

UNIVERSIDAD DE MATANZAS

*Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Mecánica*



**MODELACIÓN EXPERIMENTAL DEL PROCESO
ANAEROBIO DE MEZCLAS DE RESIDUALES
ORGÁNICOS PARA DETERMINAR SU POTENCIAL
ENERGÉTICO Y SOSTENIBILIDAD**

Tesis presentada en opción al grado de Doctor en
Ciencias Técnicas especialidad Termotecnia.

FLORENTINO SÁNCHEZ PORTILLA

**Matanzas, República de Cuba
2019**

UNIVERSIDAD DE MATANZAS

*Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Mecánica*



**MODELACIÓN EXPERIMENTAL DEL PROCESO
ANAEROBIO DE MEZCLAS DE RESIDUALES
ORGÁNICOS PARA DETERMINAR SU POTENCIAL
ENERGÉTICO Y SOSTENIBILIDAD**

Tesis presentada en opción al grado de Doctor en Ciencias
Técnicas especialidad Termotecnia.

Autor: MSc. Florentino Sánchez Portilla

Tutores: Dr. C Roberto Vizcón Toledo. Profesor Titular
Departamento de Mecánica
Universidad de Matanzas

Dr. C Agustín Benítez Hernández. Profesor Asistente
Departamento de Química
Universidad de Matanzas

**Matanzas, República de Cuba
2019**

Agradecimientos

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia agradezco a Dios nuestro señor por haberme dado la entereza y oportunidad de aprender esta parte del saber.

*A mi gran amigo **Eruviel**⁺ por forzarme a emprender el reto de esta aventura dentro del saber.*

*En forma muy especial al Tutor de este trabajo en la Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos” el **Dr. Roberto Vizcón Toledo**, por su acertada orientación, sus útiles consejo, su irrestricto apoyo y el honor de su amistad.*

*Con sentimientos fraternos a mis amigos Cubanos la **Familia Veliz Tortoló** (Juanito, Anita, Yosiel, Yohana, Maidelis y Yosmai) por el cariño y apoyo irrestricto que me han brindado.*

*También fraternalmente a mis otros grandes amigos Cubanos la **familia Jiménez Piñero** (**Dr. Jorge Luis, Su Esposa Yusimi, Yasiel y su mamá Doña Felicia**⁺)*

*Con el mismo sentimiento fraterno para mis también grandes amigos los **Doctores Juan Luis Rodríguez Olivera y Mercedes Alemán García (Titi)** por el gran apoyo y aliento que me brindaron*

*En forma también muy especial a la **Dra. María del Carmen Durán Domínguez** por su increíble vitalidad y conocimientos, que me motivaron a continuar a pesar de las caídas, a su equipo de trabajo por todo el apoyo brindado; y a otro gran personaje su apreciable esposo El **Dr. Enrique Bazúa Rueda**, por sus apreciaciones y atenciones prestadas. A todo ellos les guardo un especial cariño.*

*A la máxima casa de estudios de México la **UNAM**, por haberme brindado la oportunidad de conocer a tan grandes personajes y su irrestricto apoyo a través de dichos personajes.*

A mi alma mater la Universidad Veracruzana y en especial a la Doctora María Magdalena Hernández Alarcón y al Doctor Ángel Gasca Herrera por creer en mí y el irrestricto apoyo que me han dado.

*También un agradecimiento especial por el tiempo dedicado en apoyo a mi trabajo final para mi gran amigo “Pagrino” el **Doctor José Alfredo Tenorio López***

*Un muy especial y gran agradecimiento para mi gran y muy estimada amiga la **Mtra. Graciela Viveros Cubillos “Chelita”** con gran aprecio y cariño por su irrestricto e invaluable apoyo en todo el trayecto y principalmente durante la etapa experimental del doctorado.*

*Un especial y gran agradecimiento para mi gran y muy estimado amigo el **Ing. Fernando Cancino Cancino** “mi líder” y su respetable esposa Doris, por su apoyo irrestricto en todo el trayecto y principalmente durante las dificultades que representaron los tiempos requeridos para las estancias solicitadas para el desarrollo del doctorado.*

A mi estimado amigo Artemio Benítez Fundora por sus invaluable aportes técnicos y tecnológicos durante la búsqueda de equipamiento para las mediciones

A todos los Profesores que conforman el claustro del Doctorado en ciencias Técnicas, por su acertada orientación y apoyo sin límite

Dedicataria

DEDICATORIA

El resultado de mi pequeña aportación a esta parte del saber, la dedico con gran cariño a:

*En primera instancia a **mi Madre+** por haberme dado el ser y la formación adecuada.*

*Mis adorados hijos **Flor, Jorge y Mariana** por su comprensión y apoyo.*

*Mis Hermanos **Jorge+** y **Chole+** por su apoyo manifiesto.*

*Mis otros Hermanos **Alfredo, Beto, Diana, Queta+, Chelo, Juan, Gaby y Chaly** por ser como son conmigo.*

*A **Ruth, Raúl y Ale** por ser tan grandes amigos.*

*La **Güerita** (mi Mujer) con mucho amor por su comprensión y desinteresado apoyo.*

El autor

Definiciones

DEFINICIONES

Biofertilizante: Residuales sólido y líquido del proceso de la digestión o codigestión libre de microorganismos patógenos, ricos en macro y micronutrientes.

Codigestión: Proceso de descomposición de residuales orgánicos de más de una fuente en ambiente anóxico.

Coefficiente de efecto sinérgico: Coeficiente que resulta de dividir para este caso la producción de biogás de una mezcla de más de un tipo de residual entre la suma de las producciones individuales de cada componente de la mezcla en su proceso anaerobio; debe ser superior a uno, cuando es inferior a uno es un coeficiente inhibitorio.

Digestato: Residual sólido del proceso de la digestión o codigestión libre de microorganismos patógenos, rico en macro y micronutrientes.

Digestión: Proceso de descomposición de residual orgánico de una sola fuente (materia orgánica) en un ambiente anóxico (libre de oxígeno).

Ecosistema: Sistema biológico constituido por una comunidad de seres vivos y el medio natural en que viven (acuático o terrestre y la atmósfera).

Efluente: Residuales sólido y líquido del proceso de la digestión o codigestión libre de microorganismos patógenos.

Estiércol de ganado vacuno: Estiércol de ganado vacuno estabulado (de producción intensiva) que se dispone en terrenos a cielo abierto.

Lodos de albañal: Lodos de aguas negras recolectados en un cárcamo del sistema de alcantarillado de la ciudad de Coatzacoalcos, Veracruz, México.

Microorganismos patógenos: Bacterias que afectan a la salud humana.

Proceso anaerobio: Proceso de descomposición de residuales orgánicos en ambiente anóxico también llamado digestión o codigestión.

Recuperación del poder calorífico de la biomasa: Cantidad del poder calorífico de la mezcla de residuales de entrada al proceso anaerobio, recuperada debido a los productos del proceso.

Restos de comida: Residuos de comida de una fonda (paladares en cuba) ubicada en el mercado puerto México de la ciudad de Coatzacoalcos, Veracruz, México que significa los residuales típicos de la cocina mexicana.

Sinergia: Acción de dos o más causas que generan un efecto superior al de la suma de los efectos individuales.

Sostenibilidad: Satisfacer las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de satisfacer las futuras, garantizando los tres pilares fundamentales de crecimiento económico, cuidado del ambiente y bienestar social; es decir, preservar la biodiversidad sin renunciar al progreso económico y social.

Tiraderos a cielo abierto: Lugares donde se depositan los residuos sólidos municipales sin control ni protección para contener lixiviados y emanaciones de gases por descomposición de la parte orgánica.

SÍNTESIS

La codigestión de biomasa residual es una tecnología energética identificada con la protección ambiental, se conoce que existe un grupo de factores que intervienen en el funcionamiento de un biodigestor durante el proceso anaerobio. Este trabajo recoge los resultados del estudio de la codigestión de lodos de albañal, estiércol bovino y restos de comida, comunes en los tiraderos a cielo abierto y cuerpos de agua de México y posiblemente en muchos otros países, para lograr una operación eficiente, segura, prolongada y con mínimo daño ambiental.

Se realizaron experimentos a escala de laboratorio, los cuales permitieron modelar, por primera vez el proceso de codigestión de la mezcla de lodos albañal, estiércol bovino y restos de comida y determinar las cantidades de biogás y digestato correspondiente.

Se determinó el tiempo de retención, las producciones de biogás y residuales sólidos y líquidos, el tiempo en que dejan de existir las bacterias patógenas, condición de inhibición con porcentaje de restos de comida mayor del 50 por ciento de la masa de la mezcla, coeficiente de efecto sinérgico entre 1,41 y 2,65, análisis de recuperación energética del proceso entre 10,42 y 46,1 por ciento del poder calorífico y su valoración económico–ambiental.

SÍNTESIS

ABSTRACT

The co-digestion of residual biomass is an energy technology identified with environmental protection, it is known that there is a group of factors that intervene in the functioning of a biodigester during the anaerobic process. This work collects the results of the study of the co-digestion of sewage sludge, bovine manure and food waste, common in the open dumps and bodies of water of Mexico and possibly in many other countries, to achieve an efficient, safe operation, prolonged and with minimal environmental damage.

Experiments at laboratory scale were carried out, which allowed modeling, for the first time the co-digestion process of the mixture of sewage sludge, bovine manure and food waste and determine the amounts of biogas and digestate corresponding.

The retention time, the production of biogas and solid and liquid waste were determined, the time in which the pathogenic bacteria ceased to exist, inhibition condition with percentage of food waste greater than 50 percent of the mass of the mixture, coefficient of synergistic effect between 1,41 and 2,65, process energy recovery analysis between 10,42 and 46,1 percent of the calorific power and its economic-environmental assessment.

ÍNDICE

Contenido	Pág.
SÍNTESIS.....	10
ABSTRACT.....	11
INTRODUCCIÓN.....	i
CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	2
1.1 PROCESO DE DIGESTIÓN DE LOS RESIDUALES SÓLIDOS ORGÁNICOS (BIOMASA) [La biomasa como portador energético].....	3
1.2 INSTALACIONES EXPERIMENTALES PARA ESTUDIOS DEL PROCESO ANAEROBIO.....	8
1.3 EFECTO EN LA CODIGESTIÓN DE LA PROPORCIÓN DE LAS BIOMASAS RESIDUALES SOBRE LAS CANTIDADES DE BIOGÁS Y DIGESTATO PRODUCIDOS.....	11
1.4 EFECTO SINÉRGICO EN LA DIGESTIÓN DE MEZCLAS DE TIPOS DE BIOMASA RESIDUAL.....	13
1.5 MODELOS EXPERIMENTALES DEL PROCESO DE CODIGESTIÓN PARA PREDECIR CANTIDADES DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y DIGESTATO.....	15
1.6 OPTIMIZACIÓN DE LAS FUNCIONES OBTENIDAS EN LOS MODELOS PARA LA MÁXIMA PRODUCCIÓN DE BIOGAS Y DIGESTATO.....	19
1.7 RECUPERACIÓN DEL PODER CALORÍFICO INFERIOR DE LAS MEZCLAS DE LOS RESIDUALES Y LA MEJORA DE LA SOSTENIBILIDAD EN SU CODIGESTIÓN.....	20
CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO.....	25
CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS.....	28
2.1 MATERIALES.....	29
2.1.1 Instalación experimental.....	29
2.1.2 Equipos, herramientas y accesorios.....	30
2.2 MÉTODOS.....	34
2.2.1 Descripción del sistema.....	34
2.2.2 Diseño experimental.....	35
2.2.3 Balance de materiales.....	37
2.2.4 Evaluación del efecto de la proporción de las biomosas residuales sobre las cantidades producidas de biogás y digestato y, la condición de inhibición.....	45
2.2.5 Determinación del coeficiente sinérgico para diferentes mezclas de los tipos de biomasa residual seleccionados.....	46
2.2.6 Obtención de modelos experimentales del proceso de codigestión de las mezclas para predecir las cantidades de biogás y digestato a obtener.....	47
2.2.7 Optimización de las funciones obtenidas en los modelos para la máxima producción de biogás o digestato.....	48
2.2.8 Determinar la recuperación del poder calorífico inferior de las mezclas de los residuales y la mejora de la sostenibilidad en su codigestión.....	49
CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO.....	65
CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	68
3.1 BALANCE DE MATERIALES.....	68
3.1.1 Determinar el contenido de humedad y sólidos totales y volátiles.....	68
3.1.2 Cantidades máxicas de residual puro o mezcla de residuales y agua a introducir en el proceso.....	68
3.1.3 Cantidades máxicas de los gases obtenidos en el proceso.....	69
3.1.4 Cantidades máxicas de los residuales.....	69
3.1.5 Balance máxico del proceso.....	69
3.2 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA PROPORCIÓN DE LAS BIOMASAS RESIDUALES SOBRE LAS CANTIDADES PRODUCIDAS DE BIOGÁS, EL DIGESTATO Y LA CONDICIÓN DE INHIBICIÓN.....	76
3.3 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE SINÉRGICO PARA DIFERENTES MEZCLAS DE LOS TIPOS DE BIOMASA RESIDUAL SELECCIONADOS.....	78
3.4 OBTENCIÓN DE MODELOS EXPERIMENTALES DEL PROCESO DE CODIGESTIÓN DE LAS MEZCLAS PARA PREDECIR LAS CANTIDADES DE BIOGÁS DIGESTATO A OBTENER.....	80
3.5 OPTIMIZACIÓN DE LAS FUNCIONES OBTENIDAS EN LOS MODELOS PARA LA MÁXIMA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS O DIGESTATO.....	82
3.6 DETERMINAR LA RECUPERACIÓN DEL PODER CALORÍFICO INFERIOR DE LAS MEZCLAS DE LOS RESIDUALES Y LA MEJORA DE LA SOSTENIBILIDAD EN SU CODIGESTIÓN.....	83
CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO.....	92
CONCLUSIONES.....	95
RECOMENDACIONES.....	97

ÍNDICE DE TABLAS

Contenido	Pág.
<i>Tabla 1. 1 Clasificación de la biomasa residual debido a su origen</i>	4
<i>Tabla 2. 1 Detalle de los equipos, herramientas y accesorios utilizados en los eventos experimentales</i>	33
<i>Tabla 2. 2 Diseño del experimento con las proporciones porcentuales (%) propuestas por Minitab 17</i>	36
<i>Tabla 2. 3 Diseño del experimento ajustado en sus proporciones</i>	37
<i>Tabla 2. 4 Valores experimentales para contenido de Volátiles puros determinados</i>	51
<i>Tabla 3. 1 Contenido porcentual de humedad y sólidos totales y volátiles en la mezcla de carga por Reactor de cada evento experimental</i>	70
<i>Tabla 3. 2 Proporciones base seca (sólidos totales) de la mezcla de carga por Reactor</i>	70
<i>Tabla 3. 3 Cantidades máxicas base seca (sólidos totales), húmeda y agua en la mezcla de carga por Reactor de cada evento experimental</i>	71
<i>Tabla 3. 4 volumen medido y por gramo de gases por Reactor de cada evento experimental</i>	72
<i>Tabla 3. 5 Volumen medido y equivalente máxico de la producción de gases por Reactor de cada evento experimental</i>	73
<i>Tabla 3. 6 Producción máxica de gases por kilogramo de sólidos totales por Reactor de cada evento experimental</i>	74
<i>Tabla 3. 7 Cantidades máxicas de sólidos ingresados al proceso y residuales con su contenido de sólidos volátiles</i>	75
<i>Tabla 3. 8 Balance máxico por Reactor de cada evento experimental</i>	76
<i>Tabla 3. 9 Coeficiente sinérgico por Reactor de cada evento experimental</i>	79
<i>Tabla 3. 10 Cantidades de producción de biogás calculadas con los modelos y el error respecto a las producciones experimentales por Reactor de cada evento experimental</i>	81
<i>Tabla 3. 11 Cantidades de producción de digestato calculadas con el modelo y el error respecto a Las producciones experimentales por Reactor de cada evento experimental</i>	82
<i>Tabla 3. 12 Índices, porcentajes y poder calorífico superior de las mezclas en los reactores de cada evento experimental</i>	84
<i>Tabla 3. 13 Comparación del poder calorífico inferior de las mezclas con la recuperación y ahorro de energía por producción de metano y residuales en los eventos experimentales</i>	85
<i>Tabla 3. 14 Comparación del poder calorífico inferior de las mezclas con la recuperación y ahorro de energía por producción de metano y residuales en los eventos experimentales</i>	86
<i>Tabla 3. 15 Resultados de las pruebas bioquímicas para Vibrio Cholerae y Desulfovibrio</i>	88
<i>Tabla 3. 16 Equivalencia de gases de efecto invernadero por producción de metano y dióxido de carbono en los reactores de los eventos experimentales de codigestión</i>	88
<i>Tabla 3. 17 Aporte económico en MXN\$ del proceso considerando la producción de biogás y los residuales sólidos como fertilizante orgánico por kilogramo de sólidos totales introducidos</i>	89
<i>Tabla 3. 18 Aporte económico por ingreso Bruto (antes de impuesto y costos de distribución y empaque) con 60 toneladas (9,000 kg de sólidos totales) por mes</i>	90
<i>Tabla 3. 19 Aporte económico por ingreso Neto (después de impuesto y costos de distribución y empaque) al procesar 60 toneladas por mes acorde a los resultados de cada evento experimental</i>	90
<i>Tabla 3. 20 Análisis económico y de tasa de retorno al escalar el proceso a 60 toneladas por mes</i>	91
<i>Tabla 3. 21 Matriz de Leopold con valoración del impacto ambiental por factor, tipología y total</i>	92

INDICE DE FIGURAS

Contenido	Pág.
Figura I. 1 Eventos experimentales a efectuar	vi
Figura 1. 1 Esquema de las fases de la descomposición anaerobia de la biomasa residual (materia orgánica)	5
Figura 1. 2 Esquema del Reactor por lote para el proceso de descomposición anaerobia de la biomasa residual.	9
Figura 2. 1 Diagrama de la secuencia de actividades para efectuar los experimentos	29
Figura 2. 2 Esquema de la instalación experimental acorde a las actividades para el desarrollo de los eventos experimentales	31
Figura 2. 3 Biorreactor en acondicionamiento y en operación con accesorios	32
Figura 2. 4 Esquema gráfico del sistema con su volumen de control señalado	34
Figura 2. 5 Esquema gráfico de los eventos experimentales propuestos por Minitab 17	36
Figura 2. 6 Medición del volumen de metano por desplazamiento de sosa y absorción de CO ₂	43
Figura 2. 7 Procedimiento para el aislamiento y determinación de los microorganismos	62
Figura 2. 8 Toma de muestra de reactores	62
Figura 3. 1 Comparación de las cantidades de masa entrada y salida en los reactores de los eventos experimentales	71
Figura 3. 2 Producción de biogás por gramo de sólidos totales y porcentaje de sólidos totales residuales en los reactores de los eventos experimentales de codigestión	77
Figura 3. 3 Superficie de la producción de biogás producida por las proporciones de los residuales en los eventos experimentales de codigestión	77
Figura 3. 4 Superficie del efecto sinérgico de los lodos del estiércol de ganado vacuno y los lodos de albañal sobre los restos de comida en la producción de biogás en su codigestión	79
Figura 3. 5 Muestra tomada de los reactores en funcionamiento	87
Figura 3. 6 Existencia de coliformes en la mezcla de entrada	87
Figura 3. 7 Concentración de Coliformes y Vibrio Cholerae al inicio, a los 15 y a los 30 días de proceso	87
Figura B.1 biorreactor de mezcla completa	VI
Figura B.2 Sensor tipo J y Termómetro bimetalico	VI
Figura B.3 Paneles de control	VI
Figura B.4 Contactor para conexión de calefactores	VII
Figura B.5 Wattómetro	VII
Figura B.6 pH-metro	VII
Figura B.7 Balanza granataria	VII
Figura B.8 Picadora para disminuir tamaño de partículas	VIII
Figura B.9 Licuadora para homogeneizar componentes y muestra	VIII
Figura B.10 Balanza para medir humedad	VIII
Figura B.11 Estufa eléctrica	IX
Figura B.12 Balanza analítica	IX
Figura B.13 Mufla electrónica	IX
Figura B.14 Analizador Elemental Flash 2000	IX
Figura B.15 Recipientes de plástico para componentes y muestra	X
Figura B.16 Refrigerador para conservación	X
Figura B.17 Medidores de flujo para gases	X
Figura B.18 Bolsa Tedlar para almacenar biogás	XI
Figura B.19 Instalación para absorción de dióxido de carbono con sosa caustica y Cromatógrafo Agilent 3890B con jeringa de inyección	XI
Figura B.20 Cajas Petri	XI
Figura B.21 Tubos de ensaye y gradilla	XII
Figura B.22 Parrilla eléctrica, cuba y baño maría	XII
Figura B.23 Matraces Erlenmeyer	XII
Figura B.24 Campana de extracción y Mechero Fisher	XII
Figura B.25 Jarra de anaerobiosis	XIII
Figura B.26 Desecadores	XIII
Figura B.27 Equipos de medición elemental y cromatográfico	XIII

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Actualmente el mundo padece tres grandes crisis, la energética, la alimentaria y la ambiental, estas se encuentran de alguna manera entrelazadas, toda vez que ante la baja en las reservas probadas de combustible fósil, las naciones altamente demandantes de energía para su transporte e industria han ideado la producción de biocombustibles utilizando alimentos, especialmente muchas gramíneas utilizadas como fuente de alimentación de muchas naciones, estableciéndose una fuerte competencia entre alimentos y combustibles, que ha llevado a incrementar las áreas de cultivo a expensas de deforestar importantes áreas de bosques, con los conocidos impactos negativos sobre el ambiente que ocasiona esta práctica.

Por otro lado, la tendencia en los cultivos es su obtención por medios naturales, a lo que se le ha dado en llamar producción orgánica, aunque sin mayores controles, requieren menos costos de energía y recursos financieros, son altamente demandados y sus precios son superiores comparados con los obtenidos de cultivos en que se utilizan fertilizantes producidos mediante la industria química.

Además, la tendencia mundial en lo que respecta a la generación de energía utilizable se centra básicamente en las fuentes renovables de energía; dentro de las que se encuentran las que proporciona de forma directa la naturaleza, entre otras, la eólica, la solar, la geotérmica y la hidráulica. Sin embargo, existe otra fuente de energía que comienza a generalizarse, la biomasa, ésta es la que permite producir los llamados biocombustibles como el biogás rico en metano, los combustibles líquidos tales como el metanol y diésel, o el hidrógeno.

Dentro de los tipos de biomasa se encuentran: la parte orgánica de los residuos sólidos municipales, el estiércol de ganado vacuno y las aguas residuales municipales. Estas se consideran

INTRODUCCIÓN

un problema tanto en las ciudades como en las congregaciones que conforman los municipios en México debido a que se generan grandes cantidades de estos residuos y efluentes y representan un foco de contaminación e insalubridad al almacenarse en tiraderos a cielo abierto y descargas en los diferentes cuerpos de agua respectivamente, sin controles apropiados para evitar la contaminación de suelos, aire y mantos freáticos. Sin embargo, esos residuales cuando son tratados de forma adecuada, se transforman en una oportunidad debido a que tienen un gran potencial energético, ya sea por su combustión o la obtención de biogás mediante su proceso anaerobio (Elias Castells, 2005), (Seoanes Calvo, 2013), (Deng, y otros, 2014), (Zhiying, y otros, 2015) que, además, permite la obtención de fertilizantes naturales (Kumar, Maurya, Raghuwanshi, Meena, & Islam, 2017). Por otro lado, al tratar los residuales mediante el proceso anaerobio, se obtiene un mayor cuidado del medio ambiente y se eliminan focos de infección, además de mejorar la capacidad productiva de los suelos donde se vierta el abono orgánico resultante como residuales. Debido a esto, se hace importante que en México se potencie el procesamiento anaerobio de dichos residuales de tal forma que se haga más eficiente el manejo energético y se obtengan sustratos diferenciados que puedan utilizarse en la producción agrícola, haciendo una integración que permita que las granjas sean sostenibles y sustentables; eliminando al mismo tiempo los contaminantes que emergen de dichos residuos cuando no son tratados, y que hacen que la calidad de vida sea baja por la influencia de estos en el aire, suelo y agua.

Las investigaciones que actualmente se efectúan sobre la digestión y la codigestión, se centran principalmente en los efectos que tienen la temperatura, la carga orgánica, la concentración inicial del sustrato y la relación del carbono y nitrógeno contenido en el material que se introduce al proceso, la cinética y la eficiencia de los reactores (Deng, y otros, 2014), (Zhiying, y otros, 2015), (Deublein & Steinhauser, 2010). Por otra parte, existen también investigaciones sobre análisis

INTRODUCCIÓN

energético y de costo sobre remediación medioambiental, dirigidas al proceso de tipos específicos de residuales orgánicos urbanos, utilizando el digestato como fertilizante y considerando como factor energético la generación de energía eléctrica mediante la quema del biogás obtenido (Castells, 2012), (De Meester, y otros, 2012), (Seckin & Bayulken, 2013).

Por tanto, una solución a las tres grandes crisis consiste en valorar el proceso de codigestión desde el punto de vista de su aporte energético, la reducción del impacto ambiental que representan sus residuales, la posibilidad de obtener biofertilizantes diferenciados y la mejora de la sostenibilidad y servicios en los servicios que brindan los ecosistemas degradados.

Por todo lo anterior se identifica como:

Problema científico:

No está caracterizada científicamente la interacción que existe entre los lodos de albañal, el estiércol de ganado vacuno y los restos de comida para establecer modelos experimentales que permitan la predicción de las cantidades a obtener de biogás y digestato en el proceso de codigestión para diferentes combinaciones de esas biomásas residuales.

De ello, surge la interrogante siguiente:

¿Existirá una interrelación entre los lodos de albañal, el estiércol de ganado vacuno y los restos de comida que provoque un efecto sinérgico al procesar una combinación de esas biomásas residuales dentro de un sistema anaerobio, para obtener la máxima cantidad posible de biogás o digestato?

Como posible solución del problema y respuesta a la interrogante, se plantea la siguiente:

INTRODUCCIÓN

Hipótesis de investigación

“La determinación del coeficiente de efecto sinérgico que provoca la interacción entre los lodos de albañal, el estiércol de ganado vacuno y los restos de comida en su proceso anaerobio, permitirá establecer modelos experimentales de dicho proceso para predecir las cantidades del biogás y digestato a obtener”.

Para la atención de la hipótesis, se establece:

Objeto de la investigación:

El proceso de codigestión de la mezcla de lodos de albañal, estiércol de ganado vacuno y restos de comida.

Objetivo general:

Modelar experimentalmente el proceso de codigestión de la mezcla de lodos de albañal, estiércol de ganado vacuno y restos de comida para predecir las cantidades del biogás y digestato a obtener.

Objetivos específicos:

1. Establecer una instalación a nivel de laboratorio y el diseño experimental correspondiente
2. Evaluar el efecto de la proporción de las biomásas residuales sobre las cantidades producidas del biogás, el digestato y la condición de inhibición
3. Determinar el coeficiente de efecto sinérgico para diferentes mezclas de los tipos de biomasa residual seleccionados

INTRODUCCIÓN

4. Obtener modelos experimentales del proceso de codigestión de las mezclas para predecir las cantidades de biogás y digestato a obtener
5. Optimizar las funciones obtenidas en los modelos para la máxima producción de biogás o digestato
6. Determinar la recuperación del poder calorífico inferior de las mezclas de los residuales y la mejora de la sostenibilidad en su codigestión

El aporte o novedad científica principal de este trabajo de investigación se establece a partir de la obtención de los modelos experimentales del proceso de codigestión de las mezclas y predecir las cantidades de biogás y digestato

El fundamento metodológico de este trabajo de investigación se centra en el marco teórico e investigativo sobre: la descomposición biológica de los residuales orgánicos municipales en ausencia de oxígeno; la metodología para la evaluación termo – económica; las metodologías sobre impacto social – ambiental y sobre el análisis estadístico de los resultados experimentales.

El método científico utilizado para realizar el trabajo de investigación es el teórico experimental, y se establece en los aspectos siguientes:

En el proceso de codigestión el control de las variables: pH, temperatura, sólidos totales y volátiles, los contenidos de carbono y nitrógeno, el tiempo de retención hidráulica y, las cantidades de los componentes de la mezcla.

INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo experimental se utiliza la metodología de diseño de experimentos para mezclas del tipo Simplex Lattice {3,3}, es decir con 3 componentes y grado polinómico 3.

La representación gráfica del diseño del diseño de experimento se muestra en la figura I.1. Cada evento se desarrolla por duplicado.

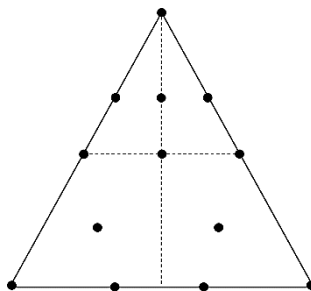


Figura I. 1 Eventos experimentales a efectuar

Para el análisis del impacto social – económico – ambiental del proceso, se utiliza la matriz de Leopold para evaluar un proyecto de mejora que establece un digestor anaerobio industrial en las inmediaciones del tiradero de los residuos sólidos municipales, determinándose los impactos sobre los medios abióticos (inerte perceptual), bióticos y socioeconómicos, identificando en primera instancia los beneficios (efectos positivos) o perjuicios (efectos negativos) que ocasionan al medio ambiente las actividades que se requieren para llevar a cabo el proyecto

El análisis de los resultados experimentales se efectúa aplicando análisis de regresión múltiple con ajustes específicos para obtener el modelo de comportamiento del proceso, utilizando el software MINITAB 17; a su vez se efectúan los balances energéticos y de materiales, para establecer las características medioambientales y económicas del proceso.

Con el trabajo el autor ha logrado las siguientes publicaciones y presentaciones en eventos:

INTRODUCCIÓN

Publicaciones:

1. **La Codigestión de Residuos Orgánicos: una contribución energética, ambiental y de salud humana.** Ingeniería *Energética*, Sept-Dic 2017, vol.38, no.3, p.226-236. ISSN 1815-5901
2. **Potencial Energético de Codigerir Estiércol bovino, Lodos cloacales y residuos de Comida.** Ingeniería *Energética*, Ene-Abr 2019, vol.40, no.1, p.20-29. ISSN 1815-5901
3. Tesis de maestría “**APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES DE COATZACOALCOS, EN LA OBTENCIÓN DE MATERIA PRIMA PARA EL RECICLAJE, LA COGENERACIÓN Y LA OBTENCIÓN DE FERTILIZANTES NATURALES EN LA CIUDAD Y PUERTO DE COATZACOALCOS**”, Universidad de Matanzas, Cuba, 2006, <https://www.researchgate.net/publication/333855761>

Eventos:

1. **Sustentabilidad, sostenibilidad y potencial energético en los procesos de residuales orgánicos** CIUM 2013, Varadero, Cuba, marzo 2013
2. **Contribución de la codigestión de residuos orgánicos municipales en la sostenibilidad energética ambiental y a la salud humana** IV Convención Internacional AGRODESARROLLO 2016, Varadero, Cuba, octubre 2016.
3. **Aporte energético y sostenibilidad de la codigestión de estiércol bovino, lodos cloacales y residuos de comida** CIUM 2019, Varadero, Cuba, mayo 2019

INTRODUCCIÓN

Estructura de la tesis:

La tesis está constituida por introducción, tres capítulos, conclusiones y recomendaciones. El primer capítulo centra su atención en el análisis del estado del arte del proceso anaerobio de mezclas de residuos orgánicos, la influencia de los componentes de la mezcla en la producción de biogás y digestato, el efecto sinérgico para alcanzar la producción máxima de biogás o digestato, la modelación experimental de este tipo de proceso y la recuperación energética del poder calorífico inferior de la mezcla de esos residuales y su mejora a la sostenibilidad. El capítulo dos principalmente describe la instalación experimental con su equipamiento e instrumentos de medición, además se describe la metodología del desarrollo de los experimentos y su procesamiento estadístico. En el tercer capítulo se presenta y discute los resultados de la investigación que dan respuesta a la solución del problema científico, la hipótesis y los objetivos general y específicos

CAPÍTULO I

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Todo parece imposible hasta que se logra

Nelson Mandela

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Ante la disminución en las reservas probadas de combustible fósil y el crecimiento demográfico que aumentan los requerimientos de combustibles, alimentos y la generación de residuales que afectan el medio ambiente, se hace necesario volver la vista hacia las energías renovables y principalmente mediante el proceso de los residuales orgánicos también llamados biomasa residual que hoy tanto en el mundo como en México incluida la Ciudad de Coatzacoalcos, Veracruz representan un grave problema ambiental y posibles problemas de salud pública al ser dispuestos sin tratamiento en tiraderos a cielo abierto y cuerpos de agua.

Dentro de los tratamientos para hacer utilizables como portadores energéticos a los residuales orgánicos, según (Elias Castells, 2005), (Elías Castells & Bordas Alsina, 2012), (Soanes Calvo, 2013) y (Hamad, Agll, Hamad, & Sheffield, 2014) de forma general se clasifican como:

Termoquímico, por su combustión directa o indirecta mediante su pirólisis previa para obtener un combustible mejorado; lo que significa que ambos requieren una cantidad de energía inicial para su aprovechamiento (Sattar Nizami, y otros, 2015), (Jones & Harrison, 2016), (Garcia-Lodeiro, Carcelen-Taboada, Fernández-Jiménez, & Palomo, 2016) y (Ashworth, y otros, 2016).

Fisicoquímico, por prensado o transesterificación, permiten obtener un biocombustible de productos agrícolas como materia prima, con los problemas que representan sus requerimientos de consumo de energía durante el proceso, y uso de catalizadores contaminantes (Jeonseok, Bora, & Jae, 2016), (Alejos & Calvo, 2015) y (Martínez, Parra, Vera, & Vera, 2016) y,

Bioquímico, el compostaje que representa grandes problemas de contaminación ambiental en suelo, agua y aire y, por último, el proceso de descomposición anaerobia.

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La tendencia tecnológica actual considerada por diversos autores, incluido el de la presente investigación para la mejor opción de tratamiento de los residuales orgánicos principalmente los municipales es el proceso anaerobio, en virtud de aprovechar todo el potencial que representan, así, (Sattar Nizami, y otros, 2015) y (Hamad, Agll, Hamad, & Sheffield, 2014) afirman que es debido a que se genera de manera natural biogás que puede amortiguar en parte la escasez de combustibles fósiles y, nutrientes para la agricultura que devuelven a la naturaleza los macro y micronutrientes que se requieren para los cultivos comestibles y en general para todo tipo de vegetales.

En revisión del estado del arte sobre la digestión, sus principios, beneficios y limitaciones, se han considerado las revistas más importantes con relación a los procesos de los residuales orgánicos municipales, los equipos e instalaciones utilizados para el proceso de esos residuales, el efecto de procesar combinaciones de esos residuales, la modelación experimental del proceso anaerobio para predicción de producción de biogás y digestato, la optimización de los modelos para la máxima producción, la determinación de la recuperación del poder calorífico inferior de la biomasa en el proceso anaerobio y la mejora de la sostenibilidad por ese proceso

1.1 PROCESO DE DIGESTIÓN DE LOS RESIDUALES SÓLIDOS ORGÁNICOS (BIOMASA) [La biomasa como portador energético]

En el mundo y en México incluyendo Coatzacoalcos, Veracruz actualmente por las actividades naturales de los seres vivos, se desechan diariamente miles de toneladas de residuos sólidos orgánicos (biomasa residual) principalmente estiércol de ganado vacuno, lodos de albañal y restos de comida sin tratamiento alguno que permita aprovechar su potencial benéfico o mitigue las

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

afectaciones que generan, lo que hace que se comprometa cada día más al medio ambiente y se incrementen los riesgos a la salud, toda vez que:

(Soanes Calvo, 2013) y (Elías Castells & Bordas Alsina, 2012) asocian el término biomasa a la materia orgánica originada por un proceso biológico, ya sea espontáneo o provocado por las actividades humanas; sólidos, líquidos y pastosos, que puede utilizarse como fuente de energía, que pueden clasificarse acorde con la tabla 1.1. Además, (Zale, y otros, 2016) establecen que la biomasa residual y en general todo tipo de ella en su tratamiento para fines energéticos no altera el balance de carbono, debido a que el carbono que libera forma parte de la atmósfera, por tratarse de energía solar almacenada mediante la fotosíntesis.

Tabla 1.1 Clasificación de la biomasa residual debido a su origen

Residual	Actividad
Ganadero	Explotación
	Industrial
Pesquero	Alimentos no consumidos
	Individuos muertos
	Heces
	Lodos
	Organismos incrustados (Fouling)
	Partes residuales
Orgánicos Urbanos	Sólidos
	Líquidos y Pastosos
Forestales	Conservación y manejo de selvas y bosques
	Industriales
Agroindustriales	Vinícolas, alcohol y cerveza (fermentativas)
	Alimentarios

El proceso de digestión tiene dos acepciones, cuando se procesa sólo un tipo de biomasa residual con o sin algún inóculo se denomina digestión y cuando se procesan dos o más tipos de biomasa residual mezcladas en determinadas proporciones se le llama codigestión, de tal forma que (Zhiying, y otros, 2015), (Solera del Río, y otros, 2014), (Sattar Nizami, y otros, 2015) y (Hamad, Agll, Hamad, & Sheffield, 2014) consideran que la digestión es el tratamiento de mayores

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

beneficios debido a que ofrece biogás y nutrientes naturales para el campo, sin embargo, sólo analizan la digestión de residuales orgánicos puros desde el punto de vista del recipiente en que se lleva a cabo, cinético, bioquímico, de su simulación con el modelo ADM1, la agitación y los procesos con que se puede tratar la biomasa residual; además (Kafle & Chen, 2016) mediante modelos estadísticos como los de Gompertz modificado y Chen, ajustan el potencial bioquímico de metano de la digestión en diferentes estiércoles de ganado.

Para (Feduchi Canosa, Blasco Castiñeyra, Romero Magdalena, & Yañez Conde, 2013), (Koolman & Röhm, 2012) y (Gaw, Cowan, O'Reilly, J., & James, 2012) el proceso de digestión es un proceso biológico natural en el que la materia orgánica en ausencia de oxígeno, y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en productos gaseosos y residuos sólidos y líquidos, acorde con las etapas que se pueden observar en la figura 1.1.

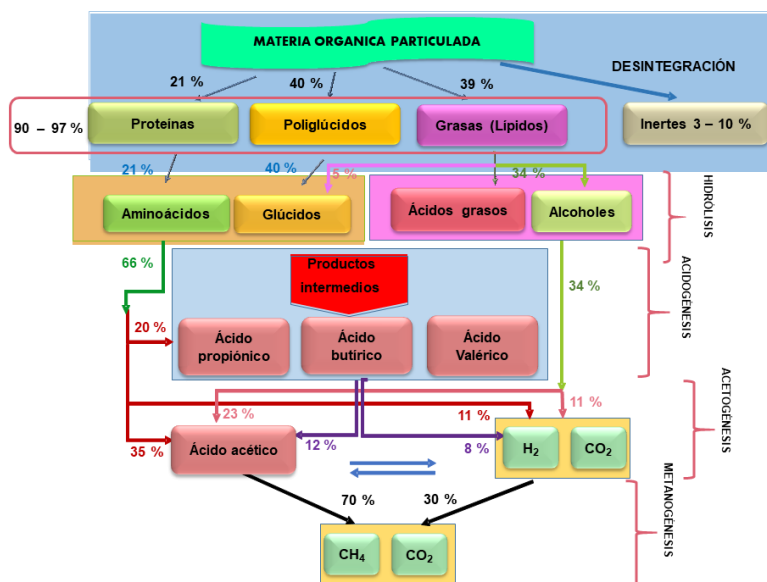


Figura 1. 1 Esquema de las fases de la descomposición anaerobia de la biomasa residual (materia orgánica)

Debido a las diferencias en el contenido de los componentes (proteínas, polisacáridos y grasas) que se muestran en la figura 1.1 para que este proceso surja de manera natural, según (Zhiying, y

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

otros, 2015), (Deublein & Steinhauser, 2010), (Varnero Moreno, 2011), (Deng, y otros, 2014) y (Arikan, Mulbry, & Lansing, 2015) existen limitantes entre las que se encuentran el pH, la relación carbono/nitrógeno, la concentración inicial del sustrato, la carga orgánica inicial (grasas) y la temperatura entre otros, sugiriendo una temperatura de entre 35 y 37 °C para el proceso anaerobio de estiércol; incluso (Braguglia, Gallipoli, Gianico, & Pagliaccia, 2018), (Ren, y otros, 2018) y el autor de esta investigación consideran que debido a la alta carga orgánica de los residuos de comida, su digestión como residual puro representan una gran complejidad, que llegan a inhibirlo por el alto grado de acidez que genera su carga orgánica.

Sin embargo, según (Rincón Ramírez, Rincón Lizardo, Mata Álvarez, & Chirinos, 2014), (Parra Orobio, y otros, 2016), (Gao, y otros, 2015) y el autor de esta investigación, cuando los restos de comida se establecen en proporciones por separado de carbohidratos, frutas y vegetales y, residuos proteicos; se inoculan ya sea con lodos de planta tratadora de aguas residuales o bicarbonato, puede establecerse una proporción que permita bajar la carga orgánica influenciada por los ácidos grasos volátiles.

De acuerdo con (Rincón Ramírez, Rincón Lizardo, Mata Álvarez, & Chirinos, 2014), la temperatura dentro del proceso anaerobio de los residuos de comida inoculados con lodos biológicos influye en el tiempo de retención hidráulica e incrementa la producción de metano, obteniendo tiempos de retención de entre 25 y 30 días para condiciones mesofílicas a 37 °C y 15 días en termofílicas a 55 °C y un porcentaje de metano de 62 % y 65 % respectivamente, estas condiciones de trabajo y los resultados obtenidos serán objeto de análisis para las nuevas condiciones de mezcla de las tres biomasas no investigadas con anterioridad.

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Por otra parte, (Arikan, Mulbry, & Lansing, 2015), (Ortiz Carrillo, Rodríguez Chona, Cajiao Pedraza, & Maldonado Maldonado, 2016) y (Rizvi, y otros, 2015) establecen el efecto de la temperatura sobre la producción de biogás y el rendimiento de metano en la digestión del estiércol porcino y de ganado vacuno.

(Fernández Rodríguez, Martínez Torres, Morán Palao, & Gómez Barrios, 2016) realizan una revisión bibliográfica sobre el tratamiento anaerobio del lactosuero para obtener biogás e hidrógeno

Además, el comportamiento del proceso de digestión difiere en su rendimiento cuando se procesan dos o más tipos de biomasa residual, llamado por diversos investigadores codigestión. Las investigaciones sobre este tipo de proceso se centran generalmente en dos o más tipos de biomasa residual, debido principalmente a la dificultad que representa los residuos de comida y algunos otros residuales para la digestión y, la facilidad del estiércol y los lodos de aguas residuales en el mismo. Por ello, (Mata Álvarez, y otros, 2014) establecen que el estiércol de animales es el más estudiado, seguido de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales, además que las investigaciones de codigestión hacen especial énfasis en el efecto de esta sobre la calidad del digestato y que en contraste no han sido estudiados como principales sustratos el estiércol animal y los lodos de depuradora de aguas residuales; también (Xu, Li, Ge, Yang, & Li, 2018) consideran que los retos de la acumulación de residuos de comida pueden ser atendida por su digestión, aunque por su constitución ofrece un mejor rendimiento cuando se codigiere con otro tipo de biomasa residual; (Hobbs, Landis, Rittman, Young, & Parameswaran, 2018) observan el efecto inhibitorio de los residuos de comida en la codigestión y el tiempo de espera en la producción de biogás y el rendimiento de metano y, (Li, Champagne, & Anderson, 2015)

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

observan un tiempo de retención de 24 días en la codigestión de manteca, aceite y grasa con lodos del tratamiento de aguas residuales con pretratamiento termoquímico a 55 °C

Otros residuales orgánicos que representan dificultad para el proceso de digestión son los que poseen material lignocelulósico, por lo que requieren de otro sustrato para su proceso de digestión; de tal forma que (Zhang, Mao, Zhai, Wang, & Yang, 2015) analizan la influencia del pH sobre la producción de metano en la codigestión a temperatura termofílica de mezclas del rastrojo de la planta del maíz con estiércol de cerdo, observando la declinación en la producción de biogás a los 15 días; (Astals, y otros, 2015) revisan el impacto de los productos de recuperación intracelular de las algas codigeridas con estiércol de cerdo; (Haryanto, Hasanudin, Afrian, & Zulkarnaen, 2018) determinaron la influencia del pasto codigerido con estiércol de vaca en la producción de biogás y su contenido de metano, encontrando un bajo rendimiento de metano y (Koch, Lippert, & Drewes, 2017) estudian el impacto del origen del inóculo sobre el rendimiento de metano en la codigestión de diferentes sustratos.

Para las nuevas condiciones de mezcla de las tres biomásas residuales objeto de estudio que ahora se investiga por este autor, se determinarán las condiciones de trabajo y los resultados a obtener, dado que, si bien existe información sobre la descripción de la digestión y su diferencia con la codigestión, no se encontró lo relativo a la codigestión de las biomásas residuales en estudio.

1.2 INSTALACIONES EXPERIMENTALES PARA ESTUDIOS DEL PROCESO ANAEROBIO

Las instalaciones para efectuar experimentos del proceso anaerobio tienen su centro en el biorreactor anóxico donde se lleva a cabo el proceso, que puede ser de varios tipos; sin embargo, el más utilizado por su simpleza y efectividad es el de mezcla completa, como el que se muestra

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

en la figura 1.2; complementándose con equipos de medición y control que aseguran la exactitud de sus resultados, por ello, Según (Markowski, Bialobrzewski, Zielinski, Debowski, & Krzemieniewski, 2014) la optimización de los parámetros geométricos del digestor incrementa la producción de biogás y la fracción de metano que contiene.

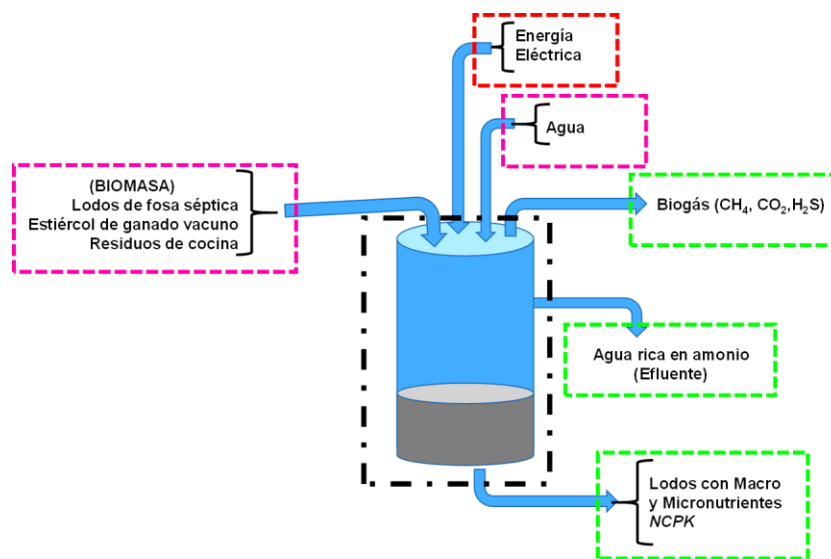


Figura 1. 2 Esquema del Reactor por lote para el proceso de descomposición anaerobia de la biomasa residual.

Considerando que los reactores operan bajo condiciones específicas, diferentes autores enmarcan los requerimientos de agitación, medición de gases e instrumentación de control del proceso, principalmente de calefacción; entonces (Fitamo, y otros, 2017) determinan la correlación entre la abundancia relativa de microorganismos y los parámetros del proceso de la codigestión de estiércol y lodos de aguas residuales y su efecto sobre el tiempo de retención hidráulica, sin describir la instrumentación utilizada.

Además (Rico, Muñoz, & Rico, 2015) analizan la operación de un reactor por lote de mezcla completa en la codigestión mesofílica a 35 °C de suero del queso con la fracción líquida filtrada de estiércol de establo, detallando las características del reactor y sus sistemas de agitación y calefacción, detallando solo la columna y el equipo cromatográfico para la determinación de la

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

composición del biogás sin mencionar los equipos de medición y control; así, (Bassani, Kougias, Treu, & Angelidaki, 2015) proponen un sistema de reactores semi continuos agitados de dos etapas con inyección externa de hidrógeno, para la codigestión mesofílica a 35 °C en la primera etapa y termofílica a 55 °C en la segunda de lodos de estiércol de vaca y cerdo con residuos de la industria alimenticia para elevar la producción de metano; comentando su sistema de calefacción, equipos de medición de gas, pH, cromatografía para ácidos grasos volátiles y composición del biogás sin detallar sus características; también (Li, y otros, 2015) analizan en un reactor de tanque agitado continuo la influencia de la carga orgánica y la recirculación del efluente en el funcionamiento del proceso anaerobio de residuos de vinagre sobre la producción de metano, mencionando los equipos con que midieron pH, carbono, nitrógeno, hidrógeno y oxígeno; además (Tang, Shigematsu, Morimura, & Kida, 2015) analizan en un reactor de tanque agitado la dinámica de las comunidades microbianas en la obtención de metano, sin detallar el equipamiento de medición utilizado.

También (Kariyama, Zhai, & Wu, 2018) determinan en un reactor continuo de tanque agitado la influencia del mezclado derivado del modo, la intensidad y sus intervalos en la eficiencia del proceso anaerobio mesofílico a 35 °C, determinando que la demanda de energía para el mezclado en un digestor industrial fluctúa entre el 8 y el 58 por ciento de la demanda total y (Li, y otros, 2017) en reactores de tanque agitado en serie analizan el proceso anaerobio de rastrojo de maíz, comentando los tipos de instrumentos que utilizaron para la medición del contenido de nitrógeno y carbono, las cantidades de biogás producidas y el cromatógrafo y su columna para determinar el contenido de metano del biogás.

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Además, utilizan reactores de tanque agitado (Hurtado, Káiser, & Zamora, 2015) para digerir aguas residuales e investigar sobre el comportamiento de la dinámica de los fluidos y optimizar energéticamente el proceso; (Karthikeyan, Selvam, & Wong, 2016) en la investigación de la digestión de residuos de comida en dos fases mediante la separación sólido – líquido a 37 °C y una agitación de 300 rpm e (Yeshanew, Frunzo, Pirozzi, Lens, & Esposito, 2016) integrando el reactor de tanque agitado con uno de cama fija para investigar el proceso anaerobio de residuos de comida en la producción de metano e hidrógeno.

Se considera que la instalación experimental a establecer debe constituirse por los reactores anaerobios como parte central, con equipamiento que permita el control y medición de la temperatura, medir las variables de masa y volumen y, los contenidos porcentuales de carbono, nitrógeno e hidrógeno en la mezcla de proceso, así como de metano y dióxido de carbono en el biogás de manera que se aseguren resultados confiables.

1.3 EFECTO EN LA CODIGESTIÓN DE LA PROPORCIÓN DE LAS BIOMASAS RESIDUALES SOBRE LAS CANTIDADES DE BIOGÁS Y DIGESTATO PRODUCIDOS

Es conocida la dificultad o facilidad que algunos tipos de biomاسas residuales representan para el proceso de digestión, de modo que en determinadas proporciones influyen en la producción de biogás o digestato, e incluso en el rendimiento de metano y la velocidad de hidrólisis.

Por ello, (Koch, Helmreich, & Drewes, 2015) analizan con la determinación del rendimiento potencial y experimental de metano y la velocidad de hidrólisis el efecto de la codigestión de diferentes mezclas de restos de comida con muestras de plantas de tratamiento de aguas residuales; (Akyol, Ince, Kleinstüber, & Ince, 2015) evalúan el efecto de las proporciones de estiércol de vaca y cebada sobre la producción de metano y la estabilidad del proceso de

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

codigestión; (Yong, Zhang, & Tan, 2015) estudian el potencial bioquímico experimental de metano en la codigestión de restos de comida y paja; (Molaey, Bayrakdar, & Sürmeli, 2018) analizan la digestión de estiércol de pollo y la influencia de elementos suplementarios en la producción de metano y, (Li Y. , y otros, 2013) calculan el rendimiento teórico de metano, su biodegradabilidad y cinética de la digestión de diferentes tipos de biomasa residual.

Además, (Nielfa, Cano, & Fernández Polanco, 2015) evalúan la producción teórica de metano en la codigestión de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales y lodos biológicos en diferentes proporciones; (Zhao, Mu, Zhao, Wang, & Zuo, 2018) analizan la influencia de la composición de diferentes sustratos preparados sintéticamente en la producción de metano; (Zhai, y otros, 2015) examinan el efecto que produce el pH inicial sobre la producción de metano en la codigestión de residuos de comida y estiércol de vaca, debido a las proporciones de los componentes; (Rahman, y otros, 2017) estudian la relación óptima para la mayor producción de biogás en la codigestión de estiércol de ave de corral con material lignocelulósico; (Rodríguez, y otros, 2017) valoran el potencial bioquímico de metano del estiércol de cerdo, la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales y residuos de la industria chocolatera procesados por separado o codigeridos en diferentes proporciones analizando el efecto que estas ejercen en la producción de biogás y metano en temperatura mesofílica; (Gil, Siles, Serrano, & Martín, 2015) valúan la influencia sobre la producción de metano de las proporciones de residuos de tomate y pepino en su codigestión y (Nielfa A. , Cano, Vinot, Fernández, & Fernández Polanco, 2015) analizan la influencia sobre la producción de metano de cada fracción de la parte orgánica de los residuos sólidos municipales, en la digestión de mezclas con diferentes proporciones de frutas y vegetales, carne, peces y cereales.

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Aunque existe información relativa a la codigestión de diversas biomásas residuales y su influencia en determinadas proporciones, no se encontró ninguna relacionada con la mezcla de las biomásas que serán investigadas.

1.4 EFECTO SINÉRGICO EN LA DIGESTIÓN DE MEZCLAS DE TIPOS DE BIOMASA RESIDUAL

La codigestión de ciertos sustratos puede producir un efecto que incremente o disminuya la producción de biogás o metano, respecto a las producciones de cada uno de ellos de forma individual; lo que diversos autores han llamado efecto sinérgico y antagonismo respectivamente. El efecto sinérgico puede surgir con el incremento de la alcalinidad producida por pequeñas cantidades de sustancias, nutrientes, enzimas o cualquier otro elemento que un sustrato aporta por sí mismo y da como resultado un incremento en la biodegradabilidad del sustrato; por el contrario, cuando el sustrato que aporta el efecto sinérgico no se encuentra en la proporción adecuada, disminuye la posibilidad de biodegradabilidad de los sustratos y con ello las producciones de biogás y metano, llegando incluso a inhibir el proceso.

Por lo anterior, (Nielfa, Cano, & Fernández Polanco, 2015) evalúan la producción teórica de metano en la codigestión de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales y lodos biológicos y su efecto sinérgico; (Zhen, Lu, Kobayashi, Kumar, & Xu, 2016) estudian el potencial técnico de producción de metano durante la codigestión de residuos de comida y microalgas, observando un efecto sinérgico positivo; (Nielfa A. , Cano, Vinot, Fernández, & Fernández Polanco, 2015) analizan la influencia sobre la producción de metano y el efecto sinérgico que produce cada fracción de la parte orgánica de los residuos sólidos municipales, en la digestión de mezclas con diferentes proporciones de frutas y vegetales, carne y peces y cereales y (Xie, y otros, 2017) valoran el efecto sinérgico en la codigestión de estiércol de cerdo y pasto ensilado.

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

También (Pagés Díaz, Pereda Reyes, Taherzadeh, Sárvári Horváth, & Lundin, 2014) determinan las interacciones antagónicas y sinérgicas sobre las cantidades de producción de metano en la codigestión termofílica a 55 °C de restos sólidos de mataderos, estiércol, cultivos diversos y residuos sólidos municipales; (Kashi, Satari, Lundin, Sárvári, & Othman, 2017) desarrollan un diseño de mezclas para identificar los efectos e interacciones sobre el rendimiento de metano de las proporciones de los sustratos en la codigestión mesofílica de lodos municipales, residuos de trampas de grasa y residuos de procesamiento de carne, encontrando efectos tanto antagónico como sinérgico; (Xie, Wickham, & Nghiem, 2017) evalúan el efecto sinérgico sobre la producción acumulada de metano en la codigestión de lodos de depuradora, con restos de comida y pulpa de papel de rechazo; (Anjum, Khalid, Qadeer, & Miandad, 2017) establecen la existencia del efecto sinérgico sobre la producción de biogás en la codigestión mesofílica a 30 °C de restos de banquetes y cáscara de naranja; (Ebner, Labatut, Lodge, Williamson, & Trabold, 2016) comprueban la existencia de un efecto sinérgico sobre la producción de metano y la velocidad aparente de la hidrólisis en la codigestión mesofílica a 37 °C de diferentes residuos de comida con estiércol de establo y (Xie, Xie, Sivakumar, & Nghiem, 2017) determinan la interrelación entre el efecto sinérgico o antagónico y la carga orgánica sobre la producción de metano en la codigestión mesofílica a 35 °C de residuos de comida y lodos de aguas residuales.

Si bien existe la definición de los efectos sinérgico y antagónico en la codigestión de las biomásas residuales, en este trabajo de investigación se evaluará la sinergia y antagonismo que se produce en la codigestión de las tres biomásas en estudio.

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.5 MODELOS EXPERIMENTALES DEL PROCESO DE CODIGESTIÓN PARA PREDECIR CANTIDADES DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y DIGESTATO

Existen algunos modelos que permiten verificar la cinética del proceso de digestión o verificar los datos experimentales, como el ASM1, 2 y 3 (Activated sludge models No. 1, 2 and 3, por sus siglas en inglés), el ADM1 (Anaerobic Digestion Model No. 1, por sus siglas en inglés) y el de Monod, de tal forma que (Hagos, Zong, Li, Liu, & Lu, 2017) determinan las perspectivas de la codigestión estableciendo que el paso limitante del proceso es la hidrólisis con el ADM1; (Brdjanovic, Meijer, Lopez-Vazquez, Hooijmans, & van Loosdrecht, 2015) definen la aplicación del modelo ASM; (Singh & Pandey, 2016) comparan el funcionamiento de los modelos de Monod y ADM1 en el tratamiento de aguas residuales de baja resistencia; (Sossa & Álvarez, 2016) implementan el ADM1 para modelar y simular el proceso anaerobio de efluentes industriales de matadero; (Donoso Bravo, y otros, 2011) identifican, seleccionan y validan los modelos científicos disponibles para el proceso anaerobio, considerando al ADM1 como el más completo aunque el de mayor dificultad; (Kythreotou, Florides, & Tassou, 2014) revisan los modelos científicos disponibles para el proceso anaerobio y algunas aplicaciones de software más simples que pueden utilizarse cuando no se tiene información suficiente para el modelo, encontrando que las dos opciones más convenientes son el de Monod y el ADM1; (Mendes, Esquerre, & Matos Queiroz, 2014) investigan sobre la aplicación del modelo ADM1 para simular el proceso anaerobio de aguas residuales en condiciones mesofílicas a 35 °C, concluyendo que permite una buena predicción de las concentraciones de acetato y propionato y un buen ajuste con los datos experimentales al optimizar los parámetros; (Razaviarani & Buchanan, 2014) calibran el modelo ADM1 para simular la función de estado de la codigestión de lodos de aguas residuales municipales y residuos de trampas de grasa de restaurant en condiciones mesofílicas a 37 °C,

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

encontrando que el modelo modificado predijo razonablemente la función de estado de la producción de biogás; (Barrera, y otros, 2015) modelan el proceso anaerobio de vinaza de molienda de caña ampliando el modelo ADM1 con sulfato reducción para aguas de alta resistencia y ricas en sulfatos, encontrando una seguridad alta y media en las predicciones cuantitativas y (Xie, y otros, 2016) estudian de manera crítica la modelación matemática para optimizar su funcionamiento para la codigestión con base en los trabajos realizados para el ADM1.

Por su parte (Kashi, Satari, Lundin, Sárvári, & Othman, 2017) desarrollan un diseño de mezclas para identificar los efectos e interacciones sobre el rendimiento de metano de las proporciones de los sustratos en la codigestión mesofílica de lodos municipales, residuos de trampas de grasa y residuos de procesamiento de carne, proponiendo analizar los datos experimentales mediante el uso de los modelos ADM1 y el cinético de primer orden

También existen modelos estadísticos utilizados para analizar o ajustar los datos experimentales de tal forma que (Kafle & Chen, 2016) utilizando los modelos estadísticos cinético de primer orden, Gompertz modificado y Chen y Hashimoto, ajustan el potencial bioquímico de metano de la digestión anaerobia en diferentes estiércoles de ganado y (Nielfa, Cano, & Fernández Polanco, 2015) evalúan la producción teórica de metano en la codigestión de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales y lodos biológicos en diferentes proporciones, ajustando los datos experimentales con los modelos cinético de primer orden y Gompertz modificado.

Además (Zhao, Mu, Zhao, Wang, & Zuo, 2018) examinan la influencia de la composición de diferentes sustratos preparados sintéticamente en la producción de metano, ajustando los datos experimentales con el modelo de Gompertz modificado; (Nguyen, y otros, 2016) evalúan y optimizan el impacto del incremento de la carga orgánica sobre la producción de biogás y metano

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

en el proceso anaerobio seco de residuos de comida inoculados con residuos de una planta de digestión seca de residuos de comida, comparando los resultados experimentales con los del modelo de Gompertz modificado; (Zhen, Lu, Kobayashi, Kumar, & Xu, 2016) analizan el potencial técnico de producción de metano durante la codigestión de residuos de comida y microalgas, utilizando los modelos cinético de primer orden, Gompertz modificado y Cone para evaluar los datos experimentales; (Zhai, y otros, 2015) analizan el efecto que produce el pH inicial sobre la producción de metano en la codigestión de residuos de comida y estiércol de vaca comparando los datos experimentales de la producción acumulada de metano con los obtenidos con el modelo de Gompertz modificado y (Li J. , y otros, 2015) analizan el incremento en la producción de metano durante el proceso anaerobio del rastrojo de maíz con dos pretratamientos, evaluando los resultados experimentales con los modelos cinético de primer orden y Gompertz modificado.

Los modelos estadísticos para la evaluación y ajuste de los datos experimentales también lo utilizan para el grado de biodegradabilidad de los sustratos, como (Ryan, Billington, & Criddle, 2017) en el desarrollo de su metodología para evaluar la cinética de biodegradación anaerobia y el potencial de producción de metano de materiales compuestos, que utilizan el modelo de Gompertz modificado; (Veluchamy & Kalamdhad, 2017) que utilizan los modelos de Gompertz modificado y de función logística para evaluar los resultados de los efectos que tiene la concentración del sustrato en la producción de metano y el incremento en la biodegradabilidad en la digestión de materiales lignocelulósicos pretratados; (Da Silva A., Astals, Peces, Campos, & Guerrero, 2018) analizan la reducción del tiempo en la estimación del potencial bioquímico de metano, evaluando los datos experimentales con el modelo cinético de primer orden; (Gil, Siles, Serrano, & Martín, 2015) evalúan la influencia sobre la producción de metano de las proporciones

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

de residuos de tomate y pepino en su codigestión, utilizando el modelo cinético de primer orden para ajustar los datos experimentales y (Parra Orobio, Donoso Bravo, & torres Lozada, 2017) que observan la influencia sobre la producción de metano de la relación sustrato-inóculo en la codigestión de residuos de cocina con lodos del tratamiento de aguas residuales de un reactor anaerobio, evaluando los datos experimentales con los modelos cinéticos de función de transferencia, función logística y el de Gompertz modificado.

Además, (Nielfa A. , Cano, Vinot, Fernández, & Fernández Polanco, 2015) analizan la influencia sobre la producción de metano de cada fracción de la parte orgánica de los residuos sólidos municipales, en la digestión de mezclas con diferentes proporciones de frutas y vegetales, carne y peces y cereales; ajustando los datos experimentales con los modelos de ecuación gaussiana, cinético de primer orden, Gompertz modificado y función logística

Por otra parte (Xie, Wickham, & Nghiem, 2017) evalúan los datos experimentales de la producción acumulada de metano en la codigestión de lodos de depuradora, con restos de comida y pulpa de papel de rechazo utilizando el modelo de Gompertz modificado y (Xie, Xie, Sivakumar, & Nghiem, 2017) determinan la interrelación entre el efecto sinérgico o antagónico y la carga orgánica en la codigestión mesofílica a 35 °C de residuos de comida y lodos de aguas residuales sobre la producción de metano y evalúan los resultados experimentales con el modelo de Gompertz modificado.

Aunque es una práctica aceptada la obtención de modelos de comportamiento a partir de ensayos a escala de laboratorio o instalaciones industriales, el tipo de estudio utilizado por el autor no se encontró en la bibliografía consultada.

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.6 OPTIMIZACIÓN DE LAS FUNCIONES OBTENIDAS EN LOS MODELOS PARA LA MÁXIMA PRODUCCIÓN DE BIOGAS Y DIGESTATO

La maximización de las funciones obtenidas en un modelo corresponde a un proceso de optimización que determina de manera cuantitativa la solución más rentable y eficiente para un problema o diseño de un proceso. Sin embargo, este proceso requiere de establecer los límites físicos de las variables, las relaciones empíricas y las leyes físicas que aplican al problema específico y que permiten establecer las condiciones necesarias y suficientes para garantizar que un supuesto extremo sea un mínimo o un máximo.

Existen diversos métodos numéricos para la optimización de una función, así (Edgar & Himmelblau, 2001) analizan los métodos para la optimización de los procesos químicos; (Morales-Rivera, Gurubel-Tun, E., del Real-Olvera, & Zuñiga-Grajeda, 2019) modifican un modelo matemático para describir la digestión, optimizando cinco parámetros cinéticos mediante el algoritmo metaheurístico Particle Swarm Optimization; encontrando una mejora en el ajuste del modelo respecto a los datos experimentales; (Mahanty, Zafar, Han, & Park, 2014) optimizan la codigestión de cinco diferentes aguas residuales en el rendimiento específico de metano, mediante el método de redes neuronales utilizando las redes response surface methodology y desirability function; encontrándolas como una solución práctica para el tratamiento de aguas residuales de diversas industrias; (Cevallos Ampuero, 2012) estudia las metodologías existentes sobre optimización multirrespuesta, integrándolas y desarrollando un nuevo algoritmo para superar las limitaciones existentes; encontrando que las metodologías revisadas se complementan y contribuyen al mejor conocimiento de los procesos o productos a optimizar y, (Verdaguer, Molinos-Senante, & Poch, 2016) utilizan el algoritmo Ant-Colony-Optimization (ACO) para maximizar la producción de biogás en la codigestión de al menos dos tipos de aguas residuales y

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

con ello optimizar las descargas de residuales orgánicos de diferentes fuentes; demostrando la utilidad del algoritmo para el soporte en la toma de decisiones sobre los procesos que contribuyen a mejorar la sostenibilidad de los residuales orgánicos.

Además, existen múltiples aplicaciones de software que facilitan el proceso de optimización, dentro de los que se encuentra Lingo versión 17, que permite maximizar funciones de diversos tipos.

1.7 RECUPERACIÓN DEL PODER CALORÍFICO INFERIOR DE LAS MEZCLAS DE LOS RESIDUALES Y LA MEJORA DE LA SOSTENIBILIDAD EN SU CODIGESTIÓN

Aunque el proceso anaerobio puede darse de manera natural bajo determinadas condiciones, lo que significa poco requerimiento de recursos, es importante evaluarlo en su dimensión energética, por ello basados en la termodinámica los diferentes autores han profundizado según las necesidades de caracterización de este tipo de proceso. Se encontró que en instalaciones reales en funcionamiento se tienen trabajos de (Spachos & Anastassios, 2011) quienes realizan un análisis térmico y la optimización del proceso anaerobio del lactosuero en la producción de queso con énfasis en la producción de energía eléctrica; (Sung, Kim, & Kim, 2017) desarrollan un análisis termoeconómico de la codigestión de lodos de aguas residuales con residuos de cocina para utilizar el biogás en la distribución local o la generación de energía eléctrica y calentamiento del propio digestor, considerándolo como ventajoso al recuperar el calor que se desperdicia y tener un buen resultado sobre el valor presente neto y (Colmenar Santos, Zarzuelo Puch, Borge Diez, & García Diéguez, 2016) desarrollan un análisis termodinámico y exergoeconómico sobre el uso del biogás generado por las plantas de tratamiento de aguas residuales como un nuevo horizonte sobre el uso de este combustible, considerando que esto le permitiría alcanzar algunas prioridades importantes en las plantas de EEUU, para la reducción de la contaminación que representan los

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

rellenos sanitarios y las aguas residuales, además de considerarse una alternativa de energía renovable en sustitución de combustibles fósiles.

Además (Haydargil & Abus,oglu, 2018) realizan el análisis termoeconómico de un sistema de cogeneración de un equipo de generación eléctrica que utiliza biogás mediante cuatro diferentes métodos comparando los resultados obtenidos, encontrando diferencias significativas entre ellos en lo referente a los costos de trabajo del equipo; (Gholizadeh, Vajdi, & Mohammadkhani, 2019) desarrollan el análisis termodinámico y termoeconómico sobre el funcionamiento de sistemas de generación básicos y modificados utilizando biogás como combustible, demostrando que todos los componentes y los sistemas propuestos tienen un alto valor en la tasa de destrucción de la exergía, seguido por la recuperación del calor intercambiado y (Reza Barati, y otros, 2017) elaboran un análisis exhaustivo de una planta de digestión de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales que produce electricidad con el biogás y biofertilizante, determinando la eficiencia exergética de la planta en un 72,8 % con una contribución de la planta eléctrica y el biofertilizante de 15,4 % y 84,6 % respectivamente.

También (Halder, Paul, Joardder, Khan, & Sarker, 2016) analizan la factibilidad de implementar la digestión en Bangladesh como una potencial fuente de energía, encontrando que es una alternativa para mitigar la crisis energética de ese país debido a su viabilidad económica y el cuidado al ambiente que significa.

No se han realizado investigaciones que caractericen el aprovechamiento de potencial energético de la codigestión y cómo en sus productos se cuenta con energía utilizable asociada a la producción de metano y de digestatos del tipo fertilizantes naturales, que de producirse en la industria química estos últimos se requeriría gastar energía para ello, en cualquier caso se tendría

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

que partir de la Termodinámica (CENGEL & BOLES, 2014), (Bejan & Tsatsaronis, 1996) y (Knapek, Vasicek, & K., 2003) como base para el análisis riguroso.

Actualmente la sustentabilidad y sostenibilidad se agrupan en un solo concepto que hoy llaman Sostenibilidad (Sustainability en inglés), que se refieren al cuidado del ambiente y al manejo económico y social, es decir, este concepto involucra las tres dimensiones o factores, sociedad, economía y medio ambiente, que son pilares esenciales que se convierten en la protección ambiental, el desarrollo social y el crecimiento económico. Esos factores se deben conjuntar para alcanzar un equilibrio de tal forma que ofrezcan un actuar en el presente pensando en el futuro. Existen diversas metodologías consideradas como conceptos que analizan los problemas ambientales de las actividades y proyectos de los seres humanos, entre los que se encuentran de residuo a recurso, de residuo a energía y análisis del ciclo de vida entre otros, que requieren de instrumentos para valorar el impacto sobre los tres pilares, entre los que se encuentra la matriz de Leopold según (Hussein & Aishath, 2017), (Asadollahfardi & Asadi, 2018).

Así, (Solera del Río, y otros, 2014), al proceso de digestión le llaman de Residuo a Recurso y caracterizan sus efectos sobre el ambiente, la sociedad y la economía.

Diversos autores utilizan la metodología del ciclo de vida para la evaluación de la sostenibilidad. Así, (Lee, Esfahani, Ifaei, Moya, & Yoo, 2017) proponen un método mediante algoritmos para optimizar la sostenibilidad de una planta de tratamiento de aguas residuales con un equipo de cogeneración integrado, encontrando que las tasas de los costos totales y los impactos ambientales decrecieron en un 16,9 % y 5,3 % respectivamente; (Fan, Klemeš, Lee, & Simon, 2018) evalúan el proceso anaerobio de los residuos sólidos municipales y su huella de carbono en la producción de energía, encontrando que cuando existe pretratamiento térmico su consumo de energía y huella

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

de carbono son relativamente altos; (Cremlato, Mastellone, Tagliaferri, Zaccariello, & Lettieri, 2018) valoran el efecto sobre el impacto ambiental del proceso anaerobio de los residuos sólidos municipales en comparación con su incineración, determinando que la mejor opción es la separación utilizando la digestión para el proceso de la parte orgánica; (Arafat, Jijakli, & Ahsan, 2015) cuantifican los impactos ambientales y recuperación del potencial energético del tratamiento anaerobio de los residuos sólidos municipales comparado con otras cuatro tecnologías de tratamiento, concluyendo que las de mayor cuidado del ambiente en su funcionamiento son la digestión y la gasificación; (Laurent, y otros, 2014) revisan la aplicación de la evaluación del ciclo de vida en los sistemas de manejo de residuos sólidos, determinando que esta tecnología permite identificar los problemas críticos y establecer propuesta de solución específicas para cada localidad y (Rajaeifar, Tabatabaei, Ghanavati, Khoshnevisan, & Raffie, 2015) que analizan los impactos medioambientales adversos de los diferentes escenarios de proceso de los residuos sólidos municipales respecto a su tratamiento anaerobio, encontrando que el proceso más amigable con el ambiente es la combinación de la digestión e incineración.

Otros autores utilizan la metodología de residuo a energía para evaluar los procesos de los residuales. De tal forma que con esta metodología (Yasar, Ali, Tabinda, & Tahir, 2015) valoran el proceso anaerobio de los residuos de ingenios azucareros utilizando el biogás para la producción de electricidad, estimando una alta reducción de emisiones de dióxido de carbono durante el año; (Nizami, y otros, 2015) analizan el proceso de los residuos sólidos municipales mediante la digestión y pirólisis para solucionar el problema ambiental crónico que representan esos residuos en la mayoría de los países en desarrollo, considerándolas como unas de las diversas tecnologías capaces de beneficiar a la sociedad que desea reducir la adicción a los combustibles fósiles; (Tan, y otros, 2015) examinan comparativamente el impacto energético, económico y

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

ambiental del proceso de los residuos sólidos municipales en su incineración, gasificación y proceso anaerobio; (Moya, Aldás, López, & Kaparaju, 2017) valoran los residuos sólidos municipales como fuente renovable de energía con tratamientos biológico, térmico, uso de gas y bio-refinación, concluyendo que el tratamiento de esos residuales produce una energía renovable recuperada de manera efectiva y eficiente; (Xu, Adair, & Deshusses, 2016) evalúan la operación de una granja porcina procesando anaeróticamente el estiércol para obtener electricidad con una microturbina utilizando el biogás, concluyendo que con un proceso de optimización se puede obtener un valor que indique los grandes beneficios ambientales que tiene; (Pham, Kaushik, Parshetti, & Mahmood, 2015) investigan sobre la situación actual y las perspectivas futuras de las tecnologías para el proceso de los residuos de comida, concluyendo que la conversión de esos residuales en energía es una práctica benigna con el ambiente, y económicamente atractiva; (Papurello, Lanzini, Tognana, Silvestri, & Santarelli, 2015) evalúan la explotación del biogás del proceso anaerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos en equipos de cogeneración, encontrando que el sistema evaluado requiere de un apropiado trabajo de optimización; (Brunner & Rechberger, 2015) analizan el manejo sostenible de los residuos peligrosos mediante su combustión, considerando que esta tecnología al destruirlos completamente, contribuye significativamente al logro de las metas sobre ese manejo.

No se reportan estudios termodinámicos relativos al máximo aprovechamiento energético de las biomásas residuales, como medida de mejoras a la sostenibilidad, considerando el potencial equivalente de la producción de fertilizantes naturales nitrogenados en sustitución de los producidos industrialmente en plantas químicas.

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO

Después del análisis de las diversas fuentes consultadas, se establecen las conclusiones siguientes:

1. En las fuentes existe la descripción del proceso de digestión y su diferencia con la codigestión, sin embargo, en ninguna de ellas se encontró información relacionada con la codigestión de estiércol de ganado vacuno, lodos de albañal y restos de comida; temática que constituye el objeto de esta investigación.
2. En la literatura se encuentran señaladas partes de una instalación experimental para el desarrollo de los experimentos de digestión sin detallar, aunque, no se encontró la estructura de una instalación a nivel laboratorio y el diseño experimental correspondiente; que se establece en el primer objetivo específico.
3. Si bien en las referencias bibliográficas se encuentran detalles de la influencia debido a las proporciones de ciertos sustratos durante su codigestión en la producción de biogás y metano, no se encontró alguna referente al efecto en la codigestión de la proporción de las biomásas residuales de la investigación sobre las cantidades de biogás y digestato; que es el segundo objetivo específico.
4. A pesar de que en la bibliografía se encuentran definidos los efectos sinérgico y antagónico y algunos autores le llaman coeficiente de efecto sinérgico a la influencia de un residual sobre otro, no se encontró información para determinar el coeficiente de efecto sinérgico para diferentes mezclas de los tipos de biomasa residual de esta investigación; que corresponde al tercer objetivo específico.

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

5. En las referencias consultadas se encontró sólo el uso de algunos modelos para evaluar la cinética del proceso y evaluar o ajustar los datos experimentales, no obteniendo ninguna referencia para la obtención de modelos experimentales del proceso de codigestión de las mezclas de biomasa residual de esta investigación para predecir las cantidades de biogás y digestato a obtener; que es el cuarto objetivo específico.
6. Existen publicaciones sobre desarrollos de optimización principalmente en el modelo ADM1, de los procesos químicos, del rendimiento específico de metano y la digestión de aguas residuales; no se encontraron referencias para optimizar las funciones de los modelos para obtener la máxima producción de biogás o digestato; correspondiente al quinto objetivo específico de este trabajo de investigación.
7. Se reportan estudios sobre análisis termoconómicos, exergoeconómicos y de sostenibilidad del proceso de digestión como fuente para producir electricidad y biofertilizantes, no se localizaron referencias para determinar la recuperación del poder calorífico inferior de las mezclas de las biomásas residuales de esta investigación y la mejora en la sostenibilidad de su proceso
8. Por todo lo anterior, se puede concluir que la información analizada es insuficiente para el desarrollo de esta investigación, por lo que el problema científico planteado permanece vigente, y esto significa que el trabajo es novedoso

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

Sí buscas resultados distintos no hagas siempre lo mismo

Albert Einstein

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

A partir de las conclusiones del capítulo anterior, se hace evidente que para llevar a cabo el proceso de codigestión de lodos de albañal, estiércol de ganado vacuno y restos de comida; es necesario establecer una instalación experimental y el diseño experimental correspondiente que permitan:

- Evaluar: si existe interrelación entre los residuales; el efecto de la proporción de las biomásas residuales sobre las cantidades producidas de biogás, digestato y la condición de inhibición; el coeficiente del efecto de efecto sinérgico para diferentes mezclas de las biomásas residuales seleccionados
- Obtener modelos experimentales del proceso de la codigestión de las mezclas para predecir las cantidades de biogás y digestato a producir y optimizar las funciones obtenidas en los modelos para la producción máxima de biogás o digestato
- Determinar la recuperación del poder calorífico inferior de las mezclas de los residuales y la mejora de la sostenibilidad en su codigestión
- Describir el sistema en que se procesan
- Establecer los procedimientos para medir las variables: contenidos de sólidos totales y volátiles, en las biomásas residuales en estudio, sus mezclas y el residual sólido del proceso; carbono, nitrógeno e hidrógeno en las biomásas residuales en estudio y, volúmenes de producción acumulados de biogás y metano en los eventos experimentales, mediante las tareas que se muestran esquemáticamente en la figura 2.1.

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

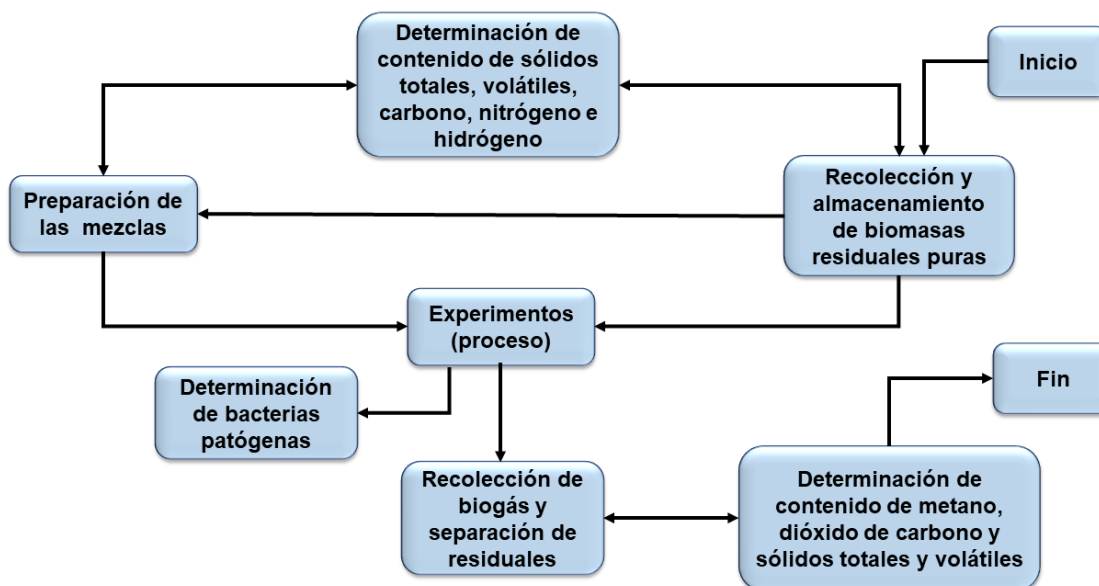


Figura 2.1 Diagrama de la secuencia de actividades para efectuar los experimentos

2.1 MATERIALES

2.1.1 Instalación experimental

Los materiales y equipos requeridos para las actividades de la figura 2.1, se muestran en la figura 2.2 y son los siguientes:

En la recolección de las biomasa residual: pala, recipientes plásticos con tapa para mantenerlos aislados y un refrigerador para su conservación.

Durante la preparación de las mezclas: agua, residual líquido de digestor agotado que produjo biogás, recipientes plásticos, balanza granataria, molino de aspas, licuadora y pHmetro.

Para determinar sólidos totales y volátiles: espátulas, balanza para determinar humedad, crisoles, desecador, balanza analítica estufa y mufla; en la determinación de carbono, nitrógeno e hidrógeno balanza analítica, cápsulas de estaño y analizador elemental de carbono, nitrógeno e hidrógeno.

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

En el desarrollo del experimento: mezcla de las biomásas preparada, biorreactor, termómetro, controlador de temperatura y pHmetro.

Dentro de la determinación de las bacterias patógenas: tioglicolato, agar TCBS, lisina, lactosa, peptosa, sal de Mohr, tubos de ensayo con tapa roscada, gradillas, cajas Petri, matraces erlenmeyer graduados, mechero fisher, campana de extracción, estufa, jarra de anaerobiosis, parrilla eléctrica y cuba para baño maría.

En la recolección del biogás y la separación de residuales: bolsas tedlar de polipropileno, coladera de 5 μm , malla de 2,5 μm , recipientes plásticos, balanza granataria, flujometro, medidor acumulador de gas y bomba de vacío.

Para la determinación del contenido de metano y dióxido de carbono: cromatógrafo de gases Agilent 3890B, cristizador, sosa al 2,5 % y probeta; y, para determinar el contenido de sólidos totales y volátiles en el residual: sólido balanza para determinar humedad, crisoles, desecador, balanza analítica estufa y mufla.

2.1.2 Equipos, herramientas y accesorios

De acuerdo con lo anterior, se establece que la instalación experimental requerida para determinar la interrelación que existe entre las biomásas residuales en su codigestión y el potencial energético y sostenibilidad del proceso, debe constar del biorreactor como equipo de proceso, equipos de medición y control y, herramientas y accesorios para almacenar y conservar, tal como se muestra en la figura 2.2 y en el anexo A y, se detallan en la tabla 2.1 y la descripción de los biorreactores.

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

El detalle de los equipos, herramientas y accesorios de la instalación establecida para efectuar los eventos experimentales de codigestión de mezclas de lodos de albañal, estiércol de ganado vacuno y restos de comida y, atender los objetivos de la investigación, se muestra en la tabla 2.1

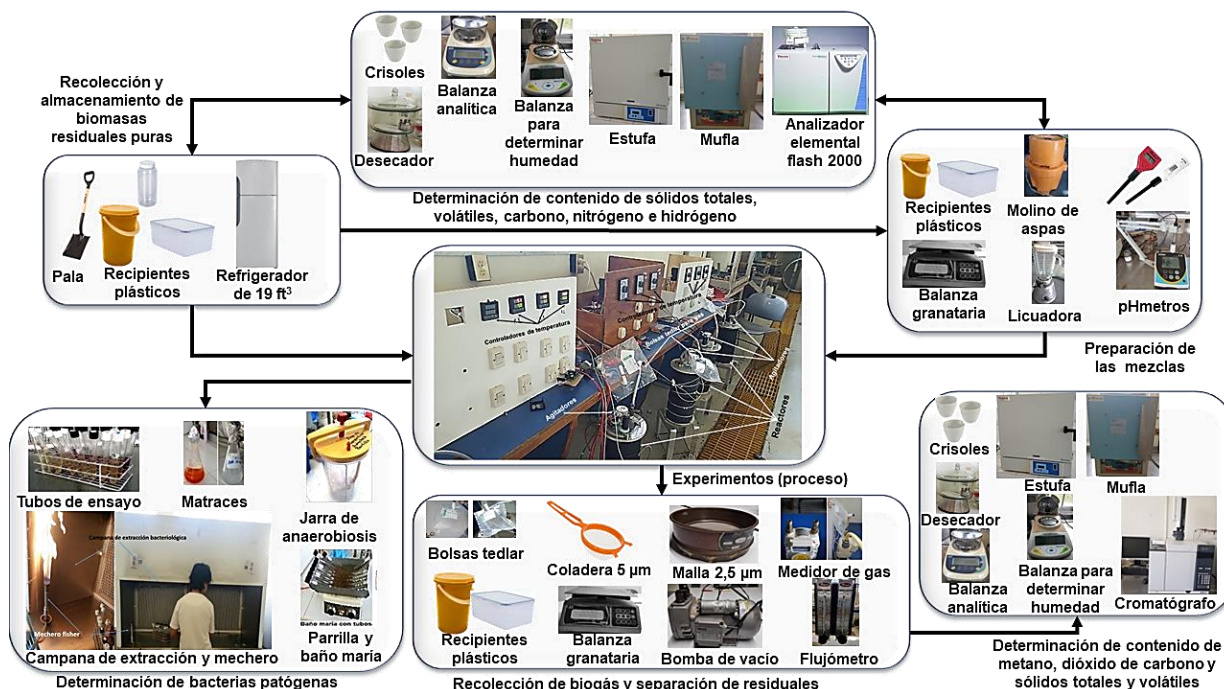


Figura 2. 2 Esquema de la instalación experimental acorde a las actividades para el desarrollo de los eventos experimentales

Para efectuar los eventos experimentales se construyeron 18 biorreactores tipo lote (batch) de mezcla completa (*BSTR* por sus siglas en inglés, *batch stirred tank reactor*) de acrílico, con forma cilíndrica con bridas ciegas en la parte superior e inferior como el que se muestra en el Anexo A y en la figura 2.3, con dimensiones de:

Seis biorreactores con 25,4 cm de diámetro interno y 56 cm de alto, con un volumen total de 28,38 litros y un volumen de proceso de 27,5 litros,

Seis biorreactores con 13,97 cm de diámetro interno y 40 cm de alto, con un volumen total de 6,13 litros y un volumen de proceso de 5,5 litros;

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

Cuatro biorreactores con 13,97 cm de diámetro interno y 48 cm de alto con un volumen total de 7,4 litros y un volumen de proceso de 6,74 litros y,

Dos biorreactores de 13,97 cm de diámetro interno y 31 cm de alto, con un volumen total de 4,75 litros y un volumen de proceso de 4,14 litros.

Todos los biorreactores con las características siguientes:

En la brida ciega superior se introducen la flecha del agitador y la válvula de salida del gas.

En la brida ciega inferior se encuentra el soporte del agitador y en los reactores más grandes una válvula para dren de los lodos.

El cuerpo cilíndrico se encuentra doble enchaquetado con neopreno; sobre la primera chaqueta se encuentran una resistencia de filamento como calefactor que envuelve al reactor y un sensor de temperatura tipo J; incrustados en el cuerpo cilíndrico se encuentran un termómetro analógico para toma de la temperatura interna y una válvula para toma de muestra del efluente.

Para el control de la temperatura del proceso se utiliza un controlador digital por biorreactor, con un contactor que le permite enviar el flujo eléctrico a la resistencia y para medir el flujo eléctrico hacia el biorreactor se utilizan vatímetros.



Figura 2. 3 Biorreactor en acondicionamiento y en operación con accesorios

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

Tabla 2. 1 Detalle de los equipos, herramientas y accesorios utilizados en los eventos experimentales

Equipo/ Herramienta/ Accesorio	Marca	Medición	Tipo de uso	Sensibilidad	Clase de precisión	Valor medio de la escala	Error sistemático
Pala cuadrada	Truper						
Recipientes de recolección de muestras	Varias						
Refrigerador 19 ft ³	Mabe						
Molino de aspas	Moulinex						
Licuadora	Osterizer						
Coladera 5 µm	S/marca						
Malla 2,5 µm	Momt-Inox						
Crisoles de porcelana							
Desecador	Pyrex						
Campana de extracción bacteriológica	Lumistell						
Mechero Fisher	Aesa						
Potenciómetro pHmetro	Oakton PC 700	pH	Instrumento laboratorio	0,01	0,01	7	0,01
Potenciómetro pHmetro	Hanna HI98103	pH	Instrumento laboratorio	0,01	0,01	7	0,01
Estufa	Thermo Scientific	Temperatura °C	Instrumento laboratorio	0,01	0,01	100	0,01
Mufla	Terlab TE- M12DR	Temperatura °C	Instrumento laboratorio	0,01	0,0002	550	0,0002
Balanza analítica	Gram	Masa g/mg	Investigación	0,0001	0,0001	100	0,0002
Balanza granataria	Torrey L-EQ series	Masa kg/g	Instrumento laboratorio	0,001	0,04	2,5	0,04
Balanza para determinar humedad	Adam PMB 53	Masa g/mg y % hum/% sol	Investigación	0,001	0,004	25	0,004
Analizador elemental Flash 2000	Thermo Scientific	Porcentaje % C, N, H	Investigación	0,001	0,002	50	0,002
Cromatógrafo de gases	Agilent tech 7890B	% C, N, H	Investigación	0,001	0,002	50	0,002
Parrilla eléctrica	Prendo PCA- 2100						
Flujómetro	Dwyer T11AB	Caudal l/min	Instrumento laboratorio	0,02	0,03	2,6	0,15
Medidor de gas	Kumho	Volumen m ³ /l/ml	Instrumento laboratorio	0,025	0,005	499,5	0,05
Probeta vidrio	Pyrex	Volumen ml	Instrumento laboratorio	1	0,004	125	0,01
Bomba de vacío	Becker		Instrumento laboratorio				
Bolsas para gas	Tedlar	1.75 l					
Controladores	Yuyao y West	Temperatura °C	Instrumento laboratorio	0,001	0,0002	499,5	0,002
Vatímetro	Sanelec	Consumo de energía Wh	Instrumento laboratorio	0,001	0,0002	499,5	0,002

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

2.2 MÉTODOS

El esquema metodológico para determinar si existe una interrelación entre los lodos de albañal, el estiércol de ganado vacuno y los restos de comida que provoque un efecto sinérgico al procesar de forma anaerobia, para obtener la máxima cantidad posible de biogás o digestato y, modelar experimentalmente el proceso de codigestión de esos residuales para predecir las cantidades de biogás y digestato a obtener, requiere de la descripción del sistema, el diseño experimental y los métodos de cálculo y medición de las variables; acorde a lo siguiente:

2.2.1 Descripción del sistema

El sistema se constituye con los biorreactores por lotes y controles descritos en el apartado de la instalación experimental, a los que se introduce la mezcla con las proporciones de lodos de albañal, estiércol de ganado vacuno y restos de comida establecidas en los eventos del diseño experimental y agua para alcanzar el 12,5 % de sólidos totales; con las características siguientes:

Se considera un sistema cerrado con producción de biogás; cuyo esquema gráfico y volumen de control se muestra en la figura 2.4.

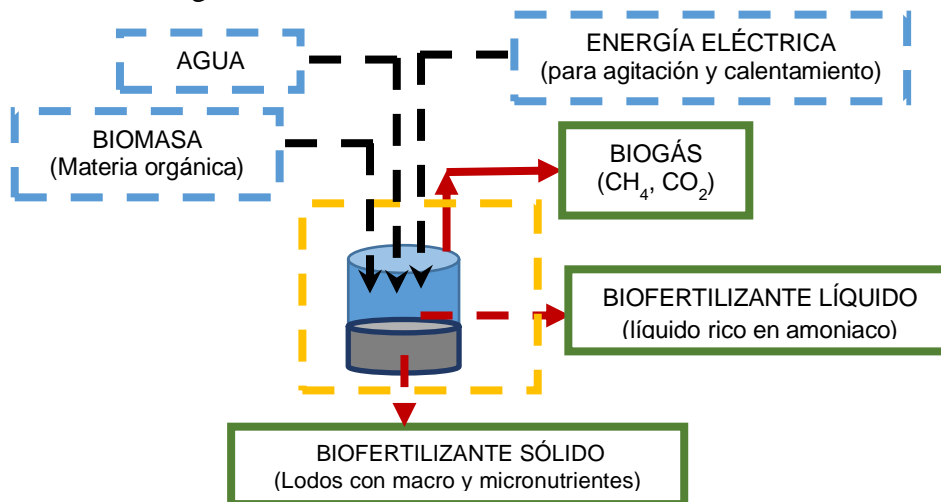


Figura 2. 4 Esquema gráfico del sistema con su volumen de control señalado

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

El ambiente del sistema se establece con una temperatura de referencia de 25 °C (298 K) y a 1 atm de presión (1,013 bar) por instalarse al nivel del mar.

Con las idealizaciones siguientes:

- La mezcla de los residuales está conformada por materia orgánica compleja y compuestos inorgánicos, constituidos por hidratos de carbono solubles e insolubles. Dentro de la parte insoluble se incluye nitrógeno orgánico ligado, que se libera en parte durante el proceso; además, la mezcla de residuos puede contener iones amonio, fosfatos entre otros cationes, aniones, compuestos intermedios como acetato, propionato y butirato y, dióxido de carbono disuelto.
- Presión constante en la fase gaseosa
- Volumen de reacción y temperatura constantes.

La temperatura de operación se define de entre 40 °C y 50 °C mediante el desarrollo de eventos del diseño experimental, eligiendo la que ofrezca el mayor porcentaje de metano en el biogás obtenido.

2.2.2 Diseño experimental

Considerando que se trata de un sistema en el que se procesan mezclas de 3 tipos de residuales, utilizando el software Minitab 17 se estableció un diseño del experimento del tipo simplex latix reticular para 3 componentes de grado 3 con 1 réplica, con los eventos propuestos por minitab 17 que se muestran gráficamente en la figura 2.4 y descriptivamente con sus proporciones en la tabla 2.2.

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

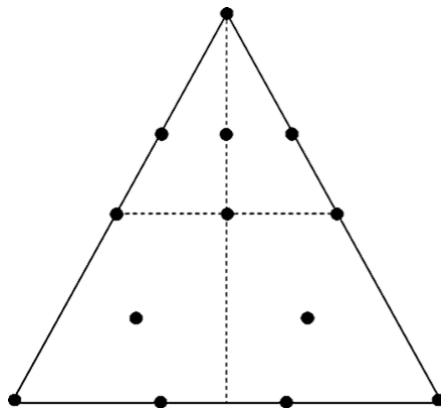


Figura 2. 5 Esquema gráfico de los eventos experimentales propuestos por Minitab 17

Tabla 2. 2 Diseño del experimento con las proporciones porcentuales (%) propuestas por Minitab 17

Orden Est	Orden Corrida	Tipo Pt	Bloques	Lodos de albañal (%)	Estiércol de ganado vacuno (%)	Restos de comida (%)
3	1	2	1	66,67	0,00	33,33
9	2	2	1	0,00	33,33	66,67
4	3	2	1	33,33	66,67	0,00
2	4	2	1	66,67	33,33	0,00
5	5	0	1	33,33	33,33	33,33
11	6	-1	1	66,67	16,67	16,67
7	7	1	1	0,00	100,00	0,00
10	8	1	1	0,00	0,00	100,00
13	9	-1	1	16,67	16,67	66,67
8	10	2	1	0,00	66,67	33,33
6	11	2	1	33,33	0,00	66,67
1	12	1	1	100,00	0,00	0,00
12	13	-1	1	16,67	66,67	16,67

El diseño obtenido en Minitab 17 se ajustó para cubrir el objeto de la investigación que es la codigestión de mezclas de los tres residuales en estudio y los objetivos planteados; reestructurando los eventos experimentales de codigestión, limitando las proporciones en la codigestión a: lodos de albañal $\leq 33,33\%$ y $\geq 10,00\%$, estiércol de ganado vacuno $\leq 50,00\%$ y $\geq 33,34\%$ y restos de comida $\leq 50,00\%$ y $\geq 30,00\%$ acorde a la tabla 2.3.

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

Tabla 2. 3 *Diseño del experimento ajustado en sus proporciones*

Orden Corrida		Evento	Reactores	Lodos de albañal (%)	Estiércol de ganado vacuno (%)	Restos de comida (%)
1		Bact 40 °C 1	4 y 5	66,66	0,00	33,34
2		Bact 50 °C 2	1 y 6	33,33	66,67	0,00
3		Bact 40 °C 3	2 y 3	66,67	33,33	0,00
4		Bact 50 °C 4	2 y 5	33,33	33,34	33,33
5		Bact 50 °C 5	1 y 3	0,00	66,67	33,33
6		6	1 y 2	10,00	40,00	50,00
7		7	3 y 4	15,00	35,00	50,00
8		8	5 y 6	20,00	35,00	45,00
9		9	1 y 2	100,00	0,00	0,00
10		10	3 y 5	0,00	100,00	0,00
11		11	1 y 2	0,00	0,00	100,00
12		12	1 y 3	30,00	40,00	30,00
13		13	3 y 5	20,00	50,00	30,00
14		14	4 y 6	15,00	50,00	35,00
15		15	1 y 3	10,00	50,00	40,00
16	Validación modelo	16	2 y 4	10,00	45,00	45,00
17		17	5 y 6	15,00	45,00	40,00

Para realizar las evaluaciones del proceso de codigestión es necesario realizar el balance de materiales en el proceso, mediante las mediciones y determinaciones correspondientes en cada evento experimental.

2.2.3 Balance de materiales

El balance másico del proceso se establece considerando los residuales en estudio en base seca y un proceso con 12,5 % de contenido de sólidos totales, mediante el procedimiento siguiente:

- a) Determinar el contenido de humedad y sólidos totales y volátiles

Para la determinación del contenido de humedad y sólidos totales y volátiles de los residuales puros, las mezclas de los residuales en estudio y el residual sólido del proceso, se utiliza la balanza

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

para determinar humedad PMB 53, marca ADAM que sirve como referencia de humedad y sólidos totales y los procedimientos marcados en la norma mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015, mediante las actividades siguientes:

- i) Utilizando la balanza ADAM PMB 53 se toma directamente la lectura del contenido porcentual de humedad y de sólidos totales.
- ii) Mediante los procedimientos de la norma mexicana, se determina hasta los sólidos totales volátiles y cenizas contenidos, acorde a lo siguiente:
 1. Utilizando una estufa y un desecador, se prepara una cápsula o un crisol de porcelana a peso constante; con la estufa a una temperatura de $105\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ durante 20 min como mínimo, dejando enfriar el recipiente para pesarlo en una balanza analítica hasta obtener una diferencia = 0,0005 g en dos pesadas consecutivas, nombrando a este peso m_1 .
 2. Se coloca una muestra del componente o la mezcla para estudio debidamente homogeneizada y a temperatura ambiente dentro del recipiente con peso constante y se pesa en la balanza analítica, nombrando m_2 a este peso.
 3. Se introduce el recipiente con la muestra dentro de la estufa manteniendo una temperatura de $105\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ durante 2 horas como mínimo, trasladando posteriormente el recipiente al desecador dejándolo enfriar por al menos 20 min y se pesa en la balanza analítica hasta obtener una diferencia = 0,0005 g en dos pesadas consecutivas nombrando este resultado m_3 .
 4. Se determina el contenido en porcentaje de humedad y sólidos totales de la muestra mediante la ecuación 2.1

$$ST = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} * 100 (\%) \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 2.1}$$

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

5. Utilizando una mufla y un desecador, se coloca el recipiente con la muestra seca en la mufla a $550\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 15 min a 20 min, posteriormente fijar la temperatura en $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 20 min como mínimo y se pasa el recipiente al desecador dejándolo enfriar para pesarlo en la balanza analítica hasta obtener una diferencia = 0,0005 g en dos pesadas consecutivas, nombrando al pesaje m_4 ; determinando el contenido en porcentaje de sólidos volátiles totales en la muestra mediante la ecuación 2.2

$$SVT = \frac{(m_3 - m_4)}{(m_2 - m_1)} * 100 (\%) \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 2.2}$$

Donde:

ST es el contenido en porcentaje de sólidos totales;

SVT es el contenido en porcentaje de sólidos volátiles totales;

m_1 es el peso del recipiente;

m_2 es el peso del recipiente con la muestra húmeda;

m_3 es el peso del recipiente con la muestra seca en la estufa;

m_4 es el peso del recipiente con la muestra sacado de la mufla

- b)** Cantidades máxicas de residual puro o mezcla de residuales y agua a introducir en el proceso

Para determinar la cantidad de sólidos totales a introducir al proceso en cada evento experimental, se desarrollan las actividades siguientes:

- i)** Determinar los sólidos totales requeridos del evento experimental: considerando el volumen total de proceso de los reactores a utilizar con su réplica como la masa total se multiplica por

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

$\frac{12,5}{100}$ correspondiente al factor porcentual de masa seca establecido para el proceso, acorde con

la ecuación 2.3, para los residuales puros corresponde a la masa seca total.

- ii) Establecer la cantidad de sólidos totales requerida de cada componente: con la cantidad de sólidos totales determinados para el evento experimental, se determina la cantidad de sólidos totales requerida de cada componente, multiplicándola por el factor porcentual de cada uno de éstos establecido para el evento experimental, mediante la ecuación 2.4, debe considerarse un porcentaje adicional de masa de la mezcla para obtener la totalidad requerida en el evento experimental.
- iii) Elaborar la mezcla con masa húmeda de cada componente: con las cantidades de sólidos totales de cada componente se determina su cantidad de masa húmeda dividiéndola entre el porcentaje de sólidos totales determinado mediante la norma mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015 para los residuales puros, acorde con la ecuación 2.5, posteriormente se mezclan las cantidades determinadas para cada componente, añadiendo un cinco por ciento para evitar merma por el residuo en los recipientes.
- iv) Determinar el contenido de sólidos totales y volátiles de la mezcla: se determina el contenido de sólidos totales y volátiles de la mezcla mediante la norma NMX-AA-034-SCFI-2015.
- v) Establecer las cantidades máxicas de mezcla húmeda y agua: la cantidad de masa húmeda de la mezcla requerida para el evento experimental se establece dividiendo la masa total en base seca entre el porcentaje de sólidos totales de la mezcla, como se establece en la ecuación 2.6. La cantidad de agua requerida se obtiene restando la masa húmeda de la mezcla de la masa total requerida para el evento experimental.

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

$$m_{requerida} = (\sum_i^n m_{reactor}) * \frac{12,5}{100} \quad (g) \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 2.3}$$

$$m_{componente} = m_{requerida} * C_{PST} \quad (g) \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 2.4}$$

$$m_{húmeda} = \sum_i^n \frac{m_{componente}}{ST} \quad (g) \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 2.5}$$

$$m_{mezcla} = \frac{m_{húmeda}}{ST} \quad (g) \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 2.6}$$

Donde:

- $m_{requerida}$ es la masa total en base seca (sólidos totales) requerida para el evento experimental
- $m_{reactor}$ es la masa total considerada para cada reactor del evento experimental
- $\frac{12,5}{100}$ es el factor porcentual de masa base seca en los reactores considerados para el evento experimental
- $m_{componente}$ es la masa en base seca del componente requerida para el evento experimental
- C_{PST} es el factor porcentual del componente considerado para el evento experimental
- $m_{húmeda}$ es la cantidad de masa húmeda de mezcla para el evento experimental antes de determinar sus sólidos totales
- m_{mezcla} es la cantidad total de masa húmeda de mezcla requerida para el evento experimental acorde con sus sólidos totales

c) Cantidades másicas de los gases obtenidos en el proceso

La conversión de los volúmenes medidos de los gases producidos en el proceso a cantidades másicas se realiza mediante las actividades siguientes:

- i) Con la bomba de vacío Becker, se le hace vacío a la bolsa tedlar en que se almacena el gas producido

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

- ii) Se coloca la bolsa tedlar con capacidad de 1,75 litros en la salida de gas del biorreactor y se abren las válvulas de la bolsa y el biorreactor
- iii) Se retira la bolsa tedlar llena de gas cerrando previamente las válvulas de la bolsa y del biorreactor.
- iv) Se mide el volumen de gas con el flujómetro de aire Dwyer T11AB y el medidor acumulador de gas Kumho, mediante el trasvase del gas a otra bolsa tedlar con la ayuda de la bomba de vacío Becker
- v) Se determina el volumen de metano utilizando el cromatógrafo Agilent technology 7890B, inyectándole 1 ml del gas obtenido, tomado de la zona de manguera de látex en la conexión de la bolsa tedlar; para obtener los porcentajes de metano y dióxido de carbono contenidos en el gas y con ello obtener sus cantidades volumétricas.
- vi) Se corrobora la cantidad de metano haciendo borbotear el gas obtenido en sosa cáustica al cinco por ciento, desplazando el volumen de una probeta de 250 ml colocada de manera invertida en un cristalizador lleno de sosa cáustica al cinco por ciento, como se muestra en la figura 2.7, con las actividades siguientes:
 - Se acopla la bolsa que contiene el gas colectado al conducto conectado a la probeta con que se mide el volumen desplazado
 - Se llena la probeta de medición con sosa caustica al 5 % y se coloca invertida en el cristalizador que contiene el resto de la sosa
 - Se abre la válvula de la bolsa, se presiona la bolsa para hacer pasar el gas por la sosa contenida en la probeta para medición del volumen desplazado, anotando el volumen medido, repitiendo las dos últimas actividades hasta que la bolsa no contenga gas

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

vii) Se convierte el volumen medido de los gases a masa utilizando la ley de Dalton de las presiones múltiples representada por la ecuación 2.7 y general de los gases ideales por la ecuación 2.8 para la obtención del número de moles del gas, que, multiplicados por el peso molecular del gas correspondiente, se convierte el volumen en masa con la ecuación 2.9.

$$P_T = \sum P_T X_i \text{ (atm) } \dots\dots\dots \text{Ecuación 2.7}$$

$$n_i = \sum \frac{(P_T * X_i) * V_i}{RT} \text{ (mol) } \dots\dots\dots \text{Ecuación 2.8}$$

$$m_i = n_i * PM_i \text{ (g) } \dots\dots\dots \text{Ecuación 2.9}$$

Donde:

- P_T presión total de la mezcla de gases se considera 1 atmósfera
- X_i proporción o fracción del gas (CO₂ ó CH₄)
- n_i número de moles del gas (CO₂ ó CH₄) contenidas en el volumen medido
- V_i volumen medido del gas (CO₂ o CH₄)
- R constante universal de los gases ideales $\left(0,082 \frac{\text{atm} * \text{L}}{\text{mol} * \text{K}}\right)$
- T es la temperatura del gas en el recipiente (298 K)
- PM_i es el peso molecular del gas en $\frac{\text{g}}{\text{mol}}$ (CO₂ = 44,0095 ó CH₄ = 16,04)



Figura 2. 6 Medición del volumen de metano por desplazamiento de sosa y absorción de CO₂

d) Cantidades másicas de los residuales

La medición de las cantidades másicas de los residuales del proceso se realiza mediante las actividades siguientes:

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

- i) Al final del proceso, se descargan por separado los digestores utilizando para cada uno de ellos un recipiente para la parte sólida recolectada por filtración utilizando la coladera de 5 μm y la malla tamiz Mont-Inox de 2,5 μm , y otro para la parte líquida
 - ii) Se determinan los sólidos totales y volátiles mediante el procedimiento marcado en la norma NMX-AA-034-SCFI-2015 y la balanza para medir humedad ADAM PMB 53, considerándolos como sólidos residuales
 - iii) Se obtiene la cantidad de sólidos totales y volátiles agotados restándole a los sólidos totales y volátiles introducidos lo residuales
 - iv) Se pesan por separado los residuales con la balanza granataria Torrey L-EQ series obteniendo la masa seca multiplicando el peso del residual sólido por su porcentaje de sólidos totales, sumando la diferencia al líquido.
- e) Balance másico del proceso

El balance másico del proceso se efectúa mediante la ecuación 2.10, considerando el esquema de la figura 2.5

$$m_{reactor} = \frac{m_{mezcla}}{N} + m_{agua_{reactor}} = m_{biofsól} + m_{biofliq} + m_{biogás} \text{ (g)} \dots\dots \text{Ecuación 2.10}$$

N es el número de reactores del evento experimental

$m_{agua_{reactor}}$ es la masa de agua considerada para cada reactor del evento experimental

$m_{biofsól}$ es la masa del residuo sólido considerada como biofertilizante sólido

$m_{biofliq}$ es la masa del residuo líquido considerada como biofertilizante líquido

$m_{biogás}$ es la masa del biogás producido obtenida con la suma del volumen medido de sus componentes (CH_4 y CO_2) convertido a masa

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

2.2.4 Evaluación del efecto de la proporción de las biomásas residuales sobre las cantidades producidas de biogás y digestato y, la condición de inhibición

La evaluación del efecto de la proporción de las biomásas residuales sobre las cantidades producidas de biogás, el digestato y la condición de inhibición se efectúa utilizando los softwares Excel y Minitab 17 mediante las actividades siguientes:

1. Introducir en una hoja de Excel los porcentajes de lodos de albañal, estiércol de ganado vacuno y restos de comida en la mezcla de proceso, las producciones de biogás y metano en mililitros por gramo y el porcentaje de sólidos totales residuales de cada evento experimental
2. Graficar considerando el eje de las abscisas los eventos experimentales con los reactores, el eje de las ordenadas para los porcentajes de los residuales en la mezcla de proceso y un eje alternativo para los datos de producción de biogás o metano y el porcentaje de sólidos totales residuales.
3. Verificar el punto en que no se produce biogás y establecerlo como condición de inhibición.
4. Verificar los puntos de mayor producción de biogás o metano y referirlos a los porcentajes de las biomásas residuales en la mezcla para establecer su efecto.
5. Utilizando una hoja de trabajo en Minitab 17, introducir los porcentajes de lodos de albañal, estiércol de ganado vacuno y restos de comida en la mezcla de proceso, las producciones de biogás y metano en mililitros por gramo y el porcentaje de sólidos totales residuales de cada evento experimental
6. Graficar la superficie de los eventos experimentales considerando en los ejes tridimensionales “z” como respuesta para los mililitros de biogás o metano por gramo; “y” para los porcentajes de lodos de albañal y “x” para los porcentajes de estiércol de ganado vacuno dejando implícito los porcentajes de restos de comida en las mezclas de proceso.

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

7. Seleccionar el método de la distancia, presentación de datos de superficie y símbolos, y subconjunto para especificar las filas que se incluirán y seleccionar todas las filas.
8. Analizar el comportamiento de la producción de biogás o metano en mililitro por gramo en la superficie gráfica para evaluar el efecto de las proporciones

2.2.5 Determinación del coeficiente sinérgico para diferentes mezclas de los tipos de biomasa residual seleccionados

Para determinar el coeficiente del efecto Sinérgico se desarrollan las actividades siguientes:

1. Se toman los datos experimentales de las producciones acumuladas de biogás y metano en mililitros y los gramos introducidos de lodos de albañal, estiércol de ganado vacuno y restos de comida en el evento experimental correspondiente.
2. Se colectan las producciones de biogás y metano por gramo de lodos de albañal, estiércol de ganado vacuno y restos de comida como residuales puros.
3. Se calcula el coeficiente del efecto sinérgico con la **Ecuación 2.12**, representada de forma simplificada por la **Ecuación 2.11**.
4. Si el factor es mayor a uno se establece que existe efecto sinérgico, cuando es menor a uno es un efecto antagónico

$$S = \frac{P_x}{\sum P_i * m_i} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 2.11}$$

$$S = \frac{P}{(P_l * m_l) + (P_e * m_e) + (P_c * m_c)} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 2.12}$$

Donde:

S es el factor del efecto sinérgico en la producción de gases (biogás o metano) ejercido por las cantidades máxicas de estiércol y lodos de albañal introducidas en la mezcla de proceso sobre los restos de comida

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

P es la producción acumulada del gas (biogás o metano) por la mezcla introducida al proceso

P_l es la producción del gas (biogás o metano) por los lodos de albañal como componente puro en mililitros por gramo (de sólidos totales) introducidos al proceso

m_l es la cantidad en gramos (de sólidos totales) de lodos de albañal introducida en la mezcla de proceso

P_e es la producción del gas (biogás o metano) por el Estiércol de ganado vacuno como componente puro en mililitros por gramo (de sólidos totales) introducidos al proceso

m_e es la cantidad en gramos (de sólidos totales) de estiércol de ganado vacuno introducida en la mezcla de proceso

P_c es la producción del gas (biogás o metano) por los restos de Comida como componente puro en mililitros por gramo (de sólidos totales) introducidos al proceso

m_c es la cantidad en gramos (de sólidos totales) de restos de Comida introducida en la mezcla de proceso

2.2.6 Obtención de modelos experimentales del proceso de codigestión de las mezclas para predecir las cantidades de biogás y digestato a obtener

Utilizando el software Minitab 17, se establecen los modelos que representan el comportamiento del proceso, utilizando una regresión múltiple, mediante los pasos siguientes:

1. Con los datos experimentales de los eventos en los que se efectúa sólo la codigestión de los 3 componentes, se crea para cada caso un modelo de diseño de superficie de respuesta central compuesto completo.
2. Se define el diseño del modelo introduciendo los factores continuos y dejando las condiciones preestablecidas por el software.
3. Para la producción de biogás, se analiza el diseño de superficie de respuesta introduciendo por separado como variables de respuesta los mililitros de biogás acumulado y por gramo, definiendo los términos de la regresión (Lineal; Lineal + Interacciones o Cuadrático

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

Completo), sin transformación y solicitando la ecuación de la regresión además del análisis estadístico.

4. Para la cantidad de digestato (residual sólido), se analiza el diseño de superficie de respuesta introduciendo como variable de respuesta los gramos de sólidos totales residuales, definiendo los términos de la regresión (Lineal; Lineal + Interacciones o Cuadrático Completo), sin transformación y solicitando la ecuación de la regresión además del análisis estadístico
5. Se comparan los resultados experimentales con los calculados por cada uno de los diferentes modelos obtenidos, calculando su porcentaje de error medio cuadrático
6. Se seleccionan los modelos con el menor porcentaje de error medio cuadrático

2.2.7 Optimización de las funciones obtenidas en los modelos para la máxima producción de biogás o digestato

Para la optimización de las funciones obtenidas en los modelos, se desarrollan las actividades siguientes:

1. Utilizando el software Lingo 17.0 introducir por separado cada una de las ecuaciones obtenidas para los modelos de comportamiento del proceso en lo referente a la producción acumulada de biogás y por gramo de sólidos totales y, digestato de los eventos experimentales en que se codigieren los tres residuales en estudio
2. Se selecciona optimización mediante el método de programación cuadrático (QP)
3. Se establece la base experimental como fracción o porcentaje de la mezcla referido a 100 gramos
4. Se introducen las restricciones establecidas en el diseño experimental.
5. Se selecciona solver para efectuar la optimización.

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

2.2.8 Determinar la recuperación del poder calorífico inferior de las mezclas de los residuales y la mejora de la sostenibilidad en su codigestión

Aunque la sostenibilidad enmarca las dimensiones ambiental, económico y social de un proceso, la dimensión energética se encuentra implícita dentro de ellas. Por ello, para determinar el potencial energético y la sostenibilidad del proceso anaerobio de mezclas de los tres residuales en estudio, se requiere que, considerando el balance de materiales en los eventos experimentales establecidos en el diseño experimental, establecer los métodos que permitan determinar separando el potencial energético mediante la consideración de la recuperación del poder calorífico inferior de la mezcla introducida al proceso y la sostenibilidad del proceso, mediante las actividades siguientes:

1. Determinación de la recuperación del poder calorífico inferior de las mezclas de proceso

Esta determinación se establece como una evaluación energética del proceso, comparando el potencial energético de las mezclas de residuales del proceso determinado por su poder calorífico inferior con la recuperación energética del proceso representada por la obtención de biogás y las cantidades de residuales sólidos considerados como un fertilizante multiplicada por su calor de formación, lo que permite evaluar su porcentaje de recuperación; y, mediante el cálculo del potencial biológico de metano de las mezclas, se establece el porcentaje de conversión de cada evento experimental.

Para determinar el Poder Calorífico Inferior de la mezcla, acorde con (Corrales Zarauza, 1953) (Corrales Zarauza, 1956), (Santos, 2009) y (File, y otros, 1986) se utilizan la metodología del análisis inmediato, los procedimientos marcados en la norma mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015, la norma americana ASTM D388-92, la fórmula de Goutal, la fórmula de comparación de

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

poderes caloríficos, los valores experimentales de α para el contenido de volátiles puros determinados de la tabla 2.4 y el contenido de carbono, nitrógeno e hidrógeno de los componentes de la mezcla mostrados en la tabla 2.5 multiplicado por su porcentaje en la mezcla mediante las actividades siguientes:

i) Determinar los índices de humedad, combustibles volátiles y de carbono fijo

Mediante los procedimientos establecidos en la metodología del análisis inmediato y la norma mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015, se determinan los índices utilizando las ecuaciones 2.13, 2.14 y 2.15 respectivamente

$$W_t = \frac{m - m_1}{m} \quad \dots \text{Ecuación 2.13}$$

$$V = \frac{m_1 - m_2}{m} \quad \dots \text{Ecuación 2.14}$$

$$CF = \frac{m_2}{m} \quad \dots \text{Ecuación 2.15}$$

Donde:

W_t = índice de humedad

m = peso de la muestra húmeda

m_1 = peso de la muestra seca a 105 °C

V = índice de combustibles volátiles

m_2 = peso de la muestra seca colocada a 550 °C considerado Carbono Fijo (CF)

CF = índice de carbono fijo

ii) Determinar el poder calorífico superior

Con la metodología del análisis inmediato, la norma americana ASTM D388-92 y la fórmula de Goutal, se determina el poder calorífico superior que significa la suma del calor producido en la reacción de combustión y el calor cedido por el vapor de agua contenido en los humos al condensarse, utilizando las actividades siguientes:

a) Establecer el contenido porcentual de combustible puro en la muestra

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

Utilizando los índices de combustibles volátiles y carbono fijo determinados, mediante la fórmula 2.16 se instituye el contenido porcentual de combustible puro

$$V' = \frac{100 \cdot V}{V + CF} \quad \dots \text{Ecuación 2.16}$$

Donde:

V' es el contenido en porcentaje de combustible puro en la muestra

b) Obtener el coeficiente del poder calorífico superior de los volátiles como combustible puro

Para encontrar el coeficiente del poder calorífico superior de los volátiles como combustible puro correspondiente al contenido en porcentaje de combustible puro en la muestra, se utilizan los valores experimentales existentes, que se muestran en la tabla 2.4, para establecer la ecuación 2.17 resultante de una regresión logarítmica de grado 2 utilizando el software Excel, e introducir en ella los valores del contenido en porcentaje de combustible puro en la muestra.

Tabla 2. 4 Valores experimentales para contenido de Volátiles puros determinados

V'	5	10	15	20	25	30	35	40	55
A	150	130	117	109	103	96	89	80	70

$$\alpha = -33.19 * \ln(V') + 206.27 \quad \dots \text{Ecuación 2.17}$$

Donde:

α es el porcentaje del poder calorífico superior de los volátiles, dependiente del valor del contenido de materiales volátiles como combustible puro, es decir exento de humedad y cenizas (V')

c) Determinar el poder calorífico superior de la mezcla

Para fijar el poder calorífico superior de la mezcla se introducen los valores de los índices de carbono fijo y de combustibles volátiles, y el porcentaje del poder calorífico superior de los volátiles en la ecuación 2.18 correspondiente a la ecuación de Goutal.

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

$$PCS_{mezcla} = 4.184 * (82 * (CF * 100) + \alpha * V) = \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad \dots \text{Ecuación 2.18}$$

Donde:

PCS_{mezcla} es el poder calorífico superior de la mezcla introducida al proceso en $\left[\frac{kJ}{kg} \right]$

4.184 es el factor de conversión de kilocalorías a kilojulios por kilogramo

82 es límites del carbono fijo (base seca sin cenizas) establecido por Goutal

iii) Calcular el potencial energético o poder calorífico inferior (PCI) de la mezcla

El cálculo del poder calorífico del combustible (PCI) se establece considerando que todo el carbono se oxida completamente convirtiéndose en anhídrido carbónico y el vapor de agua condensa, utilizando la relación que existe entre los poderes caloríficos superior e inferior, de la ecuación 2.19 e introduciendo en ella el índice de humedad de la mezcla y su porcentaje de hidrógeno obtenido mediante la sumatoria de la multiplicación de los porcentajes de cada componente en la mezcla por el porcentaje de hidrógeno de cada componente determinado mediante el del analizador elemental Flash 2000.

$$PCI_{mezcla} = PCS_{mezcla} - ((597 * 4.184) * (9 * F_h + W_t)) = \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad \dots \text{Ecuación 2.19}$$

Donde:

PCI_{mezcla} es el poder calorífico inferior en kJ/kg

597 es el calor de condensación del agua a 0 °C en kCal/kg

4.184 es el factor de conversión de kilocalorías a kilojulios por kilogramo

9 significa los kilogramos de agua que se forman al oxidar un kg de Hidrógeno

F_h es el porcentaje de hidrógeno contenido en la muestra introducida

W_t es el índice de humedad en porcentaje contenido en la muestra introducida

iv) Determinar la recuperación del poder calorífico inferior de las mezclas de proceso

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

La recuperación energética total del proceso se establece con la suma de la energía recuperada debido a la transformación de la mezcla introducida en gases considerando al metano como energético y la energía ahorrada considerando los residuales sólidos como un fertilizante nitrogenado, la formación de dióxido de carbono y sus calores de formación, utilizando las ecuaciones 2.20 a 2.24, mediante las actividades siguientes:

- a) Cálculo de la energía recuperada por producción de metano

Para calcular la energía recuperada por la producción de metano se utiliza la ecuación 2.20 en la que se introducen la producción de metano en kilogramos del balance másico y el poder calorífico inferior del metano que corresponde a 49 956,96 kJ/kg.

$$Energ_Rec_{Metano} = M_{Metano} * PCI_{Metano} \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad \dots Ecuación 2.20$$

Donde:

M_{Metano} significa la cantidad en kg de metano obtenida de su volumen medido

PCI_{Metano} es el poder calorífico inferior del metano en kJ/kg

- b) Cálculo de la energía ahorrada por los residuales sólidos considerados como fertilizante

Debido a que los residuales sólidos de cada evento experimental representan un fertilizante inocuo que puede compararse con fertilizantes nitrificados obtenidos en la industria de la transformación, tal como el nitrato de amonio sólido (NH_4NO_3), cuyo calor de formación en estado sólido a condiciones estándar tomado de su hoja de seguridad en sus características termoquímicas es de $-366 \frac{kJ}{mol}$, el cálculo del ahorro energético debido a los residuales sólidos se desarrolla con los pasos siguientes:

- i) Conversión de moléculas (mol) a kg

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

Como 1 molécula (mol) de NH_4NO_3 pesa 80 gramos, entonces mediante la ecuación 2.21 se obtienen los $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$$\Delta_f H_{\text{sólido}}^o = -366 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} * \frac{1 \text{ mol}}{80 \text{ g}} = -4,575 \frac{\text{kJ}}{\text{g}} * \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} = -4,575 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \dots \text{Ecuación 2.21}$$

Donde:

$\Delta_f H_{\text{sólido}}^o$ es el calor de formación del nitrato de amonio en kJ/kg

- ii) Cálculo de la energía ahorrada por el residual sólido considerado como fertilizante y la producción de dióxido de carbono

Considerando que los residuales se miden en gramos, se convierten a kilogramos y entonces, la energía ahorrada por la cantidad de residual comparado como fertilizante se calcula mediante la ecuación 2.22.

$$\text{Energ_Ahorro}_{\text{Residual}} = \Delta_f H_{\text{sólido}}^o * M_{\text{residual}} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad \dots \text{Ecuación 2.22}$$

Donde

$\text{energ_Ahorro}_{\text{residual}}$ significa al ahorro de energía del reactor por sus residuales sólidos

M_{residual} son los kg de residuales sólidos del reactor

$\text{Energ_Ahorro}_{\text{CO}_2}$ corresponde al ahorro de energía del reactor por la producción de dióxido de carbono

- c) Determinar la recuperación energética total del proceso y su porcentaje del PCI de la mezcla

Para determinar la recuperación energética total del proceso y su porcentaje respecto a al poder calorífico inferior de la mezcla, se toman los datos obtenidos de la recuperación energética por la producción de metano y el ahorro energético por la comparación de los residuales sólidos con el fertilizante y se suman con la ecuación 2.23 para obtener la recuperación energética total del proceso y posteriormente se compara con el poder calorífico inferior de la mezcla para obtener el porcentaje de este que se recupera mediante la ecuación 2.24

$$\text{Recup_Energ}_{\text{Reactor}} = \text{Energ_Rec}_{\text{Metano}} + \text{Energ_Ahorro}_{\text{Residual}} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad \dots \text{Ecuación 2.23}$$

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

Donde:

Recup_Energ_{Reactor} es la recuperación energética del proceso en cada reactor (kJ/kg)

Energ_Rec_{Metano} es la energía recuperada por la producción de metano en cada reactor (kJ/kg)

Energ_Ahorro_{Residual} es la energía ahorrada por el residual sólido de cada reactor considerado como fertilizante (kJ/kg)

$$\% \text{Recup } PCI_{mezcla} = \frac{\text{Recup_Energ}_{Reactor} * 100}{PCI_{mezcla}} \text{ (Porcentaje)} \quad \dots, \text{Ecuación 2.24}$$

Donde:

% Recup PCI_{mezcla} es el porcentaje del poder calorífico inferior recuperado por el proceso (porcentaje)

d) Cálculo del metano recuperado del potencial biológico de metano de la mezcla

Con la finalidad de obtener un parámetro adicional para la evaluación del proceso, se determina el porcentaje de conversión de metano respecto a la producción teórica de metano de la mezcla, mediante el método de la demanda química de oxígeno (DQO) se calcula su producción teórica de metano mediante las actividades siguientes:

i) Determinar la demanda química de oxígeno

La determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) del proceso respecto a la mezcla introducida en cada uno de los eventos experimentales, se efectúa de manera indirecta, considerando la cantidad en gramos de sólidos volátiles (SV) que contiene la mezcla en estudio y el valor promedio del factor que relaciona los gramos de DQO con los gramos de SV reportado por C. M. Bullock en 1996, que corresponde a 1.4 gDQO/gSV; utilizando la ecuación 2.25.

$$DQO = f_x * m_{SV} \quad [gDQO] \quad \text{Ecuación 2.25}$$

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

Donde:

DQO son los gramos de DQO de la mezcla introducida al proceso o agotados en el proceso
 f_x es el valor promedio que relaciona los gramos de DQO con los gramos de sólidos volátiles (1.4 gDQO/gSV)

m_{SV} son los gramos de sólidos volátiles introducidos con la mezcla o agotados en el proceso

ii) Obtener de la cantidad molecular de metano (mol)

Con el valor de la DQO obtenido, se calcula la cantidad molecular de metano (mol) mediante la ecuación 2.26.

$$n_{CH_4} = \frac{DQO}{64 \frac{g DQO}{mol}} \quad [mol] \quad \dots\dots Ecuación 2.26$$

Donde:

n_{CH_4} es la cantidad molecular de metano (mol) susceptible de convertir de la DQO

iii) Calcular del rendimiento teórico de metano

Con las cantidades de moles de metano de la DQO, mediante la ecuación 2.27 se calcula el rendimiento teórico del metano del proceso, que multiplicado por la cantidad correspondiente de Sólidos volátiles introducidos proporciona la cantidad en litros de producción teórica acumulada de metano en cualquiera de los reactores de los eventos experimentales

$$PBM_{teoDQO} = \frac{n_{CH_4} * R * T}{p * SV_x} \quad \left[\frac{L}{g} \right] \quad \text{Ecuación 2.27}$$

Donde:

PBM_{teoDQO} es el rendimiento teórico de metano de la mezcla en proceso por su DQO introducida o agotada en $\frac{\text{Litros}}{\text{gramo de Sólidos Volátiles}}$

R es la constante universal de los gases ($0.082 \frac{atm * L}{mol * K}$)

T es la temperatura del gas en el recipiente (298 K)

p es la presión atmosférica (1 atm)

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

SV_x son los gramos de sólidos volátiles introducidos al proceso o agotados por el proceso

iv) Establecer el porcentaje del rendimiento teórico de metano recuperado por el proceso

Con los volúmenes medidos de la producción acumulada de metano en los reactores de los eventos experimentales de la tabla 3.5 y la producción teórica acumulada de metano, mediante la ecuación 2.28 se obtiene el porcentaje del rendimiento teórico de metano recuperado por el proceso.

$$\% \mathbf{PBM}_{rec_{teoDQO}} = \frac{V_{metano} * 100}{\mathbf{PBM}_{teoDQO}} \text{ (Porcentaje)} \quad \dots, \text{Ecuación 2.28}$$

Donde:

V_{metano} es el volumen medido de metano en los reactores de los eventos experimentales.

$\% \mathbf{PBM}_{rec_{teoDQO}}$ porcentaje del rendimiento teórico de metano recuperado por el proceso.

\mathbf{PBM}_{teoDQO} es el rendimiento teórico de metano de la mezcla en proceso por su DQO

2. Determinación de la mejora en la sostenibilidad por el proceso de codigestión de las mezclas de los residuales en estudio

Para determinar la contribución del proceso en la mejora de la sostenibilidad, se considera que actualmente se unieron en ella la sustentabilidad y la sostenibilidad que enmarca las partes ambiental, económica y social; en la revisión exhaustiva de la bibliografía no se encontró una herramienta específica para el caso de la codigestión de los residuales, por ello, se optó por ajustar la herramienta de Leopold para estimar el factor de impacto ambiental de la codigestión de los tres residuales en estudio. El factor mide los efectos benéficos y de daño al medioambiente en los rubros abiótico (inerte y perceptual), biótico y socioeconómico.

Para determinar la contribución de este proceso en la mejora de la sostenibilidad utilizando la matriz de Leopold, se establecen las actividades siguientes:

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

A). Fijar los impactos de los residuales en la salud humana y el ambiente

Para señalar los impactos en la salud humana y el ambiente que representa el disponer el estiércol de ganado vacuno y restos de comida en tiraderos al aire libre y los lodos de albañal en cuerpos de agua, se determinan los microorganismos patógenos existentes en los residuales y los gases de efecto invernadero que producen, con las actividades siguientes:

i) Determinación de la existencia de microorganismos patógenos

La determinación de la existencia de microorganismos en la mezcla del proceso mediante la técnica del número más probable (NMP), se efectúa en dos vertientes:

- Corroborar la existencia de microorganismos específicos que afectan a la salud mediante pruebas bioquímicas, en esta investigación se consideran los *Coliformes*, *Vibrio Cholerae*, *Desulfovibrio* y *Salmonella*.
- la comparación del crecimiento de las bacterias anaerobias y el decaimiento de las bacterias aerobias, que permite observar la desaparición de las bacterias patógenas.

El esquema general de la determinación de la existencia de microorganismos en la mezcla del proceso se muestra en la figura 2.8, acorde con las normas CCAYAC-M-04, NOM-114-SSA1-1994 y pruebas bioquímicas básicas, se establecen las actividades siguientes:

- a) Se preparan y ponen en funcionamiento los biorreactores a las condiciones de mezcla en Sólidos Totales y temperaturas establecidas.
- b) Durante el proceso se toman 3 muestras de la mezcla en el digester de 30 ml cada una, una al inicio del proceso, la segunda a los 15 días y la tercera a los 30 días como se muestra en la figura 2.9.
- c) Se preparan las muestras en dilución 1:1 000

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

- d) Se esterilizan los tubos de ensaye a utilizar, en una autoclave
- e) Se siembran las muestras en los diferentes hagares y caldos de cultivo para los diferentes tipos de microorganismos a determinar
- f) Se determina la existencia o inexistencia de los microorganismos específicos mediante pruebas por duplicado con los pasos siguientes:
 - *Coliformes*
 - Preparar caldo de lauril triptosa a 36,5 g/l como medio
 - Tomar un mililitro de muestra en cada tubo para la primera toma de muestra y diez mililitros para la segunda y tercera toma de muestra, para los tres tubos de la primera dilución.
 - Transferir un mililitro de cada tubo de la primera dilución a tubos con diez mililitros de caldo lauril triptosa para la segunda dilución.
 - Introducir un mililitro de cada tubo de la segunda dilución en tubos con diez mililitros de caldo lauril triptosa para la tercera dilución.
 - Incubar los tubos a $35 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$.
 - Examinar a las 24 horas de incubación si en los tubos existe formación de gas.
 - Para la prueba confirmativa incorporar 1 mililitro de muestra de cada tubo positivo en la prueba presuntiva en tubos que contiene caldo de bilis verde brillante en la campana de Durham usando diez mililitros de lauril triptosa
 - Homogeneizar e incubar a $35 \pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas.
 - Registrar como positivos los tubos que presentan turbidez en el medio y producción de gas después del periodo de incubación

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

- *Salmonella ssp*

Para la determinación de *Salmonella spp.* se utilizan las técnicas de aislamiento de la norma oficial mexicana NOM-114-SSA1-1994, las pruebas son por duplicado.

- Preenriquecer en caldo lactosado preparado acorde a la norma NOM-114-SSA1-1994 una mezcla de la muestra analítica en una proporción de 1:9 de muestra/caldo en matraces erlenmeyer de 250 mililitros.
- Incubar los matraces por 24 horas a 35 °C.
- Transferir después de 24 horas un mililitro de caldo de preenriquecimiento al medio Vassiliadis-Rappaport manteniendo una proporción de 1:10.
- Incubar durante 24 horas a 35 °C.
- Aislar en agar *Salmonella-Shigella* a partir de las muestras en el medio Vassiliadis-Rappaport.
- Incubar durante 24 h a 36 °C.

- *Vibrio cholerae*

Para la determinación de la existencia de *Vibrio cholerae* se utiliza la metodología descrita por (Wells, 2003).

- Preenriquecer en agua peptonada alcalina con una mezcla de la muestra analítica en una proporción de 1:9 de muestra/caldo.
- Incubar durante 7 horas a 36 °C.
- Aislar en agar TCBS a partir de las muestras en agua peptonada alcalina.
- Incubar durante 24 horas a 36 °C.

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

- Realizar pruebas de confirmación bioquímicas en *medio* MIO y medio SIM a partir de las colonias crecidas en el agar TCBS que presentan una morfología típica de *Vibrio cholerae*.
- Incubar durante 24 horas a 36 °C.
- Interpretar los resultados de las pruebas bioquímicas en ambos medios
- Adicionar el reactivo de Kovac para la determinación de la prueba de indol.

- ***Desulfovibrio***

La determinación de la existencia de *Desulfovibrio* se utiliza la metodología descrita por (Gariboglio, 1993).

- Identificar las bacterias sulfato reductoras, entre los que se encuentra el género *Desulfovibrio* en un medio con lactato de sodio como fuente de carbono, utilizando como indicador positivo de la sulfato reducción la formación de un precipitado negro de sulfuro de fierro.
- Preparar cuatro tubos de ensayo con nueve mililitros de medio de cultivo.
- Introducir 1 mililitro de muestra líquida a tres tubos con medio y conservar un tubo como testigo control.
- Incubó a 41°C por 48 horas en anaerobiosis.
- Establecer como positivos los tubos que presentan precipitado negro de sulfuro de hierro

- **Microorganismos aerobios y anaerobios**

- Realizar tres tomas de muestras semanales y sembrar en el medio de tioglicolato para determinar la presencia de bacterias anaerobias y aerobias en el proceso
- Introducir un mililitro de muestra en tubos con 10 ml de medio de tioglicolato.
- Incubar a 36°C por 48 horas.

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

— Realizar la lectura de los tubos para determinar la presencia de las bacterias aerobias y anaerobias.

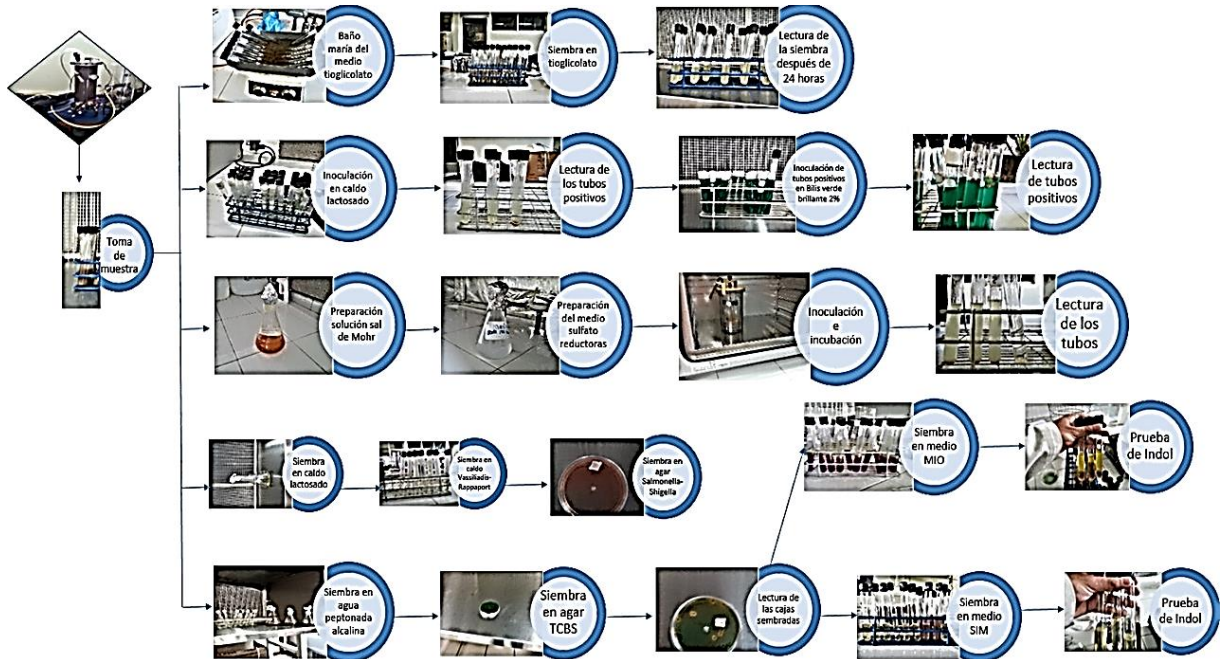


Figura 2. 7 Procedimiento para el aislamiento y determinación de los microorganismos

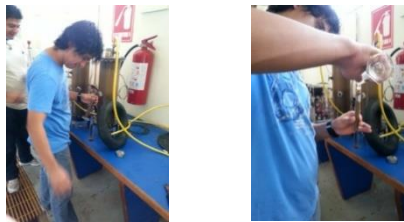


Figura 2. 8 Toma de muestra de reactores

ii) Valoración de los gases de efecto invernadero

Considerando a (Varnero Moreno, 2011) en su manual del biogás, (Brunner & Rechberger, 2015) en su análisis sobre el manejo sostenible de los residuales, (Arafat, Jijakli, & Ahsan, 2015) en su cuantificación de los impactos ambientales y recuperación del potencial energético considerada como la evaluación del ciclo de vida y (Toboso-Chavero, y otros, 2018) en su análisis de los beneficios de la recuperación de los gases de efecto invernadero, que también llaman el tiempo

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

de amortización del CO₂ equivalente en años (CO₂eq payback time in years); principalmente por la producción de metano que equivale a 21 veces el efecto del dióxido de carbono.

La valoración de los gases de efecto invernadero que producen las mezclas de los residuales en estudio por su disposición en tiraderos al aire libre se obtiene sumando las producciones de dióxido de carbono y metano que se multiplica por 21 en el biogás producido en los reactores de los eventos experimentales.

B). Fijar el impacto económico del proceso

El impacto económico del proceso consiste en tomar los resultados de producción de biogás y los sólidos totales que introducidos y residuales del reactor, elevando las cantidades de proceso a 4 500 kg de sólidos totales que corresponden a un biorreactor de la Universidad Veracruzana en su Facultad de Ciencias químicas Campus Coatzacoalcos, con capacidad para procesar 30 000 kg de masa total y 15 días de retención hidráulica debido a que es el tiempo máximo de persistencia de las bacterias patógenas encontrado en esta investigación. Considerando como ingresos los precios en México de los bioabonos \$50,00/kg y el gas natural \$81,02/m³, equiparados con los sólidos totales residuales y el biogás y, el cobro por el servicio de recolección que hace el municipio a los centros comerciales \$500,00/ton y los cobros por disposición del estiércol de ganado vacuno en predios \$750,00/ton; y, como inversión el costo de la instalación \$989 500,00 y egresos los impuestos 16% del ingreso bruto, la distribución 40% del ingreso bruto, el empaque \$7,00/bolsa de 5 kg, la amortización a 10 años, el mantenimiento 12% de la inversión/año y el salario de dos empleados \$15 960,00/mes.

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

C). Selección del grupo de expertos en proyectos e impacto ambiental

Para evaluar el factor de impacto ambiental se estructura un grupo de expertos con el método del panel de experto o método del coeficiente de Kendall acorde con (García Dihigo & Cisnero Gutiérrez, 2005), mediante los pasos siguientes:

- i) Elaborar listado de candidatos
- ii) Elaborar encuesta para evaluar el nivel de experiencia de los candidatos
- iii) Determinar el coeficiente de concordancia de Kendall
- iv) Elegir a los candidatos con valor de concordancia mayor o igual a 0,75 dado que el valor oscila entre 1 que es el nivel de concordancia de acuerdos total y 0 un desacuerdo total

D). Definición de un proyecto de mejora de la situación actual.

En esta parte se proyecta eliminar la disposición directa de los residuales al medioambiente, considerando su proceso anaerobio con los pasos siguientes:

- i) Efectuar reuniones con expertos
- ii) Definir las actividades para las fases de construcción, operación, mantenimiento y monitoreo

E). Valorar los impactos ambientales

Para valorar los impactos ambientales en las fases de construcción, operación, mantenimiento y monitoreo del proyecto a los medios abiótico, biótico y socioeconómico en reuniones con los expertos seleccionados se efectúan los pasos siguientes:

- i) Determinar de la existencia de impacto ambiental

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

- ii) Establecer la naturaleza e intensidad del impacto ambiental que puede ser negativo representado por “n” cuando es bajo y “N” cuando es alto, o positivo representado por “p” cuando es bajo y “P” cuando es alto
- iii) Valorar el impacto ambiental en la matriz de Leopold asignándole un valor de entre -5 y +5, asignando un factor de peso para cada factor ambiental que debe sumar 1 en cada medio, considerando los resultados de los eventos experimentales
- iv) Introducir los valores en la matriz de Leopold y determinar el factor de que va de -45 a +45

CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO

Al establecer la instalación experimental a nivel laboratorio, el diseño experimental, los métodos y actividades para el desarrollo del experimento, se establecen las conclusiones siguientes:

1. Con la instalación experimental a nivel laboratorio, la descripción del sistema y el diseño experimental correspondiente, se atiende el primer objetivo específico y reúnen los requisitos para la codigestión de los residuales en estudio; que es el objeto de esta investigación.
2. Con los procedimientos para el balance másico y la evaluación del efecto de las biomásas residuales sobre las cantidades producidas de biogás y digestato y, la condición de inhibición, se analiza la influencia de la proporción de las biomásas residuales en estudio sobre las cantidades producidas de biogás y digestato; correspondiente al segundo objetivo específico.
3. El procedimiento para determinar el coeficiente sinérgico en las diferentes mezclas de los residuales con los datos de producción de gases del balance másico, se obtienen los valores del coeficiente para mezclas de esos residuales, que concierne al tercer objetivo específico.

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

4. Los modelos para predecir las cantidades de biogás y digestato a obtener, se logran con el procedimiento que se constituye y los datos de producción de gases y residuales sólidos del balance másico; que atañe al cuarto objetivo específico.
5. El procedimiento que se instituye con auxilio del software definido permite optimizar las funciones de los modelos de predicción para obtener la máxima producción de biogás o digestato; relacionada con el quinto objetivo específico.
6. La recuperación del poder calorífico inferior de las mezclas de los residuales y la mejora de la sostenibilidad en su codigestión se determina con el procedimiento que se define; correspondiente al sexto objetivo específico de este trabajo de investigación.
7. Por todo lo anterior, se puede concluir que, con la instalación experimental, el diseño experimental, los métodos y actividades para el desarrollo de los eventos experimentales; se tienen las condiciones suficientes para el desarrollo de esta investigación, cumplir el objeto de la investigación, los objetivos generales y específicos, y dar respuesta a la interrogante de la investigación corroborando la hipótesis planteada.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

No es un resultado afortunado. Es el resultado que permite que nosotros estemos aquí para observarlo

Stephen William Hawking

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Conforme a las conclusiones del capítulo anterior, es indudable que, para obtener los modelos experimentales de la codigestión de mezclas de lodos de albañal, estiércol de ganado vacuno y restos de comida, predecir las cantidades de biogás y digestato a producir, optimizar las funciones obtenidas en los modelos para la producción máxima de biogás o digestato y determinar el potencial energético y manejo sostenible del proceso; es indispensable iniciar con el balance de materiales que aporta los datos requeridos en los procedimientos para ello.

3.1 BALANCE DE MATERIALES

Acorde con las consideraciones del sistema de la figura 2.4, los contenidos porcentuales de las mezclas de proceso y el orden del diseño del experimento en la tabla 2.3, mediante el procedimiento del capítulo anterior, se realiza el balance másico de materiales como sigue:

3.1.1 Determinar el contenido de humedad y sólidos totales y volátiles

Con el procedimiento del capítulo dos, se determina el contenido de humedad y, sólidos totales y volátiles a la mezcla de ingreso y el residual sólido de los reactores en los eventos experimentales con la balanza PMB 53 como punto de referencia y los procedimientos de la Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015, los resultados se muestran en la tabla 3.1.

3.1.2 Cantidades másicas de residual puro o mezcla de residuales y agua a introducir en el proceso

Considerando que los eventos experimentales con su réplica se efectúan con el 12,5 % de sólidos totales y reactores de la misma capacidad; con las ecuaciones 2.3 a 2.4 se obtiene la masa seca y húmeda del proceso, que dividida entre 2 corresponde a la masa de cada reactor del evento

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

correspondiente. La masa de agua se obtiene restando la masa húmeda al volumen del reactor. Los resultados se muestran en las tablas 3.2 y 3.3.

3.1.3 Cantidades másicas de los gases obtenidos en el proceso.

La conversión del volumen de los gases a masa, se realiza con las ecuaciones 2.7 a 2.9 y los datos de volumen de biogás producido del medidor de gas Kumho; corroborados con el flujómetro Dwyer y la medición del metano por absorción con la probeta pyrex de 250 mililitros y el cromatógrafo Agilent tech 3890B, con diferencias menores al 1,5 %; los resultados se muestran en las tablas 3.4, 3.5 y 3.6.

3.1.4 Cantidades másicas de los residuales.

Mediante la separación del sólido contenido en los residuales y el procedimiento establecido en el capítulo dos, se pesan los residuales líquido y sólido considerados como biofertilizantes, cuyos resultados se muestran en la tabla 3.7, en conjunto con el contenido de sólidos totales y volátiles introducidos al proceso.

3.1.5 Balance másico del proceso.

Con los datos obtenidos en los pasos anteriores, mediante la ecuación 2.10 se obtiene el balance másico del proceso que se muestra en el balance de materiales de la tabla 3.8.

El balance másico muestra diferencias menores al 0,5 por ciento cuyo promedio es 0,21 por ciento en los reactores de los eventos experimentales, tal como se observa en la figura 3.1, debido a los redondeos y la conversión de los volúmenes de los gases a masa; por lo que se considera que se cumple con la Ley de la Conservación de la masa y sus resultados ofrecen certeza.

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3. 1 Contenido porcentual de humedad y sólidos totales y volátiles en la mezcla de carga por Reactor de cada evento experimental

Evento	Reactores	Porcentaje		
		Humedad	Sólidos totales	Sólidos Volátiles
Bact 40 °C 1	4 y 5	41,09	58,91	24,31
Bact 50 °C 2	1 y 6	62,77	37,23	41,77
Bact 40 °C 3	2 y 3	44,05	55,95	22,25
Bact 50 °C 4	3 y 5	62,05	37,95	43,69
Bact 50 °C 5	1 y 3	80,68	19,32	63,20
6	1 y 2	78,12	21,88	57,31
7	3 y 4	76,96	23,04	56,94
8	5 y 6	76,8	23,20	58,56
9	1 y 2	24,99	75,01	2,75
10	3 y 5	81,84	18,16	61,56
11	1 y 2	76,75	23,25	67,78
12	1 y 3	66,74	33,26	45,76
13	3 y 5	70,24	29,76	51,24
14	4 y 6	73,35	26,65	53,81
15	1 y 3	75,76	24,24	57,67
16	2 y 4	74,92	25,08	57,10
17	5 y 6	72,83	27,17	54,66

Tabla 3. 2 Proporciones base seca (sólidos totales) de la mezcla de carga por Reactor

Evento	Reactores	Masa base seca de la mezcla a introducir por reactor (gramos)			
		Lodos de albañal	Estiércol de ganado vacuno	Restos de comida	Total
Bact 40 °C 1	4 y 5	2 314,10	0,00	1 157,40	3 471,50
Bact 50 °C 2	1 y 6	1 333,47	2 667,34	0,00	4 000,82
Bact 40 °C 3	2 y 3	2 262,57	1 131,62	0,00	3 394,19
Bact 50 °C 4	3 y 5	909,90	910,18	909,90	2 729,98
Bact 50 °C 5	1 y 3	0,00	1 320,90	660,35	1 981,25
6	1 y 2	64,75	258,48	324,26	647,49
7	3 y 4	94,57	230,58	330,65	655,80
8	5 y 6	126,02	220,77	284,88	631,67
9	1 y 2	625,62	0,00	0,00	625,62
10	3 y 5	0,00	508,94	0,00	508,94
11	1 y 2	0,00	0,00	625,63	625,63
12	1 y 3	190,60	254,13	190,60	635,33
13	3 y 5	126,49	317,67	190,60	632,45
14	4 y 6	94,75	317,67	222,37	631,67
15	1 y 3	62,75	317,67	254,13	627,45
16	2 y 4	63,08	285,90	285,90	630,81
17	5 y 6	94,42	285,90	254,13	629,48

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3. 3 Cantidades máxicas base seca (sólidos totales), húmeda y agua en la mezcla de carga por Reactor de cada evento experimental

Evento	Reactores	Masa de mezcla a introducir por reactor (gramos)			
		Sólidos totales	Mezcla húmeda	Agua	Total
Bact 40 °C 1	4 y 5	3 471,50	5 892,89	17 250,45	23 143,34
Bact 50 °C 2	1 y 6	4 000,82	10 746,23	15 925,91	26 672,14
Bact 40 °C 3	2 y 3	3 394,19	6 066,47	16 561,46	22 627,93
Bact 50 °C 4	3 y 5	2 729,98	7 193,62	11 006,24	18 199,86
Bact 50 °C 5	1 y 3	1 981,25	10 254,92	2 953,42	13 208,34
6	1 y 2	647,49	2 959,28	2 788,21	5 747,49
7	3 y 4	655,80	2 846,35	2 909,45	5 755,80
8	5 y 6	631,67	2 722,72	3 008,95	5 731,67
9	1 y 2	625,62	834,05	4 891,57	5 725,62
10	3 y 5	508,94	2 802,53	2 806,41	5 608,94
11	1 y 2	625,63	2 690,88	3 034,75	5 725,63
12	1 y 3	635,33	1 910,19	3 825,14	5 735,33
13	3 y 5	632,45	2 125,17	3 607,28	5 732,45
14	4 y 6	631,67	2 370,24	3 361,43	5 731,67
15	1 y 3	627,45	2 588,49	3 138,96	5 727,45
16	2 y 4	630,81	2 515,19	3 215,62	5 730,81
17	5 y 6	629,48	2 316,82	3 412,66	5 729,48

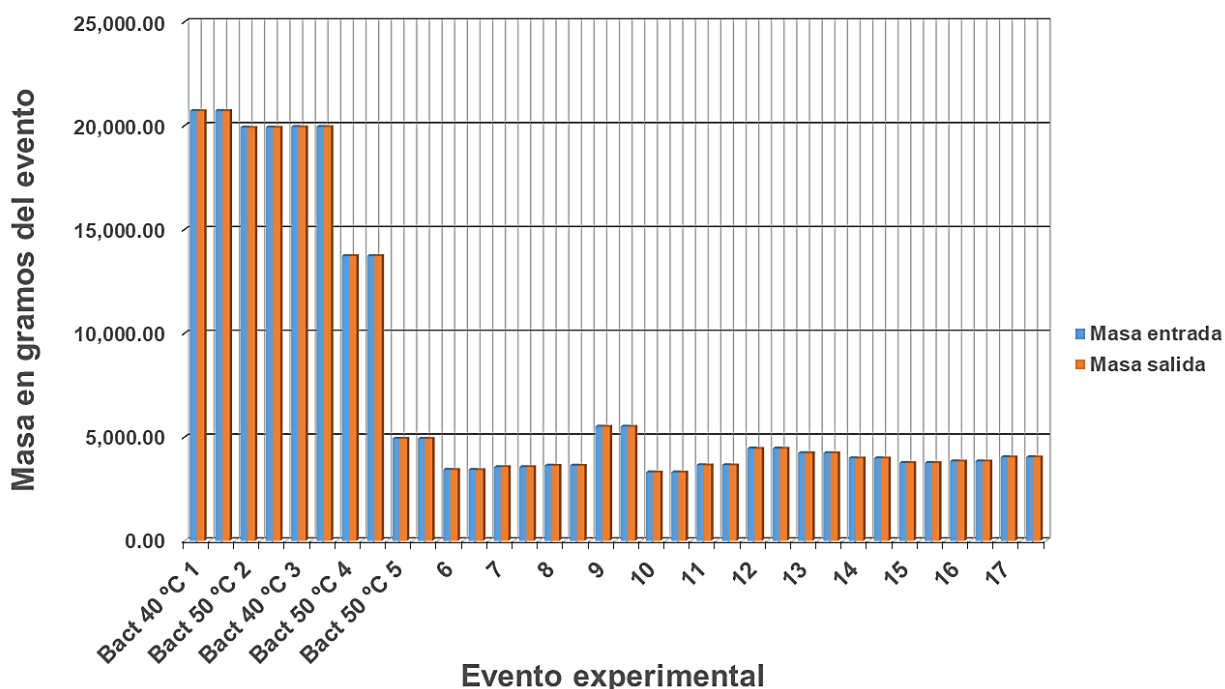


Figura 3. 1 Comparación de las cantidades de masa entrada y salida en los reactores de los eventos experimentales

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3. 4 volumen medido y por gramo de gases por Reactor de cada evento experimental

Evento	Reactor	gramos Mezcla	Mililitros de gases acumulados		Mililitros de gases/gramo	
			Biogás	Metano	Biogás	Metano
Bact 40 °C 1	4	3 471,50	13 200,00	8 514,00	3,80	2,45
	5	3 471,50	13 203,00	8 516,00	3,80	2,45
Bact 50 °C 2	1	4 000,82	32 100,00	23 594,00	8,02	5,90
	6	4 000,82	32 102,00	23 595,00	8,02	5,90
Bact 40 °C 3	2	3 394,19	15 400,00	9 858,00	4,54	2,90
	3	3 394,19	15 400,00	9 858,00	4,54	2,90
Bact 50 °C 4	3	2 729,98	25 430,00	18 564,00	9,32	6,80
	5	2 729,98	25 431,00	18 565,00	9,32	6,80
Bact 50 °C 5	1	1 981,25	21 970,00	16 258,00	11,09	8,21
	3	1 981,25	21 970,00	16 258,00	11,09	8,21
6	1	647,49	3 823,00	2 904,00	5,90	4,49
	2	647,49	3 825,00	2 890,00	5,91	4,46
7	3	655,80	0,00	0,00	0,00	0,00
	4	655,80	0,00	0,00	0,00	0,00
8	5	631,67	5 947,00	4 504,00	9,41	7,13
	6	631,67	5 935,00	4 501,00	9,40	7,13
9	1	625,62	42,00	30,00	0,07	0,05
	2	625,62	40,00	29,00	0,06	0,05
10	3	508,94	5 329,00	3 884,00	10,47	7,63
	5	508,94	5 323,00	3 879,00	10,46	7,62
11	1	625,63	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	625,63	0,00	0,00	0,00	0,00
12	1	635,33	4 822,00	3 636,00	7,59	5,72
	3	635,33	4 822,00	3 636,00	7,59	5,72
13	3	632,45	5 572,00	4 168,00	8,81	6,59
	5	632,45	5 571,00	4 167,00	8,81	6,59
14	4	631,67	5 935,00	4 501,00	9,40	7,13
	6	631,67	5 934,00	4 500,00	9,39	7,12
15	1	627,45	6 262,00	4 689,00	9,98	7,47
	3	627,45	6 262,00	4 689,00	9,98	7,47
16	2	630,81	6 024,00	4 493,00	9,55	7,12
	4	630,81	6 023,00	4 492,00	9,55	7,12
17	6	629,48	5 741,00	4 291,00	9,12	6,82
	5	629,48	5 742,00	4 292,00	9,12	6,82

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3. 5 Volumen medido y equivalente másico de la producción de gases por Reactor de cada evento experimental

Evento	Reactor	Producción de gases					
		Mililitros acumulados			Gramos acumulados		
		Biogás	Dióxido de carbono	Metano	Biogás	Dióxido de carbono	Metano
Bact 40 °C 1	4	13 200,00	4 686,00	8 514,00	9,32	5,61	3,71
	5	13 203,00	4 687,00	8 516,00	9,32	5,61	3,71
Bact 50 °C 2	1	32 100,00	8 506,00	23 594,00	20,47	10,18	10,29
	6	32 102,00	8 507,00	23 595,00	20,47	10,18	10,29
Bact 40 °C 3	2	15 400,00	5 542,00	9 858,00	10,93	6,63	4,30
	3	15 400,00	5 542,00	9 858,00	10,93	6,63	4,30
Bact 50 °C 4	3	25 430,00	6 866,00	18 564,00	16,31	8,22	8,10
	5	25 431,00	6 866,00	18 565,00	16,31	8,22	8,10
Bact 50 °C 5	1	21 970,00	5 712,00	16 258,00	13,92	6,83	7,09
	3	21 970,00	5 712,00	16 258,00	13,92	6,83	7,09
6	1	3 823,00	919,00	2 904,00	2,37	1,10	1,27
	2	3 825,00	935,00	2 890,00	2,38	1,12	1,26
7	3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	5	5 947,00	1 443,00	4 504,00	3,69	1,73	1,96
	6	5 935,00	1 434,00	4 501,00	3,68	1,72	1,96
9	1	42,00	12,00	30,00	0,03	0,01	0,01
	2	40,00	11,00	29,00	0,03	0,01	0,01
10	3	5 329,00	1 445,00	3 884,00	3,42	1,73	1,69
	5	5 323,00	1 444,00	3 879,00	3,42	1,73	1,69
11	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	1	4 822,00	1 186,00	3 636,00	3,00	1,42	1,59
	3	4 822,00	1 186,00	3 636,00	3,00	1,42	1,59
13	3	5 572,00	1 404,00	4 168,00	3,50	1,68	1,82
	5	5 571,00	1 404,00	4 167,00	3,50	1,68	1,82
14	4	5 935,00	1 434,00	4 501,00	3,68	1,72	1,96
	6	5 934,00	1 434,00	4 500,00	3,68	1,72	1,96
15	1	6 262,00	1 573,00	4 689,00	3,93	1,88	2,04
	3	6,262,00	1 573,00	4 689,00	3,93	1,88	2,04
16	2	6 024,00	1 531,00	4 493,00	3,79	1,83	1,96
	4	6 023,00	1 531,00	4 492,00	3,79	1,83	1,96
17	6	5 741,00	1 450,00	4 291,00	3,61	1,73	1,87
	5	5 742,00	1 450,00	4 292,00	3,61	1,73	1,87

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3. 6 Producción másica de gases por kilogramo de sólidos totales por Reactor de cada evento experimental

Evento	Reactor	Producción de gases		
		Gramos por kilogramo de sólidos totales		
		Biogás	Dióxido de carbono	Metano
Bact 40 °C 1	4	2,68	1,62	1,07
	5	2,68	1,62	1,07
Bact 50 °C 2	1	5,12	2,54	2,57
	6	5,12	2,54	2,57
Bact 40 °C 3	2	3,22	1,95	1,27
	3	3,22	1,95	1,27
Bact 50 °C 4	3	5,97	3,01	2,97
	5	5,97	3,01	2,97
Bact 50 °C 5	1	7,03	3,45	3,58
	3	7,03	3,45	3,58
6	1	3,66	1,70	1,96
	2	3,68	1,73	1,95
7	3	0,00	0,00	0,00
	4	0,00	0,00	0,00
8	5	5,84	2,74	3,10
	6	5,83	2,72	3,10
9	1	0,05	0,02	0,02
	2	0,05	0,02	0,02
10	3	6,72	3,40	3,32
	5	6,72	3,40	3,32
11	1	0,00	0,00	0,00
	2	0,00	0,00	0,00
12	1	4,72	2,24	2,50
	3	4,72	2,24	2,50
13	3	5,53	2,66	2,88
	5	5,53	2,66	2,88
14	4	5,83	2,72	3,10
	6	5,83	2,72	3,10
15	1	6,26	3,00	3,25
	3	6,26	3,00	3,25
16	2	6,01	2,90	3,11
	4	6,01	2,90	3,11
17	6	5,73	2,75	2,97
	5	5,73	2,75	2,97

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3. 7 Cantidades másicas de sólidos ingresados al proceso y residuales con su contenido de sólidos volátiles

Evento	Reactor	Mezcla de entrada		Residual sólido (biofertilizante)		Residual líquido (biofertilizante)
		Sólidos (gramos)		Sólidos		
		Totales	Volátiles	Totales	Volátiles	
Bact 40 °C 1	4	3 471,50	843,86	2 414,27	545,30	18 283,45
	5	3 471,50	843,86	2 414,27	545,30	18 288,35
Bact 50 °C 2	1	4 000,82	1 671,04	1 693,96	2,24	18 190,45
	6	4 000,82	1 671,04	1 693,97	2,24	18 195,70
Bact 40 °C 3	2	3 394,19	755,28	2 365,79	12,05	17 560,38
	3	3 394,19	755,28	2 365,79	12,05	17 565,65
Bact 50 °C 4	3	2 729,98	1 192,70	1 151,61	104,1	12 559,54
	5	2 729,98	1 192,70	1 151,61	103,95	12 558,66
Bact 50 °C 5	1	1 981,25	1 252,13	293,69	109,3	4 618,33
	3	1 981,25	1 252,13	293,69	109,25	4 616,57
6	1	647,49	371,09	276,22	202,03	3 146,45
	2	647,49	371,09	268,97	196,95	3 149,65
7	3	655,80	373,44	655,8	373,44	2 909,45
	4	655,80	373,44	655,8	373,44	2 909,45
8	5	631,67	369,88	117,43	100,3	3 508,44
	6	631,67	369,88	131,21	112,62	3 495,67
9	1	625,62	17,18	607,31	0,30	4 898,45
	2	625,62	17,18	606,4	0,41	4 899,56
10	3	508,94	313,32	76,24	0,16	3,224,67
	5	508,94	313,32	76,24	0,17	3 225,55
11	1	625,63	424,08	625,63	424,08	3 022,78
	2	625,63	424,08	625,63	424,08	3 023,08
12	1	635,33	290,73	250,74	110,52	4 194,95
	3	635,33	290,73	250,74	110,49	4 195,88
13	3	632,45	324,09	198,03	76,24	4 027,66
	5	632,45	324,09	198,03	76,26	4 028,05
14	4	631,67	339,89	171,83	60,86	3 806,88
	6	631,67	339,89	171,83	60,86	3 807,55
15	1	627,45	361,87	145,37	39,87	3 607,05
	3	627,45	361,87	145,37	39,87	3 606,88
16	2	630,81	360,18	145,54	42,39	3 686,98
	4	630,81	360,18	145,54	42,39	3 686,56
17	6	629,48	344,05	171,36	36,01	3 856,89
	5	629,48	344,05	171,36	36,01	3 856,35

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3. 8 Balance másico por Reactor de cada evento experimental

Evento	Reactor	Entrada (gramos)		Salida (gramos)		
		Biomasa base seca	Agua introducida	Biofertilizante sólido base seca	Biofertilizante líquido	Biogás
Bact 40 °C 1	4	3 471,50	17 250,45	2 414,27	18 283,45	9,32
	5	3 471,50	17 250,45	2 414,27	18 288,35	9,32
Bact 50 °C 2	1	4 000,82	15 925,91	1 693,96	18 190,45	20,47
	6	4 000,82	15 925,91	1 693,97	18 195,70	20,47
Bact 40 °C 3	2	3 394,19	16 561,46	2 365,79	17 560,38	10,93
	3	3 394,19	16 561,46	2 365,79	17 565,65	10,93
Bact 50 °C 4	3	2 729,98	11 006,24	1 151,61	12 559,54	16,31
	5	2 729,98	11 006,24	1 151,61	12 558,66	16,31
Bact 50 °C 5	1	1 981,25	2 953,42	293,69	4 618,33	13,92
	3	1 981,25	2 953,42	293,69	4 616,57	13,92
6	1	647,49	2788,21	276,22	3 146,45	2,37
	2	647,49	2 788,21	268,97	3 149,65	2,38
7	3	655,80	2 909,45	655,80	2 909,45	0,00
	4	655,80	2 909,45	655,80	2 909,45	0,00
8	5	631,67	3 008,95	117,43	3 508,44	3,69
	6	631,67	3 008,95	131,21	3 495,67	3,68
9	1	625,62	4 891,57	607,31	4 898,45	0,03
	2	625,62	4 891,57	606,40	4 899,56	0,03
10	3	508,94	2 806,41	76,24	3 224,67	3,42
	5	508,94	2 806,41	76,24	3 225,55	3,42
11	1	625,63	3 034,75	625,63	3 022,78	0,00
	2	625,63	3 034,75	625,63	3 023,08	0,00
12	1	635,33	3 825,14	250,74	4 194,95	3,00
	3	635,33	3 825,14	250,74	4 195,88	3,00
13	3	632,45	3 607,28	198,03	4 027,66	3,50
	5	632,45	3 607,28	198,03	4 028,05	3,50
14	4	631,67	3 361,43	171,83	3 806,88	3,68
	6	631,67	3 361,43	171,83	3 807,55	3,68
15	1	627,45	3 138,96	145,37	3 607,05	3,93
	3	627,45	3 138,96	145,37	3 606,88	3,93
16	2	630,81	3 215,62	145,54	3 686,98	3,79
	4	630,81	3 215,62	145,54	3 686,56	3,79
17	6	629,48	3 412,66	171,36	3 856,89	3,61
	5	629,48	3 412,66	171,36	3 856,35	3,61

3.2 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA PROPORCIÓN DE LAS BIOMASAS RESIDUALES SOBRE LAS CANTIDADES PRODUCIDAS DE BIOGÁS, EL DIGESTATO Y LA CONDICIÓN DE INHIBICIÓN

Con los datos del balance de materiales en la tabla 3.6 para los eventos de codigestión de las tres biomasa residuales en estudio y el software excel se obtiene una gráfica de la producción de gas y residuales sólidos o digestato, que ofrece una vista sencilla de las producciones de biogás y digestato con las diferentes proporciones; el resultado se muestra en la figura 3.2.

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el software Minitab 17 y los datos mencionados, se desarrolla una gráfica de superficie de los eventos experimentales de codigestión, que se muestra en la figura 3.3, en la que se observa el efecto de sus proporciones en la producción de biogás y la condición de inhibición.

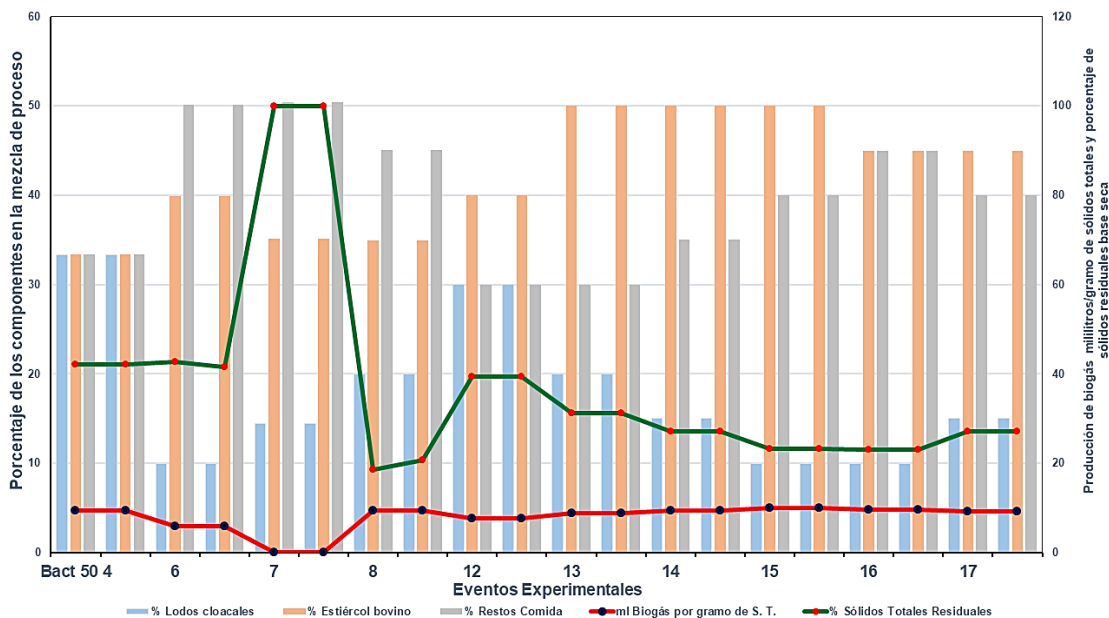


Figura 3. 2 Producción de biogás por gramo de sólidos totales y por ciento de sólidos totales residuales en los reactores de los eventos experimentales de codigestión

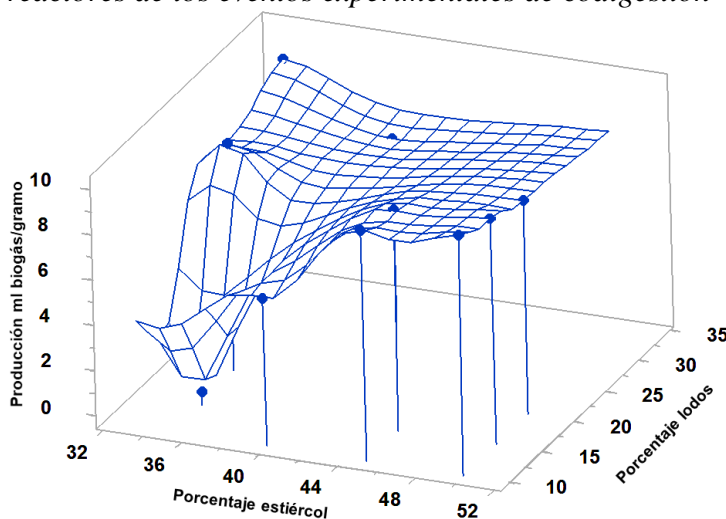


Figura 3. 3 Superficie de la producción de biogás producida por las proporciones de los residuales en los eventos experimentales de codigestión

Como se observa en el gráfico de la figura 3.2 la condición de inhibición se encuentra en los reactores del evento experimental siete cuyas proporciones en porcentaje son: 14,42 de lodos de

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

albañal, 35,16 de estiércol de ganado vacuno y 50,42 de restos de comida y que la producción de biogás aumenta y disminuye el residual de sólidos totales con el incremento en la proporción de estiércol de ganado vacuno y la disminución en la proporción de restos de comida; en la gráfica de la figura 3.3 se aprecia el mismo punto de la condición de inhibición y que el incremento en la proporción de estiércol de ganado vacuno en conjunto con la disminución de la proporción de restos de comida incrementan la producción de biogás.

3.3 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE SINÉRGICO PARA DIFERENTES MEZCLAS DE LOS TIPOS DE BIOMASA RESIDUAL SELECCIONADOS

Acorde con el procedimiento establecido, el coeficiente sinérgico se obtiene con la ecuación 2.12 y los datos del volumen acumulado de biogás o metano del evento experimental correspondiente, las producciones por gramo de los residuales puros de la tabla 3.4 y los gramos de los residuales en la mezcla que se muestran en la tabla 3.2; los resultados se exponen en la tabla 3.9.

Acorde con la tabla 3.6, correspondiente al balance de materiales el evento experimental once en el que se procesa restos de comida como residual puro no produce biogás; lo que significa que requieren de inóculo o de otros residuales que produzcan un efecto sinérgico sobre ellos. La figura 3.4 muestra que los lodos de albañal y el estiércol ganado vacuno ejercen un efecto sinérgico sobre los restos de comida que permite la producción de biogás a partir del punto inhibitorio.

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3. 9 Coeficiente sinérgico por Reactor de cada evento experimental

Evento	Reactor	Factor del Efecto Sinérgico	
		Biogás	Metano
Bact 50 °C 4	3	2,65	2,66
	5	2,65	2,66
6	1	1,41	1,47
	2	1,41	1,46
7	3	0,00	0,00
	4	0,00	0,00
8	5	2,56	2,66
	6	2,56	2,66
12	1	1,80	1,87
	3	1,80	1,87
13	3	1,67	1,71
	5	1,67	1,71
14	4	1,78	1,85
	6	1,78	1,85
15	1	1,88	1,93
	3	1,88	1,93
16	2	2,01	2,06
	4	2,01	2,06
17	6	1,91	1,96
	5	1,91	1,96

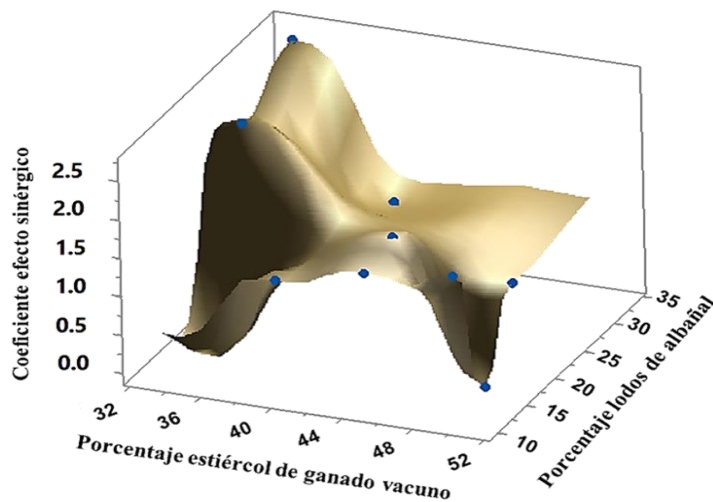


Figura 3. 4 Superficie del efecto sinérgico de los lodos del estiércol de ganado vacuno y los lodos de albañal sobre los restos de comida en la producción de biogás en su codigestión

Como se observa en las tablas 3.2 y 3.9 y, la figura 3.4; a partir de la condición de inhibición, al disminuir la proporción de restos de comida e incrementar las proporciones de lodos de albañal y estiércol de ganado vacuno se incrementa el coeficiente sinérgico, que representa la capacidad del proceso de producir biogás con los restos de comida. Lo anterior permite afirmar que al procesar

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

los residuales en diferentes combinaciones existe una interrelación entre ellos que provoca un efecto sinérgico, que permite una mayor producción de biogás.

3.4 OBTENCIÓN DE MODELOS EXPERIMENTALES DEL PROCESO DE CODIGESTIÓN DE LAS MEZCLAS PARA PREDECIR LAS CANTIDADES DE BIOGÁS DIGESTATO A OBTENER

Mediante el procedimiento que se define en el capítulo anterior, se establecen los modelos que permiten predecir las cantidades a obtener de biogás y digestato en los eventos experimentales en que se codigieren los tres residuales en estudio; estableciendo los eventos 16 y 17 para comprobación del modelo.

Los modelos adoptados para las producciones de biogás acumulada y por gramo de sólidos totales se muestran en las correspondientes ecuaciones 3.1 y 3.2 y el adoptado para la cantidad de digestato en la ecuación 3.3; todos correspondientes al análisis del modelo de superficie central compuesto completo, sin bloques creado para ello sin transformación de Box–Cox, con términos cuadrático completo. Las predicciones de los modelos sobre las cantidades de biogás y digestato a obtener comparadas con las producciones experimentales y sus errores y error medio cuadrático calculado mediante la ecuación 3.4, se muestran en las tablas 3.10 y 3.11.

$$Biog_{acum} = 174\,632 + (178,20 * gL) - (1\,902,84 * gE) + (728,8 * gRC) - (0,6932 * (gL)^2) + (2,5923 * (gE)^2) - (1,5729 * (gRC)^2) + (1,8337 * gL * gE) - (2,2626 * gL * gRC) + (1,0150 * gE * gRC) \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.1}$$

$$Biog_{gramo} = 385,90 + (0,27964 * gL) - (2,80380 * gE) + (0,3205 * gRC) - (0,001358 * (gL)^2) + (0,003499 * (gE)^2) - (0,001455 * (gRC)^2) + (0,002036 * gL * gE) - (0,002818 * gL * gRC) + (0,002061 * gE * gRC) \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.2}$$

$$Digest = -33\,022 - (51,05 * gL) + (226,49 * gE) + (18 * gRC) + (0,1628 * (gL)^2) - (0,2741 * (gE)^2) + (0,0545 * (gRC)^2) - (0,1107 * gL * gE) + (0,2186 * gL * gRC) + (0,2222 * gE * gRC) \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.3}$$

$$ERCM = \left(\frac{1}{n} * \sum_{k=1}^n |Error|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.4}$$

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Donde:

<i>Biog_{acum}</i>	es la cantidad de biogás acumulada en mililitros
<i>Biog_{gramo}</i>	es la cantidad de biogás acumulada en mililitros por gramo de sólidos totales introducidos
<i>Digest</i>	es la cantidad en gramos de sólidos totales residuales llamados digestato
<i>gL</i>	es la cantidad en gramos de sólidos totales de Lodos cloacales en la mezcla
<i>gE</i>	es la cantidad en gramos de sólidos totales de Estiércol bovino en la mezcla
<i>gRC</i>	es la cantidad en gramos de sólidos totales de Restos de comida en la mezcla
<i>ERCM</i>	es el error cuadrático medio calculado
<i>Error</i>	es la diferencia entre el resultado experimental y el calculado con el modelo
<i>n</i>	es el número de eventos considerados en el cálculo del error

Tabla 3. 10 Cantidades de producción de biogás calculadas con los modelos y el error respecto a las producciones experimentales por Reactor de cada evento experimental

Evento	Reactor	Producción mililitros de biogás				Porcentaje de error		
		Experimental		Calculado con modelo		Producción		
		Acumulado	Por gramo	Acumulado	Por gramo	Acumulado	Por gramo	
Bact 50 4	3	25 430	9,32	25 340,85	9,69	0,35	3,98	
	5	25 431	9,32	25 340,85	9,69	0,35	3,98	
6	1	3 823	5,90	3 810,06	5,95	0,34	0,91	
	2	3 825	5,91	3 810,06	5,95	0,39	0,73	
7	3	0	0,00	-13,52	0,04	0,00	0,00	
	4	0	0,00	-13,52	0,04	0,00	0,00	
8	5	5 947	9,41	5 930,34	9,44	0,28	0,30	
	6	5 935	9,40	5 930,34	9,44	0,08	0,41	
12	1	4 822	7,59	4 816,28	7,61	0,12	0,29	
	3	4 822	7,59	4 816,28	7,61	0,12	0,29	
13	3	5 572	8,81	5 563,68	8,85	0,15	0,46	
	5	5 571	8,81	5 563,68	8,85	0,13	0,46	
14	4	5 935	9,40	5 924,68	9,44	0,17	0,42	
	6	5 934	9,39	5 924,68	9,44	0,16	0,53	
15	1	6 262	9,98	6 250,24	10,03	0,19	0,49	
	3	6 262	9,98	6 250,24	10,03	0,19	0,49	
16	2	6 024	9,55	6 010,92	9,60	0,22	0,48	
	4	6 023	9,55	6 010,92	9,60	0,20	0,48	
17	6	5 741	9,12	5 730,82	9,16	0,18	0,47	
	5	5 742	9,12	5 730,82	9,16	0,19	0,47	
% ERROR MEDIO CUADRÁTICO						$ERCM = \left(\frac{1}{n} * \sum_{k=1}^n Error ^2 \right)^{\frac{1}{2}}$	0,32	1,35

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3. 11 Cantidades de producción de digestato calculadas con el modelo y el error respecto a Las producciones experimentales por Reactor de cada evento experimental

Evento	Reactor	Producción digestato gramos		Porcentaje error
		Experimental	Calculada modelo	
Bact 50 4	3	1 151,61	1 171,20	1,70
	5	1 151,61	1 171,20	1,70
6	1	276,22	265,43	3,91
	2	268,97	265,43	1,32
7	3	655,80	648,10	1,17
	4	655,80	648,10	1,17
8	5	117,43	116,94	0,42
	6	131,21	116,94	10,88
12	1	250,74	245,43	2,12
	3	250,74	245,43	2,12
13	3	198,03	192,95	2,57
	5	198,03	192,95	2,57
14	4	171,83	166,20	3,28
	6	171,83	166,20	3,28
15	1	145,37	139,38	4,12
	3	145,37	139,38	4,12
16	2	145,54	138,98	4,51
	4	145,54	138,98	4,51
17	6	171,36	165,06	3,67
	5	171,36	165,06	3,67
% ERROR MEDIO CUADRÁTICO		$ERCM = \left(\frac{1}{n} * \sum_{k=1}^n Error ^2 \right)^{\frac{1}{2}}$		3,80

Como se observa en las tablas 3.10 y 3.11 los modelos tienen un buen ajuste respecto a los datos experimentales, con errores promedio relativos y medio cuadrático para las producciones de: biogás acumulada 0,19 y 0,22, por gramo de biogás 0,79 y 1,35 y, digestato 3,14 y 3,80 respectivamente.

3.5 OPTIMIZACIÓN DE LAS FUNCIONES OBTENIDAS EN LOS MODELOS PARA LA MÁXIMA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS O DIGESTATO

Con las ecuaciones de los modelos de comportamiento del proceso, el procedimiento definido en el capítulo dos, el software Lingo 17.0 y las restricciones en el diseño del experimento en fracción

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

o porcentaje de la mezcla de 100 gramos siguientes lodos cloacales ≤ 30 ; restos de comida ≤ 50 ; estiércol de ganado vacuno ≥ 30 ; lodos cloacales + restos de comida ≤ 60 ; lodos cloacales + estiércol de ganado vacuno ≤ 70 ; estiércol de ganado vacuno + restos de comida ≤ 90 y lodos cloacales + restos de comida + estiércol de ganado vacuno = 100. Los puntos determinados son para las producciones de: biogás acumulado y por gramo de sólidos totales introducidos lodos cloacales = 10; estiércol de ganado vacuno = 40 y restos de comida = 50 y digestato sólidos totales introducidos lodos cloacales = 10; estiércol de ganado vacuno = 60 y restos de comida = 30.

En los resultados se observa que el punto que se determina para la máxima producción de biogás es efectivamente el de mayor producción al coincidir con el del evento experimental 6.

3.6 DETERMINAR LA RECUPERACIÓN DEL PODER CALORÍFICO INFERIOR DE LAS MEZCLAS DE LOS RESIDUALES Y LA MEJORA DE LA SOSTENIBILIDAD EN SU CODIGESTIÓN

Empleando los datos del balance másico y el procedimiento que se describe en el capítulo dos, se determina la recuperación del poder calorífico inferior de las mezclas de residuales codigeridas y la mejora en la sostenibilidad que ofrece el proceso, acorde a las actividades siguientes:

3.6.1 Recuperación del poder calorífico inferior de las mezclas de proceso

Con los datos del contenido de humedad, sólidos totales y volátiles y, el índice de carbono fijo determinados con las ecuaciones 2.13 a 2.15, la metodología del análisis inmediato, el contenido porcentual de combustible puro que se obtiene con la ecuación 2.16, el porcentaje de poder calorífico superior de los volátiles determinado con la ecuación 2.17 y la ecuación de Goutal expresada como la ecuación 2.18 se establece el poder calorífico superior de la mezcla de proceso, con los resultados que se muestran en la tabla 3.12.

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3. 12 Índices, porcentajes y poder calorífico superior de las mezclas en los reactores de cada evento experimental

Evento	Reactor	Índices			Volátiles puros (V')	Porcentaje del PCS de volátiles (α)	Poder Calorífico Superior (PCS)	Porcentaje de Hidrógeno en volátiles (F_h)
		Humedad (W_i)	Volátiles (V)	Carbono Fijo (CF)				
Bact 50 °C 4	3	0,6205	0,1658	0,2137	43,69	80,91	12 944,45	0,0286
	5	0,6205	0,1658	0,2137	43,69	80,91	12 944,45	0,0286
6	1	0,7812	0,1254	0,0934	57,31	71,90	6 976,82	0,0100
	2	0,7812	0,1254	0,0934	57,31	71,90	6 976,82	0,0100
7	3	0,7696	0,1312	0,0992	56,94	72,11	7 362,04	0,0119
	4	0,7696	0,1312	0,0992	56,94	72,11	7 362,04	0,0119
8	5	0,7680	0,1359	0,0962	58,56	71,19	7 345,05	0,0129
	6	0,7680	0,1359	0,0962	58,56	71,19	7 345,05	0,0129
12	1	0,6674	0,1522	0,1804	45,76	79,37	11 243,66	0,0229
	3	0,6674	0,1522	0,1804	45,76	79,37	11 243,66	0,0229
13	3	0,7024	0,1525	0,1451	51,24	75,61	9 802,88	0,0206
	5	0,7024	0,1525	0,1451	51,24	75,61	9 802,88	0,0206
14	4	0,7335	0,1434	0,1231	53,81	73,99	8 662,91	0,0167
	6	0,7335	0,1434	0,1231	53,81	73,99	8 662,91	0,0167
15	1	0,7576	0,1398	0,1026	57,67	71,69	7 713,48	0,0144
	3	0,7576	0,1398	0,1026	57,67	71,69	7 713,48	0,0144
16	2	0,7492	0,1432	0,1076	57,10	72,02	8 006,97	0,0156
	4	0,7492	0,1432	0,1076	57,10	72,02	8 006,97	0,0156
17	6	0,7283	0,1485	0,1232	54,66	73,47	8 792,02	0,0180
	5	0,7283	0,1485	0,1232	54,66	73,47	8 792,02	0,0180

Para determinar el poder calorífico inferior de la mezcla, se introducen los valores del poder calorífico superior de la mezcla, el índice de humedad de la mezcla, y el porcentaje de hidrógeno determinado para la mezcla de la tabla 3.12 en la ecuación 2.19, que relaciona los poderes caloríficos superior e inferior; los resultados se muestran en la tabla 3.13.

La energía recuperada con el proceso de codigestión se obtiene mediante las ecuaciones 2.20 a 2.23, sumando en la ecuación 2.23 la energía recuperada por la producción de metano que se obtiene con la ecuación 2.20 y la energía ahorrada por el biofertilizante que representan los sólidos totales residuales considerados como nitrato de amonio sólido fertilizante y su calor de formación a condiciones estándar que se determina con las ecuaciones 2.21 y 2.22; obteniendo el porcentaje de energía recuperada con la ecuación 2.24, los resultados se muestran en la tabla 3.13.

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3. 13 Comparación del poder calorífico inferior de las mezclas con la recuperación y ahorro de energía por producción de metano y residuales en los eventos experimentales

Evento	Reactor	PCI de la mezcla (kJ/kg)	Recuperación (kJ/kg)		Ahorro (kJ/kg)		Total (kJ/kg)	% del <i>PCI</i>
			Producción de metano	% del <i>PCI</i>	Residual (Fertilizante)	% del <i>PCI</i>		
Bact 50 °C 4	3	12 420,27	457,72	3,69	5 268,62	42,42	5 726,35	46,10
	5	12 420,27	457,76	3,69	5 268,62	42,42	5 726,38	46,11
6	1	6 456,52	74,51	1,15	1 263,71	19,57	1 338,21	20,73
	2	6 456,52	73,75	1,14	1 230,54	19,06	1 304,29	20,20
7	3	6 838,50	0,00	0,00	3 000,29	43,87	3 000,29	43,87
	4	6 838,50	0,00	0,00	3 000,29	43,87	3 000,29	43,87
8	5	6 817,21	115,21	1,69	537,24	7,88	652,46	9,57
	6	6 817,21	115,29	1,69	600,29	8,81	715,58	10,50
12	1	10 722,36	92,60	0,86	1 147,14	10,70	1 239,74	11,56
	3	10 722,36	92,60	0,86	1 147,14	10,70	1 239,74	11,56
13	3	9 273,09	105,31	1,14	905,97	9,77	1 011,28	10,91
	5	9 273,09	105,27	1,14	905,97	9,77	1 011,25	10,91
14	4	8 135,23	115,29	1,42	786,11	9,66	901,40	11,08
	6	8 135,23	115,26	1,42	786,11	9,66	901,37	11,08
15	1	7 184,00	118,59	1,65	665,08	9,26	783,67	10,91
	3	7 184,00	118,59	1,65	665,08	9,26	783,67	10,91
16	2	7 475,95	113,19	1,51	665,86	8,91	779,05	10,42
	4	7 475,95	113,16	1,51	665,86	8,91	779,02	10,42
17	6	8 260,36	108,33	1,31	783,95	9,49	892,28	10,80
	5	8 260,36	108,36	1,31	783,95	9,49	892,31	10,80

La cantidad de metano recuperada del potencial biológico de metano de la mezcla de proceso es una herramienta, que de acuerdo con (Nielfa, Cano, & Fernández Polanco, 2015) permite en conjunto con el factor de efecto sinérgico definir la proporción óptima para la codigestión en la producción de metano, Utilizando el método descrito en el capítulo dos, el porcentaje de metano recuperado del potencial biológico de metano de la mezcla de proceso se obtiene con la relación de la ecuación 2,28, entre el volumen en litros medido de la producción acumulada experimental de metano y la producción teórica de metano determinada mediante el procedimiento de la DQO vinculada con su relación con los sólidos volátiles (agotados para este caso) de Bullock y la ley general de los gases ideales, utilizando las ecuaciones 2.25 a 2.27; los resultados se muestran en la tabla 3.14.

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3. 14 Comparación del poder calorífico inferior de las mezclas con la recuperación y ahorro de energía por producción de metano y residuales en los eventos experimentales

Evento	Reactor	DQO de la mezcla	Rendimiento teórico de metano (l/g de SV)	Producción acumulada litros de metano		Porcentaje de metano recuperado del teórico
				Teórica	Experimental	
Bact 50 °C 4	3	1 669,78	0,535	581,90	18,56	3,19
	5	1 669,78	0,535	581,98	18,57	3,19
6	1	519,53	0,535	90,37	2,90	3,21
	2	519,53	0,535	93,09	2,89	3,10
7	3	522,82	0,535	0,00	0,00	0,00
	4	522,82	0,535	0,00	0,00	0,00
8	5	517,83	0,535	144,10	4,50	3,13
	6	517,83	0,535	137,52	4,50	3,27
12	1	407,02	0,535	96,33	3,64	3,77
	3	407,02	0,535	96,35	3,64	3,77
13	3	453,72	0,535	132,48	4,17	3,15
	5	453,72	0,535	132,47	4,17	3,15
14	4	475,85	0,535	149,15	4,50	3,02
	6	475,85	0,535	149,15	4,50	3,02
15	1	506,62	0,535	172,12	4,69	2,72
	3	506,62	0,535	172,12	4,69	2,72
16	2	504,25	0,535	169,87	4,49	2,64
	4	504,25	0,535	169,87	4,49	2,64
17	6	481,67	0,535	164,66	4,29	2,61
	5	481,67	0,535	164,66	4,29	2,61

3.6.2 Determinación de la mejora en la sostenibilidad por el proceso de codigestión de las mezclas de los residuales en estudio.

Considerando el procedimiento del capítulo dos, en el que se estructura la contribución del proceso de codigestión en la mejora de la sostenibilidad mediante la matriz de Leopold, considerando como pilares la sociedad, el medioambiente y la economía, Para ello con auxilio de expertos seleccionados con el método de Kendall, se establece un proyecto para la codigestión de los tres residuales en estudio, lo que evita su disposición sin control; a partir de las etapas determinadas para el proyecto, se valoran los impactos positivos y negativos en conjunto con su persistencia, acumulación, reversibilidad, recuperabilidad y área de influencia.

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El impacto social del proyecto conjunta los tres pilares, por ello, se hace necesario determinar los impactos de los residuales sobre la salud humana y el ambiente cuando se disponen sin controles, de tal forma que se determina; la existencia y permanencia de los microorganismos patógenos contenidos en los residuales, cuyos resultados se muestran en las figuras 3.5 a 3.7 y la tabla 3.15 y, la recuperación de las emisiones de gases de efecto invernadero considerando la producción de metano y su amortización del CO₂ equivalente en años (CO₂eq payback time in years), con los resultados que se muestran en la tabla.



Figura 3. 5 Muestra tomada de los reactores en funcionamiento

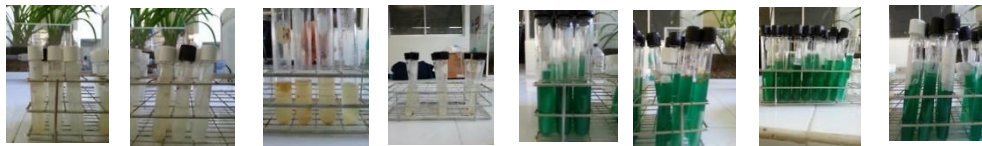


Figura 3. 6 Existencia de coliformes en la mezcla de entrada

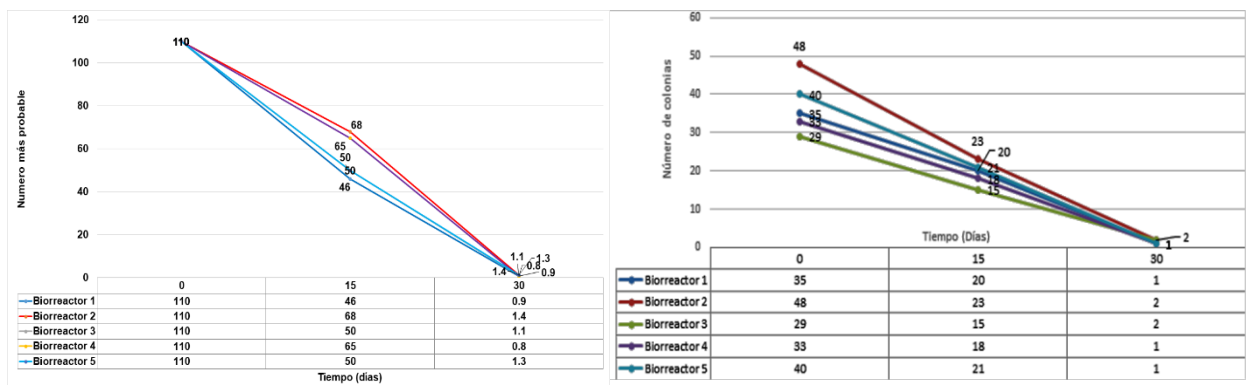


Figura 3. 7 Concentración de Coliformes y Vibrio Cholerae al inicio, a los 15 y a los 30 días de proceso

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3. 15 Resultados de las pruebas bioquímicas para *Vibrio Cholerae* y *Desulfovibrio*

a) Resultados de las pruebas bioquímicas para <i>Vibrio Cholerae</i>						
Prueba		Biorreactor 1	Biorreactor 2	Biorreactor 3	Biorreactor 4	Biorreactor 5
Indol		Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo
Ortina descarboxilasa		Positivo	Positivo	Positivo	Positivo	Positivo
Motilidad		Positivo	Positivo	Positivo	Positivo	Positivo
Producción de sulfuro de hidrógeno		Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo
b) Resultados de las pruebas bioquímicas para <i>Desulfovibrio</i>						
Muestra		Biorreactor 1	Biorreactor 2	Biorreactor 3	Biorreactor 4	Biorreactor 5
Primera	Turbidez en el medio	Positivo	Positivo	Positivo	Positivo	Positivo
	Precipitado negro de sulfuro de hierro	Positivo	Positivo	Positivo	Positivo	Positivo
Segunda	Turbidez en el medio	Positivo	Positivo	Positivo	Positivo	Positivo
	Precipitado negro de sulfuro de hierro	Positivo	Positivo	Positivo	Positivo	Positivo
Tercera	Turbidez en el medio	Positivo	Positivo	Positivo	Positivo	Positivo
	Precipitado negro de sulfuro de hierro	Positivo	Positivo	Positivo	Positivo	Positivo

Tabla 3. 16 Equivalencia de gases de efecto invernadero por producción de metano y dióxido de carbono en los reactores de los eventos experimentales de codigestión

Evento	Reactor	Producción de gases de efecto invernadero kg/ton mezcla base seca			
		Metano	Dióxido de carbono equivalente	Producción de CO ₂	Total gases
Bact 50 °C 4	3	2,97	62,27	3,01	65,28
	5	2,97	62,28	3,01	65,29
6	1	1,96	41,07	1,70	42,77
	2	1,95	40,87	1,73	42,60
7	3	0,00	0,00	0,00	0,00
	4	0,00	0,00	0,00	0,00
8	5	3,11	65,3	2,74	68,04
	6	3,11	65,25	2,72	67,97
12	1	2,50	52,41	2,24	54,65
	3	2,50	52,41	2,24	54,65
13	3	2,87	60,35	2,66	63,01
	5	2,87	60,34	2,66	63,00
14	4	3,11	65,25	2,72	67,97
	6	3,11	65,24	2,72	67,96
15	1	3,26	68,44	3,00	71,44
	3	3,26	68,44	3,00	71,44
16	2	3,11	65,23	2,90	68,13
	4	3,11	65,21	2,90	68,11
17	6	2,97	62,43	2,75	65,18
	5	2,97	62,44	2,75	65,19

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Derivado de lo anterior, se hace evidente que para disminuir las posibilidades de afectaciones a la salud humana debido a los microorganismos patógenos y al ambiente por las emisiones de gases de efecto invernadero con un promedio y un máximo de 56,63 y 71,44 kg de CO₂/ton de sólidos totales al disponer sin control esos residuales, es necesario tratarlos mediante su codigestión.

Los resultados de la determinación del impacto económico y la tasa de retorno de la inversión considerando las fuentes de ingresos y egresos establecidas en el capítulo dos, se muestran en las tablas 3.17 a 3.20.

Tabla 3. 17 Aporte económico en MXN\$ del proceso considerando la producción de biogás y los residuales sólidos como fertilizante orgánico por kilogramo de sólidos totales introducidos

Evento	Reactor	Aporte económico \$/kg de Sólidos Totales introducidos		
		Biogás	Residual Sólido	Total del proceso
Bact 50 °C 4	3	0,75	21,09	21,85
	5	0,75	21,09	21,85
6	1	0,48	21,33	21,81
	2	0,48	20,77	21,25
7	3	0,00	50,00	50,00
	4	0,00	50,00	50,00
8	5	0,76	9,30	10,06
	6	0,76	10,39	11,15
12	1	0,61	19,73	20,35
	3	0,61	19,73	20,35
13	3	0,71	15,66	16,37
	5	0,71	15,66	16,37
14	4	0,76	13,60	14,36
	6	0,76	13,60	14,36
15	1	0,81	11,58	12,39
	3	0,81	11,58	12,39
16	2	0,77	11,54	12,31
	4	0,77	11,54	12,31
17	6	0,74	13,61	14,35
	5	0,74	13,61	14,35

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3. 18 Aporte económico por ingreso Bruto (antes de impuesto y costos de distribución y empaque) con 60 toneladas (9,000 kg de sólidos totales) por mes

Evento	Reactor	Aporte económico mensual MXN\$		Ingreso adicional MXN\$ por		Ingreso total del proceso MXN\$
		Biogás	Residual Sólido	Estiércol	Residuos Comida	
Bact 50 °C 4	3	6 792,37	189 827,44	7 906,72	7 904,35	212 430,88
	5	6 792,64	189 827,44	7 906,72	7 904,35	212 431,15
6	1	4 305,33	191 970,53	16 420,48	20 599,63	233 295,97
	2	4 307,58	186 931,84	16 420,48	20 599,63	228 259,53
7	3	0,00	450 000,00	13 734,38	19 695,31	483 429,69
	4	0,00	450 000,00	13 734,38	19 695,31	483 429,69
8	5	6 865,03	83 656,81	13 558,19	17 495,69	121 575,72
	6	6 851,18	93 473,65	13 558,19	17 495,69	131 378,71
12	1	5 534,30	177 597,58	10 823,81	8 117,86	202 073,55
	3	5 534,30	177 597,58	10 823,81	8 117,86	202 073,55
13	3	6 424,21	140 899,82	15 120,97	9 072,58	171 517,58
	5	6 423,06	140 899,82	15 120,97	9 072,58	171 516,42
14	4	6 851,18	122 408,86	16 885,55	11 819,89	157 965,48
	6	6 850,02	122 408,86	16 885,55	11 819,89	157 964,32
15	1	7 277,27	104 259,61	18 564,36	14 851,49	144 952,73
	3	7 277,27	104 259,61	18 564,36	14 851,49	144 952,73
16	2	6 963,40	103 826,27	16 148,33	16 148,33	143 086,32
	4	6 962,24	103 826,27	16 148,33	16 148,33	143 085,16
17	6	6 650,29	122 497,95	14 906,15	13 249,91	157 304,29
	5	6 651,44	122 497,95	14 906,15	13 249,91	157 305,45

Tabla 3. 19 Aporte económico por ingreso Neto (después de impuesto y costos de distribución y empaque) al procesar 60 toneladas por mes acorde a los resultados de cada evento experimental

Evento	Reactor	Impuesto MXN\$ (IVA) por		Costo por bolsas	Costo por distribución MXN\$		Ingreso neto (MXN\$)
		Biogás	Residuales		Biogas	Residuales	
Bact 50 °C 4	3	1 086,78	30 372,39	5 315,17	2 716,95	75 930,98	97 008,62
	5	1 086,82	30 372,39	5 315,17	2 717,06	75 930,98	97 008,74
6	1	688,85	30 715,29	5 375,17	1 722,13	76 788,21	118 006,31
	2	689,21	29 909,10	5 234,09	1 723,03	74 772,74	115 931,36
7	3	0,00	72 000,00	12 600,00	0,00	180 000,00	218 829,69
	4	0,00	72 000,00	12 600,00	0,00	180 000,00	218 829,69
8	5	1 098,40	13 385,09	2 342,39	2 746,01	33 462,73	68 541,10
	6	1 096,19	14 955,78	2 617,26	2 740,47	37 389,46	72 579,54
12	1	885,49	28 415,61	4 972,73	2 213,72	71 039,03	94 546,97
	3	885,49	28 415,61	4 972,73	2 213,72	71 039,03	94 546,97
13	3	1 027,87	22 543,97	3 945,19	2 569,68	56 359,93	85 070,93
	5	1 027,69	22 543,97	3 945,19	2 569,22	56 359,93	85 070,42
14	4	1 096,19	19 585,42	3 427,45	2 740,47	48 963,54	82 152,41
	6	1 096,00	19 585,42	3 427,45	2 740,01	48 963,54	82 151,90
15	1	1 164,36	16 681,54	2 919,27	2 910,91	41 703,85	79 572,80
	3	1 164,36	16 681,54	2 919,27	2 910,91	41 703,85	79 572,80
16	2	1 114,14	16 612,20	2 907,14	2 785,36	41 530,51	78 136,97
	4	1 113,96	16 612,20	2 907,14	2 784,90	41 530,51	78 136,46
17	6	1 064,05	19 599,67	3 429,94	2 660,11	48 999,18	81 551,34
	5	1 064,23	19 599,67	3 429,94	2 660,58	48 999,18	81 551,85

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3. 20 Análisis económico y de tasa de retorno al escalar el proceso a 60 toneladas por mes

Inversión		Cantidad	Costo MXN\$	Amortización 10 años MXN\$/mes	Mantenimiento MXN\$/mes		
Equipo/Componente							
Digestor construido e instalado		1	750 000,00	6 250,00	7 500,00		
Sistema de compresión		1	239 500,00	1 995,83	2 395,00		
Total			989 500,00	8 245,83	9 895,00		
Tasa de recuperación de la inversión en años							
Evento	Reactor	Ingreso neto (MXN\$)	Gastos fijos MXN\$ por mes			Ingreso final MXN/mes	Recuperación inversión años
			Amortización	Mantenimiento	Salarios		
Bact 50 °C 4	3	97 008,62	8 245,83	9 895,00	15 960,00	62 907,79	1,31
	5	97 008,74	8 245,83	9 895,00	15 960,00	62 907,90	1,31
6	1	118 006,31	8 245,83	9 895,00	15 960,00	83 905,48	0,98
	2	115 931,36	8 245,83	9 895,00	15 960,00	81 830,53	1,01
7	3	218 829,69	8 245,83	9 895,00	15 960,00	184 728,85	0,45
	4	218 829,69	8 245,83	9 895,00	15 960,00	184 728,85	0,45
8	5	68 541,10	8 245,83	9 895,00	15 960,00	34 440,27	2,39
	6	72 579,54	8 245,83	9 895,00	15 960,00	38 478,71	2,14
12	1	94 546,97	8 245,83	9 895,00	15 960,00	60 446,13	1,36
	3	94 546,97	8 245,83	9 895,00	15 960,00	60 446,13	1,36
13	3	85 070,93	8 245,83	9 895,00	15 960,00	50 970,09	1,62
	5	85 070,42	8 245,83	9 895,00	15 960,00	50 969,59	1,62
14	4	82 152,41	8 245,83	9 895,00	15 960,00	48 051,58	1,72
	6	82 151,90	8 245,83	9 895,00	15 960,00	48 051,07	1,72
15	1	79 572,80	8 245,83	9 895,00	15 960,00	45 471,97	1,81
	3	79 572,80	8 245,83	9 895,00	15 960,00	45 471,97	1,81
16	2	78 136,97	8 245,83	9 895,00	15 960,00	44 036,14	1,87
	4	78 136,46	8 245,83	9 895,00	15 960,00	44 035,63	1,87
17	6	81 551,34	8 245,83	9 895,00	15 960,00	47 450,50	1,74
	5	81 551,85	8 245,83	9 895,00	15 960,00	47 451,01	1,74

Acorde a los resultados de las tablas anteriores, se puede establecer que la recuperación de la inversión resulta ser inferior en tiempo a su amortización; 22,22 veces como tiempo mínimo (0,45 años), 6,62 veces como promedio (1,51 años) y 4,18 veces como tiempo máximo (2,39),

3.6.3 Valorar los impactos ambientales,

Mediante las reuniones con los expertos seleccionados señaladas del procedimiento definido en el capítulo dos y los resultados experimentales de la codigestión de los residuales en estudio, se determina la existencia de impacto ambiental en las fases de construcción, operación y, mantenimiento y monitoreo del proyecto de mejora en los medios abiótico, biótico y socioeconómico; estableciéndole su naturaleza, intensidad, valor de impacto de entre -5 a +5 y

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

factor de peso para el impacto en la matriz de Leopold para obtener el valor total del impacto ambiental del proyecto de mejora, con los resultados que se muestran en la tabla 3.21.

Tabla 3. 21 Matriz de Leopold con valoración del impacto ambiental por factor, tipología y total

FACTORES AMBIENTALES		Persistencia		Efectos		Acumulación	reversibilidad	Recuperabilidad	Área de influencia	implic. Econ., Soc., cult., pol.	Valor del factor	Factor de peso para impacto	Valor total del impacto del factor
		Corto plazo	Largo plazo	Directos	Indirectos								
M E D I O S O C I O E C O N Ó M I C O S	Calidad del Aire	-2	4	-1	4	4	2	3	2	4	20	0,13	2,6
	Ruido	-2	3	-1	2	2	2	2	2	2	12	0,1	1,2
	Visibilidad	-2	4	-1	3	4	0	3	2	4	17	0,1	1,7
	Características de Drenaje natural	-1	3	1	3	0	1	3	2	2	14	0,1	1,4
	Calidad del Agua	2	3	3	2	2	2	3	2	2	21	0,13	2,73
	Uso del Suelo	2	3	1	1	1	0	1	2	3	14	0,11	1,54
	Calidad del Suelo	2	4	2	4	0	3	2	2	3	22	0,13	2,86
	Erosión	-1	3	2	2	0	1	2	2	1	12	0,1	1,2
	Modificación del Relieve y Paisaje	2	3	2	1	0	1	2	2	1	14	0,1	1,4
I N E R T E Y P E R C E P T U A L	Pérdida de Vegetación	-1	3	1	3	2	2	2	2	1	15	0,3	4,5
	Formación de hábitat	1	2	1	3	2	2	2	2	2	17	0,2	3,4
	Afectación a la Fauna	-1	3	1	2	2	2	2	2	2	15	0,3	4,5
	Formación de hábitat	-1	3	1	2	2	2	2	2	2	15	0,2	3
S O C I O E C O N Ó M I C O S	Mano de Obra	2	4	4	2	2	0	1	2	4	21	0,1	2,1
	Cambio de Patrón de Vida	2	4	4	2	2	0	1	2	4	21	0,2	4,2
	Salud Pública	2	4	4	3	3	0	2	2	3	23	0,3	6,9
	Economía Local	2	4	4	3	3	0	2	2	3	23	0,1	2,3
	Calidad de Vida	2	4	4	2	2	0	2	2	3	21	0,3	6,3
VALOR DE LA TIPOLOGÍA DE IMPACTOS		8	61	32	44	33	20	37	36	46	317	3	
VALOR TOTAL DEL IMPACTO AMBIENTAL												39,8	

CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO

Considerando los resultados de los eventos experimentales de codigestión definidos en el diseño experimental que se efectúan en la instalación experimental a nivel laboratorio definida; determinados con los métodos y actividades para el desarrollo del experimento, se establecen las conclusiones siguientes:

1. El diseño de la instalación experimental a escala de laboratorio satisface los requisitos técnicos y tecnológicos para la codigestión de mezclas de lodos de albañal, estiércol de ganado vacuno y restos de comida.

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2. Los resultados de la codigestión de los tres residuales en conjunto, alcanza la condición de inhibición en la generación de biogás con proporciones de 35,16% de estiércol de ganado vacuno y 50,42% de restos de comida (14,42 de lodos albañales); cualquier incremento en la proporción de estiércol y reducción en la de comida; provoca el crecimiento de la producción de biogás, disminuyendo el residual de sólidos totales.
3. El factor de efecto sinérgico en la producción del biogás de la codigestión tiene valores mínimo de 1,41, promedio de 1,96 y máximo de 2,65 a partir del punto inhibitorio.
4. Los modelos experimentales que predicen las cantidades de biogás y digestato a obtener seleccionados, tienen un error cuadrático medio de 3,8% para el digestato, 0,22% para el biogás acumulado y 1,35% para el biogás por gramo.
5. Los puntos de máxima producción de digestato y biogás corresponden al 10, 40 y 50 % para el biogás acumulado y por gramo y, del 10, 60 y 30 % para el digestato de lodos de albañal, estiércol de ganado vacuno y restos de comida respectivamente.
6. La codigestión de los tres residuales tiene un porcentaje de recuperación del poder calorífico inferior de las mezclas de los residuales promedio del 18,62 %, máximo del 46,11 % y mínimo del 9,57 % y una mejora en la sostenibilidad al eliminar las bacteria patógenas a partir de los 15 días de proceso evitando afectaciones a la salud, evitar la emisión de gases de efecto invernadero mínima de 42,60, promedio de 62,93 y máxima de 71,44 kg CO₂eq/ton de sólidos totales procesados, generar empleos y con tasa de recuperación de la inversión máxima de 0,45 años promedio de 1,51 años y mínima de 2,39 años, que significa 22,22, 6,6 y 4,18 veces menos que su amortización,

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Considerando los resultados de la investigación se establecen las conclusiones siguientes:

1. La instalación experimental satisface requisitos técnicos y tecnológicos para la codigestión de los tres residuales de la investigación; encontrando la condición inhibitoria del proceso en la mezcla con las proporciones de 35,16% de estiércol de ganado vacuno y 50,42% de restos de comida (14,42 de lodos albañales) y que cualquier incremento en la proporción de estiércol y reducción en la de restos de comida; provoca el crecimiento de la producción de biogás, disminuyendo el residual de sólidos totales.
2. Los valores del factor de efecto sinérgico en la producción del biogás de la codigestión de entre 1,41 y 2,65 a partir del punto inhibitorio, indican el efecto de las proporciones en las producciones de biogás o digestato.
3. Los modelos experimentales para la predicción de la producción de biogás y digestato son robustos al tener un error cuadrático medio de 3,8% para el digestato, 0,22% para el biogás acumulado y 1,35% para el biogás por gramo, con un punto de máxima producción coincidente al experimental.
4. El proceso recupera entre el 9,57 y 46,11 % del poder calorífico inferior de las mezclas de los residuales y mejora la sostenibilidad al eliminar las bacterias patógenas, evitar la emisión de entre 42,60 y 71,44 kg CO₂eq/ton de sólidos totales procesados, generar empleos y recuperar la inversión entre 4,18 y 22,22 veces más rápido que su amortización
7. Por todo lo anterior, se puede concluir que, la instalación experimental, el diseño experimental y los métodos establecidos, permiten el desarrollo de esta investigación, cumplir el objeto de la investigación, los objetivos general y específicos, y dar respuesta a la interrogante de la investigación corroborando la hipótesis planteada.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

Los resultados de la investigación permiten hacer las recomendaciones siguientes:

1. Efectuar experimentación incrementando los porcentajes de sólidos totales hasta llegar al límite antes de que se considere un proceso seco (15 %), para corroborar si los modelos establecidos mantienen su efectividad y robustez.
2. Desarrollar experimentos considerando en las mediciones los parámetros cinéticos del proceso, para incorporarlos a los modelos definidos y compararlos con los modelos cinéticos existentes (Anaerobic Digestion Model 1).
3. Incorporar en la nueva experimentación el inóculo de reactores agotados para equiparar el proceso con los de los reactores en proceso estable y reducir el tiempo de retención equiparable a los obtenidos en esta investigación (5 días).

REFERENCIAS **BIBLIOGRÁFICAS**

Referencias bibliográficas

- Akyol, Ç. O., Ince, O., Kleinstuber, S., & Ince, B. (28 de Septiembre de 2015). Anaerobic co-digestion of cow manure and barley: Effect of cow manure to barley ratio on methane production and digestion stability. (M. Abraham, Ed.) *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 35(2), 1 - 7. doi:<https://doi.org/10.1002/ep.12250>
- Alejos, C., & Calvo, E. (20 de octubre de 2015). Biocombustibles de primera generación. (I. M. Cáceres, Ed.) *REVISTA PERUANA DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA*, 18(2), 19 - 30. Recuperado el 20 de julio de 2016, de <http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/quim/article/view/11784>
- Anjum, M., Khalid, A., Qadeer, S., & Miandad, R. (22 de Julio de 2017). Synergistic effect of co-digestion to enhance anaerobic degradation of catering waste and orange peel for biogas production. (E.-i.-C. P. Agamuthu, Ed.) *Waste Management & Research*, 35(9), 967 - 977. doi:DOI: 10.1177/0734242X17715904
- Arafat, H. A., Jijakli, K., & Ahsan, A. (15 de Octubre de 2015). Environmental performance and energy recovery potential of five processes for municipal solid waste treatment. (C. M. Co-Editors-in-Chief: Jiří Jaromír Klemeš, Ed.) *Journal of Cleaner Production*, 105(105), 233 - 240. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.071>
- Arikan, O. A., Mulbry, W., & Lansing, S. (4 de Septiembre de 2015). Effect of temperature on methane production from field-scale anaerobic digesters treating dairy manure. (E. i. Cossu, Ed.) *Waste Management*, 43(43), 108 - 113. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.005>
- Asadollahfardi, G., & Asadi, M. (Marzo de 2018). The comparison of a revised Leopold matrix and fuzzy methods in environmental impact assessment, a case study: The construction of Al-A'amiriya residential complex, Baghdad, Iraq. (C. J. Forrest, Ed.) *construction of Al-A'amiriya residential complex, Baghdad, Iraq*, 27(4), 115 - 123. doi:DOI: 10.1002/tqem.21560
- Ashworth, D. C., Fuller, G. W., Toledano, M. B., Font, A., Elliot, P., Hansell, A. L., & de Hoogh, K. (08 de Diciembre de 2016). Comparative Assessment of Particulate Air Pollution Exposure from Municipal Solid Waste Incinerator Emissions. En D. C. Ashworth, G. W. Fuller, M. B. Toledano, A. Font, P. Elliot, A. L. Hansell, K. de Hoogh, & E. B. Ragazzi (Ed.), *Air Quality Monitoring, Measuring, and Modeling Environmental Hazards* (Vol. 0, págs. 1 -14). London, United Kingdom: Hindawi Publishing Corporation. doi:<http://dx.doi.org/10.1155/2013/560342>
- Astals, S., Musenze, R. S., Bai, X., Tannock, S. J., Tait, S., Pratt, S., & Jensen, P. D. (Abril de 2015). Anaerobic co-digestion of pig manure and algae: Impact of intracellular algal products recovery on co-digestion performance. (E.-i.-C. A. Pandey, Ed.) *Bioresource Technology*, 181(181), 97 - 104. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.039>

- Barrera, e. L., Spanjers, H., Solon, K., Amerlinck, Y., Nopens, I., & Dewulf, J. (15 de Marzo de 2015). Modeling the anaerobic digestion of canemolasses vinasse: Extension of the Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1) with sulfate reduction for a very high strength and sulfate rich wastewater. (E.-i.-C. M. Loosdrecht, Ed.) *Water Research*, 71(71), 42 – 54. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2014.12.026>
- Bassani, I., Kougiass, P. G., Treu, L., & Angelidaki, I. (21 de Septiembre de 2015). Biogas Upgrading via Hydrogenotrophic Methanogenesis in Two-Stage Continuous Stirred Tank Reactors at Mesophilic and Thermophilic Conditions. (E.-i.-C. L. Sedlak, Ed.) *Environmental Science & Technology*, 49(20), 12585 - 12593. doi:<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.5b03451>
- Bejan, A., & Tsatsaronis, G. (1996). *Thermal Design and Optimization*. Canada: JOHN WILEY & SONS, INC.
- Braguglia, C. M., Gallipoli, A., Gianico, A., & Pagliaccia, P. (28 de Junio de 2018). Anaerobic bioconversion of food waste into energy: A critical review. (E.-i.-C. A. Pandey, Ed.) *Bioresource Technology*, 248(248), 37 - 56. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.145>
- Brdjanovic, D., Meijer, S. C., Lopez-Vazquez, C. M., Hooijmans, C. M., & van Loosdrecht, M. C. (2015). *Applications of Activated Sludge Models*. LONDON, UK: IWA PUBLISHING.
- Brunner, P. H., & Rechberger, H. (Marzo de 2015). Waste to energy – key element for sustainable waste management. (M. B. Editors-in-Chief: U. Arena, Ed.) *Waste Management*, 37(37), 3 - 12. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.02.003>
- Castells, X. E. (2012). *Biomasa y Bioenergía*. Madrid: ediciones diaz de santos.
- CCAYAC-M-004. (2006). Estimación de la densidad microbiana por la técnica del numero mas probable, detección de coliformes totales, coliformes fecales y Escherichia coli por el número más probable.
- CENGEL, Y. A., & BOLES, M. A. (2014). *Termodinámica* (octava edición ed.). México, México: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Cevallos Ampuero, J. (Junio - Diciembre de 2012). Optimización multirespuesta para mejora de la calidad. Comparación de enfoque clásico con el enfoque bayesiano y el de redes neuronales. (E. R. Lizama, Ed.) *Industrial Data*, 15(2), 29 - 41. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81629470005>
- Colmenar Santos, A., Zarzuelo Puch, G., Borge Diez, D., & García Diéguez, C. (Abril de 2016). Thermodynamic and exergoeconomic analysis of energy recovery system of biogas from a wastewater treatment plant and use in a Stirling engine. (E.-i.-C. S. Kalogirou, Ed.) *Renewable Energy*, 88(88), 171 - 184. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.001>

- Corrales Zarauza, J. A. (1953). *Sobre el cálculo de la potencia calorífica de los carbones españoles a partir de los datos del análisis inmediato*. Instituto Nacional del Carbón, Consejo superior de investigación científica. Oviedo, España: Instituto Nacional del Carbón. Obtenido de <http://digital.csic.es/bitstream/10261/52996/1/Sobre%20el%20c%C3%A1lculo%20de%20la%20potencia%20calor%C3%ADfica%20de%20los%20carbones%20espa%C3%B1oles%20a%20partir%20de%20los%20datos%20del%20an%C3%A1lisis%20inmediato.pdf>
- Corrales Zarauza, J. A. (Marzo - Abril de 1956). *Establecimiento de una fórmula para el cálculo de la potencia calorífica de los carbones españoles*. Instituto Nacional del Carbón, Consejo superior de investigaciones científicas. Oviedo, España: Instituto Nacional del Carbón. Obtenido de http://digital.csic.es/bitstream/10261/107822/1/Establecimiento_f%C3%B3rmula_Zarauza.pdf
- Cremiato, R., Mastellone, M. L., Tagliaferri, C., Zaccariello, L., & Lettieri, P. (Agosto de 2018). Environmental impact of municipal solid waste management using Life Cycle Assessment: The effect of anaerobic digestion, materials recovery and secondary fuels production. (E.-i.-C. S. Kalogirou, Ed.) *Renewable Energy*, 124(124), 180 - 188. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.033>
- Da Silva A., C., Astals, S., Peces, M., Campos, J. L., & Guerrero, L. E. (Enero de 2018). Biochemical methane potential (BMP) tests: Reducing test time by early parameter estimation. (M. B. Editors-in-Chief: U. Arena, Ed.) *Waste Management*, 71(71), 19 - 24. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.009>
- De Meester, S., Demeyer, J., Velghe, F., Peene, A., Van Langenhove, H., & Dewulf, J. (2012). The environmental sustainability of anaerobic digestion as a biomass valorization technology. (ScienceDirect, Ed.) 121, 396 - 403. Obtenido de www.elsevier.com/locate/biortech
- Deng, L., Yang, H., Liu, G., Zheng, D., Chen, Z., Liu, Y., . . . Song, L. (29 de Agosto de 2014). Kinetics of temperature effects and its significance to the heating strategy for anaerobic digestion of swine wastewater. (ScienceDirect, Ed.) 134(134), 349 - 355. Recuperado el 17 de Mayo de 2016, de www.elsevier.com/locate/apenergy
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2010). *Biogas from waste and renewable resource, an introduction. 2a ed. revisada y expandida*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Donoso Bravo, A., Mailier, J., Martin, C., Rodríguez, J., Aceves Lara, C. A., & Vande Wouwer, A. (3 de Septiembre de 2011). Model selection, identification and validation in anaerobic digestion: A review. (E.-i.-C. M. Loosdrecht, Ed.) *WATER RESEARCH (IWA)*, 45(17), 5347 - 5364. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2011.08.059>

- Ebner, J. H., Labatut, R. A., Lodge, J. S., Williamson, A. A., & Trabold, T. A. (Junio de 2016). Anaerobic co-digestion of commercial food waste and dairy manure: Characterizing biochemical parameters and synergistic effects. (M. B. Editors-in-Chief: U. Arena, Ed.) *Waste Management*, 52(52), 286 - 294. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.046>
- Edgar, T. F., & Himmelblau, D. M. (2001). *OPTIMIZATION OF CHEMICAL PROCESSES, 2TH ED* (2 TH ed.). (E. D. Glandt, Ed.) New York, New York, United States of America: McGraw Hill. Obtenido de [http://sharif.ir/~pishvaie/Articles/OptimizationArticles/Semester_9293_2/SomeUsefulRefs/Optimization%20of%20Chemical%20Processes%20by%20David.%20M.%20Himmelblau%20\(Author\).pdf](http://sharif.ir/~pishvaie/Articles/OptimizationArticles/Semester_9293_2/SomeUsefulRefs/Optimization%20of%20Chemical%20Processes%20by%20David.%20M.%20Himmelblau%20(Author).pdf)
- Elias Castells, X. (2005). *TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS* (Primera ed.). (F. U. Iberoamericana, Ed.) Barcelona, Cataluña, España: Ediciones Días de Santos. Recuperado el 13 de Marzo de 2014
- Elías Castells, X., & Bordas Alsina, S. (2012). *Energía, Agua, Mediambiente, Territorialidad y Sostenibilidad*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos, S. A. Recuperado el 13 de octubre de 2015
- Fan, Y. V., Klemeš, J. J., Lee, C. T., & Simon, P. (01 de Octubre de 2018). Anaerobic digestion of municipal solid waste: Energy and carbon emission footprint. (J. E. Co-Editor-in-Chief: R. Dewil, Ed.) *Journal of Environmental Management*, 223(223), 888 - 897. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.005>
- Feduchi Canosa, E., Blasco Castiñeyra, I., Romero Magdalena, C. S., & Yañez Conde, E. (2013). *Bioquímica Conceptos Esenciales*. Madrid, España: Editorial Médica Panamericana.
- Fernández Rodríguez, C., Martínez Torres, E. J., Morán Palao, A., & Gómez Barrios, X. (2016 de Enero de 2016). Procesos biológicos para el tratamiento de lactosuero con producción de biogás e hidrógeno. Revisión bibliográfica. (P. C. Nova, Ed.) *ION Investigación, Optimización y Nuevos procesos en ingeniería*, 29(1), 47 - 62. doi:DOI: <http://dx.doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016004>
- File, J., Considine, D. M., Akhtar, S., Bakoss, J., Ball, C. G., Bloom, R. J., & Boodman, N. (1986). *Enciclopedia de Energía Tecnología del carbón* (Primera ed., Vol. 1). (D. M. Considine, Ed.) Barcelona, Barcelona, España: Publicaciones marcombo, S. A.
- Fitamo, T., Treu, L., Boldrin, A., Sartori, C., Angelidaki, I., & Scheutz, C. (1 de Julio de 2017). Microbial population dynamics in urban organic waste anaerobic co-digestion with mixed sludge during a change in feedstock composition and different hydraulic retention times. (E.-i.-C. M. Loosdrecht, Ed.) *Water Research International Water Association (IWA)*, 118(118), 261 - 271. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.04.012>

- Gao, S., Huang, Y., Yang, L., Wang, H., Zhao, M., Xu, Z., . . . Ruan, W. (15 de Marzo de 2015). Evaluation the anaerobic digestion performance of solid residual kitchen waste by NaHCO₃ buffering. (E.-i.-C. M. Al-Nimr, Ed.) *Energy Conversion and Management*, 93(93), 166 -174. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.010>
- García Dihigo, J., & Cisnero Gutiérrez, Y. (2005). *Metodología de la investigación para las ciencias administrativas* (Segunda ed.). Matanzas, Matanzas, República de Cuba: Ediciones De La U.
- Garcia-Lodeiro, I., Carcelen-Taboada, V., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (15 de febrero de 2016). Manufacture of hybrid cements with fly ash and bottom ash from a municipal solid waste incinerator. (ScienceDirect, Ed.) *Construction and Building Materials*, 105(105), 218 - 226. doi:doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.079
- Gariboglio, M. y. (1993). *Corrosion e incrustacion microbiológica en sistemas de captación y conducción de agua. Capítulo 3.*
- Gaw, A., Cowan, R. A., O'Reilly, D. S., J., S. M., & James, S. (2012). *Bioquímica 2a Ed.* Madrid, España: Harcourt.
- Gholizadeh, t., Vajdi, M., & Mohammadkhani, F. (Enero de 2019). Thermodynamic and thermoeconomic analysis of basic and modified power Thermodynamic and thermoeconomic analysis of basic and modified power. (E.-i.-C. M. Al-Nimr, Ed.) *Energy Conversion and Management*, 181(181), 463 - 475. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.011>
- Gil, A., Siles, J. Á., Serrano, A., & Martín, M. d. (01 de Junio de 2015). Mixture optimization of anaerobic co-digestion of tomato and cucumber waste. (U. Managing Editor Peter Jarvis - Cranfield University, Ed.) *Environmental Technology*, 36(20), 2628 - 2636. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/09593330.2015.1041425>
- Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C., & Lu, X. (Septiembre de 2017). Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. (E.-i.-C. A. Foley, Ed.) *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76(76), 1485 - 1496. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.184>
- Halder, P. K., Paul, N. K., Joardder, M. U., Khan, M. Z., & Sarker, M. S. (Noviembre de 2016). Feasibility analysis of implementing anaerobic digestion as a potential energy source in Bangladesh. (E.-i.-C. A. Foley, Ed.) *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65(65), 124 - 134. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.094>
- Hamad, T. A., Agll, A. A., Hamad, Y. M., & Sheffield, J. W. (28 de Noviembre de 2014). Solid waste as renewable source of energy: current and future possibility in Libya. (E.-i.-C. H. Qiu, Ed.) *Case Studies in Thermal Engineering*, 4(4), 144 - 152. doi:<https://doi.org/10.1016/j.csite.2014.09.004>

- Haryanto, A., Hasanudin, U., Afrian, C., & Zulkarnaen. (2018). Biogas production from anaerobic codigestion of cowdung and elephant grass (*Pennisetum Purpureum*) using batch digester. *Earth and Environmental Science*, 141(141), 01 - 10. doi:doi :10.1088/1755-1315/141/1/012011
- Haydargil, D., & Abus,oglu, A. e. (15 de Septiembre de 2018). A comparative thermoeconomic cost accounting analysis and evaluation of biogas engine-powered cogeneration. (E.-i.-C. H. Lund, Ed.) *Energy*, 159(159), 97 - 114. doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.102
- Hobbs, S. R., Landis, A. E., Rittman, B. E., Young, M. N., & Parameswaran, P. (Enero de 2018). Enhancing anaerobic digestion of food waste through biochemical methane potential assays at different substrate: inoculum ratios. (M. B. Editors-in-Chief: U. Arena, Ed.) *Waste Management*, 71(71), 612 - 617. doi:https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.06.029
- Hurtado, F. J., Káiser, A. s., & Zamora, B. (15 de Marzo de 2015). Fluid dynamic analysis of a continuous stirred tank reactor for technical optimization of wastewater digestion. (E.-i.-C. M. Loosdrecht, Ed.) *Water Research A Journal of the International Water Association (IWA)*, 71(71), 282 - 293. doi:https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.11.053
- Hussein, Z., & Aishath, A. (2017). *Environmental Impact Assessment development of Sewerage System at Veymandoo, Thaa Atoll*. Ministry of Environment and Energy. Malé, Republic of Maldives: Land and Marine Environmental Resource Group Pvt Ltd, Maldives.
- Jeonseok, P., Bora, K., & Jae, W. L. (9 de Septiembre de 2016). In-situ transesterification of wet spent coffee grounds for sustainable biodiesel production. (E.-i.-C. A. Pandey, Ed.) *Bioresource Technology*, 221(221), 55 - 60. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.001
- Jones, A. M., & Harrison, R. M. (7 de junio de 2016). Emission of ultrafine particles from the incineration of municipal solid waste: A review. (ScienceDirect, Ed.) *Atmospheric Environment*, 140(140), 519 - 528. doi:doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.06.005
- Kafle, G. K., & Chen, L. (Febrero de 2016). Comparison on batch anaerobic digestion of five different livestock manures and prediction of biochemical methane potential (BMP) using different statistical models. (M. B. Editors-in-Chief: U. Arena, Ed.) *Waste Management*, 48(48), 492 - 502. doi:https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.021
- Kariyama, I. D., Zhai, X., & Wu, B. (15 de Octubre de 2018). Influence of mixing on anaerobic digestion efficiency in stirred tank digesters: A review. (E.-i.-C. M. Loosdrecht, Ed.) *Water Research A Journal of the International Water Association (IWA)*, 143(143), 503 - 517. doi:https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.06.065

- Karthikeyan, O. P., Selvam, A., & Wong, J. W. (Enero de 2016). Hydrolysis–acidogenesis of food waste in solid–liquid-separating continuous stirred tank reactor (SLS-CSTR) for volatile organic acid production. (E.-i.-C. A. Pandey, Ed.) *Bioresource Technology*, 200(200), 366 - 373. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.017>
- Kashi, S., Satari, B., Lundin, M., Sárvári, I., & Othman, M. (Diciembre de 2017). Application of a mixture design to identify the effects of substrates ratios and interactions on anaerobic co-digestion of municipal sludge, grease trap waste, and meat processing waste. (D. F.-K.-T. Editors: Guilherme Luiz Dotto, Ed.) *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(6), 6156 - 6164. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.11.045>
- Knapek, J., Vasicek, J., & K., H. (2003). ECONOMIC ASPECTS OF BIOMASS UTILISATION FOR ELECTRICITY GENERATION IN POWER. *12th European Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection*, 1063.
- koch, K., Helmreich, B., & Drewes, J. E. (Enero de 2015). Co-digestion of food waste in municipal wastewater treatment plants: Effect of different mixtures on methane yield and hydrolysis rate constant. (E.-i.-C. J. Yan, Ed.) *Applied Energy*, 137(137), 250 - 255. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.025>
- Koch, K., Lippert, T., & Drewes, J. E. (Noviembre de 2017). The role of inoculum's origin on the methane yield of different substrates in biochemical methane potential (BMP) tests. (E.-i.-C. A. Pandey, Ed.) *Bioresource Technology*, 243(243), 457 - 463. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.142>
- Koolman, J., & Röhm, K.-H. (2012). *Bioquímica Humana Texto y Atlas 4a ed.* Madrid, España: Editorial Médica Panamericana.
- Kumar, A., Maurya, B. R., Raghuwanshi, R., Meena, V., & Islam, M. (Septiembre de 2017). Co-inoculation with Enterobacter and Rhizobacteria on Yield and Nutrient Uptake by Wheat (*Triticum aestivum* L.) in the Alluvial Soil Under Indo-Gangetic Plain of India. (E.-i.-C. J. Ludwig-Müller, Ed.) *Journal of Plant Growth Regulation*, 36(3), 608 - 617. doi:DOI 10.1007/s00344-016-9663-5
- Kythreotou, N., Florides, G., & Tassou, S. A. (8 de Julio de 2014). A review of simple to scientific models for anaerobic digestion. (E.-i.-C. S. Kalogirou, Ed.) *Renewable Energy*, 71(71), 701 – 714. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.055>
- Laurent, A., Bakas, I., Clavreul, J., Bernstad, A., Niero, M., Gentil, E., . . . Christensen, T. H. (Marzo de 2014). Review of LCA studies of solid waste management systems – Part I: Lessons learned and perspectives. (M. B. Editors-in-Chief: U. Arena, Ed.) *Waste Management*, 34(3), 573 - 588. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.045>

- Lee, S., Esfahani, I. J., Ifaei, P., Moya, W., & Yoo, C. (15 de Junio de 2017). Thermo-environmental modeling and optimization of an integrated wastewater treatment plant with a combined heat and power generation system. (E.-i.-C. M. Al-Nimr, Ed.) *Energy Conversion and Management*, 142(142), 385 - 401. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.03.060>
- Li, C., Champagne, P., & Anderson, B. C. (Noviembre de 2015). Enhanced biogas production from anaerobic co-digestion of municipal wastewater treatment sludge and fat, oil and grease (FOG) by a modified two-stage thermophilic digester system with selected thermo-chemical pre-treatment. (E.-i.-C. S. Kalogirou, Ed.) *Renewable Energy*, 83(83), 474 - 482. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.055>
- Li, J., Zhang, R., Siddhu, M. A., He, Y., Wang, W., Li, Y., . . . Liu, G. (Abril de 2015). Enhancing methane production of corn stover through a novel way: Sequent pretreatment of potassium hydroxide and steam explosion. (E.-i.-C. A. Pandey, Ed.) *Bioresource Technology*, 181(181), 345 - 350. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.050>
- Li, L., Feng, L., Zhang, R., He, Y., Wang, W., Chen, C., & Liu, G. (Junio de 2015). Anaerobic digestion performance of vinegar residue in continuously stirred tank reactor. (E.-i.-C. A. Pandey, Ed.) *Bioresource Technology*, 186(186), 338 - 342. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.086>
- Li, Y., Liu, C., Wachemo, A. C., Yuan, H. Y., Zou, D., Liu, Y., & Li, X. (Julio de 2017). Serial completely stirred tank reactors for improving biogas production and substance degradation during anaerobic digestion of corn stover. (E.-i.-C. A. Pandey, Ed.) *Bioresource Technology*, 235(235), 380 - 388. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.058>
- Li, Y., Zhang, R., Liu, G., Chen, C., He, Y., & Liu, X. (Diciembre de 2013). Comparison of methane production potential, biodegradability, and kinetics of different organic substrates. (E.-i.-C. A. Pandey, Ed.) *Bioresource Technology*, 149(149), 565 - 569. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.09.063>
- Mahanty, B., Zafar, M., Han, M. J., & Park, H.-S. (1 de Junio de 2014). Optimization of co-digestion of various industrial sludges for biogas production and sludge treatment: Methane production potential experiments and modeling. (J. Y. Toshihiko Matsuto, Ed.) *Waste Management*, 34(6), 1018 - 1024. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.001>
- Markowski, M., Bialobrzewski, I., Zielinski, M., Debowski, M., & Krzemieniewski, M. (14 de abril de 2014). Optimizing low-temperature biogas production from biomass by anaerobic digestion. (ScienceDirect, & S. Kalogirou, Edits.) *Renewable Energy*, 69(69), 219 - 225. doi:[doi:doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.039](https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.039)

- Martínez, M., Parra, J., Vera, M. A., & Vera, A. (1 de septiembre de 2016). Parámetros de calidad del Aceite de las Semillas de azadirachta indica (neem). (T. y. Ministerio de Ciencia, Ed.) *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 47(47), 70 - 74. Recuperado el 25 de enero de 2017, de <http://revista.cnic.edu.cu>
- Mata Álvarez, J., Dosta, J., Romero Güiza, M. S., Fonoll Almansa, X., Peces, M., & Astals, S. (Agosto de 2014). A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. (E.-i.-C. A. Foley, Ed.) *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36(36), 412 - 427. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.039>
- Mendes, C., Esquerre, K., & Matos Queiroz, L. (4 de Noviembre de 2014). Application of Anaerobic Digestion Model No. 1 for simulating anaerobic mesophilic sludge digestion. (E. i. Cossu, Ed.) *Waste Management*, 35(35), 89 - 95. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.10.013>
- Molaey, R., Bayrakdar, A., & Sürmeli, R. Ö. (05 de Diciembre de 2018). Anaerobic digestion of chicken manure: Influence of trace element supplementation. (A.-P. Z. Thomas Bley, Ed.) *Engineering in Life Sciences*, 00(00), 1 - 8. doi:DOI: 10.1002/elsc.201700201
- Morales-Rivera, J. P., Gurubel-Tun, K. J., E., L.-B., del Real-Olvera, J., & Zuñiga-Grajeda, V. (Enero - Abril de 2019). OPTIMIZACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE METANO A PARTIR DE AGUAS RESIDUALES USANDO ALGORÍTMOS METAHEURÍSTICOS. (E. r. Flores, Ed.) *Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability*, 3(1), 25 - 36. doi:DOI:10.19136/Jeeos.a3n1.3267
- Moya, D., Aldás, C., López, G., & Kaparaju, P. (05 de Julio de 2017). Municipal solid waste as a valuable renewable energy resource: a worldwide opportunity of energy recovery by using Waste-To-Energy Technologies . (A. E. Yan, Ed.) *Energy Procedia*, 134(134), 286 - 295. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.618>
- Nguyen, D. D., Chang, S. W., Jeong, S. Y., Jeung, J., Kim, S., Guo, W., & Ngo, H. H. (15 de Noviembre de 2016). Dry thermophilic semi-continuous anaerobic digestion of food waste: Performance evaluation, modified Gompertz model analysis, and energy Balance. (E.-i.-C. M. Al-Nimr, Ed.) *Energy Conversion and Management*, 128(128), 203 - 210. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.09.066>
- Nielfa, A., Cano, R., & Fernández Polanco, M. (01 de Marzo de 2015). Theoretical methane production generated by the co-digestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge. (E. i. Mattiasson, Ed.) *Biotechnology Reports*, 5(5), 14 - 21. doi:<https://doi.org/10.1016/j.btre.2014.10.005>
- Nielfa, A., Cano, R., & Fernández Polanco, M. (Marzo de 2015). Theoretical methane production generated by the co-digestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge. (E. i. Mattiasson, Ed.) *Biotechnology Reports*, 5(5), 14 - 21. doi:<https://doi.org/10.1016/j.btre.2014.10.005>

- Nielfa, A., Cano, R., Vinot, M., Fernández, E., & Fernández Polanco, M. (10 de Febrero de 2015). Anaerobic digestion modeling of the main components of organic fraction of municipal solid waste. (P. D. Editors in Chief: Professor A. Azapagic, Ed.) *Process Safety and Environmental Protection (Chem E)*, 94(94), 180 – 187. doi:doi.org/10.1016/j.psep.2015.02.002
- Nizami, A. S., Rehan, M., Ouda, O. K., Shahzad, K., Sadeq, Y., Iqbal, T., & Ismail, I. M. (2015). An Argument for Developing Waste-to-Energy Technologies in Saudi Arabia. (J. J. Guest Editors: Petar Sabev Varbanov, Ed.) *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*, 45(45), 337 - 342. doi:DOI: 10.3303/CET1545057
- Ortiz Carrillo, J. L., Rodríguez Chona, J. A., Cajiao Pedraza, Á. M., & Maldonado Maldonado, J. I. (1 de Enero de 2016). Estudio cinético de bacterias metanogénicas a diferentes temperaturas. (P. A. Parra, Ed.) *Bistua:Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 14(1), 38 - 46. doi:DOI: http://dx.doi.org/10.24054%2F01204211.v2.n2.2006.76
- Pagés Díaz, J., Pereda Reyes, I., Taherzadeh, M. J., Sárvári Horváth, I., & Lundin, M. (01 de Junio de 2014). Anaerobic co-digestion of solid slaughterhouse wastes with agro-residues: Synergistic and antagonistic interactions determined in batch digestion assays. (D. D. Co-Editors: S.J. Allen, Ed.) *Chemical Engineering Journal*, 245(245), 89 - 98. doi:https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.02.008
- Papurello, D., Lanzini, A., Tognana, L., Silvestri, S., & Santarelli, M. (01 de Junio de 2015). Waste to energy: Exploitation of biogas from organic waste in a 500 Wel solid oxide fuel cell (SOFC) stack. (E.-i.-C. H. Lund, Ed.) *Energy*, 85(85), 145 - 158. doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.093
- Parra Orobio, B. A., Donoso Bravo, A., & torres Lozada, P. (10 de Julio de 2017). Anaerobic digestion of food waste. Predicting of methane production by comparing kinetic models. (F. Machuca-MArtinez, Ed.) *Ingeniería y Competitividad*, 19(01), 210 - 218. doi:DOI: https://doi.org/10.25100/iyc.v19i1.2145
- Parra Orobio, B. A., torres Lozada, P., Marmolejo Rebellón, L. F., Torres López, W. A., Fuentes López, L., Ossa Arias, M. d., & Barba Ho, L. E. (5 de enero de 2016). Evaluación de lodos de PTAR municipales como inóculos en la digestión anaerobia de biorresiduos. (P. Sonia A. Giraldo, Ed.) *ION Innovación, Optimización y Nuevos procesos en ingeniería*, 29(1), 37 - 46. doi:DOI: http://dx.doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016003
- Pham, T. P., Kaushik, R., Parshetti, G. K., & Mahmood, R. (Abril de 2015). Food waste-to-energy conversion technologies: Current status and future directions. (M. B. Editors-in-Chief: U. Arena, Ed.) *Waste Management*, 38(38), 399 - 408. doi:https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.12.004

- Rahman, M. A., Møller, H. B., Saha, C. K., Alam, M. M., Wahid, R., & Feng, L. (Agosto de 2017). Optimal ratio for anaerobic co-digestion of poultry droppings and lignocellulosic-rich substrates for enhanced biogas production. (E.-i.-C. D. Jones, Ed.) *Energy for Sustainable Development*, 39(39), 59 - 66. doi:<https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.04.004>
- Rajaeifar, M. A., Tabatabaei, M., Ghanavati, H., Khoshnevisan, B., & Raffie, S. (Noviembre de 2015). Comparative life cycle assessment of different municipal solid waste management scenarios in Iran. (E.-i.-C. A. Foley, Ed.) *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51(51), 886 - 898. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.037>
- Razaviarani, V., & Buchanan, I. D. (27 de Diciembre de 2014). Calibration of the Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1) for steady-state anaerobic co-digestion of municipal wastewater sludge with restaurant grease trap waste. (D. D. Co-Editors: S.J. Allen, Ed.) *Chemical Engineering Journal*, 266(266), 91 - 99. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2014.12.080>
- Ren, Y., Yu, M., Wu, C., Wang, Q., Gao, M., Huang, Q., & Liu, Y. (Enero de 2018). A comprehensive review on food waste anaerobic digestion: Research updates and tendencies. (E.-i.-C. A. Pandey, Ed.) *Bioresource Technology*, 247(247), 1069 - 1076. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.109>
- Reza Barati, M., Aghbashlo, M., Ghanavati, H., Tabatabaei, M., Sharifi, M., Javadirad, G., . . . Soufiyan, M. M. (01 de Noviembre de 2017). Comprehensive exergy analysis of a gas engine-equipped anaerobic digestion plant producing electricity and biofertilizer from organic fraction of municipal solid waste. (E.-i.-C. M. Al-Nimr, Ed.) *Energy Conversion and Management*, 151(151), 753 - 763. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.09.017>
- Rico, C., Muñoz, N., & Rico, J. L. (Agosto de 2015). Anaerobic co-digestion of cheese whey and the screened liquid fraction of dairy manure in a single continuously stirred tank reactor process: Limits in co-substrate ratios and organic loading rate. (E.-i.-C. A. Pandey, Ed.) *Bioresource Technology*, 189(189), 327 - 333. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.032>
- Rincón Ramírez, M., Rincón Lizardo, N., Mata Álvarez, J., & Chirinos, I. (31 de marzo de 2014). BIODEGRADABILIDAD DE RESIDUOS DE ALIMENTOS PREPARADOS BAJO CONDICIONES MESOFÍLICAS Y TERMOFÍLICAS UTILIZANDO UN REACTOR ANAERÓBICO DE MEZCLA COMPLETA. (C. Alvarez Jiménez, Ed.) *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 24(1), 29 - 48. doi:<http://dx.doi.org/10.18359/rcin.6>
- Rizvi, H., Ahmad, N., Abbas, F., Bukhari, I. H., Yasar, A., Ali, S., . . . Riaz, M. (15 de Noviembre de 2015). Start-up of UASB reactors treating municipal wastewater and effect of temperature/sludge age and hydraulic retention time (HRT) on its performance. (E.-i.-C. A. Alwarthan, Ed.) *Arabian Journal of Chemistry*, 8(6), 780 - 786. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.12.016>

- Rodríguez, A., Ángel, J., Rivero, E., Acevedo, P., Santis, A., Cabeza, I., . . . Hernández, M. (2017). Evaluation of the Biochemical Methane Potential of Pig Manure, Organic Fraction of Municipal Solid Waste and Cocoa Industry Residues in Colombia. (J. J. Guest Editors: Sauro Pierucci, Ed.) *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*, 57(57), 55 - 59. doi:DOI: 10.3303/CET1757010
- Ryan, C. A., Billington, S. L., & Criddle, C. S. (Abril de 2017). Methodology to assess end-of-life anaerobic biodegradation kinetics and methane production potential for composite materials. (E.-i.-C. a. Wisnom, Ed.) *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 95(95), 388 - 399. doi:https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.01.014
- Santos, J. M. (01 de 01 de 2009). <http://josanna.webs.uvigo.es/>. (S. J. Manuel, Ed.) Obtenido de <http://josanna.webs.uvigo.es/>: http://josanna.webs.uvigo.es/pdf/Tecnologia_Energetica/Carbon/TEN-T03-CARBON.pdf
- Sattar Nizami, A., Rehan, M., K. M., O., Shahzad, K., Sadeq, Y., Iqbal, T., & Ismail, M. (2015). An Argument for Developing Waste-to-Energy Technologies in Saudi Arabia. *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*, 45(45), 337 - 342. doi:DOI: 10.3303/CET1545057
- Seckin, C., & Bayulken, A. R. (9 de Mayo de 2013). Extended Exergy Accounting (EEA) analysis of municipal wastewater treatment – Determination of environmental remediation cost for municipal wastewater. (Sciencedirect, Ed.) *Applied Energy*, 110(110), 55 - 64. Recuperado el 17 de Mayo de 2015, de www.elsevier.com/locate/apenergy
- Seoanes Calvo, M. (2013). *Tratado de la Biomasa*. (M. León alonso, Ed.) Madrid, España: McGraw - Hill/Interamericana de España, S. L. Recuperado el 15 de julio de 2015
- Singh, V., & Pandey, N. D. (2016). A Comparison of Performance of ADM1 and Monod Model Treating Low Strength Wastewater. (P. S. Bland, Ed.) *Materials Today: Proceedings*, 3(10), 4157 - 4162. doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.11.090
- Soanes Calvo, M. (2013). *Tratado de la Biomasa*. (M. León alonso, Ed.) Madrid, España: McGraw - Hill/Interamericana de España, S. L. Recuperado el 15 de julio de 2015
- Solera del Río, R., Álvarez Gallego, C. J., Aymerich Soler, E., Bedmar Gómez, E., Carballa Arcos, M., Castrillón Pelaez, L., . . . Marañón Maison, E. (2014). II Procesos de biotransformación de la materia orgánica 2 Aspectos biológicos de la digestión anaeróbica. En R. Solera del Río, C. J. Álvarez Gallego, E. Aymerich Soler, E. Bedmar Gómez, M. Carballa Arcos, L. Castrillón Pelaez, . . . E. Marañón Maison, J. Moreno, R. Moral, J. L. García Morales, J. A. Pacual, & M. P. Bernal (Edits.), *DE RESIDUO A RECURSO, EL CAMINO HACIA LA SOSTENIBILIDAD* (Vol. II.2, págs. 17 - 319). Madrid, España: Grupo Mundi - Prensa Libros, S. A. Recuperado el 16 de enero de 2017

- Sossa, J. J., & Álvarez, R. (01 de junio de 2016). IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO IWA ADM1 A LA MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TRATAMIENTO ANAEROBIO DE LOS EFLUENTES INDUSTRIALES DE MATADERO EN UN REACTOR UASB. (R. Bolivianas, Ed.) *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 3(3), 67 - 80. Recuperado el 19 de enero de 2017, de http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?pid=S2409-16182016000100009&script=sci_arttext
- Spachos, T., & Anastassios, S. (2011). Thermal analysis and optimization of an anaerobic treatment system of whey. 36 (2011)(Páginas 2097 - 2105).
- Sung, T., Kim, S., & Kim, K. C. (25 de Diciembre de 2017). Thermo-economic analysis of a biogas-fueled micro-gas turbine with a bottoming organic Rankine cycle for a sewage sludge and food waste treatment plant in the Republic of Korea. (E.-i.-C. C. Markides, Ed.) *Applied Thermal Engineering*, 127(127), 963 - 974. doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.106>
- Tan, S. T., Ho, W. S., Hashim, H., Lee, C. T., Taib, M. R., & Ho, C. S. (15 de Septiembre de 2015). Energy, economic and environmental (3E) analysis of waste-to-energy (WTE) strategies for municipal solid waste (MSW) management in Malasya. (E.-i.-C. M. Al-Nimr, Ed.) *Energy Conversion and Management*, 102(102), 111 - 120. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.010>
- Tang, Y. Q., Shigematsu, T., Morimura, S., & Kida, K. (Abril de 2015). Dynamics of the microbial community during continuous methane fermentation in continuously stirred tank reactors. (E.-i.-C. J. Kato, Ed.) *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 119(4), 375 - 383. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2014.09.014>
- Toboso-Chavero, S., Nadal, A., Petit-Boix, A., Pons, O., Vllalba, G., Gabarell, X., . . . Rieradevall. (26 de Noviembre de 2018). Environmental Assessment of the Food-Energy-Water Nexus of the Urban Roof Mosaic. (E. m. Chester, Ed.) *Journal of Industrial Ecology*, 0(0), 1 - 14. doi:DOI: 10.1111/jiec.12829
- Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile, Chile: FAO. Recuperado el 7 de Enero de 2017, de <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>
- Veluchamy, C., & Kalamdhad, A. S. (Octubre de 2017). Enhanced methane production and its kinetics model of thermally pretreated lignocellulose waste material. (E.-i.-C. A. Pandey, Ed.) *Bioresource Technology*, 241(241), 1 - 9. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.068>
- Verdaguer, M., Molinos-Senante, M., & Poch, M. (Abril de 2016). Optimal management of substrates in anaerobic co-digestion: An ant colony algorithm approach. (M. B. Editors-in-Chief: U. Arena, Ed.) *Waste Management*, 50(50), 49 - 54. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.047>

- Wells, M. (2003). Manual de Laboratorio para la Identificación y Prueba de Susceptibilidad a los Antimicrobianos de Patógenos Bacterianos de Importancia para la Salud Pública en el Mundo en Desarrollo.
- Xie, S., Hai, F. I., Zhan, X., Guo, W., Ngo, H. H., Price, W. E., & Nghiem, L. D. (Diciembre de 2016). Anaerobic co-digestion: A critical review of mathematical modelling for performance optimization. (E.-i.-C. A. Pandey, Ed.) *Bioresource Technology*, 222(222), 498 - 512. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.015>
- Xie, S., Lawlor, P. G., Frost, P., Dennehy, C. D., Hu, Z., & Zhan, X. (Septiembre de 2017). A pilot scale study on synergistic effects of co-digestion of pig manure and grass silage. (E.-i.-C. J.-D. Gu, Ed.) *International Biodeterioration & Biodegradation*, 123(123), 244 - 250. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.07.005>
- Xie, S., Wickham, R., & Nghiem, L. D. (Enero de 2017). Synergistic effect from anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic wastes. (E.-i.-C. J.-D. Gu, Ed.) *International Biodeterioration & Biodegradation*, 116(116), 191 - 197. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.10.037>
- Xie, T., Xie, S., Sivakumar, M., & Nghiem, L. D. (Octubre de 2017). Relationship between the synergistic/antagonistic effect of anaerobic co-digestion and organic loading. (E.-i.-C. J.-D. Gu, Ed.) *International Biodeterioration & Biodegradation*, 124(124), 155 - 161. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.03.025>
- Xu, F., Li, Y., Ge, X., Yang, L., & Li, Y. (Enero de 2018). Anaerobic digestion of food waste – Challenges and opportunities. (E.-i.-C. A. Pandey, Ed.) *Bioresource Technology*, 247(247), 1047 - 1058. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.020>
- Xu, J., Adair, C. W., & Deshusses, M. A. (Septiembre de 2016). Performance evaluation of a full-scale innovative swine waste-to-energy system. (E.-i.-C. A. Pandey, Ed.) *Bioresource Technology*, 216(216), 494 - 502. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.089>
- Yasar, A., Ali, A., Tabinda, A. B., & Tahir, A. (Marzo de 2015). Waste to energy analysis of shakarganj sugar mills; biogas production from the spent wash for electricity generation. (E.-i.-C. A. Foley, Ed.) *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43(43), 126 - 132. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.038>
- Yeshanew, M. M., Frunzo, L., Pirozzi, F., Lens, P. N., & Esposito, G. (Noviembre de 2016). Production of biohythane from food waste via an integrated system of continuously stirred tank and anaerobic fixed bed reactors. (E.-i.-C. A. Pandey, Ed.) *Bioresource Technology*, 220(220), 312 - 322. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.078>
- Yong, Z., Zhang, X., & Tan, T. (Junio de 2015). Anaerobic co-digestion of food waste and straw for biogas production. (E.-i.-C. S. Kalogirou, Ed.) *Renewable Energy*, 78(78), 527 - 530. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.033>

- Zale, J., Jung, J. H., Kim, J. Y., Pathak, B., Karan, R., Liu, H., . . . Altpeter, F. (27 de Enero de 2016). Metabolic engineering of sugarcane to accumulate energy-dense triacylglycerols in vegetative biomass. (S. f. Biology, Ed.) *Plant Biotechnology Journal*, 14(14 - 2), 661 - 669. doi:10.1111/pbi.12411
- Zhai, N., Zhang, T., Yin, D., Yang, G., Wang, X., Ren, G., & Feng, Y. (Abril de 2015). Effect of initial pH on anaerobic co-digestion of kitchen waste and cow manure. (M. B. Editors-in-Chief: U. Arena, Ed.) *Waste Management*, 38(38), 126 - 131. doi:https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.12.027
- Zhang, T., Mao, C., Zhai, N., Wang, X., & Yang, G. (Enero de 2015). Influence of initial pH on thermophilic anaerobic co-digestion of swine manure and maize stalk. (M. B. Editors-in-Chief: U. Arena, Ed.) *Waste Management*, 35(35), 119 - 126. doi:https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.004
- Zhao, C., Mu, H., Zhao, Y., Wang, L., & Zuo, B. (Febrero de 2018). Microbial characteristics analysis and kinetic studies on substrate composition to methane after microbial and nutritional regulation of fruit and vegetable wastes anaerobic digestion. (E.-i.-C. A. Pandey, Ed.) *Bioresource Technology*, 249(249), 315 - 321. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.10.041
- Zhen, G., Lu, X., Kobayashi, T., Kumar, G., & Xu, K. (01 de Septiembre de 2016). Anaerobic co-digestion on improving methane production from mixed microalgae (*Scenedesmus* sp., *Chlorella* sp.) and food waste: Kinetic modeling and synergistic impact evaluation. (D. D. Co-Editors: S.J. Allen, Ed.) *Chemical Engineering Journal*, 299(299), 332 - 341. doi:https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.118
- Zhiying, Y., Song, Z., Li, D., Yuan, Y., Liu, X., & Zheng, T. (01 de Enero de 2015). The effects of initial substrate concentration, C/N ratio, and temperature on solid-state anaerobic digestion from composting rice straw. (ScienceDirect, Ed.) 177(177), 266 - 273. Recuperado el 17 de Mayo de 2016, de www.elsevier.com/locate/biortech

ANEXOS

ANEXOS

ANEXO A

PROBLEMÁTICA

Vistas del tiradero a cielo abierto, estiércol en el establo y descargas al mar



ANEXOS



ANEXOS



ANEXOS



ANEXO B

EQUIPOS E INSTALACIONES

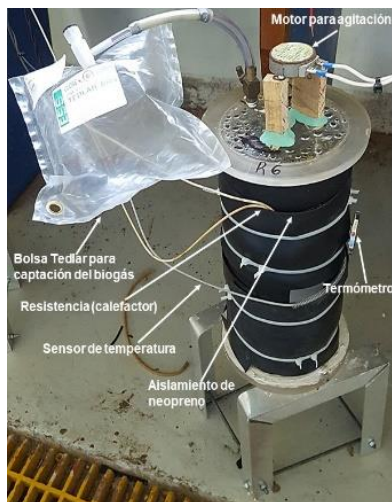


Figura B.1 biorreactor de mezcla completa



Termopar tipo J



Termómetro bimetalico

Figura B.2 Sensor tipo J y Termómetro bimetalico



Figura B.3 Paneles de control



Figura B.4 Contactor para conexión de calefactores



Figura B.5 Wattómetro



Figura B.6 pH-metro



Figura B.7 Balanza granataria



Figura B.8 Picadora para disminuir tamaño de partículas



Figura B.9 Licuadora para homogeneizar componentes y muestra



Figura B.10 Balanza para medir humedad



Figura B.11 Estufa eléctrica

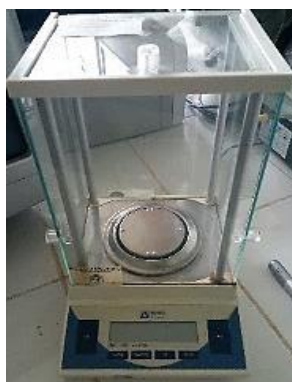


Figura B.12 Balanza analítica



Figura B.13 Mufla electrónica



Figura B.14 Analizador Elemental Flash 2000



Figura B.15 Recipientes de plástico para componentes y muestra



Figura B.16 Refrigerador para conservación



a) Medidores para biogás

b) Medidores para gases

Figura B.17 Medidores de flujo para gases



Figura B.18 Bolsa Tedlar para almacenar biogás



a) Instalación para absorción de CO₂



b) Cromatógrafo Agilent 3890B y Jeringa para inyección

Figura B.19 Instalación para absorción de dióxido de carbono con sosa caustica y Cromatógrafo Agilent 3890B con jeringa de inyección



Figura B.20 Cajas Petri



Figura B.21 Tubos de ensaye y gradilla



Figura B.22 Parrilla eléctrica, cuba y baño maría



Figura B.23 Matracas Erlenmeyer



Figura B.24 Campana de extracción y Mechero Fisher



Figura B.25 Jarra de anaerobiosis



Figura B.26 Desecadores



Figura B.27 Equipos de medición elemental y cromatográfico