinuos para la producción de biofertilizantes a partir de residuos sólidos orgánicos del mercado del distrito de Casa Grande, Región La Libertad, 2021

Rodrigo Franco Cárdenas Casanova, Bachiller en Ingeniería Ambiental<sup>1</sup>, Jessica Marleny Luján Rojas, Magister<sup>2</sup>, Grant Ilich LLaque Fernández, Magister en Educación<sup>3</sup>, and Flor Alicia Calvanapón Alva<sup>3</sup>, Doctora en Administración<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Universidad Privada del Norte, Perú, rodcardenasc388@gmail.com

<sup>2</sup>Universidad Privada del Norte, Perú, jessica.lujan@upn.pe.

<sup>3</sup>Universidad Privada del Norte, Perú, grant.laque@upn.pe, flor.calvanapon@upn.pe

**Resumen–** El acelerado crecimiento poblacional y la industrialización han generado gran cantidad de residuos sólidos orgánicos, fuente de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) causantes del calentamiento global. Similar realidad atraviesa el distrito de Casa Grande, puesto que los residuos sólidos del mercado son dispuestos en el botadero de Roma. La investigación tuvo por objetivo diseñar biodigestores discontinuos para producir biofertilizantes, a partir de residuos sólidos orgánicos del mercado de Casa Grande. La recolección de datos fue mediante técnicas de encuesta y observación, dirigidas a 80 titulares de puestos comerciales del rubro orgánicos. Se utilizó el software CAD SolidWorks 2018 para el diseño de los biodigestores. Los resultados de los cuestionarios dan cuenta de una generación diaria de 0.395 Tn de residuos orgánicos, para lo cual se necesitarán 8 biodigestores de régimen discontinuo (BATCH), cuyas características son volumen de 200 litros, 0.92 m de altura y 0.6 m de diámetro. La producción de biofertilizantes se estandarizó con un flujograma. Al cabo de 60 días se producirán 1480 litros de biol y 0.0152 toneladas de biosol que servirán para la rehabilitación de las áreas verdes del distrito de Casa Grande.

**Palabras clave–** Residuos sólidos orgánicos, biodigestores discontinuos, biofertilizantes, mercado distrital.

**Abstract–** The rapid population growth and industrialization have generated a large amount of organic solid waste, a source of greenhouse gas (GHG) emissions that cause global warming. A similar reality crosses the Casa Grande district, since the solid waste from the market is disposed of in the Roma dump. The objective of the research was to design discontinuous biodigesters to produce biofertilizers from organic solid waste from the Casa Grande market. The data collection was through survey and observation techniques,

aimed at 80 holders of commercial positions in the organic sector. SolidWorks 2018 CAD software was used for the design of the biodigesters. The results of the questionnaires show a daily generation of 0.395 Tn of organic waste, for which 8 batch biodigesters (BATCH) will be needed, whose characteristics are a volume of 200 liters, 0.92 m high and 0.6 m in diameter. The production of biofertilizers was standardized with a flow chart. After 60 days, 1480 liters of biol and 0.0152 tons of biosol will be produced, which will be used to rehabilitate the green areas of the Casa Grande district.

**Keywords–** Solid organic waste, discontinuous biodigesters, biofertilizers, district market.

### I. INTRODUCCIÓN

Altos dignatarios y funcionarios públicos alrededor del globo parlamentan con premura y zozobra sobre la problemática del calentamiento global y sus efectos[1]. Las permanentes emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) son la principal causa, y según cifras del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático [2], la descomposición de los residuos sólidos orgánicos representaron el 5% de GEI emitidos a nivel mundial en el año 2006. El acelerado crecimiento poblacional, los hábitos consumistas de una sociedad altamente industrializada y ambiciones económicas han conducido a la generación de grandes cantidades de residuos sólidos [3].

Muestra de ello es que, en Australia, entre los años 2003 y 2007 se recolectaron 5 millones de toneladas de residuos sólidos orgánicos [4]. Análogamente, en Sudáfrica por el año 2011 de acuerdo con el Departamento de Asuntos Ambientales, se generaron aproximadamente 59 millones de toneladas de

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.237>

ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

residuos municipales, cuya fracción orgánica fue del 13% [5]. Ante ello, el Banco Mundial pronostica un futuro aciago para la mayoría de las formas de vida que habiten el planeta, con un aumento de los desechos municipales a nivel mundial en un 70% en los próximos 30 años [6].

En Perú, según un informe del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) la generación de residuos sólidos municipales a nivel nacional para el año 2017, se calculó en 19412,7 Tn/día y 7085644,2 Tn/año respectivamente, además, la generación per-cápita de residuos sólidos municipales de la región La Libertad fue de 0,51kg/habitante/día [7]. Evidenciando el problema que representan los residuos sólidos y su mala gestión en el Perú.

El distrito de Casa Grande es una de las urbes de mayor crecimiento económico y desarrollo poblacional de la provincia de Ascope, y de acuerdo con el censo del 2017 del INEI, el distrito posee 28492 habitantes. Según el estudio de caracterización de residuos sólidos del distrito de Casa Grande del 2019, la generación diaria de residuos orgánicos en el mercado ascendía a 0.362 toneladas. Asimismo, el plan de manejo de residuos sólidos del distrito de Casa Grande 2021-2025, indica que la producción total diaria de residuos sólidos orgánicos es de 9.95 toneladas, lo que representa el 57% de los residuos que se pueden reaprovechar.

En [8], se desarrolló un estudio en torno a la localidad de Casa Grande, donde se emplearon cuestionarios para medir el nivel de conocimiento que poseen los habitantes de 64 viviendas en segregación de residuos sólidos, la data reveló un desconocimiento del 100%. Además, ardua resulta la labor de gestionar los residuos adecuadamente cuando el distrito no cuenta con un relleno sanitario; obligando a las autoridades a hacer la disposición final en el botadero del anexo Roma. Ante ello la municipalidad, a través de la Resolución de Alcaldía N°288-2019-MDCG, implementó una compostera en el anexo Garrapón. Sin embargo, la valorización en la compostera está enfocada solo a reaprovechar la poda y hojarasca de las áreas verdes; por lo que resultó pertinente formular una propuesta de diseño de biodigestores discontinuos (Batch) para la producción de biofertilizantes a partir de residuos sólidos orgánicos del mercado distrital de Casa Grande.

La propuesta se alinea a los principios de la economía circular, en [9], se defiende la postura de imitar a la naturaleza y su modelo cíclico de “cero residuos” en una economía basada en reducir, reutilizar y reciclar los residuos producidos; en correspondencia [10], la describen como un modelo productivo en el que se replantean los desechos como potencial materia prima.

Es de entendimiento básico que los residuos sólidos orgánicos, son biomasa altamente biodegradable, debido a una composición química rica en nutrientes primarios como el nitrógeno y el fósforo; nutrientes secundarios como el potasio, calcio y magnesio; y micronutrientes como el zinc, cobre y hierro; y a la acción microbiana natural que la descompone en macronutrientes y micronutrientes [11], [12].

En tanto, la tecnología aplicada para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos son los biodigestores, que son reactores herméticos y sin presencia de oxígeno que dan

condiciones a los organismos responsables de la digestión anaeróbica (DA) [13]. La DA, es un proceso bioquímico que consiste en la degradación de materia orgánica [14]. En [15], se menciona que las temperaturas cálidas favorecen la DA.

Para el diseño de biodigestores, es fundamental calcular la cantidad de residuos sólidos orgánicos [16], [17]. Asimismo, se debe contar con sólidos conocimientos en sistemas de modelamiento a escalas 2D y 3D; donde se deberán analizar los modelos, tamaños y formas del biodigestor; tomando en cuenta aspectos de espacio del terreno, clima y presupuesto [18], [19]. En [20], mencionan que los softwares de diseño asistido por computadora (CAD), son por excelencia los indicados para diseñar objetos tangibles.

Se seleccionó como tecnología al biodigestor discontinuo o también denominado Batch, ya que demanda mínima cantidad de agua, no requiere de agitación diaria, ni de cuidados especiales, no sufre variaciones de temperatura, requiere mano de obra eventual (cada 2 meses), y es ideal para construir sobre el suelo o semi enterrado[20], [21].

En tanto, los biofertilizantes son el resultado de la DA [22]; específicamente se trata de efluentes estabilizados ricos en materia orgánica y elementos minerales [22], [23]; dicho efluente final de la DA está diferenciado en biol (abono líquido) y biosol (abono sólido) [24].

En virtud de lo antes mencionado, el presente trabajo de investigación tiene por objetivo general el diseñar biodigestores discontinuos para producir biofertilizantes a partir de residuos sólidos orgánicos del mercado del distrito de Casa Grande. Y por objetivos específicos: calcular la cantidad de residuos sólidos orgánicos a ser valorizados; elaborar un esquema para la producción de biofertilizantes; y elaborar planos de los biodigestores anaerobios de régimen discontinuo.

## II. METODOLOGÍA

En la investigación se trabajó bajo el enfoque cuantitativo, ya que se muestran resultados de cuestionarios y cálculo para el dimensionamiento del biodigestor. Asimismo, es de alcance descriptivo, diseño no experimental, no se manipularon las variables de estudio, corte transversal y de tipo propositivo. Se trabajó con una población finita conformado por 100 comerciantes, luego considerando criterios de inclusión de los rubros de productos cárnicos, avícolas, pescados, verduras, frutas y productos de floristería del mercado de Casa Grande.

Para determinar la muestra se utilizó la fórmula propuesta en [25], Ec. (1):

$$m = \frac{N}{(N - 1) * (k)^2 + 1} \quad (1)$$

Donde:

M: muestra.

N: Población o universo.

K: Margen de error (2%, 5%, 10%), el porcentaje se expresa en decimales

$$m = \frac{100}{(100 - 1) * (0.05)^2 + 1}$$

$$m = 80$$

Por ende, la muestra estuvo compuesta por 80 comerciantes de los rubros de productos cárnicos, avícolas, pescados, verduras, frutas y productos de floristería.

Se utilizó el método Inductivo-Deductivo, las técnicas empleadas para la recolección de datos fue la encuesta y la observación, los instrumentos usados fue un cuestionario y una ficha de registro orientadas a medir, la cantidad de residuos sólidos orgánicos y segregación de acuerdo con los rubros, y conformidad en el uso de los biofertilizantes en áreas verdes.

La recolección de datos con el “cuestionario sobre residuos sólidos orgánicos del mercado de Casa Grande”, se llevó a cabo in situ y se le aplicó a cada titular de los 80 puestos comerciales.

Para el diseño y elaboración de los planos del biodigestor de régimen discontinuo (BATCH), se trabajó con el software CAD Solid Works 2018, utilizándose el Sistema Cegesimal de Unidades (CGS) y a modo pragmático se consideraron medidas y dimensiones de productos comerciales. Por otro lado, el análisis de la información cartográfica, así como la elaboración de planos de ubicación y clasificación climática, se llevaron a cabo con el software ArcGIS Pro y con una licencia para estudiantes que brinda uso libre por 1 año del mencionado software SIG.

En cuanto a la producción de biofertilizantes, se elaboró un flujograma que describe las etapas. Inicialmente los residuos sólidos orgánicos serán acopiados por personal de limpieza del mercado, para luego ser transportados a la compostera municipal del anexo Garrapón. Posteriormente, se triturarán, después, se incorporarán al biodigestor junto con agua en proporción 1:3 (una parte de residuos orgánicos, disueltos en tres partes de agua), con 2 kg de cal, 1 kg de ceniza, 2 kg de levadura y 2 kg de melaza (ver figura 12). La biodigestión se llevará a cabo en 60 días [26], [27].

Al finalizar el proceso de biodigestión se obtendrán biol que será filtrado con malla raschel y embotellado en envases oscuros; y biosol que será puesto a secar a temperatura ambiente y empaquetado en bolsas de polietileno. Luego se pesarán y registrarán, seguidamente serán distribuidos a las áreas verdes. En tanto, al biogás producido se le aplicará tratamiento mediante cartuchos y un depósito con NaOH para eliminar el  $H_2S$  y  $CO_2$ , luego de lo cual será utilizado para alimentar una cocina de llama que será utilizada por el personal de la compostera.

En la presente investigación se empleó el estilo IEEE, se contó con la venia de la Municipalidad Distrital de Casa Grande para la toma y recolección de datos en el mercado distrital. Por el presente se declara que la información recabada con el cuestionario es usada con fines estrictamente académicos, conforme al método científico y con los valores éticos y profesionales que todo investigador debe tener. Por ello, los resultados presentados no han sufrido alteración alguna.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El primer lugar en cuestión es el mercado del distrito azucarero de Casa Grande, provincia de Ascope, departamento de La Libertad. En relación, al emplazamiento y localización del mercado distrital de Casa Grande es de coordenadas

$7^{\circ}44'46.92''S$   $79^{\circ}11'19.58''O$ . A continuación, se presenta con coordenadas UTM WGS 1984 - 17S el plano de ubicación.

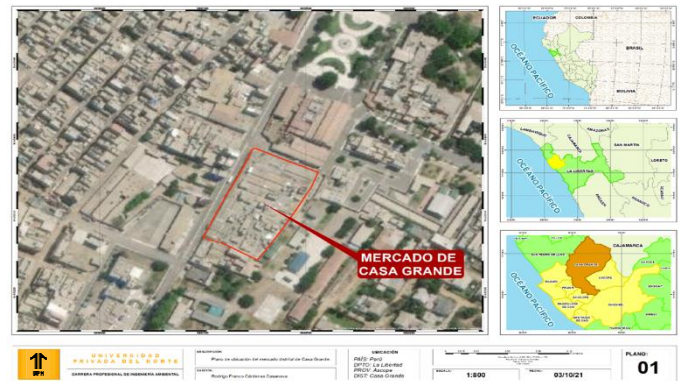


Fig. 1. Plano de ubicación del mercado distrital de Casa Grande.

En cuanto, al plano de distribución de puestos del mercado del distrito de Casa Grande, se gestionó ante el subgerente de comercio, mercados y policía municipal de la municipalidad distrital de Casa Grande, el acceso a la información mencionada. A continuación, se muestra el plano del mercado:



Fig. 2. Plano de distribución del mercado distrital de Casa Grande.

También, se contempla el aprovechamiento de 50 m<sup>2</sup> inutilizados de la compostera municipal del anexo Garrapón, específicamente la oficina y el almacén, que se transformarán en el “área de producción de biofertilizantes 1” y “área de producción de biofertilizantes 2”. En cuanto, al emplazamiento y localización de la compostera municipal del anexo Garrapón es de coordenadas  $7^{\circ}43'37.36''S$   $79^{\circ}14'41.44''O$ . A continuación, se presenta con coordenadas UTM WGS 1984 - 17S el plano de ubicación:



Fig. 3. Plano de ubicación de la compostera del anexo Garrapón.

En cuanto, al plano de distribución de los ambientes de la compostera municipal del anexo de Garrapón, se gestionó ante el subgerente de limpieza pública y áreas verdes de la municipalidad distrital de Casa Grande, el acceso a la información mencionada. A continuación, se muestra el plano de la compostera:

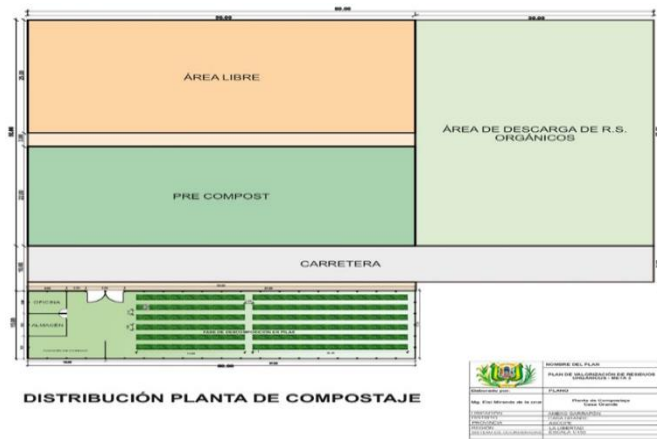


Fig. 4. Plano de distribución de la compostera del anexo Garrapón.

Por otra parte, en [26], se menciona que los biodigestores anaerobios pueden funcionar a cualquier temperatura, sin embargo, el tiempo de digestión va a ser inversamente proporcional a la temperatura. Es decir, a mayor temperatura menor será el tiempo necesario para que se produzca la digestión. Para biodigestores de régimen discontinuo el tiempo de retención será aquel que transcurre desde que se carga el sistema hasta que se descarga.

Por tanto, al ser las condiciones ambientales una limitante en la digestión anaeróbica, principalmente la temperatura, se optó por sistematizar la información climática disponible en los servidores del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). A continuación, se presenta con coordenadas UTM WGS 1984 - 17S el plano de climatología:

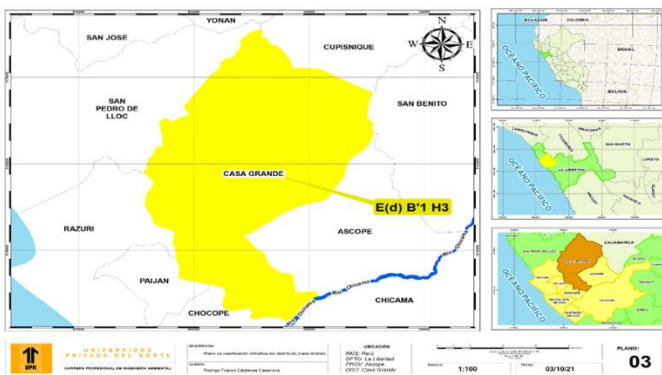


Fig. 5. Plano de la clasificación climática del distrito de Casa Grande.

Según SENAMHI, el distrito de Casa Grande posee una clasificación climática E(d) B'1 H3, árido y templado, donde las temperaturas oscilan entre 16°C y 21°C [28]. La temperatura al ser cálida y sostenida a lo largo de todo el año empodera de condiciones idóneas al sistema de biodigestión anaeróbica. En [15], mencionan que con temperaturas cálidas tanto la tasa de

hidrólisis y la velocidad de crecimiento bacteriano aumentan. Similar postura en [16], ya que el tiempo mínimo de retención disminuye en condiciones ambientales cálidas. Por lo que, no es necesario la implementación de intercambiadores de calor como se plantea en [19].

Asimismo, en [26], se menciona que para regiones cálidas el tiempo de retención para la degradación de la materia orgánica oscila entre 40-60 días. Similar postura en [27], donde establece que para rangos de temperaturas entre 15-20°C, el tiempo de retención está entre 30-60 días. En ese sentido, considerando la temperatura del distrito de Casa Grande y los antecedentes consultados se tomará para la propuesta un tiempo de retención de 60 días.

En la presente investigación, para concebir una alternativa de solución a la problemática de los residuos sólidos orgánicos del mercado de Casa Grande, resultó de suma importancia articular aspectos como el diseño asistido por computadora (CAD), economía circular, residuos sólidos orgánicos y biodigestores de régimen discontinuo.

En virtud de ello, se planteó como objetivo general el diseñar biodigestores discontinuos para la producción de biofertilizantes a partir de los residuos sólidos orgánicos del mercado del distrito de Casa Grande. Se eligió la tecnología de los biodigestores de régimen discontinuo, debido a que el costo de inversión es considerablemente menor en comparación a otras tecnologías, por consideraciones del limitado espacio en la compostera de Garrapón y la movilidad de los biorreactores. Mientras que la esencia del protagonista de los residuos sólidos orgánicos producidos en el mercado distrital de Casa Grande en la presente investigación reside en que las toneladas de orgánicos producidos a diario al no recibir tratamiento contribuyen con las emisiones GEI y con ello al calentamiento global.

Por ello, la presente investigación obedece a los principios de la economía circular, modelo donde se cierran los ciclos productivos [9], [10]. Similar postura en [18], que dimensionó un biodigestor anaeróbico para valorizar la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos en Sudáfrica. En símil, en [19], se tuvo por norte el diseño, fabricación y experimentación con un biodigestor anaeróbico a pequeña escala para la valorización de residuos sólidos orgánicos domésticos en India, para ello tomaron cálculos del dimensionamiento del biodigestor.

El primer objetivo específico, fue medido mediante técnicas de encuesta y observación a los titulares de 80 puestos comerciales de los rubros de avícolas, cárnicos, pescados, frutas, verduras y flores del mercado de Casa Grande, al respecto en [29], se menciona que las encuestas proporcionan información cualitativa y cuantitativa de los encuestados.

En relación con los datos obtenidos de los cuestionarios aplicados a los puestos comerciales de los rubros de carnes, avícolas, pescados, frutas, verduras y floristería; estos se procesaron con el software estadístico SPSS, el cual revela lo siguiente:



### Escala: Cuestionario RSO Casa Grande

Resumen del procesamiento de los casos			
Casos	Válidos	N	%
		80	100,0
	Excluidos <sup>a</sup>	0	,0
	Total	80	100,0

a. Eliminación por lista basada en todas las variables del procedimiento.

Estadísticos de fiabilidad		
Alfa de Cronbach	Alfa de Cronbach basada en los elementos tipificados	N de elementos
,870	,884	13

Fig. 6. Confiabilidad con Alfa de Cronbach de los cuestionarios aplicados a los titulares de los puestos comerciales de orgánicos. Mercado distrital de Casa Grande, 2021.

Los cuestionarios, las fichas de registro y la data que proporcionan son insumos que marcan la pauta de una investigación, siempre y cuando estas cuenten con validez y confiabilidad como se indica en [30], es por ello que, la antesala implicó determinar su confiabilidad con el software SPSS, este tuvo un Alfa de Cronbach de 0.92, indicando buena confiabilidad.

En cuanto a los datos obtenidos de los cuestionarios y fichas de registro en alusión al número de puestos comerciales generadores de residuos orgánicos, se les aplicaron criterios de inclusión por tipo de rubro, obteniéndose 47 puestos comerciales, tal como se muestra en a continuación:

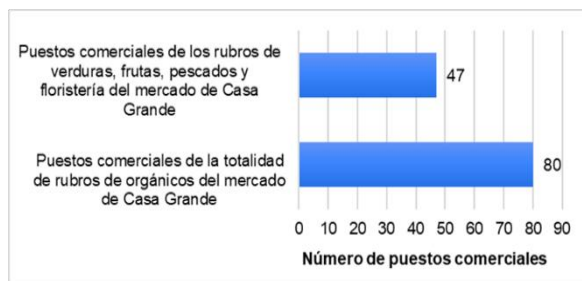


Fig. 7. Número de puestos comerciales de productos orgánicos destinados a la producción de biofertilizantes. Mercado distrital de Casa Grande, 2021.

En segundo lugar, los datos obtenidos de los cuestionarios y fichas de registro en alusión a la estimación de las toneladas de residuos sólidos orgánicos generados diariamente en los 47 puestos incluidos en el estudio revelan que se producen 0,395 toneladas de RSO, tal como se muestra en la siguiente figura:

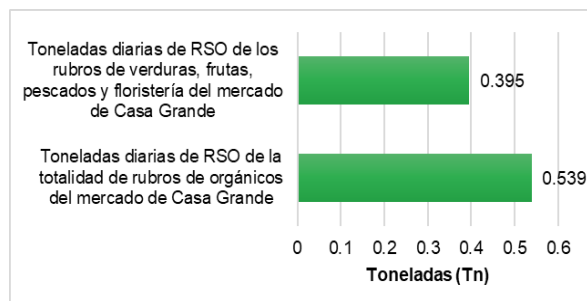


Fig. 8. Toneladas diarias de residuos sólidos orgánicos destinados a la producción de biofertilizantes. Mercado distrital de Casa Grande, 2021.

En símil, en [31], tuvieron una muestra de 76 comerciantes de los rubros cárnicos, avícolas, pescados, floristería, frutas y verduras del mercado de Girardot de Colombia, y la caracterización da cuenta de la producción diaria de 0.0059 Tn de residuos sólidos orgánicos en las galerías del mercado. También, en [32], se aplicaron cuestionarios a las cabezas de familia de 74 hogares de Nigeria, el análisis de la información revela que la producción per cápita de residuos sólidos es de 0.000634 Tn/hab./día. Por otro lado, [8] empleó los cuestionarios para medir el nivel de conocimiento que poseen los habitantes de 64 vivienda del distrito de Casa Grande en el tema de manejo de residuos sólidos, la data reveló un desconocimiento del 100%.

El segundo objetivo específico, se basa en la digestión anaerobia, que consiste en la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno y se dan en 4 fases principales: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis [33], [34]. En aras de estandarizar la producción de los biofertilizantes, es que se elaboró un flujograma que abarca desde la etapa de recepción de los residuos sólidos orgánicos, transporte desde del mercado a la compostera, hasta el embotellado del biol y empaquetado del biosol, tal como se muestra en la siguiente figura:

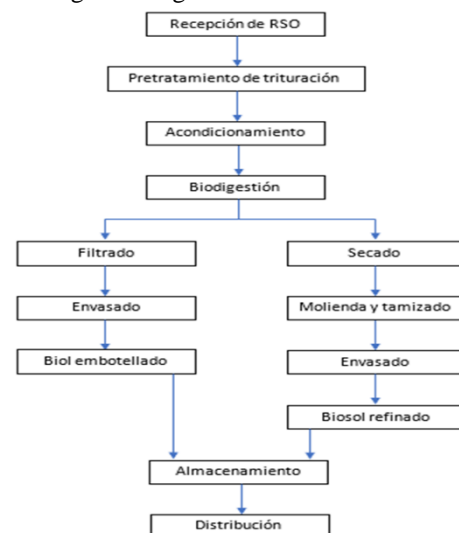


Fig. 9. Flujograma de la propuesta para la producción de biofertilizantes, a partir de residuos sólidos orgánicos. Mercado distrital de Casa Grande, 2021.

En forma similar, en [35], se elaboró un diagrama de flujo detallado de las etapas de producción de biogás, biol y biosol, a partir de residuos ganaderos en Trujillo; ello impactó positivamente al servir como método de adiestramiento e investigación académica en la estación experimental de bioquímica aplicada (E.E.B.A.) de la Universidad Nacional de Trujillo.

También, se muestra la etapa de pretratamiento físico de trituración del residuo sólido, ello con el motivo de favorecer la descomposición, como en [36] y [37], ya que aplicaron pretratamientos físicos de secado y triturado. Asimismo, en [18], mencionan que los pretratamientos de los residuos sólidos orgánicos estarán condicionados económicamente por el tamaño, por lo que en condiciones particulares se opte por la



discontinuo (BATCH), se hizo una proyección de los valores, los mismos que se detallan a continuación:

TABLA II  
 PRODUCCIÓN TOTAL DE BIOFERTILIZANTES, BIOL (LITROS) Y BIOSOL (TONELADAS).

Tipo de biofertilizante	Número de biodigestores Batch	
	1 biodigestor BATCH	8 biodigestores BATCH
Biol (L)	185	1480
Biosol (Tn)	0.0019	0.0152

En la tabla II se detallan los datos proyectados de los litros totales de biol y las toneladas totales de biosol, producidos en 8 biodigestores BATCH.

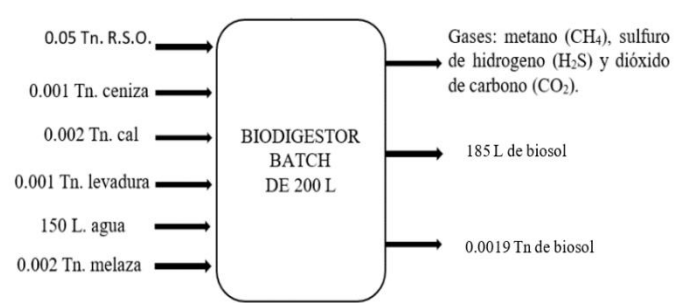


Fig. 12. Balance de materia del biodigestor anaerobio de régimen discontinuo (BATCH).

Por lo tanto, las medidas del biodigestor anaerobio de régimen discontinuo son de 0.92 m de altura y 0.6 m de diámetro. En ese sentido, el diseño de cada biodigestor tendrá la capacidad de valorizar hasta 0,05 toneladas de residuos sólidos orgánicos del mercado de Casa Grande, por lo que la digestión de las 0.395 toneladas de residuos sólidos orgánicos será cubierta por 8 biodigestores anaerobios de régimen discontinuo. Empíricamente en un biodigestor BATCH de 200 litros, se llegan a producir 185 litros de biol y 0,0019 toneladas de biosol (ver tabla 2).

Similar postura asume [16], ya que, para realizar su diseño a escala del biodigestor anaeróbico, también se apoyaron en estudios previos de cuantificación y caracterización de residuos sólidos orgánicos en Ecuador, siendo el biodigestor escalado en CAD de 45 litros, 0.386 m de alto y 0.386 m de diámetro. Asimismo, en Malawi [17], realizaron el diseño y las estimaciones de su biodigestor, a partir de un estudio previo que halló las 1.384 toneladas diarias de residuos orgánicos, luego escalaron en Auto CAD su biodigestor de 61000 litros. Otra perspectiva es la que sostienen [43], puesto que analizaron la presión interna de un biodigestor anaerobio y la viabilidad de su instalación ingenieril, a través de una simulación física a escala de laboratorio mediante SolidWorks, lo que les permitió ahorrar recursos y gastos en mano de obra.

En esa línea, [21], utilizaron 16 biodigestores anaerobios de régimen estacionario (BATCH) de 600 litros, para el aprovechamiento 26 Tn de residuos orgánicos urbanos en Ecuador; siendo la producción de 9600 litros de biol, sin biosol.

En [36], usaron 4 biorreactores anaerobios a escala de laboratorio en condición discontinua de 2 litros y 1.7 litros de volumen útil con un diámetro interno de 0.122 m y una altura de 0.165 m. Por otro lado, la municipalidad distrital de Casa Grande designará personal responsable de los biodigestores anaerobios y producción de los biofertilizantes, lo que supone la generación de puestos de trabajo, así como lo menciona [44], que con la implementación de soluciones de ingeniería como los biodigestores BATCH se van a generar puestos de trabajo para la población desempleada.

En ese sentido, de las teorías mencionadas y los resultados analizados, se verifica que el modelamiento del biodigestor estará en función de la cantidad de residuos orgánicos disponibles, a la par que se debe diseñar un prototipo a escala en un software CAD para estandarizar el proceso y prever inconsistencias. Además, de la generación de puestos de trabajo para la producción de biofertilizantes, a cargo de la municipalidad distrital de Casa Grande.

Por último, se describe la propuesta de implementación de una planta piloto de biofertilizantes compuesta por 8 biodigestores de régimen discontinuo (Batch), en respuesta a la problemática que representa la mala gestión de los residuos sólidos orgánicos del mercado de Casa Grande.

La distribución de los 8 biorreactores de régimen discontinuo será en 2 ambientes de 25 m<sup>2</sup> cada una denominadas “área de producción de biofertilizantes 1” y “área de biofertilizantes 2”, de modo que se cuente con 4 biorreactores por cada ambiente (ver figura 13).

Así también, la presente propuesta tiene por propósito instaurar el modelo de la Economía Circular en el distrito de Casa Grande con enfoque hacia la sostenibilidad. En ese sentido, la ejecución de esta propuesta es vital para mitigar el impacto ambiental negativo en los suelos, la napa freática por los lixiviados y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), aprovechándolo como biogás. Sin embargo, para obtener un sustituto del gas natural apto para su utilización es necesario eliminar el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), al tratarse de un compuesto tóxico y corroyente de equipos [45], [46]. (ver figura 14)

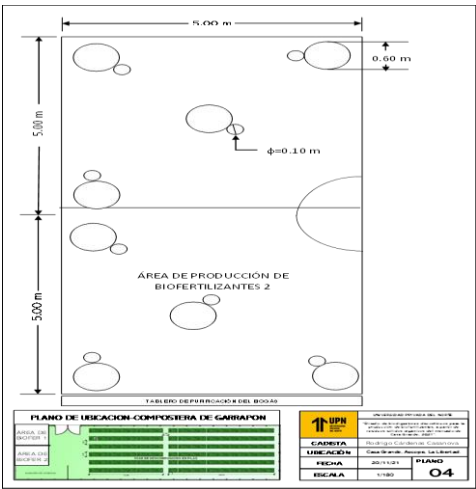


Fig. 13. Plano de distribución de biorreactores BATCH, en la compostera Garrapón.

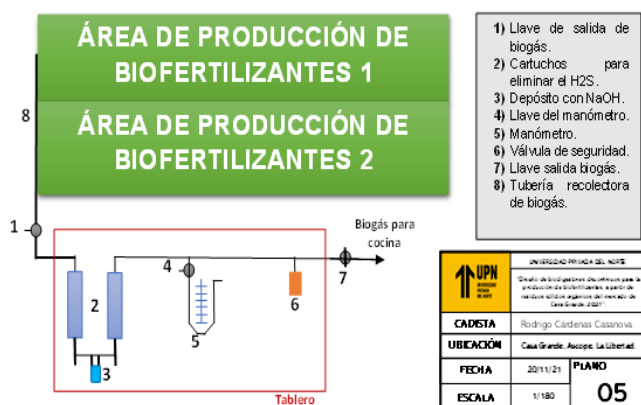


Fig. 14. Plano del sistema de producción de biogás.

El biogás producido en los 8 biodigestores Batch serán recolectados por una tubería PVC de 1" que conducirá al tablero de purificación y control de biogás, las particularidades del tablero son los cartuchos de PVC de 2", rellenos con esponjas de fierro conectados a dos puentes para eliminar el agua condensada y un depósito con hidróxido de sodio que capture el  $H_2S$  y  $CO_2$  que no hayan sido capturados por los cartuchos (ver figura 14). La presión de trabajo del sistema estará controlada por una válvula de seguridad.

También, en [47], se utilizó un sistema de purificación de biogás basado en 2 cartuchos que fueron rellenos con clavos de fierro para atrapar el  $H_2S$ . Asimismo, en [48], mencionan que la reacción de oxidación de  $H_2S$  se acelera en presencia de sales de fierro. Mientras que en [49] y [50], recomiendan el uso de soluciones diluidas de  $Fe(OH)_3$ ,  $NaOH$  o  $FeCl_2$  como tratamientos del biogás al ser eficientes para la absorción química del  $H_2S$  y  $CO_2$ . Ello debido a la reactividad del sulfuro con la mayoría de los metales [51].

Similar postura en [52], pues indican que para la purificación del biogás se puede emplear óxido de hierro (III) hidratado, cloruro de hierro (III), pelets de fierro, solución de hidróxido de sodio, y óxido de zinc. En ese sentido, el biogás purificado se usará como combustible para una cocina a la que tendrá acceso el personal de trabajo de la compostera Garrapón.

#### IV. CONCLUSIONES

En el mercado de Casa Grande se producen 0.539 Tn. de RSO entre los rubros de carnes, avícolas, pescados, frutas, verduras y floristería, pero según data de los cuestionarios, los residuos de los rubros de carnes y avícolas ya se reaprovechan particularmente, por lo tanto, se generan 0.395 Tn. diarias de residuos sólidos orgánicos de los rubros de pescados, frutas, verduras y floristería.

Se elaboró un flujograma de la producción de biofertilizantes, lo que permite estandarizar el procedimiento, va a facilitar el adiestramiento de nuevos trabajadores, y servirá de insumo en futuras investigaciones.

Los planos de los biodigestores anaerobios de régimen discontinuo, se escalan en base a las 0.395 toneladas diarias de residuos sólidos orgánicos y se elaboraron en el software SolidWorks 2018, con medidas de 200 litros, 0.92 m de altura

y 0.6 m de diámetro. Para la valorización de las 0.395 Tn diarias de residuos sólidos orgánicos son necesarios 8 biodigestores de régimen discontinuo, que producirán en conjunto 1480 L. de biol y 0.0152 Tn de biosol, al cabo de 60 días calendarios.

El presente trabajo de investigación repercutirá positivamente, ya que los biofertilizantes producidos servirán para el mantenimiento de las áreas verdes. Además, con la valorización de los residuos sólidos orgánicos se reducirán las emisiones GEI, responsables del calentamiento global.

En virtud de lo señalado, se recomienda la inclusión progresiva de los residuos sólidos orgánicos de los hogares casagrandinos, a través del empadronamiento de hogares de segregación en la fuente.

#### AGRADECIMIENTOS

Mi sentido agradecimiento a Olimpia Casanova, mi madre, benefactora de mis sueños y propósitos. Quien no sólo, me brindó la humanidad para disfrutar de esta aventura efímera llamada vida; sino que me inculcó valores éticos y morales para ser probo, que este sea un sentido reconocimiento a su esmerada labor.

En memoria de Carmen Rosa Pretell, mi abuela, quien sembró la semilla de la curiosidad por la naturaleza cuando niño, y a quien guardo con profundo cariño y nostalgia en mis recuerdos.

A mi hermano Arnold Cárdenas, por su apoyo incondicional desde que tengo uso de razón y sus palabras de aliento.

Mi sentido agradecimiento al Ing. Ronald Alvarado, ya que con sus aportes logré concluir exitosamente el presente artículo.

#### REFERENCIAS

- [1] B. Prieto, "Revertir el calentamiento global," *PM World J.*, vol. 10, pp. 1–14, 2021, Accessed: Sep. 25, 2021. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/profile/Robert-Prieto/publication/349859315\\_Reversing\\_Global\\_Warming/links/60445281a6fdcc9c781adebf/Reversing-Global-Warming.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Robert-Prieto/publication/349859315_Reversing_Global_Warming/links/60445281a6fdcc9c781adebf/Reversing-Global-Warming.pdf)
- [2] IPCC (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático), *Directrices del IPCC para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero*, vol. 5. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007. Accessed: Jan. 15, 2022. [Online]. Available: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>
- [3] R. Afroz, M. M. Masud, R. Akhtar, and J. B. Duasa, "Water pollution: Challenges and future direction for water resource management policies in malaysia," *Environ. Urban. Asia*, vol. 5, no. 1, pp. 63–81, Jan. 2014, doi: 10.1177/0975425314521544.
- [4] W. Charles, L. Walker, and R. Cord-Ruwisch, "Effect of pre-aeration and inoculum on the start-up of batch thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste," *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 8, pp. 2329–2335, Apr. 2009, doi: 10.1016/j.biortech.2008.11.051.
- [5] Department of Environmental Affairs, "National Waste Information Baseline Report," Baseline, Republic of South Africa, 2012.
- [6] S. Kaza, L. C. Yao, P. Bhada-Tata, and F. Van Woerden, *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington, DC: World Bank, 2018. doi: 10.1596/978-1-4648-1329-0.
- [7] INEI, "INEI: Anuario de Estadísticas Ambientales del Perú, 2019,," Lima, 2019. Accessed: Jun. 15, 2021. [Online]. Available: [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1704/libro.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1704/libro.pdf)
- [8] F. A. Leiva, "Educación Ambiental para el poblador del distrito de Casa Grande en el manejo de residuos sólidos urbanos entre julio a



- diciembre del año 2019,” *Arnaldoa*, vol. 27, no. 1, pp. 323–334, 2020, doi: 10.22497/ARNALDOA.271.27120.
- [9] W. Stahel and E. MacArthur, *The Circular Economy: A User's Guide*, 1<sup>o</sup> Edición. New York: Routledge, 2019.: Routledge, 2019. doi: 10.4324/9780429259203.
- [10] A. Rodríguez, R. Palomo, and F. Gonzáles, “Transparency and circular economy: Analysis and assessment of municipal management solid waste,” *CIRIEC-Espana Rev. Econ. Publica, Soc. y Coop.*, no. 99, pp. 233–272, Jul. 2020, doi: 10.7203/CIRIEC-E.99.16011.
- [11] J. William, P. Vargas, J. Adarraga, D. Aguas, and E. Molina, “Reducción de los Residuos Sólidos Orgánicos en Colombia por medio del Compostaje Líquido,” *INGENIARE*, Barranquilla, 2011.
- [12] S. Wainaina *et al.*, “Resource recovery and circular economy from organic solid waste using aerobic and anaerobic digestion technologies,” *Bioresource Technology*, vol. 301. Elsevier Ltd, Apr. 01, 2020. doi: 10.1016/j.biortech.2020.122778.
- [13] A. Diaz, “Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgánicos generados en el mercado de Tiquipaya (Bolivia),” *Universitat Politècnica de Catalunya*, Tiquipaya, Bolivia, 2013. Accessed: Sep. 13, 2021. [Online]. Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/20647>
- [14] R. Parra, “Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria,” *Prod. + Limpia*, vol. 10, no. 2, pp. 142–159, 2015, Accessed: Jan. 16, 2022. [Online]. Available: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-04552015000200014&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552015000200014&lng=en&nrm=iso&tlng=es)
- [15] E. Campos, X. Elías, and X. Flotats, *Procesos biológicos: La digestión anaerobia y el compostaje*, Ediciones. Madrid, 2012.
- [16] L. Leyva, M. Santos, I. Herrera, C. Orges, S. Palacios, and R. Chapi, “Design of a Lab-scale Anaerobic Biodigester for Renewable Energy from Municipal Solid Waste,” *Universidad Técnica del Norte*, Ibarra, Ecuador, 2018. Accessed: Nov. 23, 2021. [Online]. Available: <http://ieomsociety.org/dc2018/papers/205.pdf>
- [17] N. Kawelamzenje, M. Twizerimana, D. Bernadette, and A. Bakundukize, “Design of a Co-Digestion Biogas Plant to Curb Deforestation-Case Study of Phalombe Secondary School in Malawi,” *Open Access Libr. Inc.*, vol. 8, pp. 1–28, Mar. 2021, doi: 10.4236/oalib.1107255.
- [18] R. Kigozi, A. Aboyade, and E. Muzenda, “Sizing of an anaerobic biodigester for the organic fraction of municipal solid waste,” *b-dig.iie.org.mx*, vol. 2, pp. 22–24, 2014, Accessed: Sep. 12, 2021. [Online]. Available: [http://b-dig.iie.org.mx/BibDig2/P14-0289/content/pdf/WCECS2014\\_pp659-663.pdf](http://b-dig.iie.org.mx/BibDig2/P14-0289/content/pdf/WCECS2014_pp659-663.pdf)
- [19] R. Jyothilakshmi and S. V. Prakash, “Design, Fabrication and Experimentation of a Small Scale Anaerobic Biodigester for Domestic Biodegradable Solid Waste with Energy Recovery and Sizing Calculations,” *Procedia Environ. Sci.*, vol. 35, pp. 749–755, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.PROENV.2016.07.085.
- [20] O. Rojas and L. Rojas, “Diseño asistido por computador,” *Ind. Data*, vol. 9, no. 1, p. 007, 2014, doi: 10.15381/idata.v9i1.5709.
- [21] A. J. Catagña and D. P. Noboa, “Producción, caracterización y evaluación del biol de la EMMAIPC-EP, Cañar, a partir de residuos orgánicos urbanos, en pastizales ganaderos,” *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*, Riobamba, 2016. Accessed: May 26, 2021. [Online]. Available: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4909>
- [22] M. Aghbashlo, M. Tabatabaei, S. Soltanian, and H. Ghanavati, “Biopower and biofertilizer production from organic municipal solid waste: An exergoenvironmental analysis,” *Renew. Energy*, vol. 143, pp. 64–76, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.04.109.
- [23] N. Ortega, “Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process,” 2006, Accessed: Sep. 17, 2021. [Online]. Available: <http://www.bookpump.com/dps/pdf-b/1123329b.pdf>
- [24] S. Nogués, F. García, and D. Rezeau, *Energía de la Biomasa*. Prensas de la Universidad de Zaragoza, 2010. Accessed: Sep. 05, 2021. [Online]. Available: [https://www.unebook.es/es/libro/energia-de-la-biomasa-ii-energias-renovables\\_2811](https://www.unebook.es/es/libro/energia-de-la-biomasa-ii-energias-renovables_2811)
- [25] M. Mata and S. Macassi, *Cómo elaborar muestras para los sondeos de audiencia*. Quito, 1997. Accessed: Jul. 07, 2021. [Online]. Available: [http://biblioteca.uide.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-](http://biblioteca.uide.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=2230)
- detail.pl?biblionumber=2230
- [26] M. Varnero, “Manual de biogás,” Santiago de Chile, 2011. Accessed: Sep. 17, 2021. [Online]. Available: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- [27] B. Lagrange, *Biomethana2: Principles Techniques and Utilization*. EDISUD, 1979.
- [28] SENAMHI, “Mapa Climático del Perú,” *SENAMHI*, 2021. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru> (accessed Jan. 18, 2022).
- [29] A. Alaminos and J. Castejón, “Elaboración, análisis e interpretación de encuestas, cuestionarios y escalas de opinión,” Alicante, 2006. Accessed: Oct. 24, 2021. [Online]. Available: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/20331/1/Elaboración, análisis e interpretación.pdf>
- [30] R. Hernández-Sampieri and C. Torres, *Metodología de la investigación*, vol. 4. Ciudad de México: McGraw-Hill Interamericana., 2018. Accessed: Nov. 23, 2021. [Online]. Available: <https://dspace.scz.ucb.edu.bo/dspace/bitstream/123456789/21401/1/11699.pdf>
- [31] J. Castiblanco and E. Rodríguez, “Análisis del manejo de los residuos sólidos Universidad Piloto de Colombia Seccional del Alto Magdalena, Facultad Ingeniería, Programa De Ingeniería Civil, Girardot, 2017,” *Universidad Piloto de Colombia*, 2017.
- [32] T. C. Ogwueleka, “Survey of household waste composition and quantities in Abuja, Nigeria,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 77, pp. 52–60, Aug. 2013, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2013.05.011.
- [33] B. Chatterjee and D. Mazumder, “Role of stage-separation in the ubiquitous development of Anaerobic Digestion of Organic Fraction of Municipal Solid Waste: A critical review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 104. Elsevier Ltd, pp. 439–469, Apr. 01, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.01.026.
- [34] A. Cesaro and V. Belgiorno, “Pretreatment methods to improve anaerobic biodegradability of organic municipal solid waste fractions,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 240, pp. 24–37, Mar. 15, 2014, doi: 10.1016/j.cej.2013.11.055.
- [35] C. A. León, C. Nomberto, G. A. Mendoza, C. B. Bardales, J. Cabos, and M. A. Barrena, “Diseño e implementación de una planta piloto de producción de Biogás, Biol y Biosol,” *Universidad Privada Antenor Orrego*, Trujillo, 2019, doi: 10.22497/arnaldoa.263.26311.
- [36] J. Fernández, M. Pérez, and L. I. Romero, “Effect of substrate concentration on dry mesophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW),” *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 14, pp. 6075–6080, Sep. 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2007.12.048.
- [37] A. Cesaro, V. Belgiorno, A. Siciliano, and M. Guida, “The sustainable recovery of the organic fraction of municipal solid waste by integrated ozonation and anaerobic digestion,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 141, pp. 390–397, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.10.034.
- [38] Z. Abudi *et al.*, “Batch anaerobic co-digestion of OFMSW (organic fraction of municipal solid waste), TWAS (thickened waste activated sludge) and RS (rice straw): Influence of TWAS and RS pretreatment and mixing ratio,” *Energy*, vol. 107, pp. 131–140, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.03.141.
- [39] H. Hernández, “Diseño de un biodigestor instrumentado electrónicamente para la generación de biogás en casa habitación,” *Universidad Nacional Autónoma de México*, México, 2012. Accessed: May 28, 2022. [Online]. Available: [https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB\\_UNAM/TES01000677469](https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000677469)
- [40] D. Puglia, D. Pezzolla, G. Gigliotti, L. Torre, M. L. Bartucca, and D. Del Buono, “The opportunity of valorizing agricultural waste, through its conversion into biostimulants, biofertilizers, and biopolymers,” *Sustain.*, vol. 13, no. 5, pp. 1–26, Mar. 2021, doi: 10.3390/su13052710.
- [41] K. Torres and M. Gonzáles, “Diseño de un tanque agitado para la etapa de hidrólisis en la producción de miel de agave,” *Rev. Divulg. científica Jóvenes en la Cienc.*, 2016, Accessed: May 26, 2022. [Online]. Available: [https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/752/pdf\\_5](https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/752/pdf_5)
- [42] Y. Alfonso, A. Pérez, and M. Yil, “Diseño de un biorreactor para la producción de inóculo de Salmonella enteritidis,” *Rev. Cuba.*

- Química*, vol. 31, no. 1, Apr. 2019, Accessed: May 26, 2022. [Online]. Available: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-54212019000100120&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212019000100120&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- [43] C. Martinez, L. Méndez, and J. Flores, "Análisis de tensiones Von Mises en biodigestores anerobios de cupula rígida," *Rev. Ciencias Técnicas Agropecu.*, vol. 27, no. 2, pp. 1–9, Apr. 2018.
  - [44] K. Nandini Dora, K. Kumari, M. Srivatsava, and N. Dalai, "A review on various techniques for municipality waste management & product development," *Mater. Today Proc.*, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.747.
  - [45] J. Krischan, A. Makaruk, and M. Harasek, "Design and scale-up of an oxidative scrubbing process for the selective removal of hydrogen sulfide from biogas," *J. Hazard. Mater.*, vol. 215–216, pp. 49–56, May 2012, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2012.02.028.
  - [46] D. Liu, B. Li, J. Wu, and Y. Liu, "Sorbents for hydrogen sulfide capture from biogas at low temperature: a review," *Environ. Chem. Lett.* 2019 181, vol. 18, no. 1, pp. 113–128, Aug. 2019, doi: 10.1007/S10311-019-00925-6.
  - [47] M. Barrena, F. Cubas, W. Gosgot, C. M. Ordinola, J. Rascón, and M. Huanes, "Sistema de producción de biogás y bioabonos a partir del estiércol de bovino, Molinopampa, Chachapoyas, Amazonas, Perú," *Arnaldoa*, vol. 26, no. 2, pp. 725–734, 2019, doi: 10.22497/ARNALDOA.262.26214.
  - [48] N. Abatzoglou and S. Boivin, "A review of biogas purification processes," *Biofuels, Bioprod. Biorefining*, vol. 3, no. 1, pp. 42–71, Jan. 2009, doi: 10.1002/BBB.117.
  - [49] V. Da Silva, M. Da Motta, and F. De Melo, "Biogas purification: Removal of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S by process absorption chemistry," *J. Chromatogr. Sep. Tech.*, vol. 06, no. 04, 2015, doi: 10.4172/2157-7064.S1.011.
  - [50] W. Eldien, G. Gasmseed, and B. Abdalla, "Chemical Absorption of H<sub>2</sub>S in Aqueous Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> Solution," *Rev. Int. Ciencias la Ing. y Tecnol. Innovadora*, vol. 4, pp. 86–92, 2008.
  - [51] M. Horikawa, F. Rossi, M. Gimenes, C. Costa, and M. Da Silva, "Chemical absorption of H<sub>2</sub>S for biogas purification," *Brazilian J. Chem. Eng.*, vol. 21, no. 03, pp. 415–422, Sep. 2004, Accessed: May 28, 2022. [Online]. Available: <https://www.scielo.br/pdf/bjce/v21n3/a06v21n3.pdf>
  - [52] J. Viquez, "Remoción del sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S (g))/ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S (aq)) en el biogás," *EGAC*, vol. 53, pp. 16–20, 2010.