



**UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN  
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:  
INGENIERO QUÍMICO**

**TEMA:**

“ Estudio de la cinética química para la obtención de biogás a partir de desechos orgánicos (residuos de frutas no cítricas y estiércol vacuno) para la validación del diseño y operatividad de un biodigestor didáctico anaerobio.”

**AUTORES:**

CHICA MERO ADRIÁN ALEXANDER  
VACA CHONILLO JAMILET VIVIANA

**DIRECTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN  
ING. STEFANIE MICHELLE BONILLA BERMEO, MSC**

**GUAYAQUIL – ECUADOR  
2018-2019**

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA		
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE GRADUACIÓN		
TÍTULO Y SUBTÍTULO:	" Estudio de la cinética química para la obtención de biogás a partir de desechos orgánicos (residuos de frutas no cítricas y estiércol vacuno) para la validación del diseño y operatividad de un biodigestor didáctico anaerobio."	
AUTOR(ES) (apellidos/nombres):	1. Chica Mero Adrián Alexander 2. Vaca Chonillo Jamilet Viviana	
REVISOR(ES)/TUTOR(ES) (apellidos/nombres):	Ing. Bonilla Bermeo Stefanie Michelle, Msc	
INSTITUCIÓN:	Universidad de Guayaquil	
UNIDAD/FACULTAD:	Facultad de Ingeniería Química	
MAESTRÍA/ESPECIALIDAD:	Bachiller en Ciencias-Egresados	
GRADO OBTENIDO:	Ingeniero Químico	
FECHA DE PUBLICACIÓN:	No. DE PÁGINAS:	205
ÁREAS TEMÁTICAS:	Industria proceso – Diseño ingeniería	
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Biodigestor, degradación, biogás, cinética de reacciones, demanda química de oxígeno	
RESUMEN/ABSTRACT:	En este proyecto se realiza el montaje de tres biodigestores (uno con agitación 43,10 L y dos sin ella 3 L), las materias primas son los residuos de frutas no cítricas (banana y papaya) inóculo y estiércol vacuno previamente homogenizadas y en diferentes porcentajes de concentración (relación estiércol-fruta es 80:20). Durante la fase experimental se efectuaron mediciones periódicas de las variables de control tales como pH, demanda química de oxígeno, temperatura y contenido de sólidos en los reactores. Se obtiene un efluente rico en nitrógeno y biogás con mayor porcentaje en metano. El tiempo de residencia hidráulica es de 24 días, con base a los resultados de las mediciones experimentales y ajustes por el método integral por tanteo, se obtiene que la mezcla óptima para el proceso es la mezcla II, siendo una reacción de orden $n= 1$ y la constante cinética es $k= 0,0781 d^{-1}$ .	
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: 0997074579 0969490714	E-mail: <a href="mailto:adrian.chicam@ug.edu.ec">adrian.chicam@ug.edu.ec</a> <a href="mailto:chinsjamilet@hotmail.com">chinsjamilet@hotmail.com</a>
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN:	Nombre: Universidad de Guayaquil – Facultad de Ingeniería Química Teléfono: 04-229-2949 E-mail: <a href="http://www.fiq.ug.edu.ec">www.fiq.ug.edu.ec</a>	

## Certificado Porcentaje De Similitud



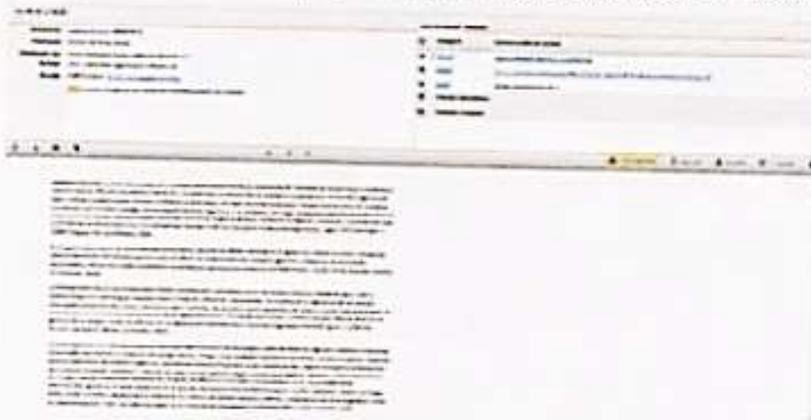
ANEXO 6

FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA  
CARRERA DE INGENIERIA QUÍMICA  
UNIDAD DE TITULACIÓN

### CERTIFICADO PORCENTAJE DE SIMILITUD

Habiendo sido nombrado **ING. STEFANIE MICHELLE BONILLA BERMEO, MSC.**, tutora del trabajo de titulación, certifico que el presente proyecto ha sido elaborado por **ADRIÁN ALEXANDER CHICA MERO, C.C.: 2450630740**, y **JAMILET VIVIANA VACA CHONILLO, C.C.: 1207731645**, con mi respectiva supervisión como requerimiento parcial para la obtención del título de **INGENIERO QUÍMICO**.

Se informa que el proyecto: **"ESTUDIO DE LA CINÉTICA QUÍMICA PARA LA OBTENCIÓN DE BIOMÁS A PARTIR DE DESECHOS ORGÁNICOS (RESIDUOS DE FRUTAS NO CITRICAS Y ESTIÉRCOL VACUNO) PARA LA VALIDACIÓN DEL DISEÑO Y OPERATIVIDAD DE UN BIODIGESTOR DIDÁCTICO ANAEROBIO"**, ha sido orientado durante todo el periodo de ejecución en el programa anti plagio (URKUND) quedando el 1% de coincidencias.



<https://secure.arkund.com/view/46935446-190394-934831>

  
Docente Tutor  
**ING. BONILLA BERMEO STEFANIE MICHELLE, MSC.**  
C.I.: 0919281311

Fecha: 27/2/2019

**Licencia Gratuita Intransferible Y No Exclusiva Para El Uso No Comercial De La Obra  
Con Fines No Académicos**



ANEXO 12

**FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA  
CARRERA DE INGENIERIA QUÍMICA  
UNIDAD DE TITULACIÓN**

---

**LICENCIA GRATUITA INTRANSFERIBLE Y NO EXCLUSIVA PARA EL USO NO  
COMERCIAL DE LA OBRA CON FINES NO ACADÉMICOS**

Nosotros, CHICA MERO ADRIÁN ALEXANDER con C.C.: 2450630740, y JAMILET VIVIANA VACA CHONILLO con C.C.: 1207731645, certificamos que los contenidos desarrollados en este trabajo de titulación, cuyo título es "ESTUDIO DE LA CINÉTICA QUÍMICA PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE DESECHOS ORGÁNICOS (RESIDUOS DE FRUTAS NO CÍTRICAS Y ESTIÉRCOL VACUNO) PARA LA VALIDACIÓN DEL DISEÑO Y OPERATIVIDAD DE UN BIODIGESTOR DIDÁCTICO ANAEROBIO", son de nuestra absoluta propiedad y responsabilidad Y SEGÚN EL Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN\*, autorizamos el uso de una licencia gratuita intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la presente obra con fines no académicos, en favor de la Universidad de Guayaquil, para que haga uso del mismo, como fuera pertinente-

\_\_\_\_\_

CHICA MERO ADRIÁN ALEXANDER  
C.C.: 2450630740

\_\_\_\_\_

JAMILET VIVIANA VACA CHONILLO  
C.C.: 1207731645

\*CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN (Registro Oficial: 899 - Dic./2015)  
Artículo 114 - De los titulares de derechos de obras creadas en las instituciones de educación superior y centros educativos - En el caso de las obras creadas en centros educativos, universidades, escuelas politécnicas, institutos superiores técnicos, tecnológicos, pedagógicos, de artes y las correspondientes superiores, e institutos públicos de investigación como resultado de su actividad académica o de investigación tales como trabajos de titulación, proyectos de investigación o innovación, artículos académicos, u otros análogos, en perjuicio de que pueda existir relación de dependencia, la titularidad de los derechos patrimoniales corresponderá a los autores. Sin embargo, el establecimiento tendrá una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra con fines académicos.

## **Agradecimiento**

*Al creador, por la fuerza y sabiduría otorgada cada día en las diferentes etapas de mi vida, le doy infinitamente agradecimiento en primer lugar.*

*Del mismo modo y no menos importante a mi madre, por la confianza, consejos, motivación y el apoyo incondicional demostrado a lo largo de mi vida, corrigiendo mis defectos y festejando mis triunfos.*

*A mi padre por su presencia y ejemplo, que ayudaron en mi crecimiento personal y profesional durante todo el trayecto de vida.*

*A mis abuelos maternos, por su incondicional apoyo y aportes de recursos; por compartir momentos de alegría, demostrando que siempre podré contar con ellos.*

*A mis hermanos por sus compañías y los retos enfrentados juntos día a día, por el apoyo y sacrificio de tiempo de mi hermano Wladimir Chica Mero, otorgados para culminar una etapa más de mi vida.*

*A mi tía Dolores Sornoza y primas por recibirme en su hogar, la ayuda mutua durante toda mi carrera de tercer nivel, así como las enseñanzas recibidas semana a semana.*

*A Katherine Ordoñez por su constante motivación, preocupación y momentos compartidos, así como su ayuda, cariño y comprensión que han sido parte fundamental de mi vida.*

*A mis compañeros y amigos y de manera especial a Jamilet Vaca que, por su amabilidad, respeto y ayuda desinteresada, han demostrado una gran calidad de amistad ante mi perspectiva de la sociedad.*

*Finalmente, a la Ing. Stefanie Bonilla, tutora de la tesis por toda la colaboración, amabilidad, valiosa guía y asesoramiento brindada durante la elaboración de la misma.*

*Adrián Alexander Chica Mero.*

## **Agradecimiento**

*Quiero expresar mi gratitud a Dios todo poderoso por darme vida, la vida en este mundo y por permitirme alcanzar mis metas indispensables para culminar mi carrera profesional.*

*A mis padres que son el amor de mi vida por apoyarme con mis estudios universitarios.*

*A mis madres por ser mi inspiración y motivación para alcanzar mis anhelados, deseos, por ser participe en los momentos significativos conmigo, escuchándome, aconsejándome para ser perseverante y lograr mis metas junto a ella.*

*A mis hermanas y sobrinas por hacerme sonreír en mis días grises y que todo tiene una solución por muy compleja que sea.*

*A mi tía por acogerme en su hogar durante el trayecto de mi vida estudiantil, guiándome a que no siga malos pasos, preocuparse por mí y a encontrar consuelo en un abrazo.*

*A la Ing. Stefanie Bonilla por su infinita paciencia y constante motivación para culminar este trabajo de titulación y a la Dra. Mirella Bermeo por su amistad y consejos para obtener un excelente proceso de digestión anaerobia.*

*A mis mejores amigos por recordarme el significado de la palabra amistad, por estar conmigo, por ayudarme a ver mis errores y que la mejor solución no es huir y rendirse.*

*Gracias a la vida por este nuevo triunfo, gracias a todas las personas que me apoyaron y creyeron en la realización de esta tesis.*

*Jamilet Viviana Vaca Chonillo*

## **Dedicatoria**

*A Dios, por permitirme llegar a culminar una etapa especial en mi vida; por los triunfos y dificultades superadas generando experiencia y enseñándome a valorarlo día a día. A mi madre por ser mi acompañante en cada situación durante todo mi trayecto de vida y estudiantil; a mi familia que han velado por mí durante este arduo camino hasta convertirme en profesional por sus consejos que han sido de guía para culminar mi profesión. A mis amigos y compañeras por su apoyo y gran amistad brindada durante mi carrera y a los profesores por sus conocimientos transmitidos, guía y tiempo otorgados para el desarrollo de mi formación profesional.*

*Adrián Alexander Chica Mero*

*El presente trabajo está dedicado a Dios y a mi familia por su amor incondicional y constante apoyo, son muchas las personas que han formado parte de mi vida de estudio profesional me encantan agradecerles por su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.*

*Jamilet Viviana Vaca Chonillo*

## Índice De Contenido

<b>Certificado Porcentaje De Similitud.....</b>	<b>III</b>
<b>Licencia Gratuita Intransferible Y No Exclusiva Para El Uso No Comercial De La Obra Con Fines No Académicos .....</b>	<b>IV</b>
<b>Agradecimiento .....</b>	<b>V</b>
<b>Agradecimiento .....</b>	<b>VI</b>
<b>Dedicatoria .....</b>	<b>VII</b>
<b>Índice De Contenido.....</b>	<b>8</b>
<b>Índice De Tablas.....</b>	<b>18</b>
<b>Índice De Figuras .....</b>	<b>21</b>
<b>Índice De Ecuaciones .....</b>	<b>23</b>
<b>Índice De Fotografías.....</b>	<b>26</b>
<b>Índice De Gráficas.....</b>	<b>27</b>
<b>Índice De Anexos .....</b>	<b>28</b>
<b>Nomenclatura .....</b>	<b>29</b>

<b>Resumen .....</b>	<b>34</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>35</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>36</b>
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>40</b>
<b>1. Problema .....</b>	<b>40</b>
<b>1.1. Tema .....</b>	<b>40</b>
<b>1.2. Planteamiento del problema.....</b>	<b>40</b>
<b>1.3. Formulación y sistematización de la investigación .....</b>	<b>41</b>
1.3.1. Formulación del problema de investigación. ....	41
1.3.2. Sistematización del problema. ....	41
<b>1.4. Justificación .....</b>	<b>42</b>
1.4.1. Justificación teórica. ....	42
1.4.2. Justificación metodológica.....	43
1.4.3. Justificación práctica.....	43
<b>1.5. Objetivos de la investigación .....</b>	<b>43</b>
1.5.1. Objetivo general.....	43
1.5.2. Objetivos específicos. ....	43
<b>1.6. Delimitación de la investigación.....</b>	<b>44</b>

1.6.1.	Delimitación temporal. ....	44
1.6.2.	Delimitación espacial. ....	44
1.6.3.	Delimitación del contenido. ....	45
<b>1.7.</b>	<b>Hipótesis</b> .....	<b>45</b>
<b>1.8.</b>	<b>Variables</b> .....	<b>45</b>
1.8.1.	Variable independiente. ....	46
1.8.2.	Variable dependiente. ....	46
1.8.3.	Operacionalización de variables. ....	46
<b>CAPÍTULO II</b> .....		<b>51</b>
<b>2.</b>	<b>Marco referencial</b> .....	<b>51</b>
<b>2.1.</b>	<b>Antecedentes de la investigación</b> .....	<b>51</b>
<b>2.2.</b>	<b>Marco teórico</b> .....	<b>52</b>
2.2.1.	Tratamiento de residuos sólidos urbanos (RSU). ....	52
2.2.1.1.	Proceso físico. ....	53
2.2.1.2.	Proceso termoquímico.....	53
2.2.1.3.	Procesos biológicos. ....	53
2.2.1.4.	Métodos para el tratamiento de residuos sólidos. ....	54
2.2.2.	Biomasa.....	59
2.2.2.1.	Fuentes para la obtención de la biomasa. ....	59
2.2.3.	Características de la biomasa para la digestión anaerobia. ....	60

2.2.3.1.	Contenido de sólidos o sólidos totales (ST).....	61
2.2.3.2.	Contenido de sólidos volátiles (SV).....	61
2.2.3.3.	Carga orgánica volumétrica (COV). ....	61
2.2.3.4.	Demanda química de oxígeno (DQO).....	62
2.2.3.5.	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).....	62
2.2.4.	Digestión anaerobia. ....	62
2.2.4.1.	Reacciones biológicas. ....	67
2.2.4.1.1.	Hidrólisis. ....	67
2.2.4.1.2.	Fase acetogénica. ....	68
2.2.4.1.3.	Fase metanogénica.....	68
2.2.4.2.	Reacciones bioquímicas. ....	69
2.2.4.3.	Degradación anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos. ....	71
2.2.4.4.	Degradación anaerobia de residuos vegetales. ....	72
2.2.4.5.	Co-digestión anaeróbica de residuos orgánicos biodegradables. ....	73
2.2.4.6.	Inóculo.....	74
2.2.5.	Parámetros para elevar la eficiencia en tratamientos anaerobios.....	74
2.2.6.	Reacción química.....	75
2.2.7.	Velocidad de reacción.....	77
2.2.7.1.	Factores que influyen en la velocidad de reacción.....	80
2.2.8.	Cinética química. ....	81
2.2.8.1.	Factores que intervienen en la cinética química. ....	81
2.2.9.	Tipos de cinética. ....	82
2.2.9.1.	Cinética de orden cero.....	83

2.2.9.2.	Ley de potencia. ....	84
2.2.9.3.	Cinética de Monod (cinética de crecimiento bacteriano).....	86
2.2.10.	Métodos para el análisis de datos de velocidad.....	91
2.2.10.1.	Método integral. ....	92
2.2.10.2.	Método diferencial. ....	92
2.2.10.3.	Método de las vidas medias. ....	93
2.2.10.4.	Efecto de la temperatura.....	96
<b>2.3.</b>	<b>Marco conceptual.....</b>	<b>96</b>
2.3.1.	Reactor químico.....	96
2.3.1.1.	Reactor de acuerdo a sus condiciones de operación .....	98
2.3.1.1.1.	Reactor intermitente (Batch) .....	98
2.3.1.1.2.	Reactor de flujo continuo .....	99
2.3.1.2.	Diseño en el biodigestor.....	99
2.3.1.2.1.	Parámetros de diseño.....	99
2.3.1.2.2.	Instalaciones complementarias.....	99
2.3.1.2.3.	Características del afluente:.....	100
2.3.2.	Biogás. ....	101
2.3.2.1.	Formación de metano.....	101
2.3.2.2.	Componentes del biogás. ....	102
2.3.2.3.	Efectos del CO <sub>2</sub> en el biogás.....	104
2.3.2.4.	Utilización del biogás.....	105
2.3.3.	Proceso de fermentación de biogás.....	105
2.3.4.	Producción de biogás en función del sustrato.....	106

2.3.4.1. Hidratos de carbono. ....	106
2.3.4.2. Proteínas. ....	106
2.3.4.3. Lípidos. ....	106
2.3.5. Biodigestores. ....	107
2.3.5.1. Ventajas y desventajas de los biodigestores anaerobios. ....	107
2.3.5.2. Clasificación de los biodigestores. ....	108
2.3.5.2.1. Régimen de carga ....	108
2.3.5.2.2. Según su método de construcción. ....	109
2.3.5.3. Componentes de los biodigestores. ....	110
2.3.6. Parámetros en la producción de biogás. ....	111
2.3.6.1. Temperatura. ....	111
2.3.6.2. pH. ....	112
2.3.6.3. Potencial redox. ....	113
2.3.6.4. Nutrientes (relación C/N). ....	113
2.3.6.5. Desintegración. ....	113
<b>2.4. Marco contextual. ....</b>	<b>114</b>
<b>2.5. Marco legal. ....</b>	<b>114</b>
2.5.1. Escenarios a ser analizados. ....	115
2.5.2. Estudios de la calidad del producto. ....	115
2.5.3. Pruebas y certificación de equipos. ....	115
2.5.4. Requisitos según tecnología. ....	116
<b>CAPÍTULO III. ....</b>	<b>117</b>

<b>3. Marco metodológico.....</b>	<b>117</b>
<b>3.1. Diseño de la investigación.....</b>	<b>117</b>
<b>3.2. Tipo de investigación.....</b>	<b>117</b>
3.2.1. Investigación bibliográfica.....	117
3.2.2. Investigación experimental.....	117
<b>3.3. Aportes.....</b>	<b>117</b>
3.3.1. Académico.....	118
3.3.2. Tecnológica.....	118
3.3.3. Económica.....	118
3.3.4. Ambiental.....	118
<b>3.4. Métodos y técnicas.....</b>	<b>118</b>
3.4.1. Métodos.....	118
3.4.1.1. Métodos empíricos.....	118
3.4.1.2. Métodos estadísticos.....	119
3.4.1.3. Métodos analíticos.....	119
3.4.2. Técnicas.....	119
3.4.2.1. Técnica utilizada.....	119
<b>3.5. Materiales y equipo.....</b>	<b>119</b>
3.5.1. Materiales.....	119
3.5.2. Equipos.....	122
3.5.3. Reactivos.....	122

3.5.4.	Materia prima.....	123
3.5.5.	Plano frontal del biodigestor.....	123
<b>3.6.</b>	<b>Metodología experimental.....</b>	<b>124</b>
3.6.1.	Diseño del biodigestor didáctico anaerobio.....	124
3.6.1.1.	Volumen del tanque.....	124
3.6.1.1.1.	Cálculo de la altura del líquido.....	126
3.6.1.1.2.	Cálculo del volumen de operación del líquido.....	126
3.6.1.1.3.	Cálculo para el diámetro del impulsor.....	127
3.6.1.1.4.	Cálculo del ancho de la paleta del agitador.....	127
3.6.1.1.5.	Cálculo del largo de la paleta del agitador.....	127
3.6.1.1.6.	Cálculo de la altura entre el fondo del tanque y agitador.....	127
3.6.1.1.7.	Cálculo para la potencia del motor de agitación.....	127
3.6.2.	Procedimiento experimental.....	131
3.6.2.1.	Acondicionamiento del sustrato orgánico.....	131
3.6.2.3.	Preparación de la mezcla inicial.....	131
3.6.2.4.	Pruebas hidrostáticas.....	132
3.6.2.5.	Acondicionamiento y llenado del biodigestor.....	134
3.6.2.6.	Caracterización de la muestra inicial.....	134
3.6.3.	Métodos de caracterización.....	135
3.6.3.1.	Procedimiento de los análisis para la caracterización de la mezcla inicial del biodigestor anaerobio.....	135
3.6.3.2.	Análisis del biogás obtenido.....	140
3.6.4.	Diseño experimental.....	141

3.6.5.	Operatividad de los biodigestores experimentales.....	143
3.6.6.	Métodos para obtener la ley de velocidad.....	144
3.6.6.1.	Método integral aplicado al estudio cinético. ....	145
<b>CAPÍTULO IV .....</b>		<b>147</b>
<b>4.</b>	<b>Resultados y discusión .....</b>	<b>147</b>
4.1.	Diseño de los experimentos y operatividad de los biodigestores.....	147
4.2.	Caracterización de mezclas reactivas.....	149
4.3.	Caracterización de biogás de las mezclas reactivas .....	152
4.4.	Indagación de la mezcla óptima en los biodigestores discontinuos sin alimentación	
	153	
4.5.	Resolución del estudio cinético.....	154
4.5.1.	Ajuste a la ecuación de Monod.....	155
4.5.2.	Selección de método a aplicar para determinación de orden de la reacción y	
	constante cinética. ....	157
4.5.3.	Método integral por tanteo.....	158
<b>CAPÍTULO V.....</b>		<b>166</b>
<b>5.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>166</b>
5.1.	Conclusiones .....	166

<b>5.2. Recomendaciones .....</b>	<b>169</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>170</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>175</b>
<b>Anexo A: Balance de materia.....</b>	<b>175</b>
<b>Anexo B: Costos de producción y estudio cinético .....</b>	<b>179</b>
<b>Anexo C: Formulaciones para las mezclas iniciales a utilizar .....</b>	<b>181</b>
<b>Anexo D: Evidencias fotográficas .....</b>	<b>184</b>
<b>Anexo E: Diseño de experimentos .....</b>	<b>188</b>
<b>Anexo F: Estudio de la cinética química de la digestión anaerobia .....</b>	<b>192</b>
<b>Anexo G: Diagrama de flujo del proceso .....</b>	<b>200</b>
<b>Anexo H: Hoja de seguridad del gas metano.....</b>	<b>201</b>
<b>Anexo I: Resultado de los análisis finales realizados en un laboratorio acreditado .....</b>	<b>203</b>

## Índice De Tablas

Tabla 1. Operacionalización de las variables .....	46
Tabla 2. Ventajas, desventajas, costo y efectividad de los métodos del tratamiento de residuos .....	54
Tabla 3. Clasificación de la biomasa.....	60
Tabla 4. Principales productos de la fermentación ácida .....	65
Tabla 5. Oxidantes y reductores de respiraciones bacteriales .....	66
Tabla 6. Productos en la generación de biogás .....	69
Tabla 7. Reacciones químicas principales de la digestión anaerobia.....	70
Tabla 8. Factores principales que influyen en la digestión anaerobia.....	75
Tabla 9. Representación de las dimensiones para el coeficiente cinético .....	82
Tabla 10. Propiedades de una composición estándar de biogás.....	102
Tabla 11. Composición del biogás y consecuencias en las propiedades.....	103
Tabla 12. Ventajas y desventajas de los biodigestores anaerobios .....	107
Tabla 13. Parámetros presentes en las etapas principales de degradación anaerobia para la producción de biogás .....	111
Tabla 14. Tiempos de retención recomendados para el diseño de biodigestores.....	112
Tabla 15. Regulación vigente ARCONEL.....	116
Tabla 16. Materiales empleados en la construcción del biodigestor .....	120
Tabla 17. Materiales empleados para el estudio de la cinética química .....	121
Tabla 18. Reactivos y sus porcentajes de pureza en la caracterización de las mezclas de los biodigestores .....	122
Tabla 19. Porcentajes y procedencia de las materias primas en las mezclas iniciales.....	123

Tabla 20. Propiedades de un compost.....	128
Tabla 21. Criterios de diseño de Richter .....	128
Tabla 22. Especificaciones del biodigestor .....	130
Tabla 23. Condiciones de operación del biodigestor .....	130
Tabla 24. Composición de la mezcla inicial .....	132
Tabla 25. Resultados de la caracterización individual y de las mezclas iniciales de los biodigestores (con y sin agitación) .....	134
Tabla 26. Normas utilizadas para los análisis de las mezclas iniciales de los biodigestores .	140
Tabla 27. Cantidad de muestra para los parámetros de caracterización de las mezclas en los biodigestores (sin y con agitación) .....	142
Tabla 28. Valores de control de los parámetros de caracterización de las mezclas en los biodigestores (sin y con agitación) .....	143
Tabla 29. Caracterización de valores iniciales y finales de cada biodigestor .....	148
Tabla 30. Composición del biogás producido en los biodigestores anaerobios.....	152
Tabla 31. Valores de las constantes cinéticas de la ecuación de Monod .....	157
Tabla 32. Valores de las constantes del método integral por el tanteo de orden .....	162
Tabla 33. Velocidad de reacción inicial y final en las diferentes mezclas.....	163
Tabla 34. Totales de las masas tamizadas y agua de inóculo usada en la preparación de las mezcla II.....	182
Tabla 35. Totales de las masas tamizadas y agua de inóculo usada en la preparación de las mezcla III .....	183
Tabla 36. Disminución del pH en variación del tiempo de operatividad.....	188

Tabla 37. Disminución de los sólidos totales y sólidos volátiles en variación del tiempo de operatividad.....	189
Tabla 38. Disminución del DQO en variación del tiempo de operatividad .....	190
Tabla 39. Incremento de la producción de biogás con la variación del tiempo de residencia	191
Tabla 40. Ajuste a la cinética de Monod.....	192
Tabla 41. Método diferencial aplicado a mezcla I .....	193
Tabla 42. Concentración y conversión de DQO .....	194
Tabla 43. Método integral para orden 0 .....	195
Tabla 44. Método integral para orden 1 .....	196
Tabla 45. Método integral para orden 2 .....	197
Tabla 46. Método integral para orden 3 .....	198
Tabla 47. Valores de constante y velocidad de reacción para orden 1.....	199

## Índice De Figuras

Figura 1. Ubicación del Laboratorio de Aguas y Medio Ambiente de la Facultad de Ingeniería Química.....	45
Figura 2. Ciclo de la biomasa.....	59
Figura 3. Proceso elemental del proceso anaerobio .....	63
Figura 4. Descripción de la oxidación anaerobia de compuestos orgánicos, representación de Zeikus.....	64
Figura 5. Formación de metano en la digestión anaerobia.....	65
Figura 6. Clasificación de las reacciones químicas.....	76
Figura 7. Proceso de una reacción.....	78
Figura 8. Cinética para una reacción de orden cero .....	84
Figura 9. Forma linealizada de la cinética para a) reacción de primer orden, b) reacción de segundo orden .....	86
Figura 10. Cinética de Monod.....	87
Figura 11. Representación de Lineweaver .....	89
Figura 12. Estimación de las constantes de Monod .....	90
Figura 13. Método diferencial para comprobar el orden de cualquier reacción química.....	93
Figura 14. Método de las vidas medias .....	95
Figura 15. Ecuación de Arrhenius para encontrar la energía de activación y el factor pre-exponencial .....	96
Figura 16. Clasificación de los reactores químicos.....	97
Figura 17. Diseño de un reactor .....	98
Figura 18. Origen del metano.....	102

Figura 19. Usos del biogás .....	105
Figura 20. Rangos de operación para organismos mesofílicos o termofílicos.....	112
Figura 21. Diferenciación de la obtención de biogás en función del proceso de fermentación y la etapa de desintegración .....	113
Figura 22. Plano frontal del biodigestor y el agitador.....	123
Figura 23. Plano frontal y superior del biodigestor.....	124
Figura 24. Semejanzas geométricas impulsor tipo turbina .....	126
Figura 25. a) Termómetro en el biodigestor b) Chaleco térmico .....	133
Figura 26. Equipos a) Mufla b) Balanza analítica c) Parilla eléctrica utilizados los análisis de caracterización de la mezcla inicial y productos.....	136
Figura 27. Muestras iniciales, luego del baño maría para determinar el contenido de ST ....	136
Figura 28. Preparación y rotulación de las muestras iniciales del biodigestor .....	138
Figura 29. Preparación de las muestras iniciales del biodigestor para determinar el contenido de sólidos totales disueltos.....	138
Figura 30. Reactor HACH y muestras para calentar a 150°C.....	140
Figura 31. Envases de recolección y determinación de la composición del biogás.....	141
Figura 32. Porcentaje de las CH <sub>4</sub> obtenido de las mezcla I (0), mezcla II (1) y mezcla III (2) .....	153
Figura 33. Análisis cuantitativo de quemado de las mezclas.....	153
Figura 34. Descripción gráfica de las entradas y salidas del biodigestor.....	175
Figura 35. Balance de materia para Mezcla I.....	176
Figura 36. Balance de materia para Mezcla II .....	177
Figura 37. Balance de materia para Mezcla III .....	178

## Índice De Ecuaciones

Ec (1). Ecuación general para la producción de metano .....	69
Ec (2). Subíndices (x) para la ecuación general para la producción de metano.....	69
Ec (3). Subíndices (y) para la ecuación general para la producción de metano.....	69
Ec (4). Ecuación estequiométrica de una reacción química.....	75
Ec (5). Reacción biológica anaerobia.....	77
Ec (6). Reacción Biológica aerobia.....	77
Ec (7). Expresión matemática de la velocidad de reacción (cambios de concentración dependiente del tiempo).....	79
Ec (8). Representación de la correlación entre la velocidad de cambio y la velocidad de reacción.....	79
Ec (9). Expresión de la velocidad de reacción de acuerdo a la ley de potencia.....	79
Ec (10). Ecuación de velocidad con varios reactivos.....	80
Ec (11). Ecuación general para encontrar el orden de una reacción global .....	80
Ec (12). Ecuación estequiométrica de orden cero .....	83
Ec (13). Ecuación general de velocidad para una reacción de orden cero .....	83
Ec (14). Integración de las concentraciones y tiempo para una reacción de orden cero.....	83
Ec (15). Ecuación para encontrar el valor de la concentración final .....	83
Ec (16). Ecuación estequiométrica de primer orden .....	84
Ec (17). Ecuación general de velocidad para una reacción de primer orden .....	84
Ec (18). Integración de las concentraciones y tiempo para una reacción de primer orden .....	85
Ec (19). Expresión de la ley de velocidad para una reacción de primer orden .....	85
Ec (20). Expresión de la ley de velocidad para una reacción de segundo orden .....	85

Ec (21). Expresión de la ecuación de velocidad para una reacción de segundo orden .....	85
Ec (22). Expresión de la ecuación de velocidad para una reacción de segundo orden .....	85
Ec (23). Expresión linealizada de la velocidad de reacción de segundo orden.....	86
Ec (24). Expresión matemática de la cinética de Monod.....	87
Ec (25). Expresión reducida de la cinética de Monod .....	87
Ec (26). Aproximación de una reacción de primer orden a bajas concentraciones .....	88
Ec (27). Aproximación de una reacción de orden cero a altas concentraciones .....	88
Ec (28). Expresión linealizada de la cinética de Monod.....	88
Ec (29). Ecuación para el rendimiento del crecimiento celular .....	89
Ec (30). Expresión linealizada de la ecuación de Monod para tanques agitado .....	90
Ec (31). Ecuación general para calcular la velocidad de consumo del sustrato.....	90
Ec (32). Ecuación simplificada para calcular la velocidad de consumo del sustrato.....	91
Ec (33). Ajustes de la ecuación de velocidad con datos experimentales .....	92
Ec (34). Expresión general de la ecuación de velocidad para una reacción de cualquier orden .....	93
Ec (35). Ecuación logarítmica de la ecuación de velocidad.....	93
Ec (36). Integración de la ecuación de velocidad para un reactor intermitente .....	94
Ec (37). Ecuación para calcular el tiempo en un reactor intermitente .....	94
Ec (38). Ecuación del tiempo de vida media para un reactor intermitente .....	94
Ec (39). Ecuación del tiempo de vida media para una reacción de primer orden.....	95
Ec (40). Ecuación del tiempo de vida media para una reacción de segundo orden .....	95
Ec (41). Ecuación de Arrhenius .....	96

Ec (42). Ecuación estequiométrica para la producción de metano en función de hidratos de carbono.....	106
Ec (43). Ecuación estequiométrica para la producción de metano mediante la descomposición de glicina.....	106
Ec (44). Ecuaciones estequiométricas para la producción de metano mediante la glicerina y ácidos grasos .....	106
Ec (45). Ecuación de cálculo del volumen del tanque .....	124
Ec (46). Ecuación de cálculo de la altura del líquido.....	125
Ec (47). Ecuación de cálculo del diámetro del impulsor .....	125
Ec (48). Ecuación de cálculo del ancho de la paleta del agitador .....	125
Ec (49). Ecuación de cálculo del largo de la paleta del agitador .....	125
Ec (50). Ecuación de cálculo para la altura entre el fondo del tanque y agitador .....	126
Ec (51). Relación entre el volumen del tanque y el volumen de operación.....	126
Ec (52). Ecuación de cálculo para el volumen de operación .....	127
Ec (53). Ecuación de cálculo de la potencia del motor .....	127
Ec (54). Relación entre la potencia del motor con la velocidad de agitación .....	129
Ec (55). Ecuación de cálculo de la cantidad de RPM .....	129
Ec (56). Ecuación de cálculo para la pérdida de velocidad de un sistema de polea .....	129
Ec (57). Ecuación de cálculo del contenido de sólidos totales .....	136
Ec (58). Ecuación de cálculo del contenido de sólidos totales volátiles .....	137
Ec (59). Ecuación de cálculo del contenido de sólidos totales fijos .....	137
Ec (60). Ecuación para calcular concentración final.....	145
Ec (61). Ecuación empírica de orden n .....	145

## Índice De Fotografías

Fotografía 1. Tanque y agitador empleados en el biodigestor con agitación.....	184
Fotografía 2. Acoplamiento del agitador al biodigestor.....	184
Fotografía 3. Elaboración y presentación del chaleco térmico .....	185
Fotografía 4. Biodigestores con agitación y biodigestores sin agitación discontinuos sin alimentación.....	185
Fotografía 5. Preparación de las materias primas individualmente .....	185
Fotografía 6. Caracterización de las materias primas individualmente y mezclas iniciales ..	186
Fotografía 7. Lectura de pH de izquierda a derecha mezcla I, mezcla II y mezcla III .....	186
Fotografía 8. Lectura de los sólidos disueltos de las materias primas individualmente .....	186
Fotografía 9. Prácticas del sistema de desplazamiento volumétrico utilizado.....	187
Fotografía 10. Vista frontal de los biodigestores sin agitación y su respectivo sistema de desplazamiento volumétrico .....	187
Fotografía 11. Lectura de pH del NaOH al 4% antes y después del entrar en contacto con el CH <sub>4</sub> .....	187

## Índice De Gráficas

Gráfica 1. pH Vs tiempo .....	148
Gráfica 2. Producción acumulada de biogás Vs tiempo .....	149
Gráfica 3. Concentración DQO Vs tiempo .....	150
Gráfica 4. Sólidos totales Vs tiempo.....	150
Gráfica 5. Sólidos volátiles Vs tiempo.....	151
Gráfica 6. Sólidos totales disueltos Vs tiempo.....	151
Gráfica 7. Producción de biogás Vs concentración de DQO .....	154
Gráfica 8. Ajuste a la cinética de Monod para mezcla I .....	155
Gráfica 9. Ajuste a la cinética de Monod para mezcla II.....	156
Gráfica 10. Ajuste a la cinética de Monod para mezcla III.....	156
Gráfica 11. Método diferencial aplicado a mezcla I .....	158
Gráfica 12. Ajuste lineal de datos de mezcla I por método integral para: a) Orden cero, b) Orden uno, c) Orden dos, d) Orden tres.....	159
Gráfica 13. Ajuste lineal de datos de mezcla II por método integral para: a) Orden cero, b) Orden uno, c) Orden dos, d) Orden tres.....	160
Gráfica 14. Ajuste lineal de datos de mezcla III por método integral para: a) Orden cero, b) Orden uno, c) Orden dos, d) Orden tres.....	161
Gráfica 15. Velocidad de reacción (orden uno) Vs tiempo.....	163
Gráfica 16. Concentración DQO Vs conversión.....	164
Gráfica 17. Conversión DQO Vs tiempo .....	165

## Índice De Anexos

Anexo A: Balance de materia .....	175
Anexo B: Costos de producción y estudio cinético .....	179
Anexo C: Formulaciones para las mezclas iniciales a utilizar .....	181
Anexo D: Evidencias fotográficas.....	184
Anexo E: Diseño de experimentos .....	188
Anexo F: Estudio de la cinética química de la digestión anaerobia.....	192
Anexo G: Diagrama de flujo del proceso.....	200
Anexo H: Hoja de seguridad del gas metano .....	201
Anexo I: Resultado de los análisis finales realizados en un laboratorio acreditado .....	203

## Nomenclatura

AGV	Ácidos grasos volátiles
$\mu$	Tasa de crecimiento
$\mu_{\text{máx.}}$	Tasa máxima de crecimiento
ARCONEL	Agencia de regulación y control de electricidad
bar	Bares
C/N	Carbono/nitrógeno
$C_A$	Concentración final
$C_{A0}$	Concentración inicial
$C_C$	Concentración de nuevas bacterias
cd	Cada
cm	Centímetro
$\text{cm}^3$	Centímetro cúbico
COT	Carbono orgánico total
COV	Carga orgánica volumétrica
$C_{\text{productos}}$	Concentración de productos
$C_{\text{reactivos}}$	Concentración de reactivos
$C_S$	Concentración del sustrato
$C_{S0}$	Concentración del sustrato inicial
$C_{Sf}$	Concentración del sustrato final
CSTR	Reactor continuo de mezcla completa
$C_X$	Concentración de biomasa
$C_{X0}$	Concentración de biomasa inicial

$C_{Xf}$	Concentración de biomasa final
d	Día
$D_a$	Diámetro de impulsor
DA	Digestión anaerobia
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
$D_t$	Diámetro del tanque
E	Altura entre el fondo del tanque y agitador
EA	Energía de activación
FORSU	Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos
G	Largo de la paleta
g	Gramo
GEI	Gases de efecto de invernadero
GLP	Gas licuado de petróleo
GRNC	Generador renovable no convencional
H	Altura del liquido
$H_p$	Caballos de fuerza
$H_t$	Altura del tanque
in	Pulgadas
k	Constante de velocidad
$K_0$	Factor de frecuencia
$k_c$	Constante de crecimiento celular
kg	Kilogramo

Kmol	Kilomol
$K_S$	Constante de monod (constante de saturación del sustrato)
$K_T$	Constante de tanques con deflectores
Kw	Kilowatts
L	Litros
$\ell$	Densidad
lb	Libra
m	Metros
$m_0$	Masa del crisol
$m_1$	Masa de la muestra + masa del crisol
$m_2$	Masa de la muestra seca + masa del crisol
$m^3$	Metro cúbico
$m_3$	Masa muestra calcinada + masa del crisol
mg	Miligramo
min	Minutos
MJ	Megajulies
ml	Mililitro
mm	Milímetro
MS	Materia seca
Mv	Tensión redox
Mw	Megawatts
N	Revoluciones
n	Orden de la reacción

N/a	No aplica
P	Potencia
PBR	Reactor empacado
PCC	Punto común de conexión
PCI	Poder calorífico inferior
PFR	Reactor de flujo tampón
pH	Potencial de hidrógeno
PP	Polipropileno
psi	Unidades de presión manométrica
PVC	Policloruro de vinilo
$q_{\max}$	Tasa máxima del consumo del sustrato
$r_A$	Velocidad de reacción
R	Revoluciones
$R^2$	Coefficiente de determinación
$R_a$	Revoluciones de 1er polea
$r_a$	Radio de primera polea
$R_b$	Revoluciones de 2da polea
$r_b$	Radio de segunda polea
RFV	Residuos de frutas y vegetales
RPM	Revoluciones por minuto
RPS	Revoluciones por segundo
$r_s, r_r$	Velocidad del consumo del sustrato
RSU	Residuos sólidos urbanos

S	Velocidad espacial
s	Segundos
SF	Sólidos totales fijos
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos volátiles
SV <sub>B</sub>	Sólidos volátiles biodegradables
SV <sub>NB</sub>	Sólidos volátiles no biodegradables
t	Tiempo
t <sub>1/2</sub>	Tiempo de vida media
t <sub>m</sub>	Tiempo de residencia
TRH	Tiempo de retención hidráulica
USAB	Reactor anaeróbico de flujo ascendente de manto de lodos
v <sub>0</sub>	Volumen de la muestra
V <sub>i</sub>	Coefficiente estequiométrico de la especie
vol	Volumen
V <sub>op</sub>	Volumen de operación
V <sub>t</sub>	Volumen del tanque
W	Ancho de la paleta
w	Watts
X <sub>A</sub>	Factor de conversión
Y	Rendimiento del crecimiento celular
ρ	Densidad



FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA  
CARRERA DE INGENIERIA QUÍMICA  
UNIDAD DE TITULACIÓN



---

“ESTUDIO DE LA CINÉTICA QUÍMICA PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE DESECHOS  
ORGÁNICOS (RESIDUOS DE FRUTAS NO CÍTRICAS Y ESTIÉRCOL VACUNO) PARA LA VALIDACIÓN DEL  
DISEÑO Y OPERATIVIDAD DE UN BIODIGESTOR DIDÁCTICO ANAEROBIO”

**Autores:** Adrián Chica y Jamilet Vaca

**Tutor:** Ing. Stefanie Bonilla Bermeo MSC.

### Resumen

En este proyecto se realiza el montaje de tres biodigestores (uno con agitación 43,10 L y dos sin ella 3 L), las materias primas son los residuos de frutas no cítricas (banana y papaya), inóculo y estiércol vacuno previamente homogenizadas y en diferentes porcentajes de concentración (relación estiércol-fruta es 80:20). Durante la fase experimental se efectuaron mediciones periódicas de las variables de control tales como pH, demanda química de oxígeno, temperatura y contenido de sólidos en los reactores. La velocidad de degradación se formula como la generación de biogás en diversas condiciones siendo la hidrólisis la etapa limitante del proceso, se obtiene un efluente rico en nitrógeno y biogás con mayor porcentaje en metano. El tiempo de residencia hidráulica es de 24 días, con base a los resultados de las mediciones experimentales y ajustes por el método integral por tanteo, se obtiene que la mezcla óptima para el proceso es la mezcla II, siendo una reacción de orden  $n=1$  y la constante cinética es  $k= 0,0781 d^{-1}$ . El objetivo del proyecto de tesis abarca el estudio de la velocidad de degradación de residuos de frutas no cítricas y estiércol vacuno con respecto a una serie de parámetros mencionados anteriormente.

**Palabras claves:** Biodigestor, degradación, biogás, cinética de reacciones, demanda química de oxígeno.



FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA  
CARRERA DE INGENIERIA QUÍMICA  
UNIDAD DE TITULACIÓN



---

“ESTUDIO DE LA CINÉTICA QUÍMICA PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE DESECHOS  
ORGÁNICOS (RESIDUOS DE FRUTAS NO CÍTRICAS Y ESTIÉRCOL VACUNO) PARA LA VALIDACIÓN DEL  
DISEÑO Y OPERATIVIDAD DE UN BIODIGESTOR DIDÁCTICO ANAEROBIO”

**Autores:** Adrián Chica y Jamilet Vaca

**Tutor:** Ing. Stefanie Bonilla Bermeo MSC.

**Abstract**

This project is the assembly of three biodigesters (one with Agitation 43,10 L and two without it 3 L), the raw materials are the residues of non-citrus fruits (banana and papaya), inoculum and bovine manure previously homogenized and in different percentages of Concentration (manure-fruit ratio is 80:20). During the experimental phase, periodic measurements of control variables such as pH, chemical oxygen demand, temperature and solids content were carried out in the reactors. The rate of degradation is formulated as the generation of biogas in various conditions being hydrolysis the limiting stage of the process, we obtain an effluent rich in nitrogen and biogas with higher percentage in methane. The hydraulic residence time is of 24 days, based on the results of the experimental measurements and adjustments by the integral method by probing, it is obtained that the optimal mixture for the process is the mixture II, being a reaction of order  $n=1$  and the kinetic constant is  $k=0,0781 d^{-1}$ . The objective of the thesis project includes the study of the rate of degradation of non-citrus fruit residues and bovine manure with respect to a series of parameters mentioned above.

**Key words:** Biodigestor, degradation, biogas, reaction kinetics, chemical oxygen demand.

## **Introducción**

El aumento de la población y el crecimiento económico de los estándares de vida aceleran la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) en los países en desarrollo, considerando la contaminación ambiental originada por la incorrecta gestión de estos residuos puede provocar diversos problemas ambientales y de salud. Generalmente estos residuos son enviados al vertedero, incinerados para producir energía, compostaje de residuos orgánicos y recuperados (reciclaje), existe otra solución para minimizar el impacto de los residuos sólidos urbanos para tratar la fracción orgánica de estos mediante la digestión anaerobia. Considerando que el 50-60% de los RSU es biomasa, caracterizada por poseer un alto porcentaje de materia biodegradable y agua (Nogués, García, & Rezeau, 2010).

El desgaste relevante de las circunstancias ambientales, durante las últimas décadas ha dirigido a las industrias a tener conciencia para implementar mecanismos que procuran satisfacer las necesidades en el consumo agrícola y ambiental de una manera estabilizada y eficaz procurando un ambiente sostenible para generaciones futuras (Morla, Giayetto, Cerioni, & Fernandez, 2016).

La energía obtenida por los combustibles fósiles (la combustión del metano es la más limpia mejora la calidad de agua y aire) y biotecnología han sido de gran importancia en el impacto ambiental.

Actualmente, se visualiza el resurgimiento de las energías renovables convencionales: eólica, hidráulica, solar y biomasa. De acuerdo a los tratamientos de residuos sólidos que se emplean, no contribuyen con la reducción parcial de los sólidos generados en las actividades antrópicas, entre las energías alternas tenemos la generación de biogás, ya que se obtienen de la degradación anaerobia de los desechos orgánicos (Río, Álvarez, Ayemerich, Bedmar, & Carballa, 2014).

Los biodigestores son sistemas diseñados para optimizar la producción de biogás a partir de desechos agrícolas, estiércol o efluentes industriales, permitiendo la obtención de energía limpia y de bajo costo mediante una fuente renovable, siendo una opción mejorada para el tratamiento de desechos orgánicos, permitiendo disminuir la presencia de contaminantes, mejorar la capacidad fertilizante del material (compost “bioabono”), eliminar los malos olores y generar biogás (combustible alternativo). Además, el aprovechamiento del biogás impulsa la reducción de emisiones de gases de efecto de invernadero como metano ( $\text{CH}_4$ ), cuyo potencial de calentamiento global es 23 veces mayor que el del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (Caballero, Lozano, & Ortega, 2016). Existen diversos métodos para la obtención de metano, de manera natural o artificial, mediante el uso de biodigestores como los desarrollados en China y la India, los cuales, en su mayoría son artesanales (Acevedo, 2006).

Ciertos países como Alemania y Francia aprovechan el biogás como combustible para motores, en Costa Rica y otros países en desarrollo, el uso del biogás es limitado empleado en forma directa para la combustión con fines de cocción e iluminación o de manera indirecta para alimentar motores de combustión interna que genera electricidad (Rico, 2018).

En Latinoamérica países como Bolivia, Honduras, Perú y Ecuador poseen proyectos para el desarrollo de tecnologías en el proceso de digestión anaerobia. En Ecuador hasta el 2013 se instalaron 23 biodigestores familiares en zonas rurales, para obtener biogás para la cocción de alimentos y bioabono en las provincias del Guayas, Esmeraldas, Imbabura y Cotopaxi (Martí, 2015).

La digestión anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), se utiliza comúnmente y con éxito en los países industrializados, con soluciones de alta tecnología (sofisticadas y costosas). La mayoría de los diseños de digestión anaerobia con sistemas de bajo

coste se han realizado en los países medios y bajos recursos destinados para el tratamiento de excretas de animales. El reporte de este tipo de diseños es muy amplio pero la información de la viabilidad técnica y operativa del tratamiento de residuos sólidos orgánicos es limitada (Río, Álvarez, Ayemerich, Bedmar, & Carballa, 2014).

El proceso de digestión anaerobia se efectúa dentro de un biodigestor, se producen reacciones bioquímicas y biológicas por la activación de los microorganismos en ausencia de oxígeno, dando inicio a tres fases respectivamente diferenciadas: hidrolítica, acidogénesis y metanogénesis, en cada fase se aprecian bacterias y sustancias responsables de degradación del sustrato. Los parámetros de control nos permiten tener una mejor eficiencia del biogás, es de estricto control la temperatura (directamente proporcional a la producción de biogás), el pH, la agitación (crecimiento microbiano) y el tiempo de retención hidráulico. Se estima que el porcentaje de sólidos totales sea del 8 al 10% (vía húmeda) o superiores al 15% (vía seca). Para seleccionar los compuestos para la co-digestión, se considera la relación C/N evitando la presencia de inhibidores en el proceso (Magaña, Torres, & Sandoval, 2010).

El biogás es un 20% más ligero que el aire y tiene una temperatura de ignición en el rango de 650°C. Es un gas incoloro que quema con una llama azul clara similar a la del GLP. Su valor calorífico es de 20 MJ/m<sup>3</sup> y se quema con el 60% de eficiencia en una cocina convencional de biogás, puede tener diferentes usos o aplicaciones. Aunque la composición del biogás varía de acuerdo a la biomasa utilizada. El gas metano (componente del gas natural), tiene un lugar dominante en la matriz energética mundial, debido a sus propiedades intrínsecas que le proporcionan ser una energía óptima. En la combustión se genera pequeñas cantidades de emisión de gases contaminantes (Gases de Efecto de Invernadero “GEI”), siendo un excelente candidato para sustituir la gasolina en motores de combustión interna (Giraldo & Carmona, 2005).

El presente trabajo tiene por objetivo validar el diseño y operatividad del biodigestor por medio de un estudio cinético para obtener biogás a partir de desechos orgánicos (residuos de frutas no cítricas y estiércol vacuno), al aplicar valores reales obtenidos con la demanda química de oxígeno semanalmente, se podrá realizar una gráfica DQO Vs tiempo, que permitirá determinar la constante de la velocidad y posteriormente conocer el orden de la reacción.

## CAPÍTULO I

### 1. Problema

#### 1.1. Tema

Estudio de la cinética química para la obtención de biogás a partir de desechos orgánicos (residuos de frutas no cítricas y estiércol vacuno) para la validación del diseño y operatividad de un biodigestor didáctico anaerobio.

#### 1.2. Planteamiento del problema

La crisis energética en estas últimas décadas es indiscutible y la acumulación descontrolada de desechos sólidos, el alto nivel de contaminación y a su vez el impacto ambiental producido por la combustión de estos ha originado que el hombre busque fuentes alternativas de energía renovables, entre ellas el biogás, permitiendo de esta forma la sostenibilidad de los ecosistemas. De esta forma surge la necesidad de generar energía basada en el máximo aprovechamiento de los recursos y de los residuos generados en un proceso y con la utilización apropiada de la tecnología, se asegure el suministro de combustibles accesibles y económicos, pero sobre todo por aquellos residuos resultantes de actividades antrópicas (realizadas por el hombre) (Río, Álvarez, Ayemerich, Bedmar, & Carballa, 2014).

Los biodigestores (biorreactor) han adquirido una creciente demanda en países como México y Alemania, ya que contribuyen con la disminución de residuos sólidos incluyendo heces fecales (seres humanos - animales), creando una alternativa para obtener energía eléctrica (Prossapys, 2015). Cabe mencionar que los desechos empleados en los biodigestores tienen que poseer cierto porcentaje de relación de C/N, la cual permite una mejor producción de biogás (directamente proporcional a la temperatura suministrada). Los residuos que contienen un alto porcentaje de lignina y celulosa no son directamente recuperables, se debe realizar un tratamiento previo

(cortado, macerado, compostado) con la finalidad de liberar las sustancias factibles de ser transformadas de las incrustaciones de lignina (Parra, 2015).

Para el diseño y operatividad óptima de plantas de biogás es preciso efectuar un estudio cinético del proceso de digestión anaerobia, en la carrera de Ingeniería Química se estudia la función y características de los reactores químicos haciendo enfoque a las reacciones que se producen en su interior y el tiempo que tarda en formar los productos requeridos por las industrias. Los biorreactores de mezcla completa son más usados para el estudio cinético, facilitando la determinación de parámetros como la concentración, tiempo y velocidad de degradación de los residuos de frutas no cítricas y estiércol vacuno; teniendo como producto principal el biogás, que es un gas resultante de la degradación de las bacterias durante el proceso en condiciones anaeróbicas y bioabono que se utiliza como fertilizante orgánico (Acevedo, 2006).

Por lo tanto, la presente investigación tiene por objeto estudiar la cinética química que intervienen en el proceso de la digestión anaerobia de desechos orgánicos (residuos de frutas no cítricas y estiércol vacuno) para la producción de biogás, que puede emplearse como energía eléctrica o de manera directa en la cocción de alimentos.

### **1.3. Formulación y sistematización de la investigación**

#### **1.3.1. Formulación del problema de investigación.**

¿A partir de la demanda química de oxígeno en la digestión anaerobia del sustrato orgánico (residuos de frutas no cítricas y estiércol vacuno) se podrá determinar la cinética de la velocidad de la reacción en la producción de biogás?

#### **1.3.2. Sistematización del problema.**

Para el diseño y construcción de un biodigestor didáctico se cuestiona lo siguiente:

- ¿Cuáles son los parámetros de operación que influyen en el crecimiento bacteriano en la digestión anaerobia?
- ¿Cuál será el porcentaje de degradación del sustrato orgánico (residuos de frutas no cítricas y estiércol vacuno) dentro del biodigestor?
- ¿Se podrá construir una curva para la degradación del sustrato con la demanda química de oxígeno vs el tiempo de operación, para lograr determinar el orden de la reacción y la constante de velocidad?
- ¿Cuál deberá ser el tiempo de retención para lograr una mayor producción de metano?

#### **1.4. Justificación**

##### **1.4.1. Justificación teórica.**

“La ingeniería de las reacciones químicas se basa en los conceptos cinéticos y termodinámicos de la reacción química aplicados a nivel industrial, para diseñar y hacer funcionar correctamente aquel equipo donde debe tener lugar, el cual se denomina reactor químico” (Levenspiel, 2008).

Para el diseño de un reactor químico tenemos que responder dos preguntas:

- ¿Qué cambios hemos de esperar que ocurran? Conciérne a la termodinámica.
- ¿Con que rapidez tendrán lugar? Conciérne a la cinética química y transmisión de calor.

El diseño de un biodigestor didáctico de mezcla completa para la obtención de biogás procede del conocimiento teórico-experimental y termodinámico-químico, como: velocidad de reacción, calor de reacción (exotérmica-endotérmico) y los factores que influyen en ella (temperaturas óptimas para el crecimiento bacteriano y concentración de materia orgánica dentro del sustrato).

En el presente trabajo de titulación tiene como finalidad determinar los parámetros fisicoquímicos en la conversión teórica y experimental de la reacción química para obtener biogás, el mismo que se produce dentro del biodigestor (hermético de mezcla completa) y de esta manera

obtener la curva de producción de biogás generada semanalmente. Al igual que la degradación del sustrato orgánico para determinar la velocidad de reacción (basado en análisis de DQO).

#### **1.4.2. Justificación metodológica.**

Para la justificación metodológica, se describe las reacciones que se generan en la digestión anaerobia de desechos orgánicos (residuos de frutas no cítricas y estiércol vacuno) al establecer el uso de modelos cinéticos generales, que mediante el análisis integral permite crear las ecuaciones de diseño propias del biodigestor hermético de mezcla completa, los mismos que servirán de modelo cinético para una digestión anaerobia y obtención de biogás.

#### **1.4.3. Justificación práctica.**

El diseño y operatividad del biodigestor didáctico de mezcla completa permitirá adquirir datos reales del porcentaje de conversión experimental en la obtención de biogás y la variación de la constante de velocidad ( $k$ ), al intervenir los cambios de temperatura absorbida por el sustrato orgánico para la activación de la fase metanogénesis.

### **1.5. Objetivos de la investigación**

#### **1.5.1. Objetivo general.**

- Estudiar la cinética química de la digestión anaerobia a partir de desechos orgánicos (residuos de frutas no cítricas y estiércol vacuno) para la obtención de biogás en un biodigestor didáctico anaerobio.

#### **1.5.2. Objetivos específicos.**

- Diseñar un biodigestor didáctico anaerobio.
- Determinar los parámetros de operación que influyen en el crecimiento bacteriano en la digestión anaerobia.

- Determinar la constante de velocidad y orden de reacción en la degradación del sustrato orgánico (residuos de frutas no cítricas y estiércol vacuno) para la producción de biogás.
- Calcular la velocidad de reacción de degradación anaerobia del sustrato orgánico (residuos de frutas no cítricas y estiércol vacuno).

## **1.6. Delimitación de la investigación**

### **1.6.1. Delimitación temporal.**

Los percances que se presenten en el transcurso de la investigación experimental variarán según las condiciones de operación para la obtención de biogás a partir de desechos orgánicos (residuos de frutas no cítricas y estiércol vacuno) debido a la sensibilidad del proceso.

### **1.6.2. Delimitación espacial.**

La construcción y operatividad del biodigestor se realizará en el Laboratorio de Aguas y Medio Ambiente de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Guayaquil.

La materia prima que servirá como sustrato son el estiércol vacuno que provendrá de una Hacienda conocida como “El Ángela” ubicada en la vía Vinces y los residuos de frutas no cítricas de procedencia doméstica. Los análisis para caracterizar dicha composición se realizarán en el Laboratorio de Aguas y Medio Ambiente de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Guayaquil.



### 1.8.1. Variable independiente.

Estudio de la cinética química de la digestión anaerobio a partir de desechos orgánicos (residuos de frutas no cítricas y estiércol vacuno).

### 1.8.2. Variable dependiente.

Validación del diseño y operatividad de un biodigestor didáctico anaerobio para la obtención de biogás.

### 1.8.3. Operacionalización de variables.

Tabla 1. Operacionalización de las variables

<b>TIPO DE VARIABLE</b>	<b>VARIABLE</b>	<b>TEMAS</b>	<b>SUBTEMAS</b>
<b>Dependiente</b>	<b>Estudio de la cinética química de la digestión anaerobia a partir de desechos orgánicos (residuos de frutas no cítricas y estiércol vacuno).</b>	2.2.1 Tratamiento de residuos sólidos urbanos. 2.2.2 Biomasa. 2.2.3 Características de la biomasa para la digestión anaerobia 2.2.4 Digestión anaerobia 2.2.5 Parámetros a aplicar para elevar la eficiencia de	2.2.1.1 Proceso físico 2.2.1.2 Proceso termoquímico 2.2.1.3 Proceso biológico 2.2.1.4 Métodos para el tratamiento de residuos sólidos urbanos. 2.2.2.1 Fuente para la obtención de biomasa.

		operación en sistemas anaerobios.	2.2.3.1 Contenido de sólidos totales.
		2.2.6 Reacción química.	2.2.3.2 Contenido de sólidos volátiles.
		2.2.7 Velocidad de reacción.	2.2.3.3 Carga orgánica volumétrica
		2.2.8 Cinética química.	2.2.3.4 Demanda química de oxígeno.
		2.2.9 Tipo de cinética.	2.2.3.5 Demanda bioquímica de oxígeno.
		2.2.10 Métodos para el análisis de datos de velocidad.	2.2.4.1. Reacciones biológicas
			2.2.4.2 Reacciones bioquímicas
			2.2.4.3 Degradación anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos
			2.2.4.4 Degradación anaerobia de residuos vegetales

			<p>2.2.4.5 Co-digestión anaeróbica de residuos orgánicos biodegradables</p> <p>2.2.4.6 Inóculo</p> <p>2.2.7.1 Factores que intervienen en la velocidad de reacción.</p> <p>2.2.8.1 Factores que influyen en la cinética química.</p> <p>2.2.9.1 Cinética de orden cero.</p> <p>2.2.9.2 Ley de potencia.</p> <p>2.2.9.3 Cinética de Monod (cinética de crecimiento bacteriano).</p> <p>2.2.10.1 Método integral.</p> <p>2.2.10.2 Método diferencial.</p>
--	--	--	---

			<p>2.2.10.3 Método de las vidas medias.</p> <p>2.2.10.4 Efecto de la temperatura.</p>
<b>Independiente</b>	<p><b>Validación del diseño y operatividad de un biodigestor didáctico anaerobio para la obtención de biogás.</b></p>	<p>2.3.1 Reactor químico</p> <p>2.3.2 Biogás</p> <p>2.3.3 Proceso de fermentación de biogás.</p> <p>2.3.4 Producción de biogás en función del sustrato.</p> <p>2.3.5 Biodigestores</p> <p>2.3.6 Parámetros en la producción de biogás</p>	<p>2.3.1.1 Reactor de acuerdo a sus condiciones de operación.</p> <p>2.3.1.2 Diseño en el reactor (biodigestor)</p> <p>2.3.2.1 Formación de metano</p> <p>2.3.2.2 Componentes del biogás.</p> <p>2.3.2.3 Efectos del CO<sub>2</sub> en el biogás.</p> <p>2.3.3.1 Utilización del biogás.</p> <p>2.3.4.1 Degradación anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.</p>

			<p>2.3.4.2 Degradación anaerobia de residuos vegetales.</p> <p>2.3.5.1 Ventajas y desventajas de los biodigestores anaerobios.</p> <p>2.3.5.2 Clasificación de los biodigestores.</p> <p>2.3.5.3 Componentes de los biodigestores.</p>
--	--	--	--

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

## CAPÍTULO II

### 2. Marco referencial

#### 2.1. Antecedentes de la investigación

El incremento de los residuos sólidos urbanos, rurales e industriales, se tornan cada día en un problema más grave de contaminación. Los daños ambientales ocasionados por los vertederos y la incineración de desechos sólidos son peligrosos, porque contaminan el aire, las aguas subterráneas-superficiales y el suelo. El humo resultante de la combustión abierta, los gases formados por la degradación de desechos en un botadero abierto perjudicando la calidad del aire, por las emisiones de distintos gases contaminantes (monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno, el SO<sub>2</sub> y los gases de invernadero). Estos gases son receptados en la atmósfera afectando a la composición del aire que respiramos, causando efectos negativos que percuten no solo en la salud, sino también en el ecosistema. El proceso de lixiviación procedente de los vertederos contaminan los suelos, las aguas superficiales y subterráneas, por la filtración de los líquidos contaminantes provenientes de la descomposición de la materia orgánica. Debido a estos procesos empleado para degradar la materia orgánica que igual contribuyen en la contaminación, se propone la reutilización de los desechos sólidos para generar una fuente de energía alterna (Almeida & Regalado, 2010).

El uso de biomasa empleada en el proceso de la digestión anaerobia, para obtener una fuente de energía alterna y renovable se ha aprovechado desde algunas décadas. En épocas anteriores los problemas energéticos y ambientales no eran tan severos como se muestran en la actualidad, por lo tanto, sus estudios y avances tecnológicos no eran importantes. A pesar del predecible agotamiento de las fuentes de energía fósil y al calentamiento global, es inevitable buscar fuentes de energías alternas y renovables que ayuden con la reducción de agentes contaminantes; por lo que se ha retomado el interés en la digestión anaerobia (Acevedo, 2006).

El proceso de digestión anaerobia se produce en un biodigestor (biorreactor), que es un recipiente herméticamente cerrado el cual puede ser construido de varias formas y materiales de bajo costo. Generalmente, un biodigestor tiene un ducto de entrada, por donde se suministra la materia orgánica, un ducto de salida por donde se retira el efluente (degradado por acción bacteriana) y un ducto en la parte superior por donde sale el biogás producido diariamente para ser almacenado (Acevedo, 2006).

A partir de los antecedentes se desarrolló el presente proyecto con el estudio de la cinética química para la obtención de biogás a partir de desechos orgánicos (residuos de frutas no cítricas y estiércol vacuno) para la validación del diseño y operatividad de un biodigestor didáctico anaerobio. La materia prima empleada como sustratos son estiércol vacuno y residuos de frutas no cítricas previamente tratados para acelerar su descomposición. Para dar inicio a la degradación del sustrato orgánico son requeridas las bacterias presentes en el estiércol. Esta fase es de mayor importancia ya que de ello dependerá el éxito del proceso de digestión anaerobia (aprovechamiento del ecosistema bacteriano) (Acevedo, 2006).

Para el proceso de digestión, es necesario controlar ciertos parámetros (pH, temperatura, agitación y tiempo de residencia hidráulica); a fin de tener un sistema estable con una alta producción de biogás (directamente proporcional a la temperatura). Los análisis que se realizarán al afluente para controlar y caracterizar el proceso son: relación C/N, contenido de sólidos totales, contenido de sólidos volátiles, demanda química de oxígeno (Acevedo, 2006).

## **2.2. Marco teórico**

### **2.2.1. Tratamiento de residuos sólidos urbanos (RSU).**

Para reducir el volumen y peso de los residuos se emplean los tratamientos que varían de acuerdo a los objetivos buscados en la gestión de residuos, la mayoría de estos residuos orgánicos

se transforman mediante procesos físicos, termoquímicos y biológicos (Henze, Ekama, & Brdjanovic, 2017). Posteriormente se mencionan dichos procesos:

#### **2.2.1.1. *Proceso físico.***

En la primera etapa se gestionan los residuos, no implica cambio de fase estas pueden ser (Henze, Ekama, & Brdjanovic, 2017):

- Separación de componentes
- Reducción mecánica de volumen
- Reducción mecánica de tamaño

#### **2.2.1.2. *Proceso termoquímico***

Estos implican un cambio de fase y la aplicación de energía como son (Henze, Ekama, & Brdjanovic, 2017):

- Combustión
- Pirólisis
- Gasificación

#### **2.2.1.3. *Procesos biológicos.***

Se utilizan para reducir el volumen y peso del material para obtener compost o metano, los principales microorganismos que llevan a cabo dicha transformación son bacterias, hongos y levaduras; dicho proceso puede ser en presencia o ausencia de oxígeno (Henze, Ekama, & Brdjanovic, 2017) :

- Compostaje aerobio
- Degradación anaerobia

#### 2.2.1.4. *Métodos para el tratamiento de residuos sólidos.*

Debido al crecimiento industrial, es necesario desarrollar sistemas óptimos para el tratamiento de los residuos sólidos generados, entre los tratamientos aplicables se tiene:

- Fermentación en estado sólido.
- Degradación anaerobia.
- Incineración.
- Ozonización.
- Reactor secuencial discontinuo.
- Degradación anaerobia termofílica.
- Electrodiálisis.
- Degradación aerobia.

La mayoría de estos tratamientos tienen una alta capacidad de degradar sustratos complejos y concentrados ya sean residuos de agrícolas, desechos de animales o aguas residuales. En la Tabla 2 se resume las ventajas, desventajas, así como el costo y efectividad de dichos métodos (Henze, Ekama, & Brdjanovic, 2017):

Tabla 2. Ventajas, desventajas, costo y efectividad de los métodos del tratamiento de residuos

<b>N°</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Costo</b>	<b>Efectividad</b>
1	Fermentación en estado sólido.	Entornos propicios para el crecimiento de hongos, subproductos como fuente de alimento	Se emplea un solo microorganismo que crecen a bajos niveles de humedad, la determinación de la biomasa es muy	Bajo	Alta

		humano y microbiano, beneficios ecológicos, reduce posibles contaminaciones por bacterias y levaduras.	difícil, requiere grandes volúmenes de inóculo y la agitación es muy difícil.		
2	Degradación anaerobia	Bajo requerimiento energético, bajos requerimientos de nutrientes, alta capacidad de degradación de sustratos concentrados, capacidad operativa en tiempo de residencia hidráulicos cortos.	Es inestable bajo variaciones en las condiciones de operación, complejidad, alta variabilidad de la carga de entrada, comportamiento no lineal del proceso, falta de sensores apropiados para el monitoreo de las variables.	Bajo	Alta
3	Incineración	Máxima reducción de	Emisión de micro y macro	Alto	Alta

		volumen, bajos requerimientos de disposición, destrucción de agentes patógenos y compuestos tóxicos, la recuperación de energía, no hay producción de metano.	contaminantes, efluentes líquido ocasional que puede ser tratado antes de ser vertido al drenaje.		
4	Ozonización	Sin subproductos para ser removidos, propiedades deseables en presencia de ozono como: potente oxidantes, soluble en agua, fácilmente disponible y alta selectividad.	Proceso complejo	Alto	Mediano o alto
5	Reactor secuencial discontinuo	Fácil control de crecimiento filamentoso y	Nivel más alto de sofisticación (unidades de tiempo	Bajo	Alta

		<p>problemas de sedimentación, mayor flexibilidad del operador, sin lavado de biomasa, posible adición de carbono activado.</p>	<p>y control) que los sistemas convencionales, potencial de descarga de lodos flotantes o liquidados durante la fase de decantación, la compensación del potencial necesario está en función de los procesos posteriores.</p>		
6	<p>Degradación anaerobia termoflica</p>	<p>Estabilidad, alta eficiencia, bajo requerimientos de nutrientes, producción eficiente de biogás, al otro grado de purificación con una carga orgánica de alimentación alta</p>	<p>Altos requerimientos de energía para el calentamiento.</p>	Bajo	Alta

7	Electrodiálisis	Fácil desarrollo a escala industrial no requiere componentes externos, proceso simultaneo de concentración y purificación.	Cantidad máxima de impurezas.	Alto	Alta
8	Degradación aerobia	Flexibilidad, fácil operación, recuperación de fertilizantes básicos en lodos sin producción de olores, como el humus, producto final biológicamente estable, económico, alta producción de biomasa.	Dificultad de operación de los lodos, incapacidad del sistema para tratar cargas de DBO y DQO.	Alto	Alta

**Fuente:** (Henze, Ekama, & Brdjanovic, 2017)

### 2.2.2. Biomasa.

Considerada una de las fuentes de energía renovables e inagotable, conformada por los residuos forestales, agrícolas, industriales, domésticos y urbanos. Estos residuos conservan energía química generada en la transformación energética de la radiación solar, siendo liberada por medio de una combustión directa o con ayuda de procesos auxiliares en otras fuentes energéticas (Vega & Bolaños, 2015). La utilización de la biomasa contribuye beneficios tanto como energético, sino que su transformación es beneficiosa e indispensable para el entorno. Es un método ideal para la supresión de residuos.



Figura 2. Ciclo de la biomasa

**Fuente:** (Morla, Giayetto, Cerioni, & Fernandez, 2016)

#### 2.2.2.1. Fuentes para la obtención de la biomasa.

La biomasa que se emplea en la producción de energía engloba una extensa categoría de materiales y fuentes:

- Los residuos de la industria forestal (madera, aserrín).
- Desechos agrícolas.
- Los residuos de la acuicultura (algas).

- Desechos industriales.
- El estiércol de animales.
- Los residuos de los desechos urbanos.

Los residuos antes mencionados son generalmente empleados en procesos modernos de transformación que implica la generación de energía a gran escala, dirigidos al desplazamiento de los combustibles fósiles (Romero, 2010). La biomasa empleada en función de la degradación anaerobia puede realizarse como un sustrato base o en una co-digestión como se muestra en la siguiente Tabla 3:

Tabla 3. Clasificación de la biomasa

<b>Biomasa</b>			
<b>Sustrato (Base)</b>	<b>Co-sustratos (Co-digestión)</b>		
<u>Agropecuarios</u> (Estiércol de ganado de cerdo, vacuno, gallinaza, caballos, etc.)	<u>Cultivos</u> <u>Energéticos</u> (Forraje de maíz, de pasto, de cereales, etc.)	<u>Desechos</u> <u>Agrícolas</u> (Restos de cosechas, descartes, podas de jardines, vinazas)	<u>Restos Orgánicos</u> (Grasas, restos de comidas, plantas depuradoras)

**Fuente:** (Burés, 2015)

### **2.2.3. Características de la biomasa para la digestión anaerobia.**

Para lograr optimizar el rendimiento de la biomasa (sustrato) en el biodigestor, es importante realizar análisis físico-químico (características medibles) en un laboratorio acreditado.

### **2.2.3.1. Contenido de sólidos o sólidos totales (ST).**

El afluente, posee cierta cantidad de agua y material sólido (materia orgánica biodegradable) que varía de acuerdo al diseño del equipo (80-20%, 75-25%); considerando el porcentaje de ST en la mezcla. Los sólidos totales se expresan en el peso del material sobrenadante de una muestra, luego es secado en una estufa a una temperatura de 105°C. La interacción de las bacterias metanogénicas en el interior del sustrato es limitada por la cantidad de sólidos presentes. Consecuentemente, la eficiencia de la producción de biogás puede ser afectada por la concentración de sólidos, debido a esta razón es necesario considerar el porcentaje de sólidos totales para establecer la dilución correcta del sustrato (Ampudia, 2011).

### **2.2.3.2. Contenido de sólidos volátiles (SV).**

Los sólidos volátiles o sólidos orgánicos (SV), constituyen la cantidad de materia orgánica de una muestra (los SV constituyen la parte orgánica de los ST) que luego se degrada para producir biogás durante la digestión anaerobia en el biodigestor, representando de manera real el contenido de masa orgánica degradable, se expresa en mg/L. Este valor de la concentración de sólidos volátiles es necesario para calcular la carga orgánica volumétrica para el biodigestor (Ampudia, 2011).

### **2.2.3.3. Carga orgánica volumétrica (COV).**

Se define como la cantidad de materia orgánica seca, que se alimenta diariamente o semanalmente el biodigestor por cada metro cúbico de volumen de biodigestor se expresa en kg de sólidos volátiles por metro cúbico por día o semana  $\frac{\text{kg}_{\text{ST}}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}}$ .

El valor óptimo de la COV dependerá de la temperatura del proceso del interior del biodigestor y del tiempo de retención hidráulica (TRH), con esto se logra manipular la carga del biodigestor, siendo un factor preciso para el dimensionamiento del mismo. Si la alimentación está muy diluida,

no habrá suficiente alimento para las bacterias, en cambio, si hay muchos sólidos reduce el movimiento de los microorganismos y del biogás, es decir, logrando la efectividad del proceso.

Usualmente la COV debe alcanzar valores entre  $2-3\text{kg}_{\text{ST}}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ , para valores de  $3\text{kg}_{\text{ST}}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ , puede que la materia orgánica del efluente del biodigestor se descargue sin ser completamente degradada (Ampudia, 2011).

#### **2.2.3.4. Demanda química de oxígeno (DQO).**

Es una técnica utilizada para medir el contenido de materia orgánica en la mezcla en el interior del biodigestor. Se define como la cantidad de oxígeno en mg/L, empleado para oxidar la materia orgánica presente en la mezcla en suspensión bajo condiciones específicas de agentes oxidantes, temperatura y tiempo se emplea como medida indirecta de la cantidad de sustrato transformable a biogás (Ampudia, 2011).

Se estima que la cantidad máxima de metano producible es de  $0,35\text{CH}_4/\text{kg}$  DQO eliminada, en condiciones normales de presión y temperatura.

#### **2.2.3.5. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).**

Mide la digestibilidad de los residuos y el consumo de oxígeno (mg/L en suspensión) en el lapso de degradación por microorganismos durante 5 días a 20°C. Tanto como la DBO<sub>5</sub> como la DBO son correspondientes al contenido de materia orgánica en la suspensión a degradar, la primera fase es más representativa de la degradabilidad de la misma. También puede usarse el valor de carbono orgánico total (COT), se consigue calculando compuestos como el CO<sub>2</sub> formado en la combustión (Ampudia, 2011).

#### **2.2.4. Digestión anaerobia.**

La degradación anaerobia es realizable en compuestos orgánicos que tengan oxígeno en su integridad molecular, involucran los procesos fundamentales de descomposición como la

desnitrificación de nitratos, respiración de sulfatos y tres fases importantes que describen el proceso que son: etapa de hidrólisis, fermentación acetogénica y metanogénica. El mecanismo que utilizan los microorganismos anaerobios es muy complicado y está compuesto por diversas reacciones paralelas y en serie (Rozano & Dapena, 2002). De manera más esencial, se considera el proceso descrito en dos etapas: fermentación de ácidos y fermentación de metano, que ocurre simultáneamente, como se representa en la Figura 3:

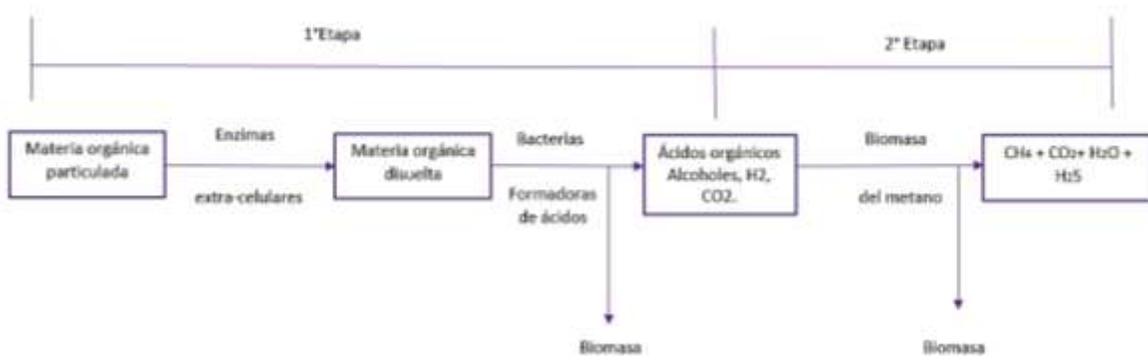


Figura 3. Proceso elemental del proceso anaerobio

**Fuente:** (Henze, Ekama, & Brdjanovic, 2017)

Los microorganismos metanogénicos (fermentación metanogénica), se obtienen compuestos de producto como,  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ . En la Figura 4 se muestra la representación gráfica de Zeikus para la oxidación anaerobia de compuestos orgánicos. Originalmente las bacterias hidrolíticas, con ayuda de transformaciones enzimáticas, fermentan los compuestos orgánicos complejos en compuestos de masa molecular baja (azúcares, aminoácidos, ácidos grasos y glicerol), para posteriormente emplearlos como fuente de energía y de carbón celular. Estos compuestos lo utilizan las bacterias acetogénicas para producir ácido acético, propiónico, butírico, valérico y fórmico. A partir del ácido acético, fórmico y metanol, las bacterias de metano producen metano, dióxido de carbono y agua (Rozano & Dapena, 2002).

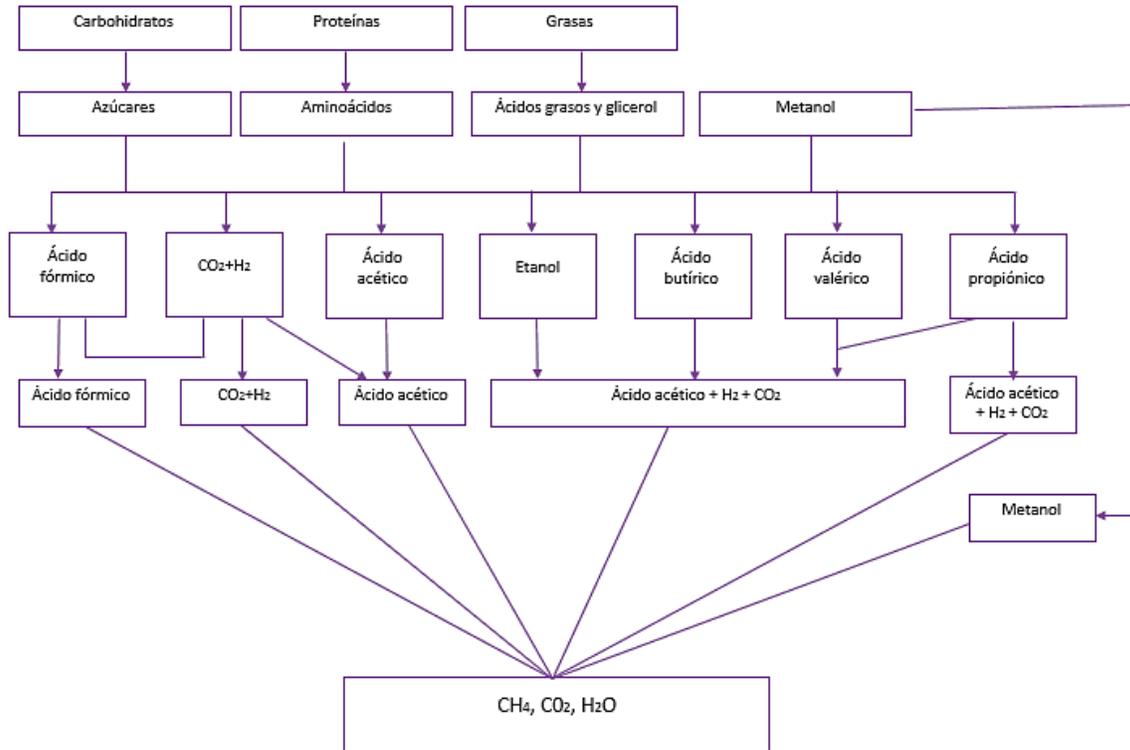


Figura 4. Descripción de la oxidación anaerobia de compuestos orgánicos, representación de Zeikus

**Fuente:** (Henze, Ekama, & Brdjanovic, 2017)

La fermentación de metano en el proceso de la digestión anaerobia esquematizado por Parkin y Owen. Como se indica en la Figura 5. El diagrama supone una serie de tres etapas:

- 1) Hidrolisis, licuefacción y fermentación.
- 2) Formación de ácido acético e hidrógeno.
- 3) Formación de metano.

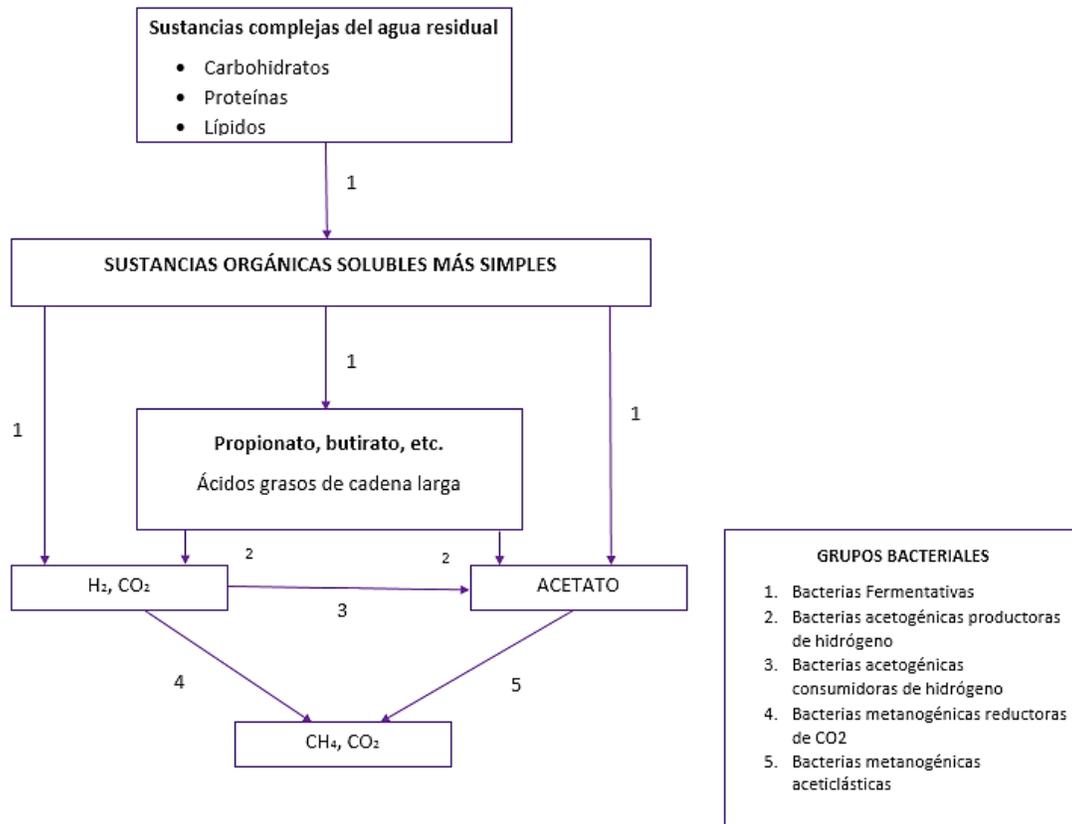


Figura 5. Formación de metano en la digestión anaerobia.

**Fuente:** (Henze, Ekama, & Brdjanovic, 2017)

Estas etapas son realizadas por cinco grupos bacteriales principales en cada uno con metabolismos dependientes de los otros grupos involucrados en el proceso.

Tabla 4. Principales productos de la fermentación ácida

<b>ÁCIDOS VOLÁTILES</b>	
Ácido fórmico	HCOOH
Ácido acético	CH <sub>3</sub> COOH
Ácido propiónico	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> COOH
Ácido butírico	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> COOH
Ácido valérico	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> COOH

Ácido isovalérico	$(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2\text{COOH}$
Ácido caproico	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$
<b>OTROS PRODUCTOS</b>	
Hidrógeno	$\text{H}_2$
Dióxido de carbono	$\text{CO}_2$
Metanol	$\text{CH}_3\text{OH}$
Metilamina	$(\text{CH}_3)_2\text{N}$

**Fuente:** (Henze, Ekama, & Brdjanovic, 2017)

Las reacciones de oxidación (reducción biológica) son reacciones de deshidrogenación-hidrogenación, donde el sustrato es oxidable, materia inorgánica pierde átomos de hidrógeno. La oxidación orgánica puede visualizarse como una remoción de electrones o átomos de hidrógeno de las moléculas orgánicas. En la oxidación anaerobia, otros compuestos como los nitratos, los sulfatos y  $\text{CO}_2$ , pueden servir como aceptadores de electrones. El uso de sulfatos y de  $\text{CO}_2$  como aceptadores de electrones requiere condiciones estrictamente anaerobias (Henze, Ekama, & Brdjanovic, 2017).

Los principales reductores y oxidantes usados por las bacterias se detallan en la Tabla 5.

Tabla 5. Oxidantes y reductores de respiraciones bacteriales

<b>Reductor</b>	<b>Oxidante</b>	<b>Productos</b>	<b>Organismo</b>
$\text{H}_2$	$\text{O}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	Bacteria del hidrógeno
$\text{H}_2$	$\text{SO}_4^{=}$	$\text{H}_2\text{O} + \text{S}^{=}$	Desulfovibrio
Compuestos orgánicos	$\text{O}_2$	$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	Muchas bacterias, plantas y animales

NH <sub>3</sub>	O <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> +H <sub>2</sub> O	Bacteria nitrificante
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	O <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> +H <sub>2</sub> O	Bacteria nitrificante
Compuestos orgánicos	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub>	Bacteria desnitrificante
Fe <sup>++</sup>	O <sub>2</sub>	Fe <sup>3+</sup>	<i>Ferrobacillus</i> (bacteria del hierro)
S <sup>=</sup>	O <sub>2</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> + H <sub>2</sub> O	<i>Thiobacillus</i> (bacteria del azufre)

**Fuente:** (Henze, Ekama, & Brdjanovic, 2017)

### 2.2.4.1. Reacciones biológicas.

#### 2.2.4.1.1. Hidrólisis.

Los microorganismos indisolubles hidrolíticos (celulosa, proteínas y grasas) son fraccionadas en monómeros por enzimas (hidrolasa subproductos únicamente del metabolismo anaeróbico y se activa a una temperatura de 35°C), interceden sobre los polímeros orgánicos y otros materiales complejos despolimerizándolos enzimáticamente en los correspondientes monómeros (Autolines, Bohórquez, Corrales, & Corredor, 2015).

Consecutivamente estos compuestos se fermentan causando diferentes ácidos orgánicos. El objetivo de esta etapa es alcanzar la disolución de los biopolímeros complejos en polímeros solubles (monómeros), debido a que los microorganismos que efectúan la depuración solamente son capaces de actuar sobre materia orgánica disuelta. Cabe mencionar que esta etapa, puede limitar la velocidad del proceso global, sobre todo tratando residuos con alto contenido de sólidos. El grado de hidrólisis y la velocidad del proceso dependen de ciertos factores como el pH, la temperatura, la concentración y del tamaño de la partícula del sustrato (Parra, 2015).

La hidrólisis de los carbohidratos se produce en algunas horas, en cambio, en las proteínas el proceso requiere varios días y en el caso de la lignina y celulosa es muy lento e incompleto, lo cual es poco recomendable usar compuestos con un alto porcentaje. La sostenibilidad de esta etapa se basa en que los microorganismos anaeróbicos consuman el oxígeno disuelto en el agua y por ende disminuye el potencial redox, siendo la base para la proliferación de más microorganismos anaerobios. La concentración intermedia de iones de hidrógenos afecta los productos de fermentación (Parra, 2015).

Se halla en esta fase del proceso, bacterias (anaerobias) facultativas como las *enterobacterias*, las *aerotolerantes* como las bacterias del ácido láctico y bacterias anaerobias como: *Clostridium*, *Propionibacterias*, *Selenomona* (Autolines, Bohórquez, Corrales, & Corredor, 2015).

#### 2.2.4.1.2. Fase acetogénica.

Los productos de la fase acidogénicas sirven de sustrato para la formación de otras bacterias, las reacciones de esta etapa son endorgénicas (requieren energía para degradar los productos de la acidogénesis) (Magaña, Torres, & Sandoval, 2010).

Las bacterias producen necesariamente H<sub>2</sub> y están en simbiosis constante con los organismos que producen metano. Los organismos metanogénicos pueden sobrevivir solo altos niveles de presión parciales de hidrógeno, si este nivel baja, el H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y el acetato son producidos por bacterias acetogénicas de no ser así la formación de ácido propiónico, butírico valérico y etanol sería mayoritaria (Autolines, Bohórquez, Corrales, & Corredor, 2015).

#### 2.2.4.1.3. Fase metanogénica.

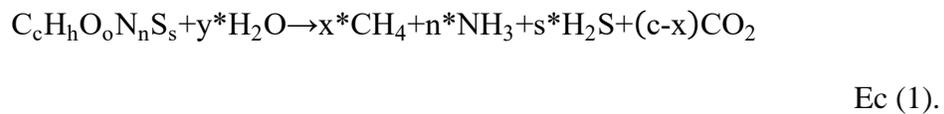
Comprende la formación de metano en condiciones estrictamente anaeróbicas, esta degradación es estrictamente energética y no cualquier microorganismo metanogénico puede degradar

cualquier sustrato. Cuando la metanogénesis funciona, la etapa acetogénica también funciona sin problemas, si existen falencias en los parámetros de control diario. Se inicia la sobre-acidificación.

Las bacterias metanogénicas pertenecen al reino de las *arqueobacterias*. Acorde a los sustratos que consiguen degradar se obtienen: *Hidrogenotróficos* (producen metano a partir de hidrógeno y anhídrido carbónico), *Aceticlásticos* (producen metano y anhídrido carbónico a partir de acetato), *Metilótrofos* (asimilan compuestos como metilsulfuros y metilaminas). Los géneros de metano bacterias hidrogenofílicas más frecuentes en reactores anaerobios son: *Methanibacterium*, *Methanospirillum*, *Methanobrevibacter* (Autolines, Bohórquez, Corrales, & Corredor, 2015).

#### 2.2.4.2. Reacciones bioquímicas.

La producción de metano corresponde a la siguiente ecuación:



De acuerdo a las siguientes fórmulas, los subíndices x – y:

$$x = \frac{1}{8} * (4c+h-20-3n-2s)$$

Ec (2).

$$y = \frac{1}{4} (4c-h-20+3n+2s)$$

Ec (3).

Los productos habitualmente obtenidos se observan en la Tabla 6:

Tabla 6. Productos en la generación de biogás

Sustancia	Estequiometría
Carbohidratos	$C_6H_{12}O_5 \rightarrow 3*CO_2 + 3*CH_4$
Grasas	$C_{12}H_{24}O_6 + 3*H_2O \rightarrow 4,50*CO_2 + 7,50*CH_4$

Proteínas	$C_{13}H_{25}O_7N_3S + 6 \cdot H_2O \rightarrow 4,50 \cdot CO_2 + 6,50 \cdot CH_4 + 3 \cdot NH_3 + H_2S$
-----------	--

**Fuente:** (Moreno, 2011)

Generalmente los compuestos como los sulfuros continúan en los residuos, el  $CO_2$  se acopla con el  $NH_3$ , el gas resultante es principalmente  $CH_4$  y  $CO_2$  en la siguiente proporción:

$CH_4$ :  $CO_2$  71:29%

Las ecuaciones químicas deben estar balanceadas, la relación que existen entre los reactivos y productos de cada proceso de digestión. El crecimiento celular y la síntesis con la circulación de electrones son de gran importancia para alcanzar la energía necesaria y cumplir todas las funciones celulares. Inicialmente una proporción de electrones del sustrato donador es transferida al receptor para la conversión de otra porción de electrones en células microbianas a continuación se muestran las principales reacciones en la degradación.

Tabla 7. Reacciones químicas principales de la digestión anaerobia

Tipo de reacción	Ecuación
Conversión completa de glucosa a $CH_4$ y $CO_2$	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CH_4 + 3CO_2$
Acidogénesis de carbohidratos a ácido acético	$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2$
Acetogénesis del propionato	$CH_3CH_2COO^- + 3 H_2O \rightarrow CH_3COO^- + H^+ + HCO_3^- + 3H_2$
Acetogénesis hidrogenoclastica	$4H_2 + 2CO_2 \rightarrow CH_3COOH + 2H_2O$
Metanogénesis acetoclastica	$CH_3COOH + H_2O \rightarrow CH_4 + HCO_3^- + H^+$
Metanogénesis hidrogenoclastica	$4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$

**Fuente:** (Autolines, Bohórquez, Corrales, & Corredor, 2015)

#### **2.2.4.3. *Degradación anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.***

En la degradación anaerobia es importante conocer la composición química del afluente, es primordial para realizar los cálculos de la cantidad y composición del biogás producido. Es complicado determinar el porcentaje de hidrato de carbono, lípidos y proteínas en un sustrato no homogenizado, existen varias técnicas para estimar la cantidad de biogás que forma un sustrato complejo (Romero, 2010).

La fermentación anaerobia es un proceso importante que ayuda a reciclar residuos orgánicos, logrando la reducción del volumen con la producción de biogás como un efecto secundario positivo. Se requiere una representación matemática del proceso por la gran variedad de microorganismos responsables y el desconocimiento de la composición de los residuos y la variación del tiempo (Nogués, García, & Rezeau, 2010).

El nivel de complejidad del diseño está limitado por la cantidad y calidad de los datos experimentales disponibles que serán usados para la reducción del modelo. En la práctica, la derivación de un modelo de proceso dinámico implica los siguientes pasos:

- 1) La selección de esquemas de reacción y estructuras cinéticas macroscópicas adecuados.
- 2) La estimación de un modelo de parámetros desconocidos de los datos de experimentación mediante la minimización de un criterio de máxima probabilidad.
- 3) La estimación de las variaciones de medidas desconocidas.
- 4) La estimación en la matriz de covarianza de los parámetros estimados.
- 5) La validación del modelo obtenido.

El modelado dinámico de la degradación anaerobia ha sido un tema de investigación activa durante las tres últimas décadas, es ampliamente usada en tratamiento de aguas residuales, se

consigue optimizar este proceso, implementando un modelo de degradación anaerobia para lograr estimar sus parámetros cinéticos (Henze, Ekama, & Brdjanovic, 2017).

#### ***2.2.4.4. Degradación anaerobia de residuos vegetales.***

El tratamiento de aguas residuales, industriales y residuos orgánicos con alta carga orgánica puede degradarse por medio de un sistema anaerobio y en ocasiones se logra optimizar el tiempo de retención hidráulica (Henze, Ekama, & Brdjanovic, 2017).

Una de las limitaciones de la degradación anaerobia de residuos de frutas y vegetales (RFV) es la acelerada acidificación de estos desechos reduce el pH en el reactor, desarrollando la producción de ácidos grasos volátiles (AGV), los cuales inhabilitan la actividad de las bacterias metanogénicas. Los sistemas continuos de dos períodos implican tecnologías más eficientes para la degradación anaerobia de residuos de frutas (Nogués, García, & Rezeau, 2010).

En la degradación anaerobia, la biomasa residual es transformada a biogás y bioabono. La cantidad de biogás obtenido varía de acuerdo a la materia prima en algunos componentes (calidad de materia orgánica y los parámetros ambientales). Es un método para promover energía renovable, la posibilidad de reciclar nutrientes y reducir de volumen de los residuos teniendo como producto principal el biogás, siendo una opción rentable (Almeida & Regalado, 2010). Cabe mencionar que la intensidad microbiana de la cual depende la producción de metano está en función de la temperatura; el rango de selección de la temperatura para la degradación anaerobia es rigurosamente a las condiciones bioclimáticas (Nogués, García, & Rezeau, 2010).

Los residuos pueden relacionarse de otro modo, ya sea separados o en co-digestión, en el proceso de co-digestión se debe estimar los efectos de los diferentes compuestos que pueden ser utilizados; se logra alcanzar una mejor digestión y manejo del proceso diluyendo los residuos sólidos. Además, con el mezclado exitoso de diferentes residuos resulta una mejor digestión al

aumentar el contenido de nutriente y reducir los efectos negativos de los componentes tóxicos en el proceso de la digestión anaerobia (Henze, Ekama, & Brdjanovic, 2017).

#### ***2.2.4.5. Co-digestión anaeróbica de residuos orgánicos biodegradables.***

Se conoce con el nombre de co-digestión al tratamiento de dos o más residuos orgánicos, contribuye con el aprovechamiento de la complementariedad de la composición de los residuos a utilizar. Los residuos ganaderos poseen una mínima concentración de materia orgánica y baja relación C/N, pero tienen una concentración elevada de micro y macronutrientes (fundamentales para el desarrollo de microbiano). Los residuos alimentarios ricos en carbohidratos, proteínas y grasas se estiman un alto porcentaje de materia orgánica biodegradable y alta relación C/N, pero el proceso de degradación anaerobia es afectado por carencia de micronutrientes e inconvenientes de acidificación. Así pues, la mezcla de estos residuos procura tener una estabilidad en el proceso y aumento considerable de la producción de biogás (Burés, 2015).

La producción de biogás genera mayores ingresos, incrementando la economía en el país donde se desarrollen estos proyectos, es decir, comercializar la electricidad obtenida y uso del calor producido. Además, la gestión de algunos residuos empleados como co-sustratos puede generar también ingresos. La co-digestión de residuos ganaderos y residuos orgánicos biodegradables ha presentado excelentes resultados tanto en el rango termofílico como el mesofílico (Alvaréz & Lidén, 2009).

La combinación eficiente de diferentes tipos de desechos orgánicos biodegradables puede incrementar la producción de biogás, además el incrementar el valor fertilizante del fango digerido por la conservación de nutrientes (Mashad & Zhang, 2010).

#### **2.2.4.6. Inóculo**

Para la puesta en marcha y operatividad de un reactor discontinuo y sin alimentación, se necesita de un inóculo (semilla) que tenga una cantidad significativa de actividad microbiológica, masa biológica y una factible consecución accediendo a las bacterias intervinientes del proceso DA y se desarrollen positivamente las aguas residuales en condiciones ambientales (Manrique, Vera, & Pelaéz, 2012).

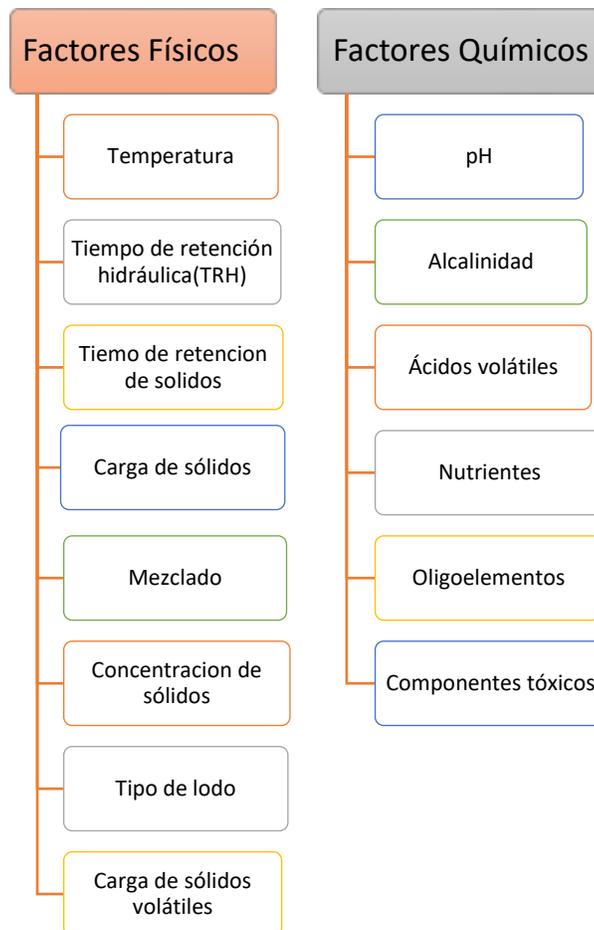
Cabe mencionar que si el inóculo es propicio en el proceso, se logra optimizar el tiempo de puesta en marcha del reactor (varía acorde a la capacidad – cantidad y calidad del inóculo). Los inóculos de diversas procedencias, los más recomendables son los lodos producidos en lagunas anaerobias y fosas sépticas; otros ejemplares de inóculos que posean un gran porcentaje de materia orgánica (condiciones anaerobias) son: el estiércol vacuno (crudo/digerido), lodos domésticos, residuos de destilería, lodos de ríos. En ciertos casos se emplean mezclas o combinaciones de los lodos antes mencionados, para lograr mejorar la producción de biogás (Córdoba, Fernández, & Santalla, 2014).

Para el llenado y operatividad de los reactores discontinuos sin alimentación se utilizó un inóculo procedente de la planta de tratamientos conocida como EMSABA ubicada en la provincia de Los Ríos en la ciudad de Babahoyo, debido a que cuenta con seis reactores anaeróbicos de flujo ascendente de manto de lodos (USAB).

#### **2.2.5. Parámetros para elevar la eficiencia en tratamientos anaerobios.**

Para lograr elevados niveles de estabilidad, ciertos requerimientos físicos y químicos de los microorganismos formadores se resumen en la Tabla 8:

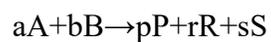
Tabla 8. Factores principales que influyen en la digestión anaerobia



**Fuente:** (Moreno, 2011)

### 2.2.6. Reacción química.

Una reacción química es una fase donde ocurren transformaciones, en la naturaleza de las sustancias mezcladas. La ecuación estequiométrica se expresa las proporciones molares en las que participan productos y reactivos en una reacción química.



Ec (4).

Existen diversas formas para clasificar las reacciones químicas, las cuales se presentan en la

Figura 6:

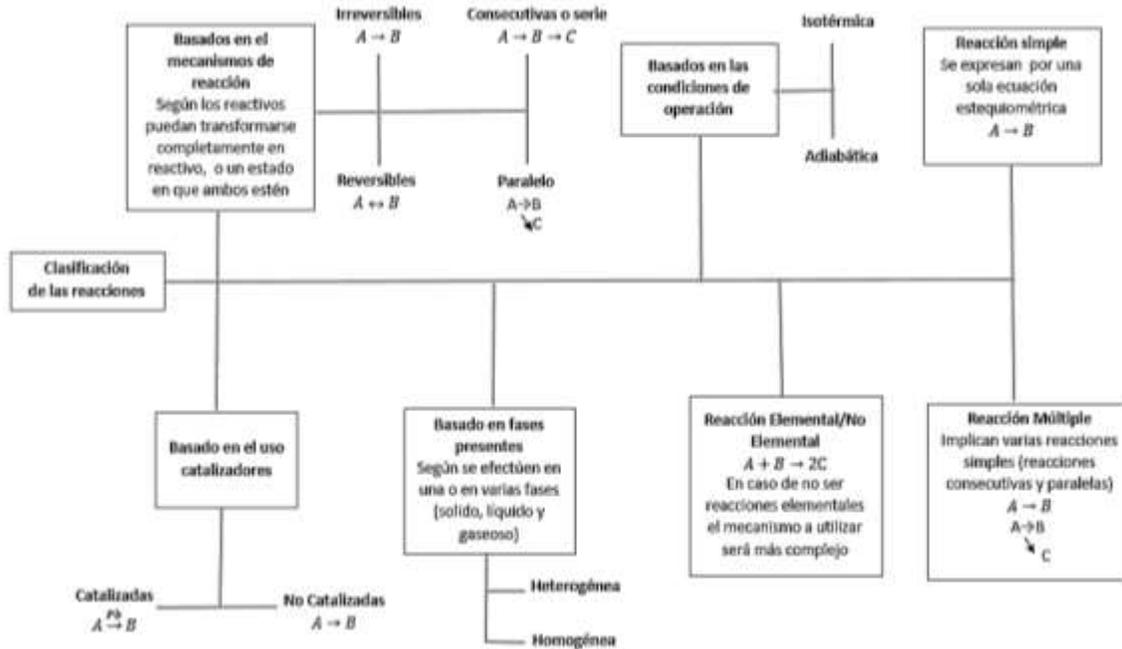


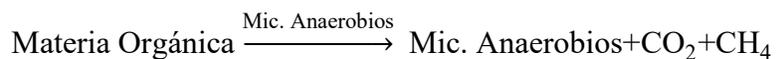
Figura 6. Clasificación de las reacciones químicas

**Fuente:** (Levenspiel, 2008)

Todas estas reacciones son caracterizadas por un mecanismo de reacción determinado, delimita la transformación que sufren los reactivos. Generalmente se catalogan según el número y el tipo de fases en homogéneas y heterogéneas. Una reacción es homogénea cuando tiene lugar dentro de una fase única, es decir que los reactivos, productos y especies intermedias que forman parte de la reacción estén en la misma fase. En cambio, las reacciones heterogéneas requieren por lo mínimo dos fases (sólido, líquido y gaseoso) para producirse, también vamos a nombrar las reacciones biológicas cuya diferencia es la participación de microorganismos vivos que ayudan a llevar a cabo la reacción; siendo homogéneas y elementales, todas las especies tienen la misma capacidad para reaccionar, pueden ser aeróbicas o anaeróbicas (Levenspiel, 2008).

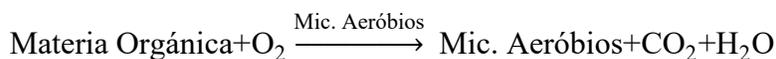
Para que dichas reacciones tengan lugar, se debe evaluar el contenido de carbono, nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, fósforo y una fuente de energía presente en la materia orgánica para el crecimiento de los microorganismos. Dicha energía es utilizada en la biosíntesis de la biomasa. Los microorganismos reactivos de la reacción originan productos de desecho como CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, y CH<sub>4</sub>, los cuales en la fase líquida es fácil de separar. Un aspecto importante dentro de las reacciones biológicas es que estos microorganismos deben ser separados y destruidos fácilmente (Chang, 2015). Las ecuaciones estequiométricas son afectadas por los microorganismos que operan en la reacción química, por ende en los sustratos utilizados y las condiciones asignadas en el proceso. Las reacciones globales para condiciones anaeróbicas y aeróbicas se presentan posteriormente (Levenspiel, 2008):

#### Reacciones Biológicas Anaeróbicas



Ec (5).

#### Reacciones Biológicas Aeróbicas



Ec (6).

### 2.2.7. Velocidad de reacción.

La velocidad de reacción química detalla el cambio en el porcentaje de concentración de los reactivos o de un producto con variación al tiempo que se produce la reacción química, expresado de manera cuantitativamente como la masa (moles) de un producto producido o reactante consumido por unidad de volumen y tiempo (Chang, 2015).

La cinética química trata principalmente del estudio de la velocidad con la que ocurre una reacción y los factores que influyen en ella, nos interesa saber cuánto ha progresado una reacción

química desde su inicio explicando la magnitud de cambio. Ciertas reacciones suceden de manera rápida o instantánea y otras lentas. Como sabemos en la obtención de polietileno o en la refinación de petróleo para producir gasolina, es necesario que las reacciones se lleven a cabo en tiempos relativamente breves (preferibles en segundos). En cambio, en los tratamientos de aguas residuales la fase de reacción es lenta (requiere algunos días). Por esta razón, es muy importante estudiar la velocidad de reacción para poder predecir, diseñar y controlar de una manera óptima el proceso de reacción (Levenspiel, 2008).

En la Figura 7 se visualiza la velocidad de reacción que es positiva, es decir que los reactivos se consumen y los productos se forman en un lapso determinado para que ocurra la reacción.

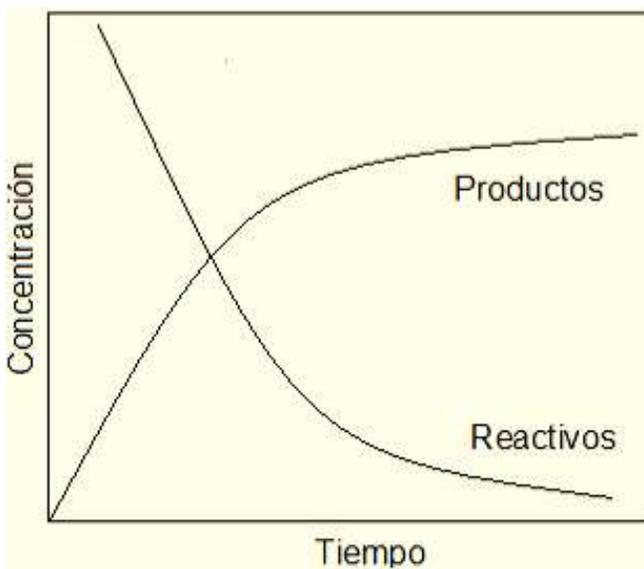


Figura 7. Proceso de una reacción

**Fuente:** (Herrera, 2017)

La velocidad de reacción se basa en los cambios de concentración-dependiente del tiempo. Matemáticamente y de una manera simple esto se expresa como:

$$r_A = \frac{-dC_{\text{reactivos}}}{dt} = \frac{dC_{\text{productos}}}{dt}$$

Ec (7).

Donde:

$r_A$ : Velocidad de cambio  $\left[\frac{\text{mol}}{\text{m}^3\text{s}}\right]$

$C_{\text{reactivos}}$ : Concentración de reactivos  $\left[\frac{\text{mol}}{\text{m}^3}\right]$

$C_{\text{productos}}$ : Concentración de productos  $\left[\frac{\text{mol}}{\text{m}^3}\right]$

El signo que estamos utilizando hace referencia a la reducción de concentración de reactivos, por contrario, la concentración de productos aumenta (Herrera, 2017). La correlación entre la velocidad de cambio y la velocidad de reacción se representa en la siguiente ecuación:

$$r = \sum v_i r_i$$

Ec (8).

Donde:

$v_i$ : Coeficiente estequiométrico de la especie

$r_i$ : Velocidad de reacción  $\left[\frac{\text{mol}}{\text{m}^3\text{s}}\right]$

“El coeficiente estequiométrico de la especie es negativo para reactivos y positivo para productos” (Fogler, 2001). La constante de velocidad (k) es una constante directamente proporcional con la velocidad de reacción y la concentración de los reactivos. La expresión de velocidad de reacción se fórmula de acuerdo a la ley de potencia queda:

$$r_A = k C_A^n$$

Ec (9).

Donde:

k: Constante de velocidad  $\left[\left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^3}\right)^{1-n} \frac{1}{\text{s}}\right]$

n: Orden de la reacción [-]

La constante cinética es especialmente para cada reacción dependiendo de la temperatura que se suministre para que ocurre la reacción. La ley de Arrhenius explica esta dependencia (Herrera, 2017). Como se mencionó, la velocidad de reacción está relacionada con la concentración de los reactivos, determinando el orden de la reacción (exponente al que esta elevados los términos de concentraciones en una ecuación de velocidad, basado en las concentraciones de los reactivos) (Muñoz, 2013).

$$r_A = k C_A^n C_B^n C_C^n$$

Ec (10).

La molecularidad de una reacción es el número de moléculas que interceden en la reacción. Para poder encontrar el orden de reacción global se deberán sumar los exponentes, como se muestra a continuación:

$$n = a + b + c$$

Ec (11).

Por lo general las leyes de velocidad se determinan experimentalmente (puede ser un número entero o fraccionario), partiendo de la cantidad de reactivos. Utilizando mecanismos que se detallarán más adelante es posible encontrar la constante cinética y el orden de reacción (Levenspiel, 2008).

#### ***2.2.7.1. Factores que influyen en la velocidad de reacción.***

Hay numerosas variables que perturban la velocidad de una reacción química, en los sistemas homogéneos son los siguientes (Muñoz, 2013):

- 1) Estado físico de los reactivos:** Las reacciones son más rápidas si los reactivos son gaseosos o están en dilución.
- 2) Temperatura:** Es directamente proporcional con la energía de activación.

- 3) **Concentración de los reactivos:** La velocidad de reacción se acrecienta al aumentar la concentración de los reactivos (aumenta el número de choque entre ellos).
- 4) **Catalizadores:** Cambian la energía de activación y por ende alteran la velocidad de reacción.

### **2.2.8. Cinética química.**

“No es obligatorio saber el mecanismo de una reacción para diseñar un reactor, lo que sí es necesario es una ecuación de velocidad conveniente”. En circunstancias adecuadas una sustancia logra convertirse en otras que reflejan diferentes naturalezas químicas, se origina por una reordenación de átomos para establecer nuevas moléculas, determinando una nueva reacción química. La cinética química establecerá si una reacción es lenta o rápida al analizar los componentes que estipulan la velocidad y el mecanismo (Smith, 1991).

#### ***2.2.8.1. Factores que intervienen en la cinética química.***

De acuerdo con Levenspiel, 2008 se describe los factores que intervienen en la cinética química:

- 1) **Velocidad de la reacción:** Se ve afectada por la temperatura, presión y concentración.
- 2) **Tiempo de residencia o permanencia:** El tiempo que tarda en avanzar una molécula por un reactor se conoce como tiempo de residencia. Son dos las propiedades importantes: el tiempo transcurrido desde que la molécula entra al reactor (su edad) y el resto del tiempo que estará en el reactor (su vida residual).
- 3) **Velocidad espacial (S):** Es la máxima velocidad de alimentación por unidad de volumen del reactor que dará una determinada conversión.

- 4) **Tiempo espacial:** El tiempo espacial no es igual al tiempo real que un elemento del fluido reside en el reactor. Los gradientes de temperatura, presión, y moles de mezcla reaccionante pueden ocasionar cambios en la densidad total de algunas zonas del reactor.
- 5) **Conversión:** La conversión tiene que ver con el grado de conversión de una reacción, es decir, su consumo que por lo general es el porcentaje o fracción del reactivo limitante que se convierte en producto.

### 2.2.9. Tipos de cinética.

Las dimensiones para el coeficiente cinético (k) para la reacción de orden n son:

$$(\text{Tiempo})^{-1}(\text{Concentración})^{1-n}$$

En la Tabla 9 se representa el orden de la reacción y sus respectivas unidades:

Tabla 9. Representación de las dimensiones para el coeficiente cinético

Reacción	Ecuación de velocidad	Orden	Unidades
<b>A→productos</b>	$r_A=kC_A^0$	n=0	$k=\frac{\text{mol}}{\text{L}\cdot\text{s}}$
<b>A→B</b>	$-r_A=kC_A$	n=1	$k=\frac{1}{\text{t}}, \frac{1}{\text{s}}$
<b>A+B→2R</b>	$r_r=kC_A C_B$	n=2	$k=\frac{\text{L}}{\text{mol}\cdot\text{s}}$
<b>2A+B→3S</b>	$r_s=kC_A^2 C_B$	n=3	$k=\frac{\text{L}}{\text{mol}^2\cdot\text{s}}$

Fuente: (Fogler, 2001)

### 2.2.9.1. Cinética de orden cero.

En la Tabla 9 se mostró que una reacción de orden cero, es cuando la velocidad de reacción es independiente a la cantidad de especies intervienen en una reacción (Fogler, 2001). La ley de velocidad para una reacción de orden cero se formula de la siguiente manera:

Para una reacción del tipo:



Ec (12).

$$-\frac{dC_A}{dt} = r_A = kC_A^n = k$$

Ec (13).

Integrando entre  $C_{A0}$  y  $C_A$ , y  $t$  se obtenemos:

$$-\int_{C_{A0}}^{C_A} dC_A = \int_0^t k dt$$

Ec (14).

$$C_A = C_{A0} - kt$$

Ec (15).

Todos los valores obtenidos de manera experimental se deben ajustar a una línea recta cuya pendiente es igual a  $-k$  como se muestra en la Figura 8:

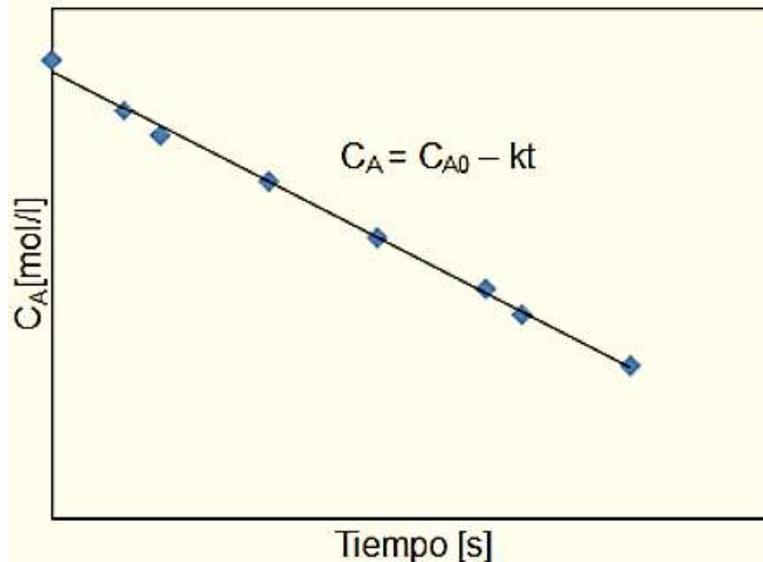


Figura 8. Cinética para una reacción de orden cero

**Fuente:** (Levenspiel, 2008)

Las reacciones de orden cero, están establecidas por otros constituyentes, por ejemplo, los espacios aprovechables de ciertas reacciones catalizadas por sólidos (Chang, 2015).

### 2.2.9.2. Ley de potencia.

Una reacción concuerda con la ley de potencia porque la velocidad depende de la concentración de los reactivos (excepto las reacciones de orden cero). El valor del orden de reacción es positivo (Levenspiel, 2008). Para una reacción del tipo:



Ec (16).

La ley de velocidad queda:

$$-\frac{dC_A}{dt} = kC_A^n$$

Ec (17).

Integrando entre  $C_{A0}$  y  $C_A$  para 0 y t se obtiene:

$$\ln C_A = \ln C_{A0} - kt$$

Ec (18).

También se logra formular la ley de velocidad como se muestra a continuación:

$$\frac{C_A}{C_{A0}} = e^{-kt}$$

Ec (19).

Se logra obtener el valor de la constante k graficando la manera linealizada la dependencia de la concentración con el tiempo. Una reacción de primer orden, se obtiene la línea presentada en la Figura 9 (a) cuya pendiente es una constante (Levenspiel, 2008).

Las reacciones de primer y segundo orden dependen de la concentración de los reactivos, pero el orden global de la reacción está elevado a la segunda potencia; a continuación, se muestran casos:



Ec (20).

La ley de velocidad de reacciones de segundo orden se expresa así:

$$-\frac{dC_A}{dt} = r_A = kC_A^n C_B^n$$

Ec (21).

De manera resumida queda así:

$$-\frac{dC_A}{dt} = kC_A^2$$

Ec (22).

Asimismo, integrando las concentraciones (entre  $C_{A0}$  y  $C_A$ ) para la variación del tiempo (0 y t) obtenemos la forma linealizada como sigue:

$$\frac{1}{C_A} = kt + \frac{1}{C_{A0}}$$

Ec (23).

De igual forma se puede encontrar la constante cinética graficando la forma linealizada y se ajustan los datos a una línea cuya pendiente es  $k$  como se observa en la Figura 9 (b) (Fogler, 2001)

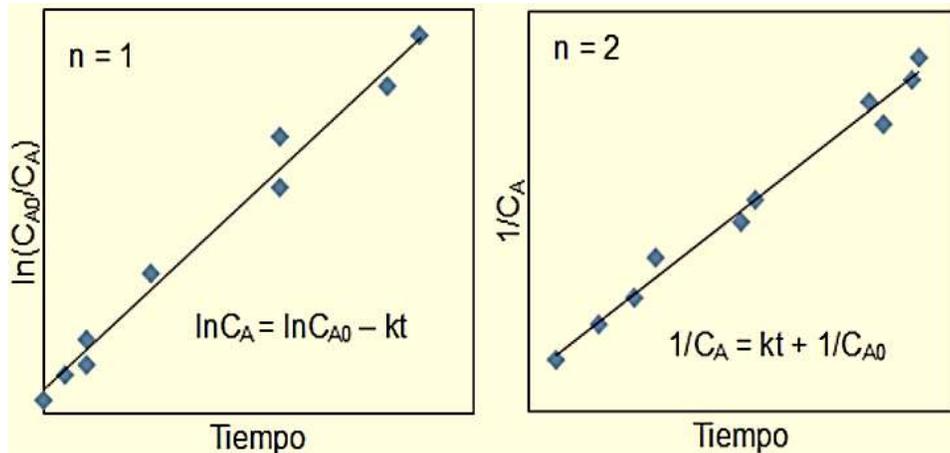


Figura 9. Forma linealizada de la cinética para a) reacción de primer orden, b) reacción de segundo orden

**Fuente:** (Levenspiel, 2008)

### 2.2.9.3. *Cinética de Monod (cinética de crecimiento bacteriano).*

Este método relaciona la evolución celular frente a la concentración de sustrato (formación de células nuevas vs el sustrato que se consume); con este estudio cinético se logra predecir el desarrollo o evolución de un cultivo, es decir, como se va consumiendo el sustrato y como varía la acumulación en el producto de una fermentación (Levenspiel, 2008).

La cinética sin inhibición, en este argumento la limitación del alimento por sí sola perturba la velocidad del crecimiento celular, en cambio con inhibición por productos, solo algunos productos formados durante la fermentación disminuyen en la velocidad. De manera matemática la expresión de Monod se formula así:

$$\mu = \frac{\mu_{\max} C_S}{K_S + C_S}$$

Ec (24).

$$\mu = K_C C_C$$

Ec (25).

Donde:

$\mu$ : Tasa de crecimiento  $\left[\frac{1}{h}, \frac{1}{d}\right]$

$\mu_{\max}$ : Tasa máxima de crecimiento  $\left[\frac{1}{h}, \frac{1}{d}\right]$

$k_C$ : Constante de crecimiento celular  $\left[\frac{mg}{L}, \frac{kg}{L}\right]$

$C_C$ : Concentración de nuevas bacterias  $\left[\frac{mg}{L}, \frac{kg}{L}\right]$

$C_S$ : Concentración de sustrato  $\left[\frac{mg}{L}, \frac{kg}{L}\right]$

$K_S$ : Constante de saturación del sustrato  $\left[\frac{mg}{L}, \frac{kg}{L}\right]$

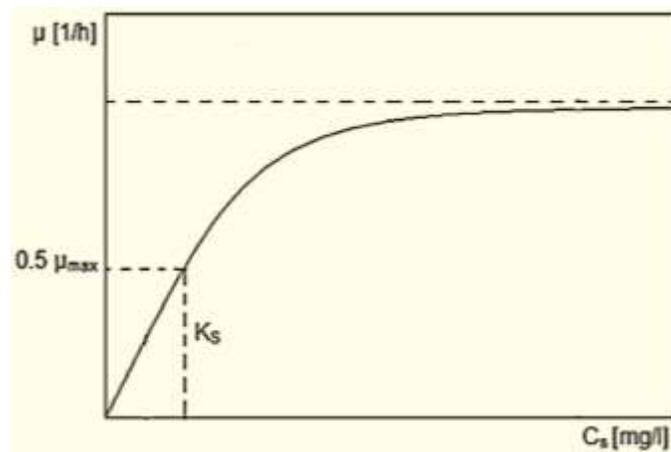


Figura 10. Cinética de Monod

**Fuente:** (Levenspiel, 2008)

En la Figura 10 visualizamos que la constante de Monod ( $K_S$ ), representa la concentración de sustrato donde se alcanza una valorización del crecimiento similar a la mitad de la valorización máxima.

Si hubiese exceso de sustrato, la concentración no afecta al valor de la tasa de crecimiento ( $\mu$ ); sí el sustrato es restringido existe este efecto. La valorización del crecimiento se aproxima a una reacción de primer orden cuando las concentraciones son bajas (Levenspiel, 2008).

$$\text{Si } C_S \ll K_S \rightarrow \mu = K C_S$$

Ec (26).

Al contrario, para concentraciones altas la tasa de crecimiento se aproxima a una reacción de orden cero:

$$\text{Si } C_S \gg K_S \rightarrow \mu = \mu_{\max}$$

Ec (27).

Para hallar el valor de las constantes es necesario linealizar la expresión. Se emplea la misma representación de Lineweaver semejante a la de Michaelis - Menten, pero en términos de Monod como se muestra posteriormente:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{K_S}{\mu_{\max}} \frac{1}{C_S} + \frac{1}{\mu_{\max}}$$

Ec (28).

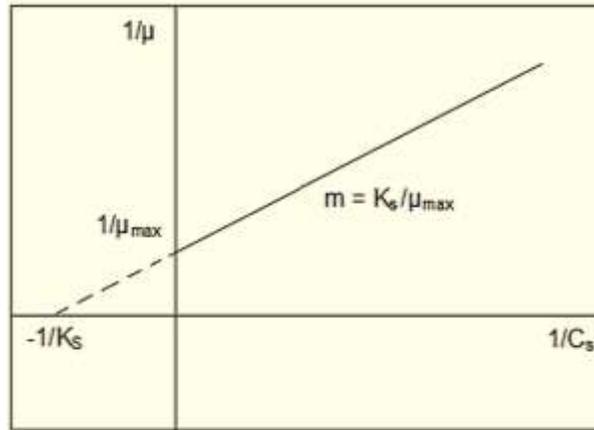


Figura 11. Representación de Lineweaver

**Fuente:** (Levenspiel, 2008)

El rendimiento del crecimiento celular ( $Y$ ) se mide de acuerdo a la cantidad de biomasa que puede producirse por unidad de sustrato consumido:

$$Y = \frac{C_{xf} - C_{x0}}{C_{S0} - C_S} = \frac{\text{g células nuevas}}{\text{g sustrato consumido}}$$

Ec (29).

Donde:

$C_{xf}$ : Concentración de biomasa final  $\left[\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right]$

$C_{x0}$ : Concentración de biomasa inicial  $\left[\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right]$

$C_{S0}$ : Concentración de sustrato inicial  $\left[\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right]$

$C_S$ : Concentración de sustrato final  $\left[\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right]$

Se puede linealizar la ecuación de Monod de otra manera para encontrar el valor de sus constantes mediante diversos experimentos en un reactor de tanque agitado. Se supone que los rendimientos fraccionales son constantes y que en la corriente de ingreso no se incorporan células,

obteniendo de esta manera la ecuación desarrollada por Monod, Novick y Szilard (Levenspiel, 2008).

$$\frac{1}{C_S} = \frac{k_C}{K_S} t_m - \frac{1}{K_S}$$

Ec (30).

Donde:

$t_m$ : Tiempo de residencia [d]

En la Figura 12 se demuestra gráficamente la ecuación 30, donde se adquieren las constantes de Monod:

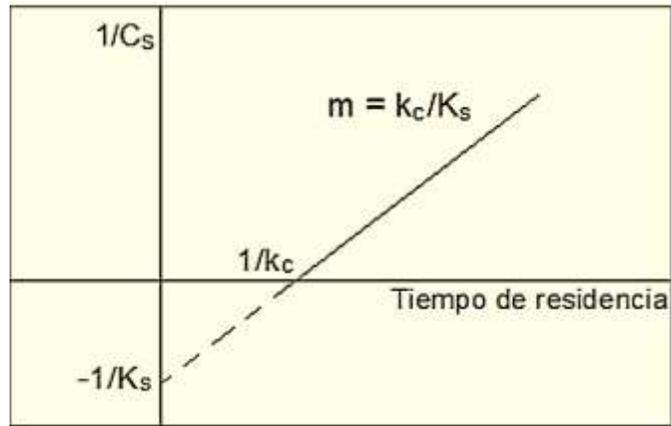


Figura 12. Estimación de las constantes de Monod

**Fuente:** (Levenspiel, 2008)

Una vez obtenido el rendimiento se puede calcular la velocidad de consumo del sustrato, de la siguiente manera:

$$R_S = \left( \frac{-q_{\max} C_S}{K_S + C_S} \right) C_x$$

Ec (31).

$$q_{\max} = \frac{\mu_{\max}}{Y}$$

Donde:

$q_{\max}$ : Tasa max. de consumo del sustrato  $\left[ \frac{\text{mg sustrato}}{\text{mg cels. agotadas}} \right]$

$C_x$ : Concentracion de biomasa  $\left[ \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right]$

$R_S$ : Velocidad de consumo del sustrato  $\left[ \frac{\text{mg sustrato}}{\text{h*L}} \right]$

### 2.2.10. Métodos para el análisis de datos de velocidad.

Para hallar la velocidad de reacción, el orden de reacción y el valor de la constante cinética, es preciso ejecutar una serie de experimentos para obtener datos reales e interpretar la velocidad de reacción. Debido a la ausencia de un equipo en el Laboratorio de Aguas que ayude a estudiar y controlar el proceso de reacción, se diseña un biodigestor (reactor discontinuo de tanque agitado) con un afluente de 43,10 L. Los equipos que permiten obtener y optimizar los valores cinéticos es el reactor intermitente (sistemas homogéneos) y el reactor de flujo continuo (sistemas heterogéneos) (Fogler, 2001).

El reactor intermitente (batch) es un recipiente hermético donde ingresan las sustancias y reaccionan en el interior del reactor, comúnmente las condiciones de operación son isotérmicas y a volumen constante, así se logra interpretar los datos obtenidos de una serie de experimentos. Los datos de mayor importancia para el proceso son: temperatura, concentración, pH que se miden en diferentes circunstancias mientras transcurre la reacción (Levenspiel, 2008).

Una vez obtenidos los datos, ya sea en el reactor intermitente o en de flujo continuo es preciso estudiar e interpretar estos para encontrar el valor de la constante cinética y el orden de reacción. Logrando expresar la ley de velocidad correspondiente a la reacción estudiada, existen algunos métodos para análisis de datos, a continuación, se explican los más relevantes:

### 2.2.10.1. Método integral.

En este método es rentable para reacciones simples donde aplicamos un procedimiento de prueba y error para hallar el orden de reacción, se debe suponer una representación de la ecuación cinética donde se sugiere un orden de reacción. Para lograr linealizar dicha ecuación se integra y después se realiza la gráfica de la forma linealizada con los datos conseguidos de la concentración y tiempo. Si estos datos concuerdan en una línea recta, se logra indicar que la ecuación cinética supuesta es conveniente. Si el ajuste de datos no es satisfactorio, se manifiesta y ensaya otra ecuación cinética hasta lograr la ecuación cinética adecuada a la reacción que se estudia. Generalmente se ensayan reacciones con expresiones cinéticas de orden cero, de primer orden o de segundo orden, mismas que fueron abordadas con anterioridad. Resulta inconveniente la expresión de la ecuación de velocidad para cualquier otra ecuación de velocidad, porque el método integral no es útil ya que al integrar no se obtienen expresiones manejables (Fogler, 2001).

### 2.2.10.2. Método diferencial.

El método diferencial se aplica en las cinéticas más complejas y se necesita una mayor cantidad de datos, para lograr construir una ecuación cinética de acuerdo a los valores obtenidos. El ajuste de la ecuación cinética se comprueba directamente a los datos experimentales obtenidos, antes del ajuste es obligatorio realizar unos cálculos previos, a continuación, se explica:

- Según los cambios de concentración de acuerdo al tiempo del reactor, se calcula las pendientes para la curva aproximada, que son las velocidades de reacción respectivas para cada valor de concentración.

$$-r_A = \frac{dC_A}{dt} = \frac{C_{A2} - C_{A1}}{t_2 - t_1}$$

Ec (33).

- Posteriormente se procede a linealizar la ecuación cinética (orden n):

$$r_A = -\frac{dC_A}{dt} = kC_A^n$$

Ec (34).

Empleando el logaritmo en ambas partes de la ecuación:

$$\log\left(-\frac{dC_A}{dt}\right) = \log(k) + n \cdot \log(C_A)$$

Ec (35).

- Posteriormente, se gráfica la función linealizada se visualiza que la pendiente representa el orden de reacción (n) y la ordenada al inicio suministra el valor de la constante cinética log k (Fogler, 2001).

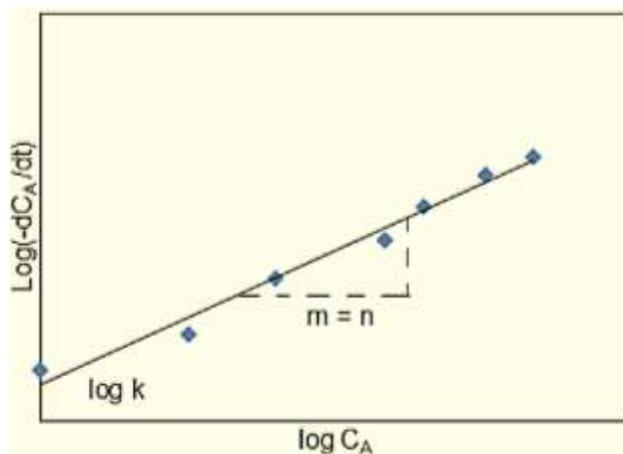


Figura 13. Método diferencial para comprobar el orden de cualquier reacción química

**Fuente:** (Fogler, 2001)

### 2.2.10.3. Método de las vidas medias.

El método de las vidas medias permite obtener la velocidad de una reacción (orden de reacción y ley de velocidad). Se sabe que acorde progresa una reacción, la cantidad de reactivos disminuye.

La vida media ( $t_{1/2}$ ), es el tiempo que tarda la concentración de los reactivos disminuya a la mitad de su concentración inicial (Levenspiel, 2008). Trabajando con un reactor intermitente y a volumen constante se tiene la ecuación 36:

Asimismo, integrando la ecuación 34 entre  $C_{A0}$  y  $C_A$  para 0 y t obtenemos:

$$-\frac{1}{k} \int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{1}{C_A^n} dC_A = \int_0^t dt$$

Ec (36).

$$t = \frac{1}{k(n-1)} \left( \frac{1}{C_A^{n-1}} - \frac{1}{C_{A0}^{n-1}} \right)$$

Ec (37).

Se expresa la concentración final así:  $C_A = \frac{C_{A0}}{2}$ , por lo que reemplazando esta definición en la ecuación 37 se consigue la expresión 38 para el tiempo de vida media:

$$t_{1/2} = \frac{2^{n-1} - 1}{k(n-1)} \left( \frac{1}{C_{A0}^{n-1}} \right)$$

Ec (38).

Empleando logaritmo en ambas partes de la ecuación 38 y graficando el  $\log t_{1/2}$  vs el  $\log C_{A0}$  se consigue una línea recta cuya pendiente es  $1 - n$ :

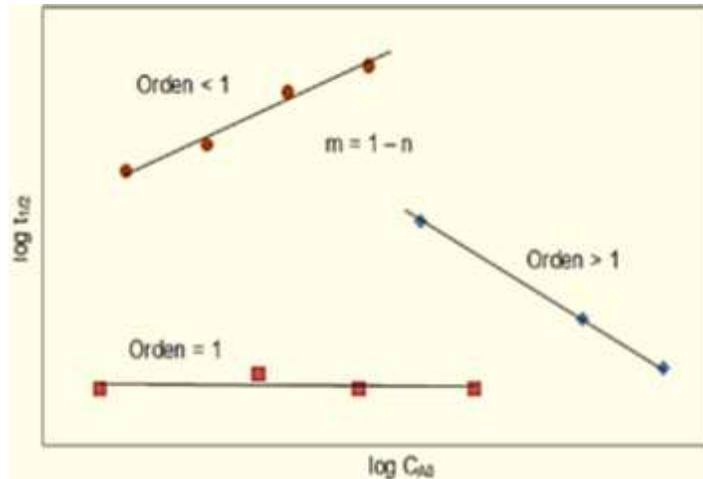


Figura 14. Método de las vidas medias

**Fuente:** (Fogler, 2001)

Como se visualiza en la Figura 14, para una reacción de primer orden, el tiempo de vida media es autónoma la cantidad de reactivo y para el tiempo de vida media se formula de la siguiente manera:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k}$$

Ec (39).

El tiempo de vida media es inversamente proporcional a la concentración inicial del reactivo ( $n=2$ ), como se muestra en la ecuación 40:

$$t_{1/2} = \frac{1}{C_{A0}k}$$

Ec (40).

Este método solicita una serie de experimentos, variando las concentraciones iniciales de un determinado reactivo.

#### 2.2.10.4. Efecto de la temperatura.

La constante cinética (ecuación de velocidad) varía según la temperatura, ya que está es independiente de la concentración. La dependencia de la constante cinética con la temperatura se manifiesta en la expresión de Arrhenius como sigue (Fogler, 2001):

$$k=k_0e^{\frac{E_a}{RT}}$$

Ec (41).

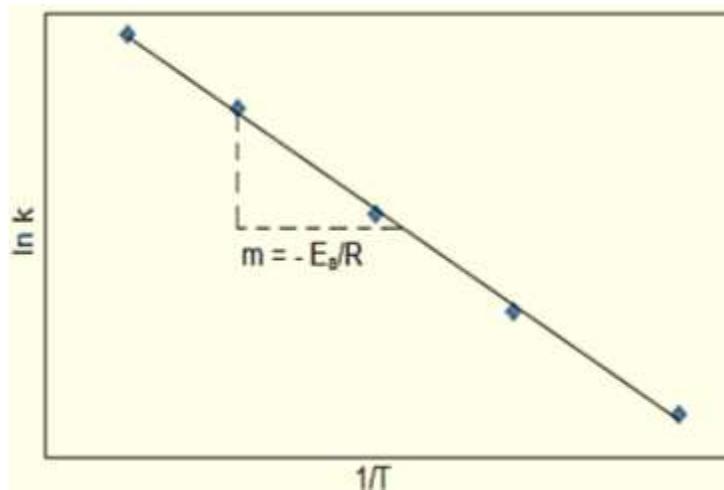


Figura 15. Ecuación de Arrhenius para encontrar la energía de activación y el factor pre-exponencial

**Fuente:** (Levenspiel, 2008)

### 2.3. Marco conceptual

#### 2.3.1. Reactor químico.

Los reactores químicos pueden tener una gran variedad de tamaños, formas y condiciones de operación. El más empleado a escala de laboratorio es el matraz, usado en reacciones de fase líquida. El estudio de los reactores químicos ha sido un tema de constante investigación y análisis en el mundo de la ingeniería química llevando siempre a clasificarlos de maneras distintas como se muestra a continuación (Smith, 1991)

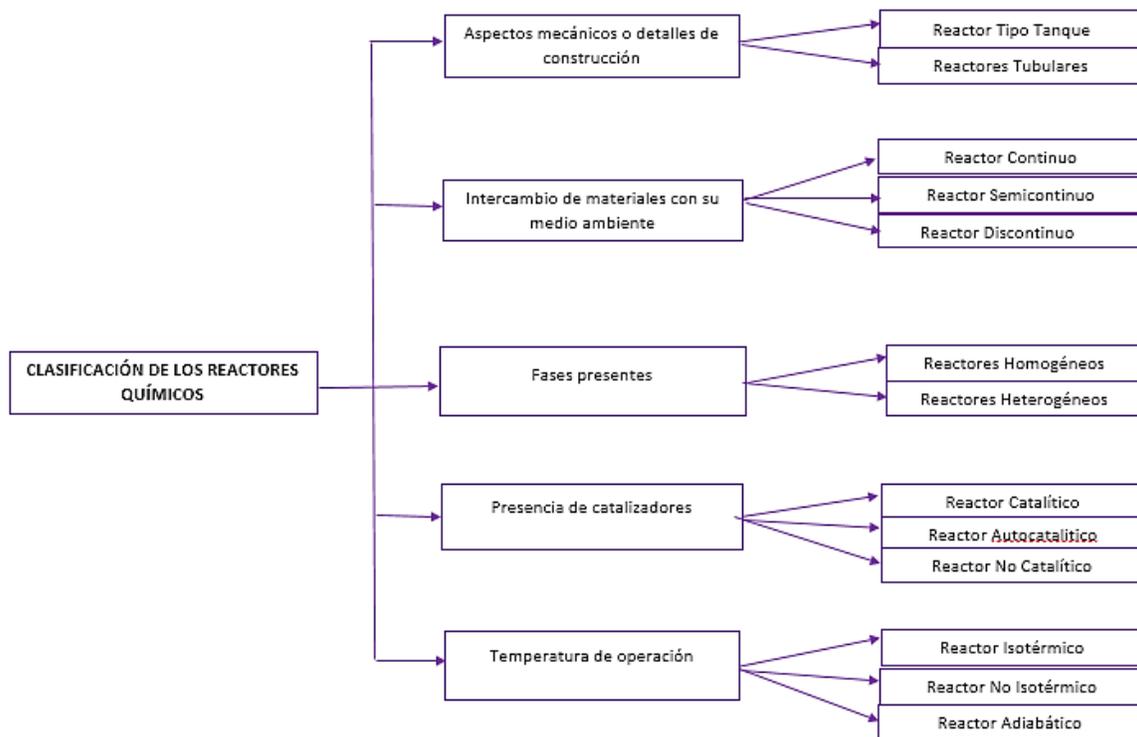


Figura 16. Clasificación de los reactores químicos

**Fuente:** (Smith, 1991)

Como visualizamos en la Figura 16 los diversos aspectos que se consideran para clasificar un reactor. Con el diseño de un reactor se determina el tamaño, tipo de reactor y el método de que se vaya a operar, para lograr obtener un proceso eficiente. Para optimizar el diseño de un reactor se debe tener en cuenta muchos factores para predecir el funcionamiento (Levenspiel, 2008). En la Figura 17 se muestra las características de diseño:

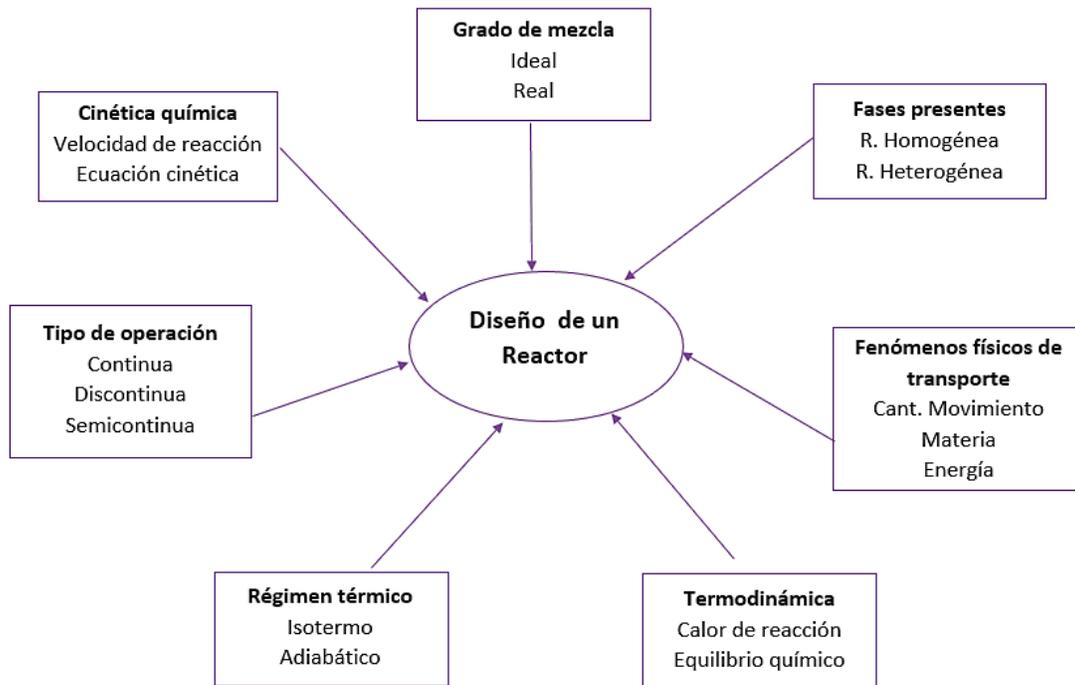


Figura 17. Diseño de un reactor

**Fuente:** (Smith, 1991)

### 2.3.1.1. *Reactor de acuerdo a sus condiciones de operación*

Esta clasificación hace referencia exclusivamente a los equipos donde se efectúan reacciones homogéneas pueden ser de tres tipos de reactor intermitente, reactor de flujo continuo y de flujo en estado no estacionario (Levenspiel, 2008).

#### 2.3.1.1.1. *Reactor intermitente (Batch)*

Se usa para operar a pequeñas escalas, previos a realizar el proceso a gran escala, obtenemos un alto porcentaje de conversión, una vez dentro todos los reactivos; los procesa según el transcurso de la reacción, no se alimenta ni se extrae ningún material del mismo (Levenspiel, 2008).

#### 2.3.1.1.2. *Reactor de flujo continuo*

Los reactores de flujo continuo en ciertas ocasiones operan en estado estacionario, también es conocido como reactor de tanque, como operan en estado estacionario el sistema está muy bien agitado por lo que a lo largo del reactor no hay variaciones espaciales en la concentración, temperatura o velocidad de reacción en todos los puntos del recipiente (Fogler, 2001).

Posteriormente se mencionará tres tipos de reactores que operan en estado estacionario:

- 1) Reactor continuo de mezcla completa (CSTR).
- 2) Reactor de flujo tampón (PFR).
- 3) Reactor empacado (PBR).

#### 2.3.1.2. *Diseño en el biodigestor*

Según los criterios de diseño Narvaez & Saltos, 2007 se deberá considerar los siguientes aspectos:

##### 2.3.1.2.1. *Parámetros de diseño*

- 1) Sistema de operación.
- 2) Sistema de carga (separación de gruesos).
- 3) Sistema de descarga (sifón, vertido o bombeo).
- 4) Sistema de agitación (mecánico, circulación del líquido, circulación del biogás).
- 5) Sistema de calefacción (interior o intercambiador de calor externo).
- 6) Aislamiento térmico.
- 7) Forma. Relación diámetro/altura.
- 8) Volumen necesario (carga diaria y tiempo de retención).

##### 2.3.1.2.2. *Instalaciones complementarias*

- 1) Depósito de almacenamiento previo.

- 2) Caldera o unidad de calefacción.
- 3) Gasómetro.
- 4) Unidad depuradora del biogás.
- 5) Unidad de tratamiento de lodos y efluentes.
- 6) Unidad de compresión del biogás (una compresión de 200-350kg/cm<sup>2</sup> representa un costo energético del 20% de la energía acumulada).

Posteriormente se describe los parámetros para la operación de un reactor anaerobio.

*2.3.1.2.3. Características del afluente:*

- 1) Concentración de sólidos (en porcentaje).
- 2) Sólidos Totales (ST), se determinan por secado en estufa a 105°C.
- 3) Sólidos Volátiles (SV), se determinan por calcinación a 550°C en el lapso de 1h.
- 4) Sólidos Fijos (SF), se obtiene de la siguiente fórmula,  $SF=ST-SV$ .

$SV_B$ =Sólidos Volátiles Biodegradables.

$SV_{NB}$ =Sólidos Volátiles No Biodegradables.

- 5) Demanda Química de Oxígeno (DQO), expresada en g/L o en mg/L.
- 6) Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO-20°C).
- 7) Contenido de nitrógeno total, amonio y nitratos.
- 8) pH y conductividad.
- 9) Relación C/N.
- 10) Alcalinidad, concentración de HCO<sub>3</sub> de 2,50-5 g/L.
- 11) Inhibidores, como antibiótico o metales pesados que por encima de 1 mg/L, suelen ser tóxicos.

12) Temperatura de digestión, de zona mesofílica ( $35-40^{\circ}\text{C}\pm 2.8^{\circ}\text{C}$ ) y zona termofílica ( $55-60^{\circ}\text{C}\pm 0.30^{\circ}\text{C}$ ).

13) Potencial redox. Debe ser lo más reductor posible, deben suprimir sustancias oxidantes (nitratos y oxígeno).

### **2.3.2. Biogás.**

El biogás es un gas combustible que se logra obtener de la biomasa, es más liviano que el aire. El mecanismo predominante para la transformación de biomasa en biogás es la conversión bioquímica en donde se involucran unas fases de procesos bacterianos y enzimáticos de manera simultánea. Unos de los métodos más empleados para la producción de biogás son por medio de la digestión anaerobia que consiste en un tanque completamente cerrado conocido con el nombre de biodigestor, la mezcla debe ser completamente homogénea (Moreno, 2011).

#### **2.3.2.1. Formación de metano.**

El metano principalmente se origina por:

- Descomposición de los residuos orgánicos (28%).
- Pantanos (23%).
- Extracción de combustibles fósiles (20%).
- La defecación de animales (digestión) (17%).
- Las bacterias provenientes de las plantaciones de arroz (12%).

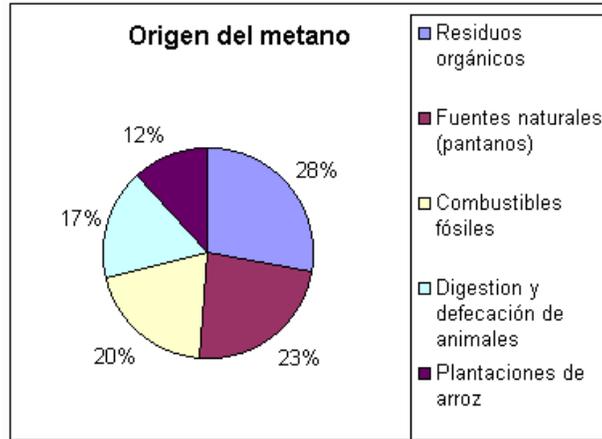


Figura 18. Origen del metano

**Fuente:** (Fernando, 2010)

### 2.3.2.2. Componentes del biogás.

El principal componente del biogás es el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), esta composición puede variar de acuerdo a la biomasa empleada pero una estimación de los valores se muestra a continuación:

- Metano ( $\text{CH}_4$ ): 40-70% del volumen.
- Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ): 30-60% del volumen.
- Hidrógeno ( $\text{H}_2$ ): 0-10% del volumen.
- Nitrógeno ( $\text{N}_2$ ): 0-0,05% del volumen.
- Sulfuro de hidrógeno (0-3%) del volumen.

Tabla 10. Propiedades de una composición estándar de biogás

<b>Composición</b>	55-70 % Metano
	34-45% Dióxido de carbono
	Trazas de otros elementos
<b>Energía obtenida</b>	6 – 6,50 kw/m <sup>3</sup>

<b>Equivalente en combustible</b>	0,60 – 0,65 L <sub>petróleo</sub> /m <sup>3</sup> biogás
<b>Límite de explosión</b>	6 – 12 % biogás en el aire
<b>Temperatura de ignición</b>	650 – 750 °C (según metano contenido indicado)
<b>Presión crítica</b>	75,89 bar
<b>Temperatura crítica</b>	-82,50 kg/m <sup>3</sup>
<b>Densidad normal</b>	1,20 kg/m <sup>3</sup>
<b>Olor</b>	Huevos en mal estado
<b>Masa molar</b>	16,04 kg/kmol

**Fuente:** (Moreno, 2011)

Tabla 11. Composición del biogás y consecuencias en las propiedades

<b>CO<sub>2</sub></b>	25-50% vol	Baja el poder calorífico
		Incrementa el número de metano
		Causa corrosión
		Daña celdas alcalinas de combustible
<b>H<sub>2</sub>S</b>	0-0,50% vol	Corrosión en equipos
		Emisiones de SO <sub>2</sub> posteriormente de los quemadores
		Emisiones de H <sub>2</sub> S en combustión imperfecta
		Inhibición de catálisis
<b>NH<sub>3</sub></b>	0-0,05% vol	Emisión de Nox
		Daño en las celdas de combustión
<b>Vapor de agua</b>	1-50% vol	Riesgo de solidificar y estrechar, tuberías y válvulas
		Daño de instrumentación por condensación
		Corrosión de equipos

<b>Polvo</b>	>5µm	Bloquea las boquillas y celdas de combustible
<b>N<sub>2</sub></b>	0-50% vol	Baja el poder calorífico
<b>Siloxenos</b>	0-50 $\left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}\right)$	Actúan como abrasivos, daño de motores

**Fuente:** (Moreno, 2011)

### 2.3.2.3. *Efectos del CO<sub>2</sub> en el biogás.*

Para lograr medir la presencia del CO<sub>2</sub> se mide en la razón de  $\frac{\text{CO}_2}{\text{CH}_4}$  en porcentaje volumen, los factores que influyen en la composición de CO<sub>2</sub> son (Camargo & Veléz, 2009):

- 1) Presencia de compuestos de extensas cadenas de hidrocarburos, la cantidad de carbono presente en el sustrato es directamente proporcional con el porcentaje en volumen de metano presente en el biogás.
- 2) El contenido de metano incrementa proporcionalmente a medida que el contenido de CO<sub>2</sub> va desactivando el proceso de hidrólisis (la descomposición anaeróbica de la biomasa mejora con el tiempo de exposición).
- 3) La degradación es acelerada, si la mezcla que está en el interior del reactor es completamente homogenizada.
- 4) Mientras más temperatura se suministre a la degradación, reduce el porcentaje de CO<sub>2</sub> diluido en agua.
- 5) Mientras más líquido contenga el reactor (alta concentración de CO<sub>2</sub> diluido en el agua), reduce el CO<sub>2</sub> en la fase gaseosa.

#### 2.3.2.4. Utilización del biogás.

En nuestro país la explotación de este combustible alternativo no está en planes de crecimiento, por lo que se continúa realizando investigaciones y desarrollo, es necesario un incentivo para la construcción de plantas pilotos que a futuro generen energía y aumente el campo de aplicación de estos proyectos (Fernando, 2010).

El biogás puede utilizarse como un combustible alternativo a la madera, el petróleo, el GLP, y la electricidad, también puede ser utilizado directamente para cocinar y para la cogeneración de electricidad y calor. A continuación, en la Figura 19 se indica donde se puede utilizar el biogás:

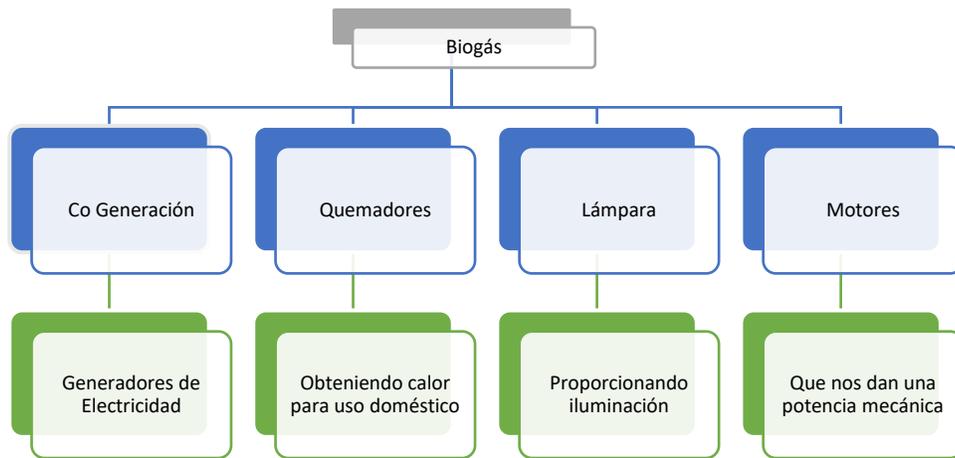


Figura 19. Usos del biogás

**Fuente:** (Moreno, 2011)

#### 2.3.3. Proceso de fermentación de biogás.

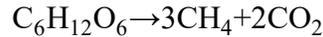
El proceso de fermentación de biogás se realiza en un recipiente hermético conocido como biodigestor donde tendrá lugar la digestión anaerobia, consiste en un ciclo biológico natural. Las bacterias metanogénicas constituyen el último eslabón de la cadena de microorganismos que se encargan de digerir la materia orgánica y reiniciar el ciclo. Las bacterias productoras de biogás son estrictamente anaeróbicas y por lo tanto solo podrán sobrevivir en ausencia total de oxígeno atmosférico (Moreno, 2011).

### 2.3.4. Producción de biogás en función del sustrato.

La obtención de biogás mediante la composición de la materia orgánica se establecerá de acuerdo a las siguientes consideraciones teóricas:

#### 2.3.4.1. *Hidratos de carbono.*

Desde la glucosa se provoca la hidrólisis de los hidratos de carbono, se logra formar la siguiente reacción de descomposición:

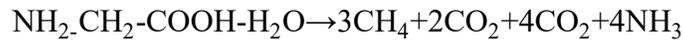


Ec (42).

El biogás se originará a razón de 0,80 m<sup>3</sup> por kg de glucosa y tendría una composición de sus componentes CH<sub>4</sub>:CO<sub>2</sub> de 1:1, con poder calorífico de 4250  $\frac{\text{kcal}}{\text{m}^3}$ .

#### 2.3.4.2. *Proteínas.*

Mediante la glicina se logra establecer la reacción de descomposición de los aminoácidos:

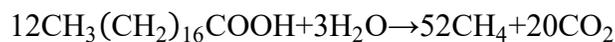


Ec (43).

El biogás se originará a razón de 0,70m<sup>3</sup> por kg de glucosa y tendría una composición de sus componentes CH<sub>4</sub>:CO<sub>2</sub> de 3:1, con poder calorífico de 6375  $\frac{\text{kcal}}{\text{m}^3}$ .

#### 2.3.4.3. *Lípidos.*

La hidrólisis de los aceites y grasas se tiene como producto glicerina y ácidos grasos, se logra establecer las ecuaciones globales de descomposición metanogénica:



Ec (44).

El biogás se originará a razón de  $1,20\text{m}^3$  por kg de glucosa y tendría una composición de sus componentes  $\text{CH}_4:\text{CO}_2$  de 59:25, con poder calorífico de  $5970 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3}$ .

Considerando que el poder calorífico del metano es de  $8500 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3}$ .

Según la composición de la biomasa, se deduce que la cantidad de biogás que se consigue obtener a partir de un determinado tipo de biomasa y su composición (contenido energético) dependerá de su composición química, por lo tanto, mientras mayor sea su contenido en grasa y proteína, mayor será también su contenido proporcional en metano (Camargo & Veléz, 2009).

### 2.3.5. Biodigestores.

Es un tanque herméticamente sellado en su interior se producen reacciones anaeróbicas, donde se degradan desechos orgánicos disueltos en un medio acuoso, para obtener metano y dióxido de carbono y sulfhídrico (Guardado, 2007).

El biogás que se origina de dicha degradación posee aproximadamente 66% de metano y 33% de dióxido de carbono, puede ser utilizado y transformado a energía. Adicionalmente el efluente formado es rico en nutrientes (Devesa, 2014).

#### 2.3.5.1. Ventajas y desventajas de los biodigestores anaerobios.

Tabla 12. Ventajas y desventajas de los biodigestores anaerobios

Ventajas	Desventajas
Producción de energía: Por acción de las bacterias metanogénicas, la mayor parte del contenido orgánico se transforma en metano, posee un alto poder energético (1 kg de la DQO eliminada genera 350 L de metano a 35°C).	Puesta en marcha: Requieren bajas revoluciones, debido al crecimiento de los microorganismos es lenta.

<p>Producción de fangos: El sólido restante queda bien neutralizado a una previa deshidratación.</p>	<p>Temperatura: A temperatura ambiente el proceso es muy lento, por lo cual es recomendable operar a una temperatura de 35°C para optimizar la actividad de las bacterias.</p>
<p>Proceso exterior: No hay presencia de malos olores debido a que se desarrollan en reactores completamente sellados, ubicados a 500 m de las urbanizaciones.</p>	<p>Costos: Los costos son elevados ya que necesitan de sistemas auxiliares para optimizar la producción de biogás, como la agitación mecánica, aislantes térmicos y un sistema de calefacción.</p>

**Fuente:** (Moreno, 2011)

### 2.3.5.2. Clasificación de los biodigestores.

Los biodigestores se clasifican por dos aspectos básicos, su régimen de carga y según su método de construcción.

#### 2.3.5.2.1. Régimen de carga

Esta clasificación describe el período de carga de volumen en el biodigestor:

- 1) **Flujo por lote:** Son de una sola carga, una vez llenados no es posible extraer o añadir más sustratos hasta finalizar todo el proceso (no se produce más biogás).
- 2) **Régimen semicontinuo:** Se carga por gravedad diariamente, el volumen de la mezcla es directamente proporcional al tiempo de retención.
- 3) **Régimen continuo:** Son de gran capacidad y requieren un sistema tecnológico para los controles de operación, porque es necesario control y seguimiento permanente para su rápida degradación.

2.3.5.2.2. *Según su método de construcción.*

Se refiere al modelo de construcción y las variables en los materiales para fabricar (Mamani, 2010):

- 1) **Biodigestor tipo hindú (domo móvil):** Se carga por gravedad diariamente, la carga orgánica volumétrica depende del tiempo de retención, la producción de gas es constante (Araujo, 2014).
- 2) **Biodigestor tipo chino (domo fijo):** Biodigestor semicontinuo, de campana fija, varios materiales de construcción y el biogás es recolectado en un recipiente fijo opera a presiones variables (Mamani, 2010).
- 3) **Biodigestor horizontal:** Se monta bajo tierra, equipo de forma cuadrada o en forma de “V”, la relación largo/ancho varía entre 5:1 hasta 8:1 y está provisto de paredes divisoras, de esta manera se evita que el sustrato salga antes de terminar el tiempo de retención.
- 4) **Biodigestor horizontal (Plug Flow):** No requieren agitación, ni ninguna parte móvil. Su construcción tanto en la cámara de digestión como en el almacenamiento de biogás puede ser en forma de globo, teniendo en cuenta que va herméticamente cerrado donde el gas al igual que los digestores anteriores se ubica en la parte superior de la materia orgánica digerida y dicho espacio superior corresponde del 25 – 30% del volumen del digestor.
- 5) **Biodigestor plástico de flujo continuo tipo CIPAV:** Son biodigestores plásticos de flujo continuo de bajo costo, fácil construcción, y mantenimiento. Acorde a la estructura de los otros biodigestores tiene una caja de entrada y otra de salida, además el biodigestor, el cual básicamente está constituido por una bolsa de

polietileno tubular calibre 8, su longitud puede llegar a los 100 m de longitud, lo que da capacidad suficiente para la alimentación de la carga orgánica.

### **2.3.5.3. Componentes de los biodigestores.**

De acuerdo con Guardado, 2007 los biodigestores se componen de cinco partes fundamentales, a continuación, se realiza una breve descripción de los diferentes componentes que aplican a cualquier tipo de biodigestor:

- 1) **Tanque de carga o de recolección:** Almacena los desechos orgánicos, con un previo tratamiento (para disminuir el tamaño de partícula del sustrato) y luego homogenizarlo con la cantidad de agua para hacer la disolución según el tipo de biodigestor instalado.
- 2) **Tanque de descarga (efluente):** Este tanque se encarga de recoger la mezcla digerida a emplear posteriormente como material de abono.
- 3) **Agitador:** Es importante para los biodigestores batch y algunos semicontinuo, ya que su permanente volumen de carga requiere agitación para la degradación. El agitador tiene como función mantener la homogeneidad de los desechos orgánicos depositados.
- 4) **Reservorio de gas:** Permite la acumulación de gas cuando la producción excede la demanda. Idealmente el reservorio debería ser el mismo espacio libre entre el volumen del biodigestor y el sustrato cargado, pero los reservorios aportan una capacidad adicional al proceso ya sea por eficiencia de generación.
- 5) **Tanque mezclador:** Constituye el principal elemento en el proceso de digestión y trabaja bajo el principio de ausencia de oxígeno, en esta cámara se degrada la materia orgánica en un tiempo de retención y a unas condiciones específicas de funcionamiento, el correcto manejo, cargue y funcionamiento garantiza la mejor productividad en la generación de biogás.

### 2.3.6. Parámetros en la producción de biogás.

Debido a todo el proceso biológico que se realiza, es de mucha importancia las condiciones de vida, un cambio de temperatura, cambios en la concentración del sustrato puede ocurrir una anulación del mecanismo de producción de biogás.

Los parámetros que se deben regular en cada una de las fases se logran resumir en la siguiente

Tabla 13:

Tabla 13. Parámetros presentes en las etapas principales de degradación anaerobia para la producción de biogás

Parámetro	Hidrólisis / Acidogénesis	Formación de metano
Temperatura	25-35 °C	Mesofílico (32 - 42 °C) Termofílica (50 - 58 °C)
Valor del pH	5,20-6,30	(6,70-7,50)
Razón C/N	(10-45)	(20 - 30)
Contenido MS	<40% MS	<30%MS
Potencial redox	(+400 a -300 mV)	<-250mV
Razón C:N:P:S Requerida	500:15:5:3	600:15:5:3
Trazas de elementos	N/a	Ni, Co, Mo, Se

Fuente: (Metcalf, 2003)

#### 2.3.6.1. Temperatura.

Las variaciones de temperatura serán directamente proporcionales a la bacteria que se dejará proliferar teniendo una relación fija con los días de degradación para conseguir el biogás.

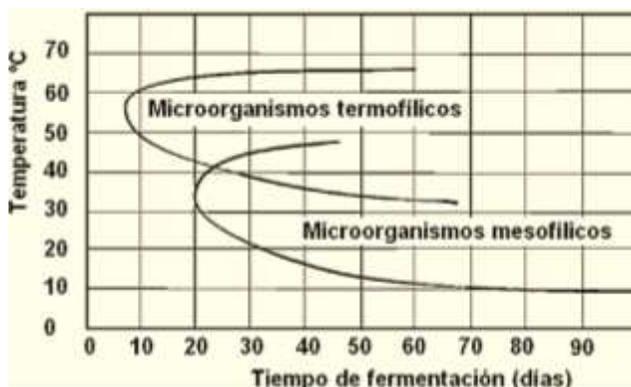


Figura 20. Rangos de operación para organismos mesofílicos o termofílicos

**Fuente:** (Metcalf, 2003)

A continuación, se muestra la Tabla 14 donde especifica el tiempo de retención recomendado de acuerdo a la temperatura de operación para realizar las etapas de degradación.

Tabla 14. Tiempos de retención recomendados para el diseño de biodigestores

<b>Temperatura de funcionamiento (°C)</b>	<b>Tiempo de retención hidráulico, (días)</b>	<b>Tiempo de retención recomendado, (días)</b>
18	11	28
24	8	20
30	6	14
35	4	10
40	4	10

**Fuente:** (Metcalf, 2003)

### 2.3.6.2. pH.

Para comenzar la degradación y obtener bacterias formadoras de metano, debe estar entre los 6,50 y 7,50. El pH es muy importante ya que es influenciado por sobrecargas orgánicas y presencia de inhibidores. En función de la alcalinidad del medio, la disminución de pH será más o menos

rápida. En residuos ganaderos presentan altas alcalinidades, la baja de pH será poco importante, aunque se produzcan importantes acumulaciones de ácidos (Devesa, 2014).

### 2.3.6.3. *Potencial redox.*

En el biodigestor son necesarios potenciales redox bajos, debido a que un monocultivo de bacterias de metanogénicas necesita un potencial redox entre (-300, -330) mV como óptimo. Para controlar este parámetro se pueden agregar agentes oxidantes como sulfatos, nitritos o nitratos (Metcalf, 2003).

### 2.3.6.4. *Nutrientes (relación C/N).*

Es recomendable utilizar una relación C/N entre los nutrientes, en el orden 16:1-25:1, el carbono obtenido del estiércol vacuno es lo que dará paso al metano y el nitrógeno aporta la multiplicación bacteriana y a catalizar el proceso de producción de biogás (Giraldo & Carmona, 2005).

### 2.3.6.5. *Desintegración.*

La producción de biogás es directamente proporcional con el tiempo de residencia en el reactor debido al cambio de etapa del tipo de digestión.

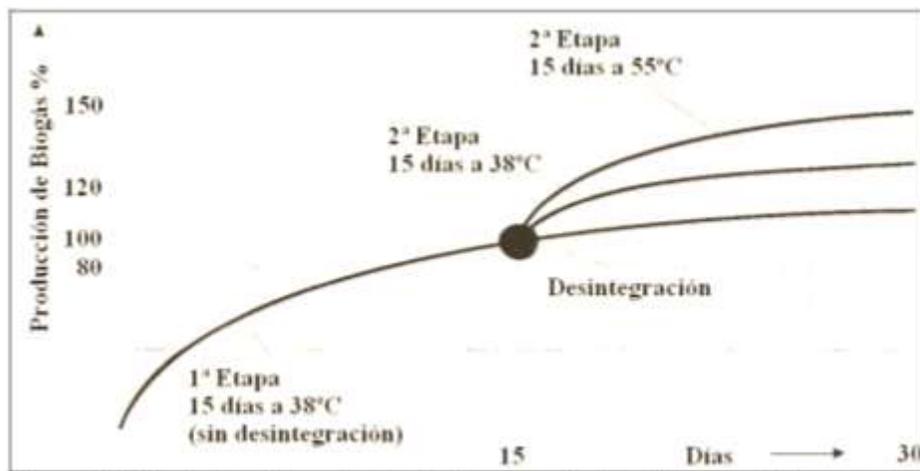


Figura 21. Diferenciación de la obtención de biogás en función del proceso de fermentación y la etapa de desintegración

**Fuente:** (Metcalf, 2003)

## 2.4. Marco contextual

Las materias primas que contribuyen con el estudio de la cinética química de la digestión anaerobia son los desechos orgánicos de procedencia doméstica, es recomendable emplear residuos de frutas no alcalinas, ya que se necesitará neutralizar el sistema adicionando una bomba de dosificación y de esta manera equilibrar el pH. El estiércol vacuno es procedente de la hacienda llamada “El Angela” ubicada en la vía a Vinces-Babahoyo. El Inóculo fue suministrado por la empresa “EMSABA” se extrajo del reactor número tres, debido a que cuenta con seis reactores anaeróbicos de flujo ascendente de manto de lodos. La co-digestión de los residuos sólidos urbanos es una manera de optimizar el tiempo de retención hidráulica y ayuda en la disminución de los mismos.

## 2.5. Marco legal

En Ecuador la institución que regula las energías renovables no convencionales es ARCONEL, de acuerdo con la Regulación N° 004/15, tiene por objeto determinar los criterios y obligaciones técnicas, que intervienen en la conexión de los generadores renovables no convencionales a las redes de transferencia y repartición. Posteriormente se definen la generación convencional y generación renovable no convencional:

**Generación convencional:** Manejan las siguientes tecnologías y son directamente conectadas a la red mediante una maquina sincrónica (Regulación N° 004/15, 2015):

- Hidroeléctrica (10 Mw).
- Termoeléctricas (usen combustibles fósiles y nucleares).

**Generador renovable no convencional (GRNC):** Engloba las centrales de generación que operen con las estas tecnologías (Regulación N° 004/15, 2015):

- Solar fotovoltaica y solar termoeléctrica.

- Eólica.
- Pequeñas centrales hidroeléctricas.
- Geotérmica.
- Biomasa.
- Biogás.
- Mareomotriz.

### **2.5.1. Escenarios a ser analizados.**

Los estudios deben considerar lo siguiente (Regulación N° 004/15, 2015):

- Red sin el generador renovable.
- Red con el generador renovable.
- Red de distribución solo con generación renovable.

“Adicionalmente, en los estudios de acceso deben tener en cuenta todo el equipamiento de generación, transporte, control, protección y comunicaciones que se prevé estará instalado al momento de la conexión GNRC al sistema eléctrico”.

### **2.5.2. Estudios de la calidad del producto.**

La GRNC debe efectuar estudios donde se detalle la calidad del producto que deberá entregarse en el PCC (Punto común de conexión), comprendieran los siguientes parámetros de calidad de producto (flicker, desbalance de voltaje y armónicos) según lo establecido (Regulación N° 004/15, 2015).

### **2.5.3. Pruebas y certificación de equipos.**

El operador de la red deberá confirmar el cumplimiento de los criterios, requerimientos y estándares ya sea, en el diseño, fabricación y compatibilidad de conexión del generador y el

equipo asociado. Si es necesario el operador de red puede contratar un consultor externo, a costo del GRNC, que verifique el cumplimiento (Regulación N° 004/15, 2015).

#### 2.5.4. Requisitos según tecnología.

En el presente trabajo de titulación, solo se va a referir a la GRNC la red de transmisión o distribución de la biomasa (Regulación N° 004/15, 2015).

- **“Solar térmica, biomasa, geotérmica y pequeña hidroeléctrica:** Para el caso de esto GRNC, cuya conexión a la red se realiza mediante generador sincrónico en forma similar que un generador convencional, se deberán seguir los mismos procedimientos de ensayo utilizados en generadores convencionales, establecidos en la regulación referente al procedimiento de despacho y operación, y en los instructivos de acceso a la red que definan el operador del sistema y operador de la red”. A continuación, se describe la regulación vigente ARCONEL:

Tabla 15. Regulación vigente ARCONEL

Código	Nombre	Descripción	Vigencia
ARCONEL 004/15	Requerimientos técnicos para la conexión y operación de generadores renovable no convencionales las redes de transmisión y distribución.	Establece criterios y requisitos técnicos relacionados con la conexión de los generadores renovables no convencionales las redes de transmisión y distribución a fin de no degradar la calidad y confiabilidad del servicio de energía eléctrica en la zona de influencia del generador	21/10/2015

**Fuente:** (Regulación N° 004/15, 2015)

## CAPÍTULO III

### 3. Marco metodológico

#### 3.1. Diseño de la investigación

En el presente proyecto se realizó en cuatro tipos de diseño estructurales:

1. Diseño y operatividad del biodigestor con una carga orgánica (residuos de frutas no cítricas y estiércol vacuno).
2. Obtención de biogás por medio de la descomposición bacteriana.
3. Estudio de la cinética química de la degradación anaerobia del sustrato orgánico (residuos de frutas no cítricas y estiércol vacuno).
4. Validación del diseño y operatividad del biodigestor didáctico anaerobio de acuerdo con el tiempo de operación.

#### 3.2. Tipo de investigación

##### 3.2.1. Investigación bibliográfica.

Con la indagación de consultas bibliográficas, se recopilará la información técnica que será de argumento para la validación del diseño y operatividad de un biodigestor didáctico anaerobio obteniendo la velocidad de degradación del sustrato orgánico.

##### 3.2.2. Investigación experimental.

En la presente investigación se manejan las condiciones de operación del biodigestor de manera controladas, con la finalidad de lograr condiciones propicias para el crecimiento bacteriano de acuerdo al tiempo de retención hidráulica.

#### 3.3. Aportes

### **3.3.1. Académico.**

Contribuir con resultados sobre un estudio cinético de un sustrato orgánico específico, debido a que, en la facultad de ingeniería química, no hay proyectos de investigación referentes a estudios cinéticos químicos de la digestión anaerobia los mismos pueden ser comparados con otras investigaciones a nivel nacional.

### **3.3.2. Tecnológica.**

El estudio cinético químico de un sustrato orgánico específico (residuos de frutas no cítricas y estiércol vacuno), que opera con un sistema de adaptación de bajo costo, y al optimizar la temperatura y volumen de llenado, se obtiene un tiempo de degradación bacteriana menor al previo diseño realizado a nivel de laboratorio.

### **3.3.3. Económica.**

Con el uso del biogás, ya sea de forma directa para cocinar o para la cogeneración de electricidad, se logra sustituir de manera parcial los combustibles fósiles.

### **3.3.4. Ambiental.**

Las materias primas que conforman el sustrato orgánico requieren un previo tratamiento físico los cuales no generan más contaminantes y como subproducto del proceso se obtiene bioabono (rico en nutrientes) que se puede utilizar como fertilizante.

## **3.4. Métodos y técnicas**

### **3.4.1. Métodos.**

#### ***3.4.1.1. Métodos empíricos.***

La fase experimental se orientará al diseño y operatividad de un biodigestor didáctico anaerobio para obtener la cinética química de la digestión anaerobia a partir de desechos orgánicos (residuos de frutas no cítricas y estiércol vacuno).

#### **3.4.1.2. *Métodos estadísticos.***

Se empleó métodos estadísticos descriptivos para:

- 1) Tabular los valores seleccionados.
- 2) Examinar los resultados conseguidos.
- 3) Mostrar resultados en forma de tablas.

#### **3.4.1.3. *Métodos analíticos.***

Se utilizarán para la valorización y recopilación de cada uno de los datos obtenidos dentro de la fase de experimentación.

Los métodos analíticos que se emplean son:

- 1) Contenido de sólidos totales.
- 2) Análisis de la demanda química de oxígeno (DQO).
- 3) Contenido de sólidos volátiles.
- 4) Sólidos disueltos.

### **3.4.2. Técnicas.**

#### **3.4.2.1. *Técnica utilizada.***

Para verificar la hermeticidad del biodigestor didáctico anaerobio se realizaron pruebas hidrostáticas, donde no hubo fugas. Para comprobar su funcionamiento, se ingresa el sustrato orgánico, que al descomponerse genera biogás y bioabono.

### **3.5. Materiales y equipo**

#### **3.5.1. Materiales.**

En las siguientes tablas se describen, los materiales que se emplearon tanto como en la construcción del biodigestor y en el estudio de la cinética química de la digestión anaerobia:

Tabla 16. Materiales empleados en la construcción del biodigestor

<b>Materiales empleados en la construcción del biodigestor</b>		
<b>Cantidad</b>	<b>N° Pieza</b>	<b>Descripción</b>
1	Abrazadera pequeña	Acero inoxidable
3	Adaptadores de tanque de ½ in	Dos bridas PP con cauchos
1	Banda de lavadora	Caucho
1	Bufler	Caucho
2	Caucho	Caucho
1	Codo de 90°	PP
1	Llave de paso ½ in	Acero inoxidable
1	Llave de paso de ½ in	Acero inoxidable
1	Lona	1.50x50 cm
1	Manómetro ½ 0-30 psi	Aluminio, latón
4	Mariposas	Acero inoxidable
1	Motor de 1 hp	Acero inoxidable
4	Paletas	Nylon
12	Pernos	Acero inoxidable
2	Poleas diámetro de 5-10 cm	Acero inoxidable
2	Rulimanes 808	Acero inoxidable
1	Tanque de 58 L	PVC
1	Tapón de ½ in	Caucho
4	Teflón	PP
1	Termómetro bimetálico de 0-100C°	Acero inoxidable

1	Tubo transparente ¼ in	1 m LDFE
1	Válvula de globo 1 in	PVC

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

Tabla 17. Materiales empleados para el estudio de la cinética química

<b>Materiales empleados para el estudio de la cinética química</b>		
<b>Cantidad</b>	<b>N° Pieza</b>	<b>Descripción</b>
2	Agitadores	Vidrio
4	Botellas plásticas de 0,5-1 L	PET
1	Caja de fosforo	Madera
1	Caja Petri	Vidrio
6	Capsulas de porcelana de 20 ml	Porcelana
1	Cocina de 1 hornilla	Vidrio
3	Equipos para sueros	Plástico
2	Espátulas	Acero
4	Jeringas de diferentes medidas	Plástico
1	Olla	Aluminio
1	Papel aluminio	Aluminio
1	Papel filtro	Papel
1	Pera	Goma
1	Piceta	Plástico
4	Pilas de reloj	Acero
2	Pinzas	Metálicas
6	Pipetas	Vidrio

6	Probetas de diferentes medidas	Vidrio
1	Silicona liquido	Silicón
6	Vasos precipitados	Vidrio

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

### 3.5.2. Equipos.

- Balanza analítica.
- Colorímetro.
- Espectrofotómetro.
- Estufa.
- Hornilla eléctrica.
- Mufla.
- Reactor HACH.

### 3.5.3. Reactivos.

Tabla 18. Reactivos y sus porcentajes de pureza en la caracterización de las mezclas de los biodigestores

Reactivos	Porcentajes (%)
Agua destilada	100
NaOH al 4%	4
Solución A (dicromato de potasio)	98
Solución B (ácido sulfúrico)	98

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

### 3.5.4. Materia prima.

Tabla 19. Porcentajes y procedencia de las materias primas en las mezclas iniciales

Materias primas	Procedencia	Mezcla I (%)	Mezcla II (%)	Mezcla III (%)
Estiércol de vaca	Hacienda “El Angela”	12	12	12
Inóculo	EMSABA	10	10	10
Residuos de la cáscara de papaya y banano	Doméstica	3	3	1

Fuente: (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

### 3.5.5. Plano frontal del biodigestor.

Para el diseño del biodigestor se utilizó el programa SmartDraw 2018, a continuación, se presenta un esquema generalizado:

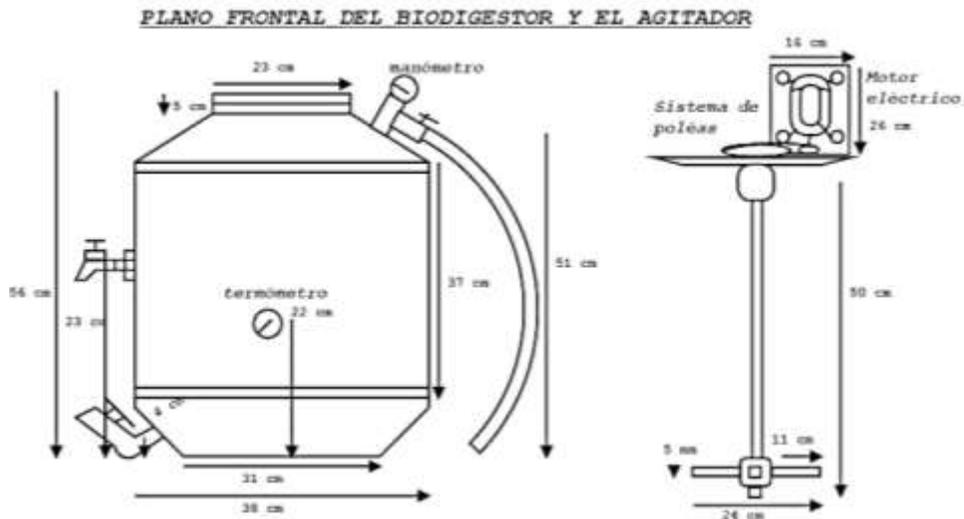


Figura 22. Plano frontal del biodigestor y el agitador

Fuente: (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)



Figura 23. Plano frontal y superior del biodigestor

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

### 3.6. Metodología experimental

#### 3.6.1. Diseño del biodigestor didáctico anaerobio.

##### 3.6.1.1. Volumen del tanque.

De acuerdo a los criterios de diseño de Narvaez & Saltos, 2007 se diseñará un biodigestor en forma de tanque mezclador de polietileno, material usado por no existir en el proceso una reacción exotérmica.

$$D_t = 38 \text{ cm} = 0,38 \text{ m}$$

$$H_t = 51 \text{ cm} = 0,51 \text{ m}$$

$$V_t = H_t * \frac{\pi}{4} * D_t^2 = 0,51 \left( \frac{\pi}{4} * 0,38^2 \right) = 0,05 \text{ m}^3 = 58 \text{ L}$$

Ec (45).

Donde:

$D_t$ : Diámetro del tanque [m]

$H_t$ : Altura del tanque [m]

$V_t$ : Volumen del tanque [L]

Para los siguientes cálculos se utilizó los siguientes criterios de diseño empleados por (Narvaez & Saltos, 2007). Para una cámara cilíndrica los criterios de diseño sin tener en cuenta los deflectores son:

$$H/D_t=1$$

Ec (46).

Donde:

H: Altura del líquido [m]

$D_t$ : Diámetro del tanque [m]

$$D_a/D_t=0,33$$

Ec (47).

Donde:

$D_a$ : Diámetro del impulsor [m]

$D_t$ : Diámetro del tanque [m]

$$W/D_a=0,20$$

Ec (48).

Donde:

W: Ancho de la paleta del agitador [m]

$D_a$ : Diámetro del impulsor [m]

$$G/D_a=0,25$$

Ec (49).

Donde:

G: Largo de la paleta del agitador [m]

$D_a$ : Diámetro del impulsor [m]

$$E/D_t=0,33$$

Ec (50).

Donde:

E: Altura entre el fondo del tanque y agitador [m]

$D_t$ : Diámetro del impulsor [m]

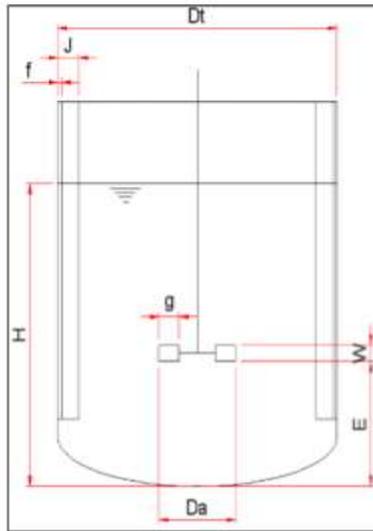


Figura 24. Semejanzas geométricas impulsor tipo turbina

**Fuente:** (Catillo, 2013)

3.6.1.1.1. *Cálculo de la altura del líquido.*

Los valores se reemplazan en la ecuación 46, dando como resultado:

$$H/D_t=1 \therefore H=D_t=38\text{cm}$$

3.6.1.1.2. *Cálculo del volumen de operación del líquido.*

El volumen de operación del tanque es del 75% del volumen total del tanque.

$$V_{op}=75\%V_t=0,75(0,05\text{m}^3)=43,50\text{L}$$

Ec (51).

Otra forma de cálculo del volumen de operación del tanque es por medio de la altura del liquido.

$$V_{op} = H * \frac{\pi}{4} * D_t^2 = 0,38 \left( \frac{\pi}{4} * 0,38^2 \right) = 0,04m^3 = 43,10L$$

Ec (52).

3.6.1.1.3. *Cálculo para el diámetro del impulsor.*

Los valores se reemplazan en la ecuación 47, dando como resultado:

$$D_a/D_t = 0,33 \therefore D_a = 0,33D_t = 0,33(38cm) = 12,54cm = 0,12m$$

3.6.1.1.4. *Cálculo del ancho de la paleta del agitador.*

Los valores se reemplazan en la ecuación 48, dando como resultado:

$$W/D_a = 0,2 \therefore W = 0,2D_a = 0,2(12,54cm) = 2,51cm$$

3.6.1.1.5. *Cálculo del largo de la paleta del agitador.*

Los valores se reemplazan en la ecuación 49, dando como resultado:

$$G/D_a = 0,25 \therefore G = 0,25D_a = 0,25(12,54cm) = 3,14cm$$

3.6.1.1.6. *Cálculo de la altura entre el fondo del tanque y agitador.*

Los valores se reemplazan en la ecuación 50, dando como resultado:

$$E/D_t = 0,33 \therefore E = 0,33D_t = 0,33(38cm) = 12,54cm$$

3.6.1.1.7. *Cálculo para la potencia del motor de agitación.*

$$P = K_T \ell N^3 D_a^5$$

Ec (53).

Donde:

P: Potencia requerida [Watts]

$K_T$ : Constante [Tabla 21]

$\ell$ : Densidad del compost [ $kg/m^3$ ]

N: Velocidad del agitador [R/s]

D<sub>a</sub>: Diámetro del agitador [m]

Cabe mencionar que la densidad varía de acuerdo a los desechos orgánicos usados, pero se estima el siguiente valor presente en el cuadro:

Tabla 20. Propiedades de un compost

<b>Materia orgánica</b>	35-40 %
<b>C/N</b>	12
<b>Humedad</b>	40-45%
<b>Nitrógeno total</b>	2-2,60%
<b>Fósforo</b>	1,50-2%
<b>Potasio</b>	1,50%
<b>Calcio</b>	2%
<b>Densidad</b>	831kg/m <sup>3</sup>
<b>Viscosidad</b>	0,04kg/m-s

Fuente: (Narvaez & Saltos, 2007)

La constante ( $K_T$ ) se la obtiene de la siguiente tabla para un diseño de cuatro palas inclinadas a 45°C:

Tabla 21. Criterios de diseño de Richter

<b>Valores de las constantes <math>K_L</math> y <math>K_T</math> para tanques que tienen cuatro deflectores en la pared del tanque, cuya anchura es igual o menor al 10% del diámetro del tanque</b>		
Tipo de impulsor	$K_L$	$K_T$
Impulsor hélice, tres palas	-	-
Paso 1	41	0,32

Paso 1,50	48	0,87
Turbina	-	-
Disco de seis palas	65	5,75
Seis palas inclinadas	-	1,63
Cuatro palas inclinadas	44,50	1,27
Paleta plana, dos paletas	36,50	1,70
Impulsor HE-23	43	0,28
Ancla	300	0,35

**Fuente:** (Narvaez & Saltos, 2007)

Entonces se determina las revoluciones del motor de ½ hp (372,85Watts):

$$P = K_T \ell N^3 D_a^5 \therefore N = \sqrt[3]{P / (K_T \ell D_a^5)}$$

Ec (54).

$$N = \sqrt[3]{372,85w / (1,27(831Kg/m*s)(0,12m)^5)} = 22,50 \text{ RPS} = 1350,10 \text{ RPM}$$

Ec (55).

Se necesita una velocidad baja de maximo de 500 RPM, por lo que se aplica un sistema de polea y se calcula la revoluciones del agitador mediante la siguiente fórmula:

$$R_a r_a = R_b r_b \therefore R_b = R_a r_a / r_b = 1350,10 \text{ RPM} (5\text{cm}) / (15\text{cm}) = 450,33 \text{ RPM}$$

Ec (56).

De acuerdo a los datos que se obtuvieron usando las fórmulas descritas anteriormente para el funcionamiento del diseño de un biodigestor se obtiene las siguientes especificaciones del equipo y parámetros de operación:

Tabla 22. Especificaciones del biodigestor

<b>Dimensiones</b>	<b>Medidas</b>
Volumen total del tanque	0,05 m <sup>3</sup> = 58 L
Volumen de operación del tanque	0,04m <sup>3</sup>
Diámetro del tanque	38 cm
Altura del tanque	51 cm
Altura del líquido	38 cm
Diámetro del impulsor	12,54 cm
Ancho de la paleta	2,51 cm
Largo de la paleta	3,14 cm
Número de paletas	4 inclinadas a 45°
Espacio entre fondo e impulsor	12,54 cm
Potencia del motor y revoluciones	½ Hp y 1350,10 RPM
Revoluciones del agitador	450,33 RPM

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

Tabla 23. Condiciones de operación del biodigestor

<b>Parámetros</b>	<b>Rango</b>
Temperatura	35 – 28 °C
pH	8 – 5
Agitación	450 RPM (cd/4h)
Presión	0 psi

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

### **3.6.2. Procedimiento experimental.**

#### **3.6.2.1. Acondicionamiento del sustrato orgánico.**

Para facilitar la degradabilidad del sustrato se debió reducir el tamaño de los desechos orgánicos antes de proceder con la mezcla. El estiércol vacuno se recolectó y almacenó en un balde PVC, para luego ser transportados a Guayaquil en condiciones anaerobias y evitar malos olores. El lapso de llenado fue de tres días, para una mejor facilidad de homogenización los residuos de frutas serán triturados.

#### **3.6.2.2. Operación del biodigestor.**

La operatividad del biodigestor permitió obtener datos reales para el estudio de la cinética química de la digestión anaerobia, al controlar los parámetros que influyen en el proceso, tales como: pH, la agitación y la temperatura (Ver Tabla 23). Los biodigestores operaron en un lapso de cuatro semanas, para la operatividad de los biodigestores fue necesario efectuar las etapas a continuación, se describen:

#### **3.6.2.3. Preparación de la mezcla inicial.**

Según los estudios anteriores realizados por Ampudia, 2011 y Almeida & Regalado, 2010 la mezcla que inició la operación del biodigestor estaba constituida por estiércol, agua, desechos orgánicos de frutas no cítricas e inóculo. El inóculo fue suministrado de la Planta de Tratamiento de Aguas ubicada en Babahoyo provincia de Los Ríos llamada “EMSABA”.

La preparación consistió en mezclar los desechos de frutas no cítricas (cáscara de banana y papaya), estiércol y agua para el biodigestor anaerobio con agitación, y con un pre-tamizado para los prototipos de biodigestores anaerobio sin agitación para reducir la cantidad de sólidos, para evitar el taponamiento de la tubería al momento de llenarlos. En la mezcla inicial se utilizó 12% de estiércol y 3% de desechos de frutas no cítricas para tener una población bacteriana fuerte que

permita el desarrollo del proceso. De acuerdo con Ampudia, 2011 el último componente de la mezcla fue el inóculo del cual se añade 10% (se mantuvo constante para dos de las formulaciones y el tercero disminuye a 1% los desechos de frutas no cítricas Ver Anexo C). Procurando evitar el contacto con el oxígeno ya que poseen las bacterias en crecimiento, tienen como finalidad ayudar a la formación de las bacterias metanogénicas. En la Tabla 24 se describe la composición de la mezcla inicial:

Tabla 24. Composición de la mezcla inicial

<b>Componentes</b>	<b>Porcentaje (Peso/Vol-%)</b>
Agua	50
Estiércol vacuno	12
Desechos de frutas no cítricas	1-3
Inóculo	10

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

#### **3.6.2.4. Pruebas hidrostáticas.**

Se realizaron pruebas para confirmar la hermeticidad del biodigestor anaerobio de mezcla completa referente a la conductividad térmica, verificación de fugas líquidas y del gas a continuación, se describe el procedimiento de cada una de ellas (Ver Anexo D):

##### **A. Control de fugas líquidas**

- 1) Se cierran las válvulas de entrada y salida, posteriormente se llena el volumen total del biodigestor, para verificar que no existan fugas de líquidos, durante el lapso de 30 min.

##### **B. Conductividad térmica**

- 1) La primera prueba se realizó sin ningún tipo de material aislante, se ingresa agua caliente (40°C), excediendo la altura del termómetro en el biodigestor.
- 2) Para comprobar la conductividad térmica del PVC, se visualizó que durante una hora se mantuvo constante, luego en un período de dos horas la temperatura desciende 5°C; en el transcurso de 6 h desciende a 30°C.
- 3) De acuerdo con los resultados anteriormente obtenidos, se implementó un aislante tipo chaleco de lona y bufet.
- 4) Se repitió el paso 2 mencionado, dando como resultado en un lapso de 6 h disminuyó de 40°C a 33°C, sin agitación.



Figura 25. a) Termómetro en el biodigestor b) Chaleco térmico

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

### C. Control de fugas del gas

- 1) Se decidió utilizar hielo seco y agua para verificar que no existan fugas del biogás en el transcurso de operatividad del biodigestor, ya que se requiere trabajar en un sistema anaerobio.
- 2) Se ingresó 27 L de agua y 1 lb de hielo seco, luego se procedió a cerrar todas las válvulas y ajustar correctamente el agitador.

- 3) Las fugas del gas se dieron en el acoplamiento del agitador al taque, por lo que en el manómetro no dio un valor real.
- 4) Debido a la presencia mínima de fugas del gas, se usó silicona 999 y se verificó la ausencia de fugas y ejerció una presión de 5 psi (valor inferior a la presión que soporta el tanque).

Con el desarrollo de las pruebas hidrostáticas, se logró mantener la temperatura en el rango deseado con la ayuda del aislante (35 – 28) °C, no se presenciaron fugas de gas o líquidas, siendo un sistema completamente anaerobio.

#### **3.6.2.5. Acondicionamiento y llenado del biodigestor.**

Se comprobó la hermeticidad del biodigestor antes de su respectivo llenado, por medio de pruebas hidrostáticas anteriormente descritas, para evitar la alteración de las condiciones anaerobias durante la operación (impedimento de crecimiento de bacterias estrictamente anaerobias). Después de la comprobación se procedió a llenar el tanque con un 75% de su volumen total, por medio de la tubería de ingreso con el sustrato inicial para la puesta en marcha del biodigestor.

#### **3.6.2.6. Caracterización de la muestra inicial.**

Tabla 25. Resultados de la caracterización individual y de las mezclas iniciales de los biodigestores (con y sin agitación)

<b>Parámetros</b>	<b>DQO</b>	<b>ST</b>	<b>SV</b>	<b>STF</b>	<b>STD</b>	<b>pH</b>
<b>Residuos</b>	<b>[ml/L]</b>	<b>[mg/L]</b>	<b>[mg/L]</b>	<b>[mg/L]</b>	<b>[mg/L]</b>	
Cáscara de papaya	-	11,60	11,40	0,20	3,98	6

Cáscara de banano	-	18,10	17,60	0,50	4,88	6
Estiércol vacuno	-	82	28	54	3,15	7,50
Inóculo	-	-	-	-	1,17	8,50
Mezcla I	150000	160000	86500	73500	2670	8
Mezcla II	110000	120000	76500	43500	3860	8
Mezcla III	86000	135000	67780	67220	3840	8

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

### **3.6.3. Métodos de caracterización.**

#### ***3.6.3.1. Procedimiento de los análisis para la caracterización de la mezcla inicial del biodigestor anaerobio.***

##### **A. Contenido de sólidos totales**

- 1) Las muestras fueron extraídas el mismo día que fueron analizadas se necesitó un volumen de 20 ml.
- 2) La balanza analítica una vez calibrada, se procedió a tomar el peso de los 3 crisoles sin y con las muestras posteriormente se vertió las muestras en los crisoles.
- 3) Los crisoles con las muestras fueron sometidas a un baño maría (evaporación del agua de las muestras), se anotó su peso y luego se sometieron a un secado durante 2 h en la estufa a 105°C.
- 4) Una vez transcurridas las 2 h, se procedió a retirar las muestras de la estufa, se dejó enfriar los crisoles para equilibrar la temperatura y se registraron los pesos.
- 5) Se procedió realizar los cálculos y registró en la hoja de control.

$$ST = \frac{m_2 - m_0}{v_0}$$

Ec (57).

Donde:

ST: Sólidos totales [mg/ml]

$m_2$ : Masa de la muestra seca + masa del crisol [mg]

$m_0$ : Masa del crisol [mg]

$m_1$ : Masa de la muestra + masa del crisol [mg]

$v_0$ : Volumen de la muestra [ml]



Figura 26. Equipos a) Mufla b) Balanza analítica c) Parilla eléctrica utilizados los análisis de caracterización de la mezcla inicial y productos

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)



Figura 27. Muestras iniciales, luego del baño maría para determinar el contenido de ST

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

## B. Contenido de sólidos totales volátiles y fijos

- 1) Finalizada la práctica de los sólidos totales, las muestras fueron ingresadas en la mufla en un lapso de 20 min a 550°C.
- 2) Una vez transcurrido los 20 min, se procedió a retirar las muestras de la mufla, se dejó enfriar los crisoles para equilibrar la temperatura y se registraron los pesos.
- 3) Se procedió a realizar los cálculos y registró en la hoja de control.

$$SV = \frac{(m_2 - m_0) - (m_3 - m_0)}{v_0}$$

Ec (58).

Donde:

SV: Sólidos volátiles [mg/ml]

m<sub>2</sub>: Masa de la muestra seca + masa del crisol [mg]

m<sub>0</sub>: Masa del crisol [mg]

m<sub>1</sub>: Masa de la muestra + masa del crisol [mg]

m<sub>3</sub>: Masa muestra calcinada + masa del crisol [mg]

v<sub>0</sub>: Volumen de la muestra [ml]

Los sólidos fijos se los calculó por diferencia de la siguiente manera:

$$SF = ST - SV$$

Ec (59).

Donde:

SV: Sólidos volátiles [mg/ml]

ST: Sólidos totales [mg/ml]

SF: Sólidos fijos [mg/ml]



Figura 28. Preparación y rotulación de las muestras iniciales del biodigestor

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

### C. Contenido de sólidos totales disueltos

- 1) Previamente se realizó una disolución de la muestra (20-1 ml).
- 2) Las disoluciones se colocaron en 3 vasos precipitados (50 ml), posteriormente se calibró el colorímetro sumergiéndolo en agua destilada.
- 3) Se procedió a ingresar el colorímetro en los vasos precipitados con las muestras (asegurándose que esté completamente sumergido, para obtener un valor real), se esperó unos minutos hasta que dio un valor estable.
- 4) Se procedió a realizar los cálculos y registró en la hoja de control.



Figura 29. Preparación de las muestras iniciales del biodigestor para determinar el contenido de sólidos totales disueltos

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

#### **D. Demanda química de oxígeno (DQO)**

- 1) Se determinó los valores de la demanda química de oxígeno por el método de oxidación con la involucración de dos equipos: un reactor HACH que calienta la muestra hasta 150°C y un espectrofotómetro HACH en cual provee un valor de absorbancia para hallar la concentración de DQO en mg/L con la ecuación de la curva cero preestablecida.
- 2) El método consistió en establecer una curva cero con rango en el eje X de 500 hasta 10 000 de DQO con muestras bases ya preparadas y una muestra cero con agua destilada denominada “blanco alto” para futuras lecturas y calibración del equipo inicialmente.
- 3) Se preparó 1 ml de cada una de las muestras base en un vial HR+ (marca HACH) con 2,20 ml de dicromato de potasio y 1,80 ml de ácido sulfúrico a 98% y se sometió a una temperatura de 150°C por 2 h en el reactor, se dejó reposar por 30 minutos para que se enfríen y se leyeron en el espectrofotómetro previamente calibrado con el blanco alto inicialmente; los valores iniciales de absorbancia que representan el eje Y, se recogen y se realiza la gráfica en Excel para establecer la curva cero y la ecuación de la misma.
- 4) Las muestras que fueron extraídas del biodigestor requieren una dilución con agua destilada en relación 1:10 y se agitó hasta tener muestras homogéneas; se procedió a preparar el vial HR+ (marca HACH) como se indicó en el paso 3, se recogieron los valores de absorbancia (se debe multiplicar el factor de dilución para que matemáticamente con la ecuación de la curva cero obtener la concentración de DQO en mg/L).



Figura 30. Reactor HACH y muestras para calentar a 150°C

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

Tabla 26. Normas utilizadas para los análisis de las mezclas iniciales de los biodigestores

Parámetro	Método de análisis	Standard Methods Ed 18 <sup>ava</sup>
Demanda química de oxígeno (DQO).	Oxidación	SM 5220-D
Contenido de sólidos totales.	Método gravimétrico	SM 2540-B
Contenido de sólidos disueltos.	Método gravimétrico	SM 2540-D 2540-C
Contenido de sólidos totales volátiles.	Método gravimétrico	SM 2540-E

**Fuente:** (Association, 2015)

### 3.6.3.2. Análisis del biogás obtenido.

El biogás producido se retiró semanalmente del biodigestor con agitación y en los otros dos prototipos de biodigestores sin agitación diariamente (menor capacidad), por medio de una manguera y jeringa de 60 ml (sin catéter) localizada en la parte superior de los biodigestores; las

jeringas facilitaron la succión y traslado del biogás a sus recipientes de almacenamiento (debidamente rotulados y herméticos) posteriormente se caracterizó su composición.

Una vez extraído el biogás con la jeringa, se sometió a un análisis de combustión; que consistió en quemar el biogás con la ayuda de una vela (llama piloto). Otro análisis que se realizó es para determinar la composición del biogás, consistió en preparar 2L de solución de NaOH al 4%; posteriormente se llenó tres botellas de 500 ml con la solución, previamente acopladas con dos mangueras en la tapa (una ingresa el biogás y la otra sale la solución NaOH al 4% a las probetas), y una jeringa de 10 ml (Ver Figura 31) se usaron 3 probeta de 250 ml, con ayuda de una manguera se hizo burbujear el biogás lentamente dentro de las botellas (acción que desplaza cierta cantidad de la solución a las probetas). Se utilizó una solución de NaOH al 4% ya que el CO<sub>2</sub> es capaz de absorber dicha solución y el metano ocupa el espacio en las botellas plásticas.



Figura 31. Envases de recolección y determinación de la composición del biogás

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

#### **3.6.4. Diseño experimental.**

Con la finalidad de realizar un estudio cinético, se diseñó un biodigestor de mezcla completa discontinuo con agitación, y 2 prototipos de biodigestores de mezcla completa sin agitación de

menor dimensionamiento bajo las condiciones y parámetros establecidos con anterioridad (Ver Tablas 23 y 24), con un periodo de operación de 24 días con un sustrato orgánico (residuos frutas no cítricas y estiércol vacuno) con variación del porcentaje de dilución, según la formulación de la muestras iniciales (Ver Anexo C); se realizaron los respectivos análisis de los parámetros cada dos días y se mantuvo control diario, con excepción de los fines de semanas, a continuación en las Tablas 27 y 28 , se describió la cantidad de muestra, la frecuencia y lugar donde se analizaron las pruebas de caracterización de las mezclas.

Tabla 27. Cantidad de muestra para los parámetros de caracterización de las mezclas en los biodigestores (sin y con agitación)

<b>Parámetro</b>	<b>Cantidad de muestra</b>	<b>Frecuencia del muestro</b>	<b>Lugar</b>
DQO	1 ml	Tres veces por semana	Laboratorio de aguas y medio ambiente, a cargo del Ing. José Cárdenas, Msc.
Contenido de sólidos disueltos	1 ml		
Contenido de sólidos totales	20 ml		Laboratorio de biotecnología, a cargo de la Ing. Cecilia Uzca, Msc.
Contenido de sólidos volátiles	20 ml		

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

Tabla 28. Valores de control de los parámetros de caracterización de las mezclas en los biodigestores (sin y con agitación)

Parámetro	Valores	Frecuencia del muestra	Lugar
pH	8 – 5	Diariamente	Laboratorio de aguas y medio ambiente, a cargo de la Dra. Mirella Bermeo
Temperatura	35 – 28 °C		
Presión	0 psi		

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

Los análisis de los parámetros en los diferentes laboratorios, se necesitó un volumen total de 42 ml de muestra de cada biodigestor; presentaron diferentes concentraciones y conversión de materia orgánica en biogás, a medida que avanzaban los días de operatividad, necesarios para la obtención del orden, la constante y velocidad de reacción para cada mezcla respectiva de los biodigestores.

### **3.6.5. Operatividad de los biodigestores experimentales.**

El sustrato inicial con el que se emprendió la operación del biodigestor anaerobio se lo realizó bajo una concentración de sustrato orgánico del 33%, constituida por estiércol vacuno, desechos frutales no cítricos (banano y papaya) e inóculo orgánico diluidos en 67% de agua de inóculo y agua potable, hasta la obtención de una mezcla reactiva homogénea para un tanque de mezcla completa discontinuo de 43,10 L, con agitación discontinua y temperatura constante de 30°C controlados en un intervalo de 2 a 3 días; con un pH y DQO inicial altos, se repitió la misma formulación para la preparación de sustrato orgánico tamizado y sin agua potable, para un prototipo de reactor discontinuo de menor capacidad (3 L), de esta manera se comparó los valores obtenidos de la mezcla reactiva inicial, comprobando que la operación de tamización y el volumen

de operación intervino en la variación de los datos iniciales analizados, debido a que las partículas de menor tamaño lograron mejor homogenización; gracias a la cantidad de agua de inóculo, encontrada con mayor concentración en el reactor de menor dimensionamiento en comparación al biodigestor anaerobio con agitación, con la preparación de la mezcla reactiva inicial complementada con agua potable y sin tamización.

Debido a la preparación de una segunda mezcla reactiva en un reactor discontinuo sin agitación, se implementó una tercera preparación variando su formulación al disminuyendo la concentración del sustrato orgánico a 31% y 69% de agua de inóculo bajo las mismas condiciones de temperatura, tamización y volumen del reactor discontinuo sin agitación, obteniéndose una concentración de DQO menor a las anteriores, debido a la menor carga orgánica frutal no cítrica aplicado en la preparación (Ver Anexo C).

### **3.6.6. Métodos para obtener la ley de velocidad.**

Para obtener los valores de la cinética química de la digestión anaerobia a partir de desechos orgánicos (residuos de frutas no cítricas y estiércol vacuno), se controló de manera rigurosa los principales parámetros que influyen en el crecimiento bacteriano como son: la temperatura, la agitación y el pH (Ver Anexo E).

Las mezclas iniciales se caracterizaron por medio de los análisis de DQO, obteniendo como resultado las gráficas de la remoción de DQO Vs tiempo, pH Vs tiempo. Con los datos que se obtuvieron durante el tiempo de operación mediante el método integral (puede que la gráfica requiera más ajustes, Ver Anexo F). Se realizaron las gráficas para encontrar la velocidad de reacción de la digestión anaerobia al realizar un ajuste previo a la Cinética de Monod.

### 3.6.6.1. Método integral aplicado al estudio cinético.

Se procedió a modificar las ecuaciones de linealización para cada orden, obteniendo una pendiente positiva directa en las gráficas de las respectivas mezclas y se comprobó con la pendiente de conversión respectiva de cada orden; sin embargo, se escogió el orden de la reacción de cada mezcla por individual en relación al  $R^2$  más cercano a uno.

Para obtener la conversión de DQO se usó la siguiente ecuación 60 y se desarrolló matemáticamente hasta obtener nuevas ecuación linealizadas, como se presenta a continuación.

$$C_A = C_{A0}(1 - X_A)$$

Ec (60).

Para el orden cero la ecuación 15 se presenta modificada matemáticamente:

$$C_{A0} - C_A = C_{A0} X_A = kt$$

Para el orden uno la ecuación 18 se reordena y matemáticamente se convierte:

$$-\ln\left(\frac{C_A}{C_{A0}}\right) = -\ln(1 - X_A) = kt$$

Para el orden dos la ecuación 23 matemáticamente se transforma a:

$$\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} = \frac{X_A}{C_{A0}(1 - X_A)} = kt$$

Al aplicar la ecuación empírica de orden n de la ecuación 60 para un orden n=3 y desarrollándola matemáticamente, se presenta a continuación como una ecuación linealizada para reacción monomolecular irreversible:

$$\frac{1}{n-1} (C_A^{1-n} - C_{A0}^{1-n}) = kt$$

Ec (61).

$$\frac{1}{2} \left( \frac{1}{C_A^2} - \frac{1}{C_{A0}^2} \right) = \frac{2X_A - X_A^2}{2C_{A0}^2(1 - X_A)^2} = kt$$

Donde:

$C_{A0}$ : Concentración de DQO inicial  $\left[\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right]$

$C_A$ : Concentración de DQO  $\left[\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right]$

$X_A$ : Conversión de DQO [-]

$k$ : Constante o coeficiente cinético de velocidad de reacción [Tabla 9]

$t$ : Tiempo [d]

## CAPÍTULO IV

### 4. Resultados y discusión

En el presente capítulo se analiza los datos recolectados del diseño experimental, de cada uno de los biodigestores anaerobios discontinuos de mezcla completa con y sin agitación, con distintas concentraciones para cada mezcla bajo las mismas condiciones ambientales, determinando por medio del análisis la mezcla con mayor porcentaje de remoción (conversión) así como la constante y velocidad de reacción, detectando la causa de la variación de resultados entre cada una de las mezclas.

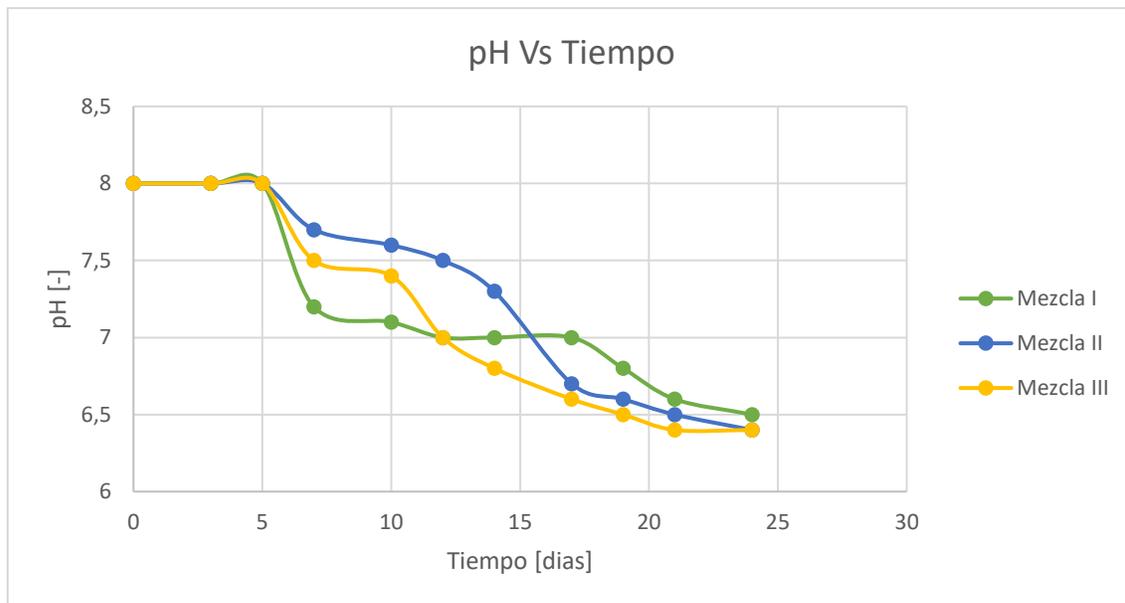
#### 4.1. Diseño de los experimentos y operatividad de los biodigestores

Cada reactor operó por 24 días controlando parámetros de muestreo como son la temperatura, el pH, y la agitación por motor en el biodigestor de mayor capacidad; al finalizar el periodo de operación de los biodigestores anaerobios se receptaron datos finales como muestra la Tabla 29, se observó el mejor porcentaje de remoción de DQO es el de la segunda preparación, sin importar que tenga la misma concentración de sustrato orgánico que el primero, su eficiencia es mejor debido al pre-tamizado de la materia orgánica y el uso único de agua del propio inóculo, a pesar de no ser un tanque agitador. En cambio, se observó un descenso brusco del pH en la mezcla I en el quinto día a diferencia del descenso progresivo de la mezcla II y III, debido a una mínima fuga en la tapa del biodigestor anaerobio con agitación discontinua, lo que provocó la caída repentina del pH, que luego de ser corregida se observó un pH constante hasta el día 17 que desciende progresivamente como las demás mezclas, como se observa en la Gráfica 1.

Tabla 29. Caracterización de valores iniciales y finales de cada biodigestor

Propiedad	Unidad	Mezcla I	Mezcla II	Mezcla III
		33%	33%	31%
<b>pH inicial</b>	-	8	8	8
<b>pH final</b>	-	6,50	6,40	6,40
<b>DQO inicial</b>	mg/L	150000	110000	86000
<b>DQO final</b>	mg/L	60800	13002	11970
<b>Remoción DQO</b>	%	59,50	88,18	86,01

Fuente: (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

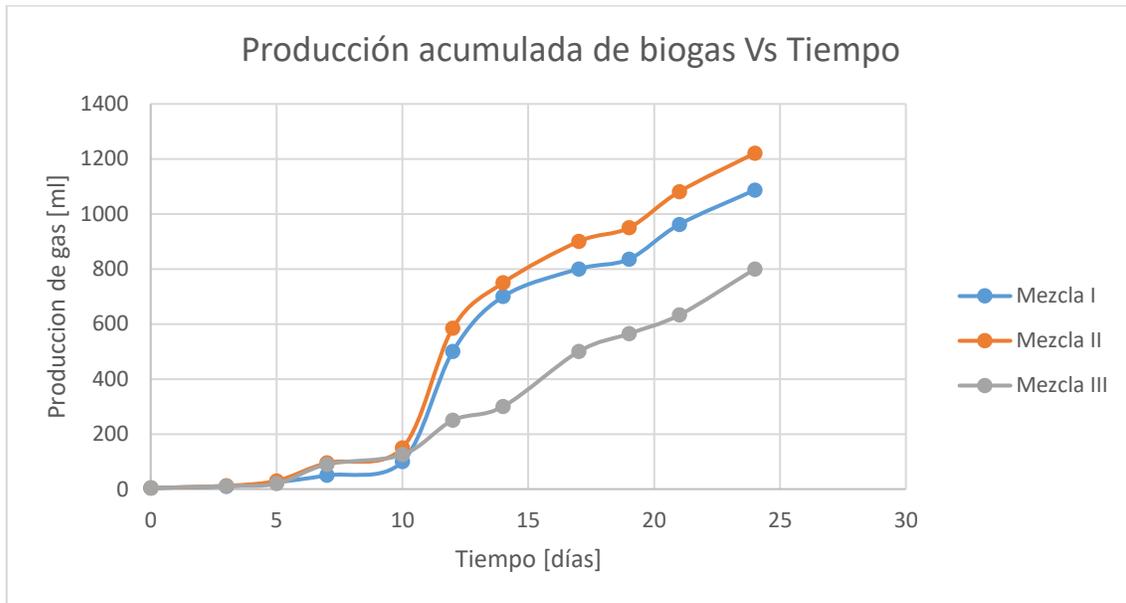


Gráfica 1. pH Vs tiempo

Fuente: (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

Al controlarse la temperatura constante diariamente, sin contar fines de semana en cada uno de los biodigestores no generó variaciones en los datos de muestreo, gracias al clima caluroso de la ciudad de Guayaquil; sin embargo, se observa en la Gráfica 2 la producción de gas en el tiempo de operación, como éste aumenta cada 2 o 3 días, evidenciada por su extracción gracias al sistema

de desplazamiento volumétrico manual, en donde la mezcla III en relación a las dos primeras a partir del día 10 disminuyó el volumen de producción de gas metano, debido a la carga orgánica inicial del sustrato frutal no cítrico; mientras que la mezcla II presenta el mayor volumen acumulado de las tres mezclas.



Gráfica 2. Producción acumulada de biogás Vs tiempo

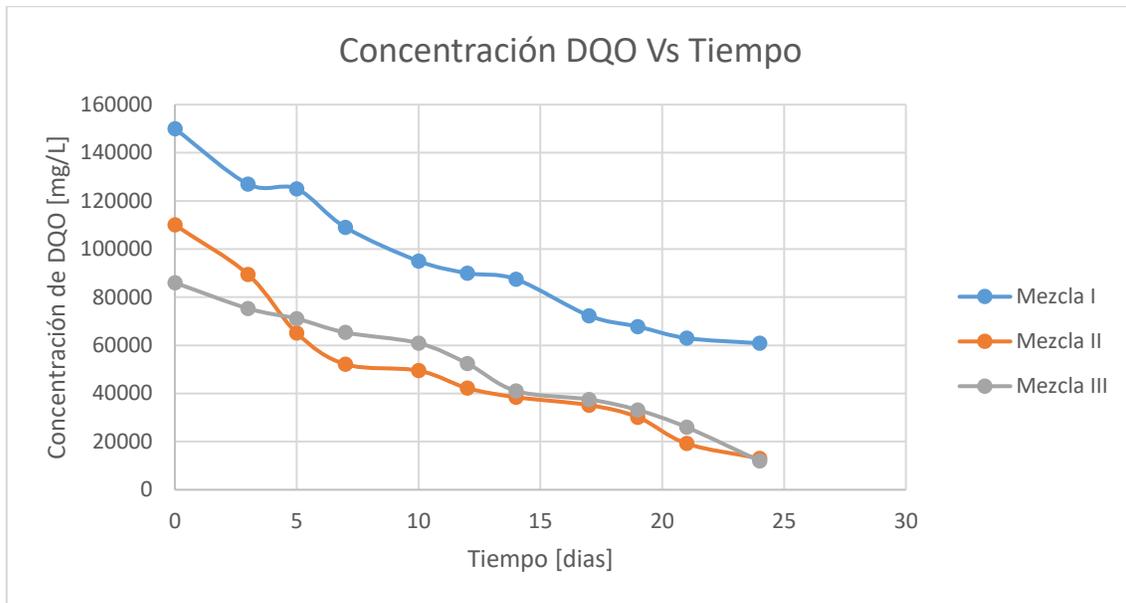
**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

#### 4.2. Caracterización de mezclas reactivas

La operatividad de los biodigestores anaerobios se realizó por un lapso de 24 días, en donde se extraían muestras cada 2 o 3 días para los respectivos análisis de los indicadores, que nos facilitaron una mejor comprensión del diseño experimental.

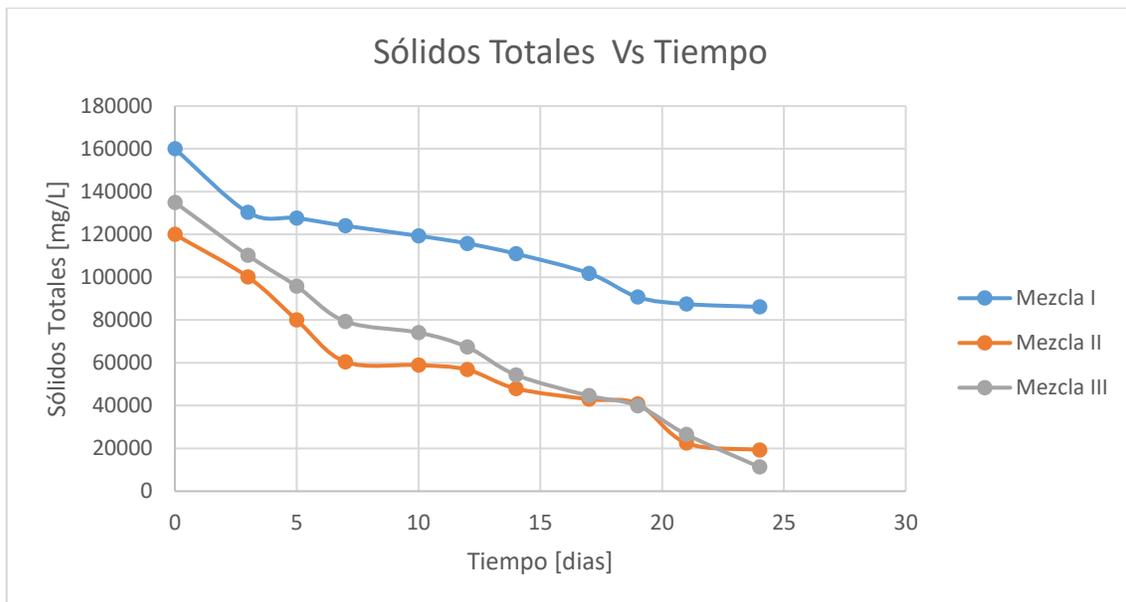
En las Gráficas 3, 4, 5 y 6 se observa de manera general un descenso progresivo en las tres mezclas, debido a que no existe una alimentación al biodigestor anaerobio por ser un proceso de experimentación por lote, manteniendo la mezcla II como la más eficiente en la conversión y disminución de material orgánico para producción de biogás, a pesar de haberse presentado

apagones eléctricos, afectando el uso de equipos eléctricos necesarios durante el análisis de cada uno de los indicadores.



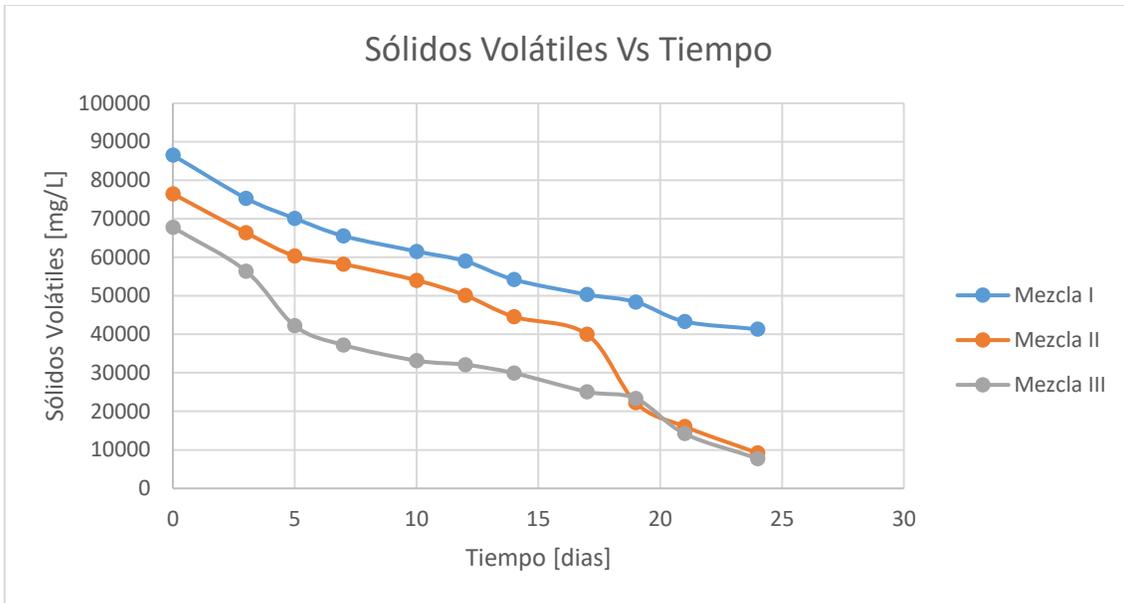
Gráfica 3. Concentración DQO Vs tiempo

Fuente: (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)



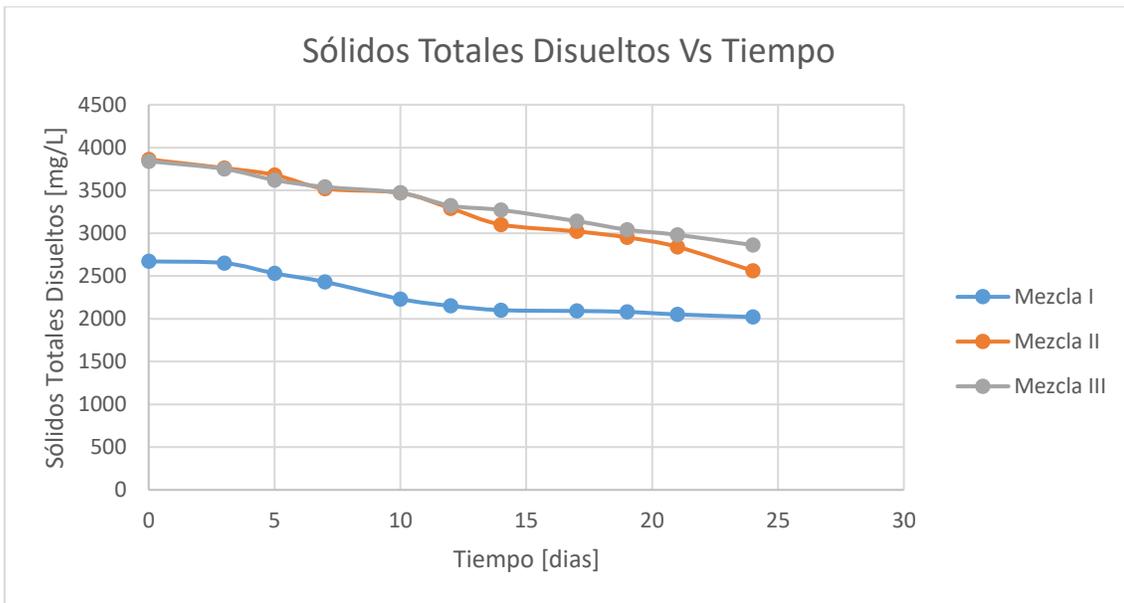
Gráfica 4. Sólidos totales Vs tiempo

Fuente: (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)



Gráfica 5. Sólidos volátiles Vs tiempo

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)



Gráfica 6. Sólidos totales disueltos Vs tiempo

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

### 4.3. Caracterización de biogás de las mezclas reactivas

La Tabla 30 muestra como las mezclas reactivas poseen un porcentaje de metano mayor al 70%, gracias al inóculo y carga orgánica preparada al inicio; la caracterización correspondiente se realizó gracias a la extracción de volumen de biogás (100 mL de biogás por cada mezcla), el mismo que al ser burbujado en hidróxido de sodio al 4% nos da un porcentaje de metano puro, y la diferencia del 100% del volumen burbujado, es el porcentaje de dióxido de carbono absorbido por la solución de hidróxido de sodio, siendo la mezcla II la mejor entre todas y reflejándose en la producción acumulada de biogás en la Gráfica 2.

Tabla 30. Composición del biogás producido en los biodigestores anaerobios

<b>Mezcla reactiva</b>	<b>Porcentaje de metano (%CH<sub>4</sub>)</b>	<b>Porcentaje de dióxido de carbono (%CO<sub>2</sub>)</b>
<b>Mezcla I</b>	75	25
<b>Mezcla II</b>	82	18
<b>Mezcla III</b>	70	30

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

Posteriormente a determinar la composición del gas obtenido, se realizó la prueba de combustión del metano (análisis cuantitativo de quemado); consistió en quemar el metano con ayuda de una llama piloto (vela), formando una llama de color azul (propicia del CH<sub>4</sub>), a continuación, se visualizan el gas obtenido de las tres mezclas:



Figura 32. Porcentaje de las CH<sub>4</sub> obtenido de las mezcla I (0), mezcla II (1) y mezcla III (2)

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)



Figura 33. Análisis cuantitativo de quemado de las mezclas

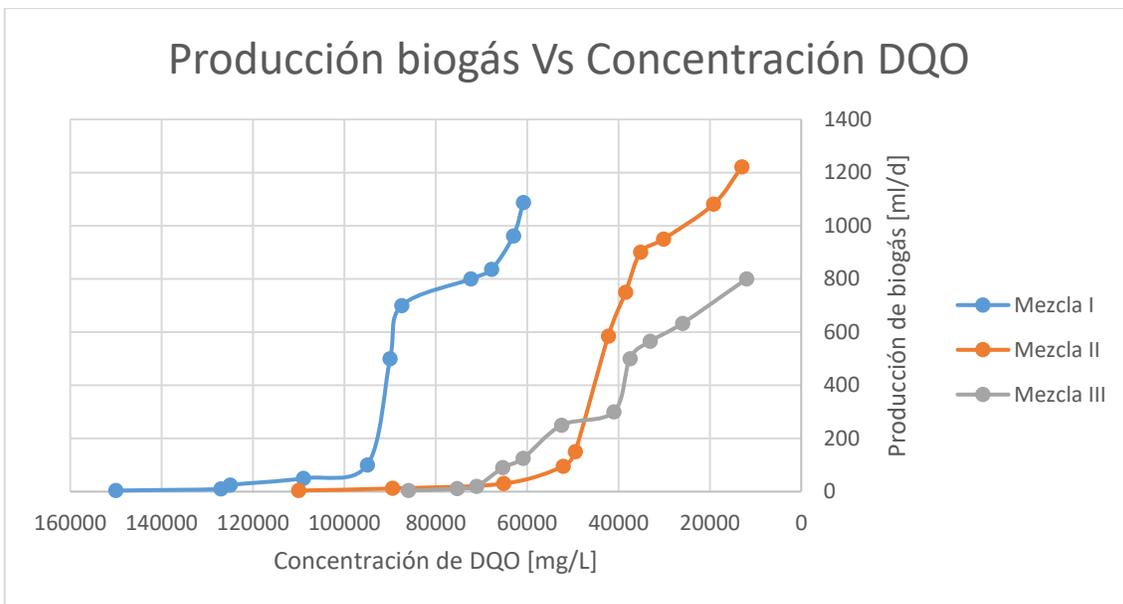
**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

#### 4.4. Indagación de la mezcla óptima en los biodigestores discontinuos sin alimentación

La preparación de las mezclas iniciales de los biodigestores discontinuos sin alimentación (con y sin agitación) contribuye con la determinación de la mezcla óptima para el proceso de la

digestión anaerobia, se basaron en el ajuste de dos parámetros (variación del porcentaje de los residuos de frutas no cítricas – parámetros de control como temperatura y agitación).

El volumen de operación de los biodigestores varía; en el biodigestor con agitación se diseñó para un volumen de operación de 43,10 L y los restantes para 3 L, funcionaron en un lapso de 24 días, donde se analizó el volumen acumulado de biogás producido, la elección de la mezcla optima se basó en la cantidad de biogás producido considerando su composición (porcentaje mayor de CH<sub>4</sub>).



Gráfica 7. Producción de biogás Vs concentración de DQO

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

Al comparar la producción de biogás Vs disminución de la concentración de DQO como se visualiza en la Gráfica 7, la mezcla óptima se determina por los diferentes porcentaje de remoción de DQO en el mismo lapso teniendo el mayor porcentaje de concentración de sustrato orgánico con mejor homogenización con tamaño de partículas de 0,02 mm.

#### 4.5. Resolución del estudio cinético

#### 4.5.1. Ajuste a la ecuación de Monod.

Ajustando los datos recolectado a la ecuación de Monod según la ecuación 30 podemos obtener la ecuación linealizada matemáticamente para obtener la constante de Monod y la constante de crecimiento celular, como se presenta a continuación:

$$\frac{1}{C_A} = \frac{k_c}{K_s} t - \frac{1}{K_s}$$

Ec (30)

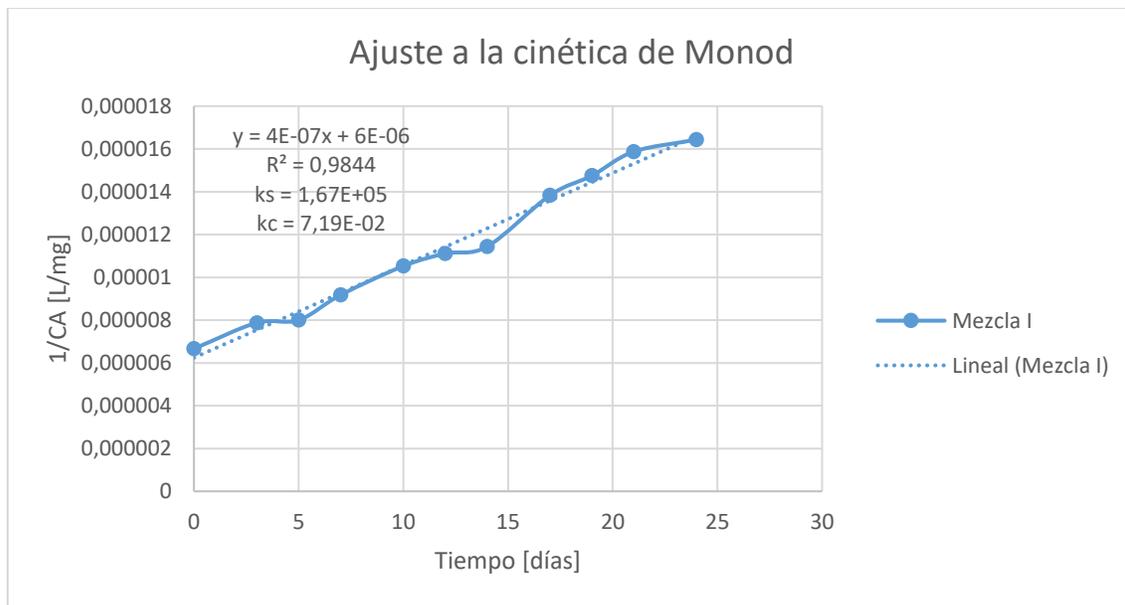
Donde:

$C_A$ : Concentración de DQO  $\left[\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right]$

$k_c$ : Constante de crecimiento celular  $[\text{d}^{-1}]$

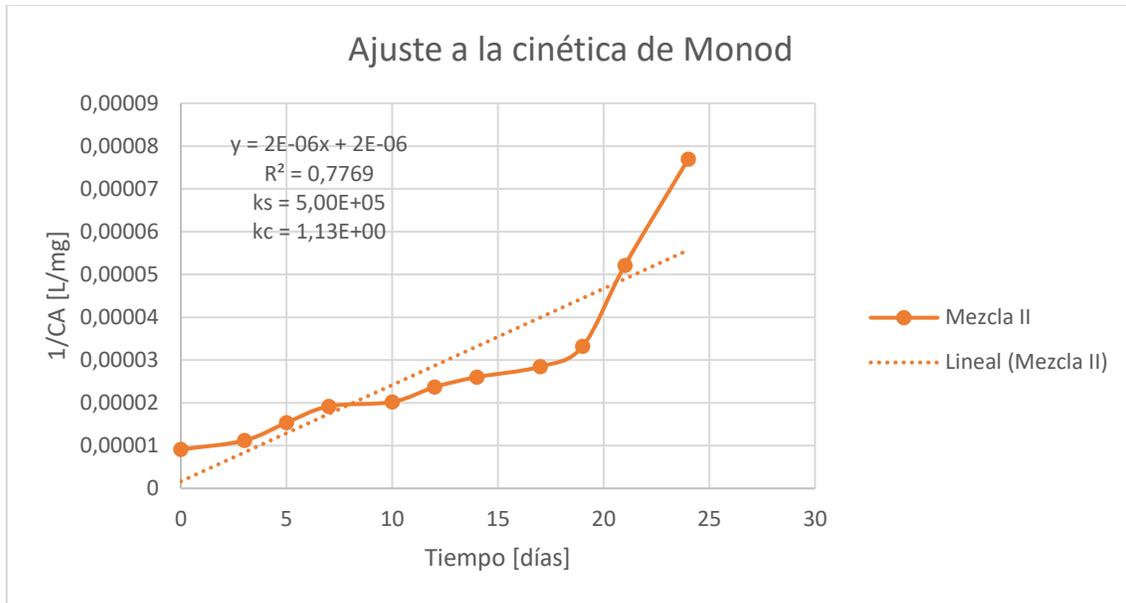
$K_s$ : Constante de Monod o saturación del sustrato  $[\text{mg/L}]$

$t$ : Tiempo  $[\text{d}]$



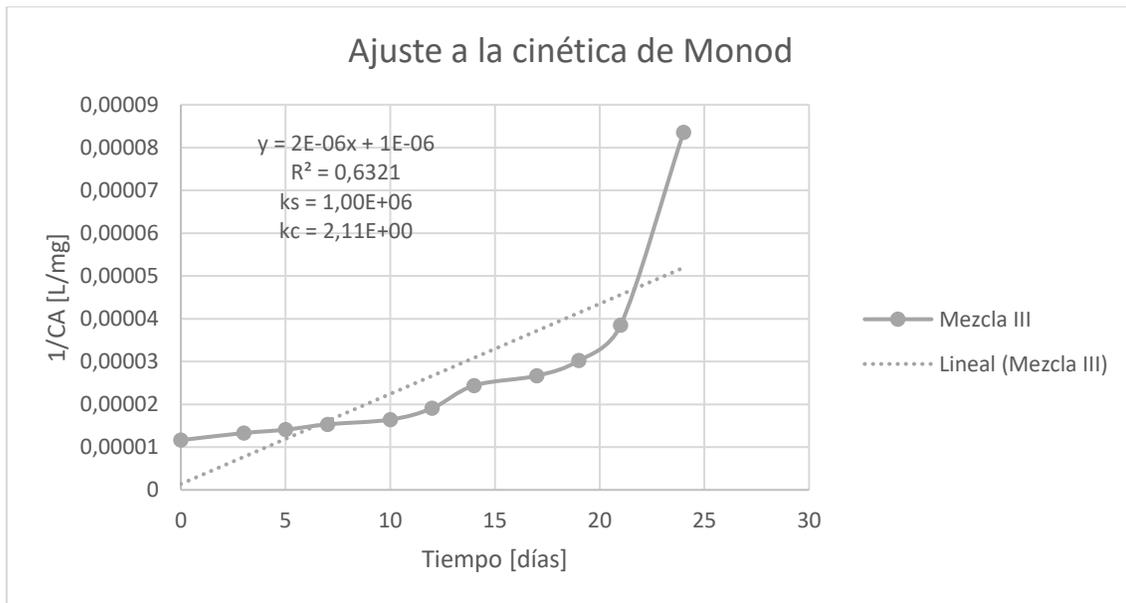
Gráfica 8. Ajuste a la cinética de Monod para mezcla I

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)



Gráfica 9. Ajuste a la cinética de Monod para mezcla II

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)



Gráfica 10. Ajuste a la cinética de Monod para mezcla III

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

El análisis evidencia que los datos de la mezcla I tienen mejor ajuste a la línea de tendencia por su coeficiente de determinación, pero que la mezcla III posee constante de Monod mayores que

las tres mezclas, confirmando por elección que la mezcla II es la más aceptada y óptima por su ajuste promedio a la cinética de Monod según lo observado en las Gráficas 8, 9 y 10.

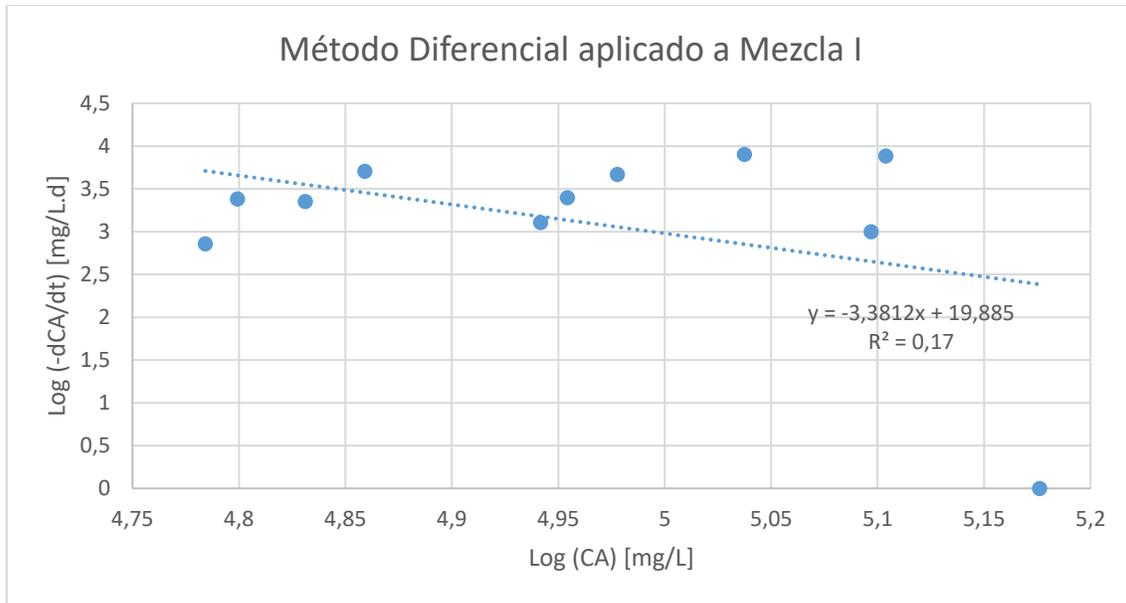
Tabla 31. Valores de las constantes cinéticas de la ecuación de Monod

Constantes	Unidades	Mezcla I	Mezcla II	Mezcla III
$K_s$	$\left[\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right]$	1,67E+05	5,00E+05	1,00E+06
$k_c$	$[\text{d}^{-1}]$	7,19E-02	1,13	2,11

Fuente: (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

#### 4.5.2. Selección de método a aplicar para determinación de orden de la reacción y constante cinética.

Tras culminar la operatividad del diseño experimental, se determina con los datos recogidos de las tres mezclas la constante de velocidad de reacción, mediante el método integral por tanteo de orden, por ser un método simple y no complejo como es el método diferencial; debido a los cálculos matemáticos y gráficamente (Ver Gráfica 11) realizados para la mezcla I, se comprueba que los valores no se ajustan al método diferencial al emplearse logaritmos en ambas partes de la ecuación 35 para encontrar el orden y la constante de velocidad, evidenciado en el  $R^2$  muy bajo y una pendiente negativa, producto de una operatividad sin alimentación continua, es decir un proceso de degradación de materia orgánica discontinua, sin el ingreso de nuevo sustrato al biodigestor que estabilice el DQO, manteniendo valores en un rango aproximados a la concentración de DQO inicial para la aplicación del método diferencial por velocidades iniciales.

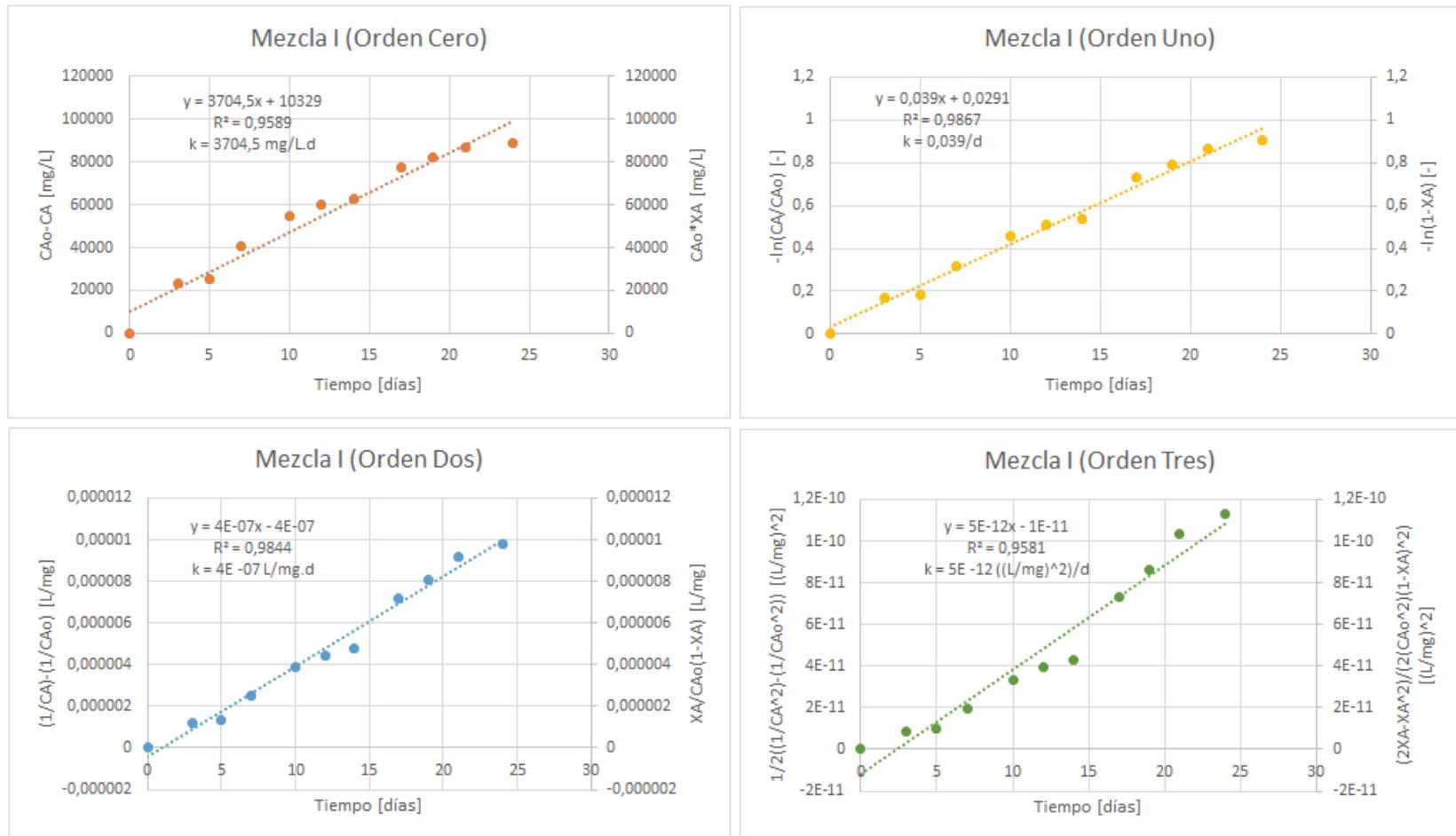


Gráfica 11. Método diferencial aplicado a mezcla I

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

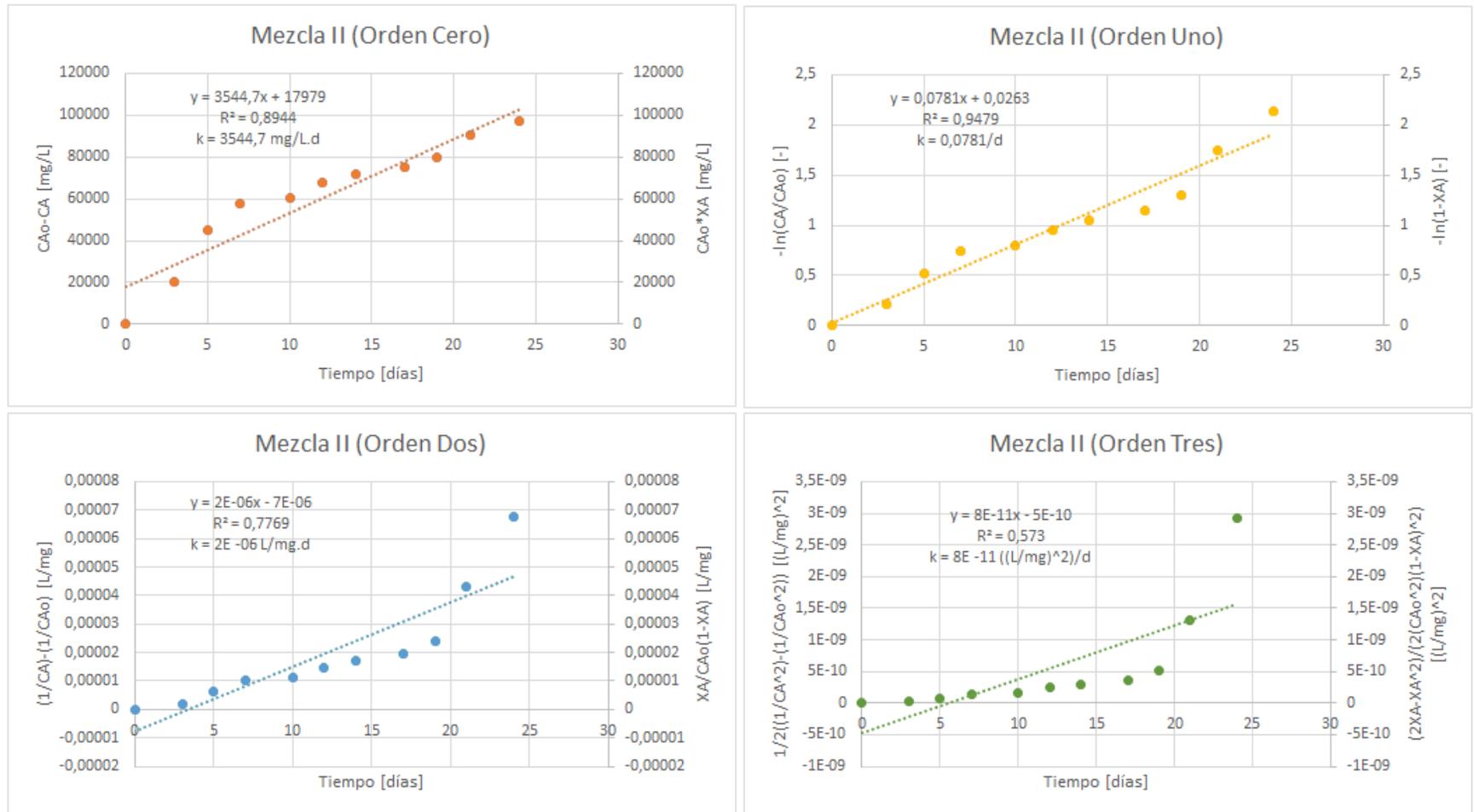
#### 4.5.3. Método integral por tanteo.

Al descartar el uso del método diferencial, se analiza desde un punto de vista individual y posteriormente global el método integral por tanteo aplicado a cada mezcla como se presenta a continuación:



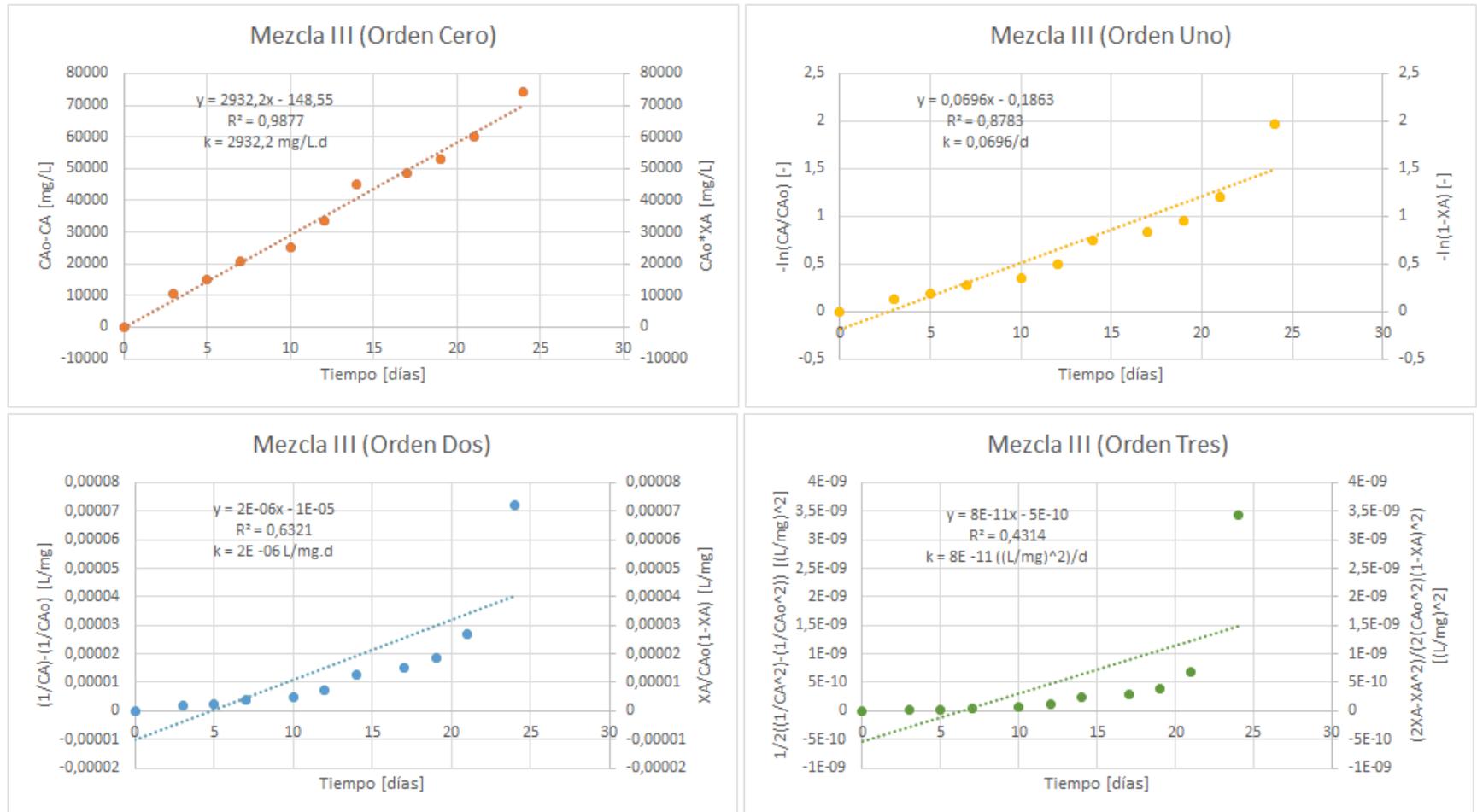
Gráfica 12. Ajuste lineal de datos de mezcla I por método integral para: a) Orden cero, b) Orden uno, c) Orden dos, d) Orden tres

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)



Gráfica 13. Ajuste lineal de datos de mezcla II por método integral para: a) Orden cero, b) Orden uno, c) Orden dos, d) Orden tres

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)



Gráfica 14. Ajuste lineal de datos de mezcla III por método integral para: a) Orden cero, b) Orden uno, c) Orden dos, d) Orden tres

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

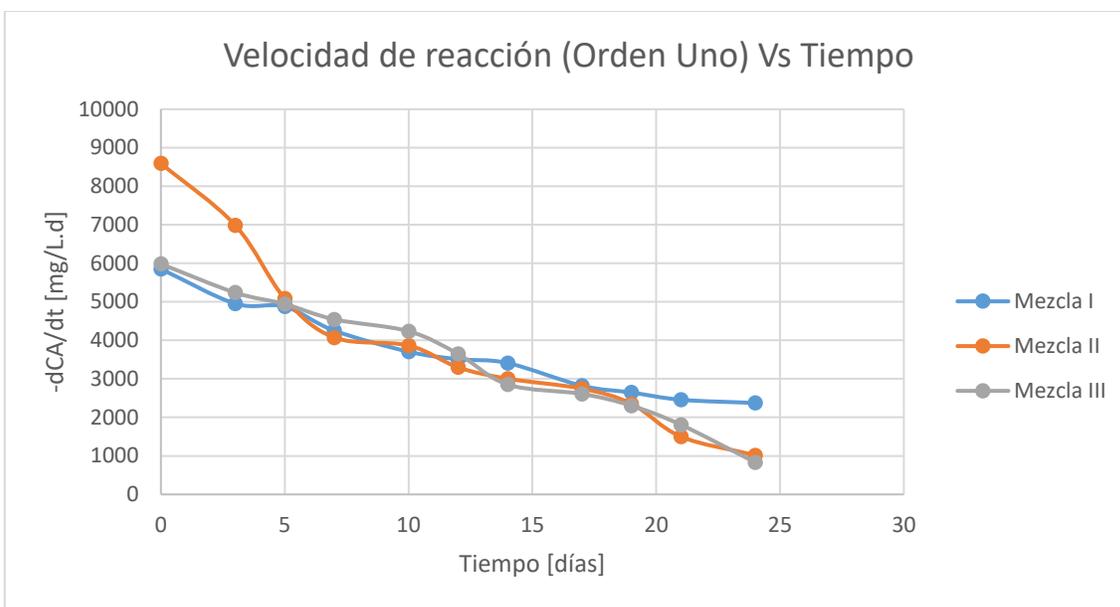
Un análisis individual por mezcla en relación al orden de tanteo en las Gráficas 12, 13 y 14, se observa que la mezcla I y II poseen orden uno, mientras que la mezcla III posee orden cero en relación a  $R^2$  más cercano a 1. Otro análisis evidenciado es el mejor ajuste a la línea de tendencia al aplicarle un menor orden, con un coeficiente cinético mayor reflejado en la ecuación de la gráfica y el  $R^2$ ; a excepción del orden cero, debido a que es independiente de la concentración de la sustancia.

Tabla 32. Valores de las constantes del método integral por el tanteo de orden

Orden	Unidades	Constantes	Mezcla I	Mezcla II	Mezcla II
0	mg/L	k	3704,50	3544,70	2932,20
1	d <sup>-1</sup>		0,03	0,07	0,06
2	L/mg		4E-07	2E-06	2E-06
3	(L/mg) <sup>2</sup>		5E-12	8E-11	8E-11

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

Un análisis global entre todas las mezclas evidencia un mismo orden para la mezcla I y II, debido al mismo porcentaje de concentración de sustrato orgánico; sin embargo, la mezcla II sigue siendo óptima en relación a la velocidad de reacción, reflejado en el coeficiente cinético mayor que en la mezcla I a pesar del  $R^2$  más cercano a 1. Se analiza la mezcla III con orden uno en relación al diseño experimental bajo las mismas condiciones que las demás mezclas, resultando que su constante cinética y coeficiente de determinación ( $R^2$ ) sean menor a la mezcla II, pero su velocidad de reacción sea mejor que la mezcla I, según la Gráfica 15.



Gráfica 15. Velocidad de reacción (orden uno) Vs tiempo

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

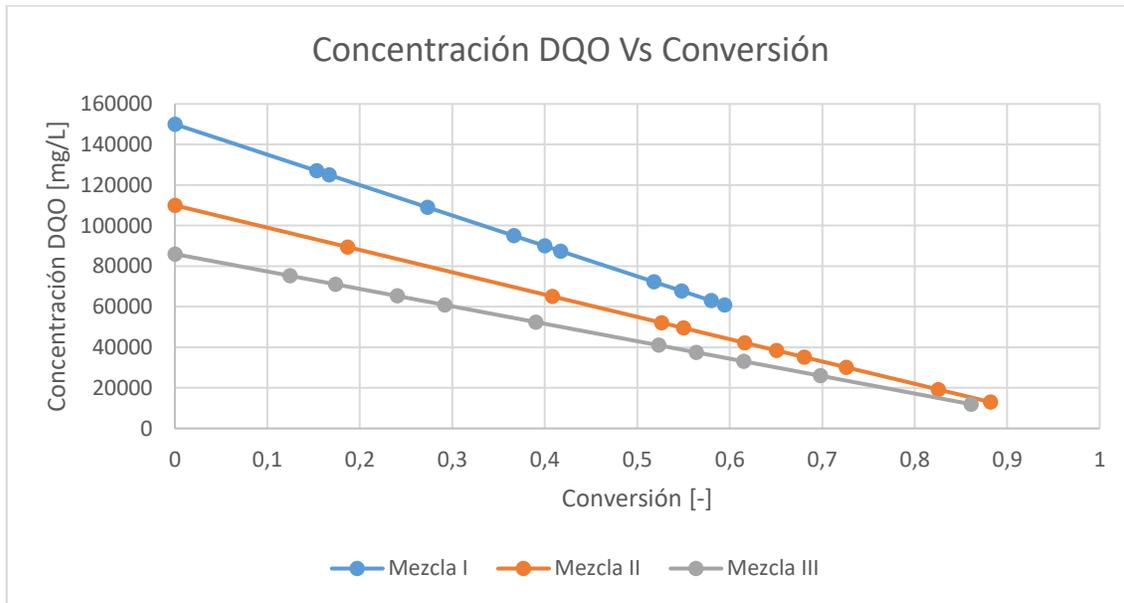
Durante los primeros cinco días de operación la mezcla II presenta mayor velocidad de degradación, debido a la descomposición de la materia orgánica pre-tamizada con el inóculo en un biodigestor hermético sin agitación y la concentración homogénea de residuos frutales no cítricos, ayudando en ese lapso a la alimentación de las bacterias dentro del biodigestor y la estabilización del sustrato en relación a la disminución de oxígeno dentro del mismo.

Tabla 33. Velocidad de reacción inicial y final en las diferentes mezclas

Mezclas	Velocidad de reacción inicial [mg/L.d]	Velocidad de reacción final [mg/L.d]
<b>Mezcla I</b>	5851,20	2373,24
<b>Mezcla II</b>	8594,24	1015,84
<b>Mezcla III</b>	5982,62	832,69

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

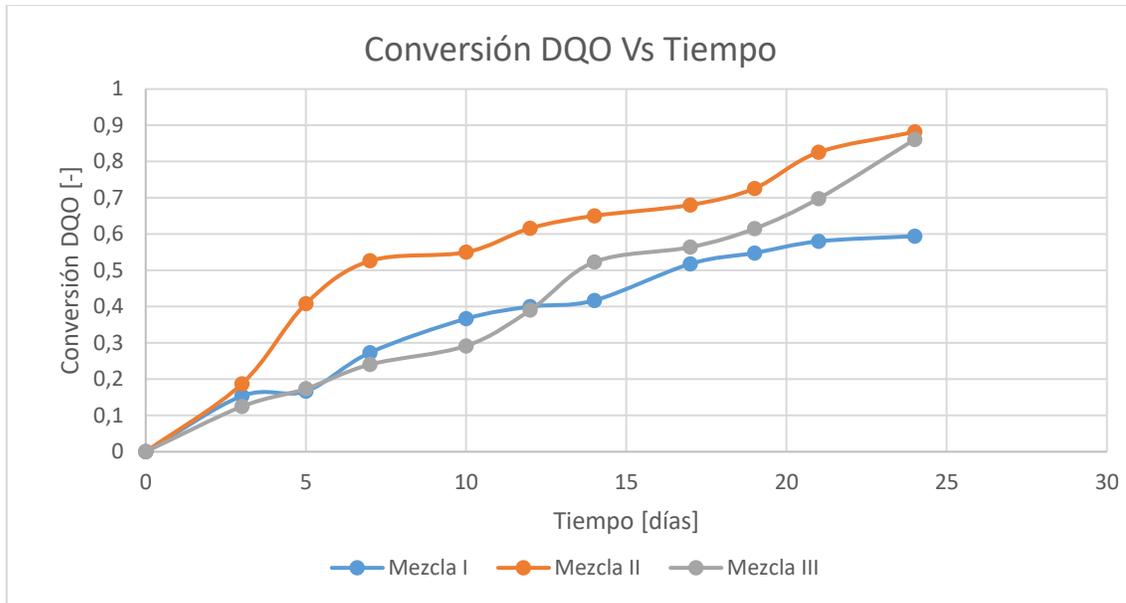
Las Gráficas 16 y 17 muestra que la mezcla II posee un mejor porcentaje de conversión frente al tiempo y en relación a la degradación del DQO en comparación con mezcla I y III, debido a lo mencionado en el apartado de diseño experimental y operatividad, y comprobado con las gráficas y ajustes del estudio cinético.



Gráfica 16. Concentración DQO Vs conversión

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

La mezcla II posee una mayor conversión, observado en la diferencia entre las concentración finales e iniciales de DQO de cada mezcla, debido a la mejor homogenización con pre-tamización presente en el sustrato orgánico, en comparación a la mezcla I sin tamización con presencia de posible materia inorgánica (piedras, tierra, residuos de hojas secas, etc.) dentro de su alimentación inicial, y la mezcla III por su menor concentración de residuos frutales no cítricos, con una mayor dilución del sustrato orgánico y sin tamización, provoca menor concentración de DQO inicial con menor conversión.



Gráfica 17. Conversión DQO Vs tiempo

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

Al analizar la conversión en el tiempo se observa que la mezcla II presenta una mayor disminución de la concentración de DQO en el quinto día, debido a la rápida estabilización del sustrato orgánico, por su alto contenido de materia orgánica homogenizada sin presencia de material inorgánico como son las piedras y la tierra, presentando una conversión progresiva a partir del décimo día.

## CAPÍTULO V

### 5. Conclusiones y recomendaciones

#### 5.1. Conclusiones

- Para obtener valores que contribuyan con el estudio cinético de la digestión anaerobia de residuos de frutas no cítricas y estiércol vacuno, se diseñó un biodigestor didáctico anaerobio de mezcla completa (con agitación), con un volumen de operación de 43,10 L (capacidad total del tanque 58 L) previo al estudio cinético para su respectiva validación en comparación con los biodigestores discontinuos sin agitación, con un volumen de operación de 3 L (capacidad del recipiente 4 L); debido a la complejidad de manipulación del volumen de operación del biodigestor, se replicó la formulación con previo tamizado y variando el porcentaje de concentración de sustrato frutal en los envases modificados y gracias a las pruebas hidrostáticas realizadas, se hermetizan los biodigestores con un margen de error observada en los primeros cinco días donde la mínima fuga de gas produce una demora en la estabilización hidrostática del proceso anaerobio comprobado en los parámetros de control (pH, DQO, etc.) analizados periódicamente.
- Los principales parámetros de control que influyen en el crecimiento bacteriano fueron: la temperatura, el pH, la agitación, alcalinidad y relación de C/N, se inicia con una relación estiércol-fruta es 80:20; se consiguió controlar rigurosamente la temperatura y el pH, la agitación se realizó en un intervalo de cuatro horas (previo a la extracción de la muestra). Se logró mantener la temperatura en el rango de 30°C con ayuda del chaleco térmico. El pH descendió de manera progresiva hasta el rango establecido (8-6,40), alcanzando una disminución continua del DQO sin alteraciones o interferencias durante el tiempo de operación.

- El estudio cinético de la digestión anaerobia del sustrato orgánico específico está basado en la degradación de DQO durante la operatividad del biodigestor, al aplicar el método integral los datos recogidos se ajustan a la línea de tendencia reflejada en el  $R^2$  más cercano a uno, resultando una cinética de orden uno bajo las mismas condiciones ambientales para cada uno de los reactores con distinta formulación de operación aplicada para cada mezcla, concluyéndose que la constante cinética está relacionada estrictamente al ajuste lineal del método aplicado y su coeficiente de determinación (el coeficiente cinético y el coeficiente de determinación son inversamente proporcional al orden aplicado en el método integral) dando como resultados valores de la constante cinética  $0,039 \text{ d}^{-1}$  (mezcla I),  $0,0781 \text{ d}^{-1}$  (mezcla II) y  $0,0696 \text{ d}^{-1}$  (mezcla III) con orden uno para cada mezcla, considerando como mezcla óptima la mezcla II. Debido al diseño experimental para un biodigestor anaerobio sin alimentación continua, los valores de concentración de DQO originaron una pendiente negativa con un valor de  $R^2$  que no se aproxima a uno (0,17) al aplicar el método diferencial, concluyéndose que el método diferencial no es aplicable para diseños experimentales discontinuos con un periodo de operatividad y retención hidráulica de 24 días, sin generalización de réplica de experimentación para obtención de valores iniciales de cada experimento (biodigestores con alimentación continua).
- La velocidad de degradación presente en el biodigestor anaerobio con y sin agitación se analizó en relación al periodo de operatividad, donde se observó una mejor velocidad de reacción para la mezcla II por su gran velocidad de remoción de la concentración de DQO durante los primeros cinco días, y luego esta disminuye progresivamente similar a las demás mezclas, concluyéndose que la velocidad de reacción depende de la concentración de materia orgánica de estiércol vacuno y residuos frutales no cítricos sin material

inorgánico (piedras, tierra, etc.) reflejada en análisis de DQO, y estabilización inmediata del sustrato orgánico dentro de un biodigestor hermético con un estricto control de los parámetros (temperatura, pH, DQO, etc.) para evitar fugas mínimas (el ingreso continuo de oxígeno retrasa la fase de estabilización de la materia orgánica para la producción de biogás).

## 5.2. Recomendaciones

- La complejidad que posee un estudio cinético requiere un trabajo con pequeños volúmenes de operación para disminuir el tiempo de estabilización y generación de biogás, así como el mejor control de los parámetros de operación del biodigestor anaerobio de mezcla completa.
- La operatividad de un biodigestor anaerobio discontinuo posee gran complejidad si el objetivo es un estudio cinético o la eficiencia del proceso, por lo que para ambos casos se recomienda, un control automático o un control estricto diario de 24 horas si el sustrato orgánico inicia con un pH bajo y existe variación brusca de temperatura.
- Las características que posee el sustrato orgánico fijo (agua residual doméstica), no se logró descender de acuerdo a lo que estipula el Acuerdo Ministerial 0-97A, por lo que se aconseja someter el residuos del sustrato orgánico a un tratamiento aerobio hasta conseguir valores aptos para la descarga en un cuerpo hídrico, caso contrario realizar un tratamiento de lodos sedimentados para su reutilización en el campo agrícola como bioabono.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, P. (28 de Agosto de 2006). Biodigestores de doble propósito- producción e investigación para granja porcícola residuos. *Revista ION*, 19(1), 60. Recuperado el 2018
- Almeida, D., & Regalado, D. (21 de Mayo de 2010). Estudio de la co-digestión anaeróbica de desechos orgánicos agroindustriales. (D. A. Hidrobo, Ed.) *Avances En Ciencias E Ingenierías*, 2(12), 6.
- Alvaréz, R., & Lidén, G. (Marzo de 2009). Low temperature anaerobic digestion of mixtures of llama, cow and sheep manure for improved methane production. *Biomass and Bioenergy*, 33(5), 527-533.
- Ampudia, M. (Mayo de 2011). Investigación de la condiciones óptimas y de la cinética del proceso de biodigestión anaerobia de desechos orgánicos agroindustriales y estiércol vacuno. 92. Quito, Ecuador: Universidad San Francisco de Quito.
- Araujo. (2014). *Las excretas porcinas como materia prima*. Mexico: Intituto nacional de investigaciones forestales y agricolas.
- Association, A. P. (2015). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23 ed.). (C. L. Phase, Ed.) Toronto, Estados Unidos de América : American Public Health Association.
- Autolines, D., Bohórquez, J., Corrales, L., & Corredor, A. (1 de agosto de 2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Revista Colombiana de Ciencias Agropecuarias*, 18(5), 27.
- Burés, S. (2015). Manejo de Sustratos. *Cursos de gestión de viveros forestales* (pág. 15). Barcelona: Ediciones Agrotécnicas.

- Caballero, M., Lozano, S., & Ortega, B. (10 de Octubre de 2016). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático. *Revista Digital Universitaria*, 8(10), 11.
- Camargo, Y., & Veléz, A. (24 de Septiembre de 2009). Emisiones de biogás producidas en rellenos sanitarios. *Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*, 8(22), 12.
- Catillo, V. (2013). *Diseño y cálculo de un agitador de fluidos*. Universidad de Bio-Bio, Departamento de Ingeniería Mecánica , México.
- Chang, R. (2015). *Química de Chang. Décima Edición Mc Graw Hill* (Séptima ed.). México, México: McGraw-Hill Book Company.
- Córdoba, . V., Fernández, M., & Santalla, E. (12 de Agosto de 2014). Influencia de inóculos en la digestión anaerobica de purín de cerdo. *Aaociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente*, 2(10), 20.
- Devesa, L. R. (2014). *Obtención de biogás a partir de codigestión anaerobia de microalgas y fangos de EDAR*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona, Departamento de Ingeniería Química , Barcelona.
- Fernando, S. P. (2010). *El metano- Usos y soluciones*. Obtenido de <https://www.monografias.com/trabajos36/metano/metano2.shtml>
- Fogler, S. (2001). *Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas*. . Mexico.
- Giraldo, J., & Carmona, L. (2005). El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 17.
- Google Maps. (7 de Noviembre de 2018). Universidad de Guayaquil. Guayaquil, Guayas, Ecuador. Obtenido de <https://www.google.com.ec/maps/place/Facultad+de+Ingenier%C3%ADa+Qu%C3%AD>

mica+Universidad+de+Guayaquil/@-2.1837733,-

79.8996388,17z/data=!4m8!1m2!2m1!1subicacion+de+laboratorio+de+operaciones+unit

arias+la+facultad+de+ingenieria+quimica+de+la+universidad+de

Guardado, C. J. (2007). *Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas* (Alejandro Montesinos Larrosa ed.). (J. S. Guerra, Ed.) Habana, Cuba: Cubasolar.

Henze, M., Ekama, G. A., & Brdjanovic, D. (Noviembre de 2017). *Tratamiento Biológico de Aguas Residuales, Principios, Modelación y Diseño*. (M. Henze, G. A. Ekama, D. Brdjanovic, Edits., C. López, G. Buitrón, H. García, & F. Cervantes, Trads.) London, España: IWA Publishing. doi:10.2166/9781780409146

Herrera, A. y. (2017). Efectos térmicos en la cinética química: una revisión. *Biotechnology & Bioengineering, Symposium N° 2*, 10 .

Levenspiel, O. (2008). *Ingeniería de las reacciones químicas* (Tercera ed.). Barcelona, España: Limusa Wiley. Recuperado el 2018

Magaña, L., Torres, E., & Sandoval, C. (2 de agosto de 2010). Producción de Biogás a Nivel Laboratorio Utilizando Estiércol de Cabras. *Acta Universitaria*, 16(2), 12.

Mamani, F. (2010). *Construcción y evaluación de un biodigestor modelo chino mejorado para zonas andinas*. Universidad Nacional San Antonio Abad Del Cusco. Peru: Centro de Capacitación para el Desarrollo.

Manrique, L., Vera, M., & Pelaéz, M. (23 de Septiembre de 2012). Evaluación de inóculos para la digestión anaerobia de aguas residuales domésticas en condiciones del Piedemonte Amazónico. *Momentos de Ciencia*, 9(2), 97-105.

Martí, J. (2015). *Desarrollo de la Investigación de biodigestores en Ecuador*. Instituto Nacional de Eficiencia Energetica y Energias renovbles , PROMETEO, Quito.

- Mashad, H. M., & Zhang, R. (Junio de 2010). Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. *Bioresource Technology*, 101(23), 4021-4028.
- Metcalf, E. (2003). *Ingeniería de Aguas Residuales, Tratamiento, Vertido y Reutilización* (Tercera ed., Vol. I). (A. Gacía, Ed.) Madrid, España: McGraw Hill,.
- Moreno, M. T. (2011). *Manual de biogás*. (H. Romero, Ed.) Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).
- Morla, F. D., Giayetto, O., Cerioni, G., & Fernandez, E. (15 de Octubre de 2016). Crecimiento Y partición de biomasa de dos cultivares de maní (*Arachis hypogaea* L.) en distintas fechas de siembra en Río Cuarto, Córdoba (Argentina). *European Scientific Journal*, 12(30), 19.
- Muñoz, V. &. (2013). Reactor químico . En V. &. Muñoz, *Operaciones Unitarias y Reactores Químicos* (pág. 86). Madrid.
- Narvaez , Y., & Saltos, A. (2007). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor tipo piloto para la obtención de biogás y bioabono a partir de la mezcla de estiercol vacuno y suero de queso*. Universidad de Guayaquil , Departamento de Ingeniería Química, Guayaquil.
- Nogués, S., García, D., & Rezeau, A. (2010). *Energía de la biomasa* (Vol. I). (C. d.-S. renovables, Ed.) Zaragoza, España: Presas Universitarias de Zaragoza.
- Parra, R. (11 de Diciembre de 2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Producción más limpia*, 10(2), 18.
- Prossapys. (6 de Septiembre de 2015). Biodigestores una alternativa de saneamiento en comunidades rurales del estado de México. *Comisión del agua del estado de México*, 23 . Recuperado el 2018

- Regulación N° 004/15. (15 de Mayo de 2015). 20. Quito, Ecuador. Obtenido de [http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/08/Reg\\_004-15\\_conexion-GRNC\\_incluye-anexo.pdf](http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/08/Reg_004-15_conexion-GRNC_incluye-anexo.pdf)
- Rico, J. (26 de Marzo de 2018). El biogás sigue frenado y el biometano disparado. *Energías Renovables*, pág. 6.
- Río, R., Álvarez, C., Ayemerich, E., Bedmar, E., & Carballa, M. (2014). *De Residuo a Recurso. El Camino hacia la Sostenibilidad* (Vol. II). (J. Moreno, R. Moral, J. Pascual , & M. Bernal, Edits.) Barcelona, España: Mundi-Prensa. Recuperado el 2018
- Romero, A. (2010). Aprovechamiento de la biomasa com fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. *Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 104(2), 15.
- Rozano, E., & Dapena, J. (2002). *Tratamiento biológico de las aguas residuales* (Vol. 1). (J. Bravo, Ed.) Barcelona, España: Ediciones Díaz de Santos, S.A. Recuperado el 2018
- Smith, J. (1991). *Ingeniería de la Cinética Química*. (Sexta ed.). (A. Eroles, Trad.) México: McGRAW-Hill Book Company.
- Vega, O., & Bolaños, M. (2015). *Uso y acceso a las energías renovables en territotio rurales*. (O. Vega, Ed.) San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).

## ANEXOS

### Anexo A: Balance de materia

Balance de materia está enfocado en la ecuación estequiométrica presentada a continuación:

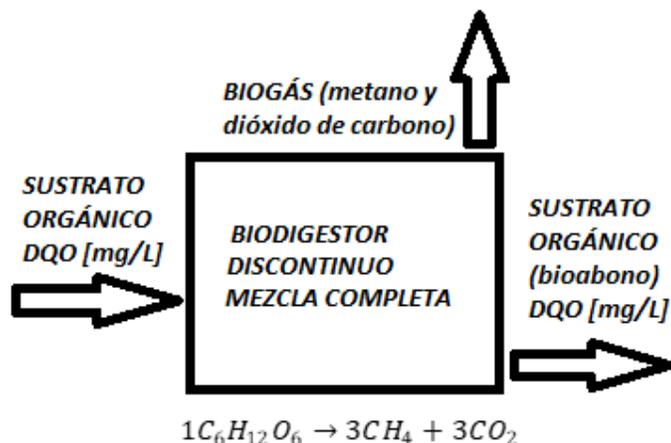


Figura 34. Descripción gráfica de las entradas y salidas del biodigestor

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

### Balance de materia para mezcla I

Se alimenta un biodigestor con sustrato orgánico no cítrico inicial de 150000 mg/L, con una conversión de 59% para obtener los valores de los productos teóricos a partir de la degradación del reactivo, con base de 1 L.

$$C_6H_{12}O_6 \text{ degradado} \rightarrow 150000\text{mg}(0,59)=$$

$$88500\text{mg}C_6H_{12}O_6 * \frac{1\text{mol}C_6H_{12}O_6}{180\text{mg}_{\text{mol}}C_6H_{12}O_6} = 491,67\text{mol}C_6H_{12}O_6$$

$$C_6H_{12}O_6 \text{ restantes} \rightarrow 150000\text{mg} - 88500\text{mg} = 61500\text{mg}C_6H_{12}O_6$$

$$\text{Moles producidos de } CH_4 \rightarrow 491,67\text{mol}C_6H_{12}O_6 * \frac{3\text{mol}CH_4}{1\text{mol}C_6H_{12}O_6} = 1475,01\text{mol}CH_4$$

$$\text{Peso mg de } CH_4 \rightarrow 1475,01\text{mol}CH_4 * \frac{16\text{mg}_{\text{mol}}CH_4}{1\text{mol}CH_4} = 23600,16\text{mg}CH_4$$

$$\text{Volumen teórico de CH}_4 \rightarrow \frac{\text{masa}}{\text{densidad}} = \frac{23600,16 \text{mgCH}_4}{0,668 \frac{\text{mg}}{\text{mL}}} = 35329,58 \text{mLCH}_4$$

$$\text{Moles producidos de CO}_2 \rightarrow 491,67 \text{molC}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 * \frac{3 \text{molCO}_2}{1 \text{molC}_6\text{H}_{12}\text{O}_6} = 1475,01 \text{molCO}_2$$

$$\text{Peso mg de CO}_2 \rightarrow 1475,01 \text{molCO}_2 * \frac{44 \text{mg}_{\text{mol}}\text{CO}_2}{1 \text{molCO}_2} = 64900,44 \text{mgCO}_2$$

$$\text{Volumen teórico de CO}_2 \rightarrow \frac{\text{masa}}{\text{densidad}} = \frac{64900,44 \text{mgCO}_2}{1,976 \frac{\text{mg}}{\text{ml}}} = 32844,35 \text{mlCO}_2$$

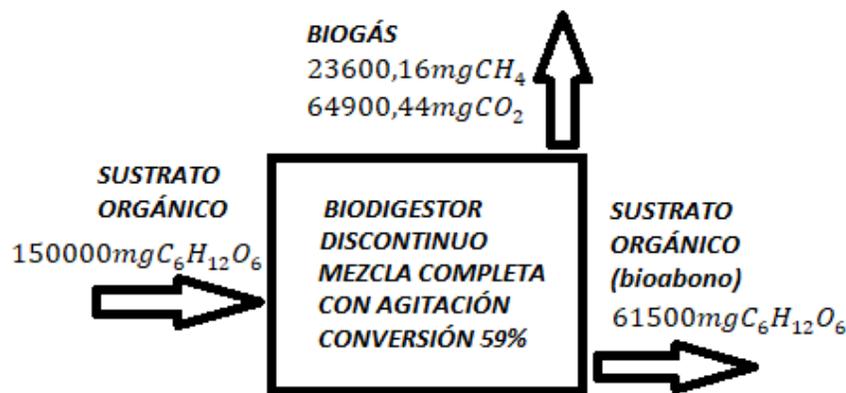


Figura 35. Balance de materia para Mezcla I

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

### Balance de materia para mezcla II

Se alimenta un biodigestor con sustrato orgánico no cítrico inicial de 110000 mg/L, con una conversión de 88% para obtener los valores de los productos teóricos a partir de la degradación del reactivo, con base de 1 litro.

$$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \text{ degradado} \rightarrow 110000 \text{mg}(0,88) =$$

$$96800 \text{mgC}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 * \frac{1 \text{molC}_6\text{H}_{12}\text{O}_6}{180 \text{mg}_{\text{mol}}\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6} = 537,78 \text{molC}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$$

$$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \text{ restantes} \rightarrow 110000 \text{mg} - 96800 \text{mg} = 13200 \text{mgC}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$$

$$\text{Moles producidos de } CH_4 \rightarrow 537,78 \text{ mol } C_6H_{12}O_6 * \frac{3 \text{ mol } CH_4}{1 \text{ mol } C_6H_{12}O_6} = 1613,34 \text{ mol } CH_4$$

$$\text{Peso mg de } CH_4 \rightarrow 1613,34 \text{ mol } CH_4 * \frac{16 \text{ mg}_{\text{mol}} CH_4}{1 \text{ mol } CH_4} = 25813,44 \text{ mg } CH_4$$

$$\text{Volumen teórico de } CH_4 \rightarrow \frac{\text{masa}}{\text{densidad}} = \frac{25813,44 \text{ mg } CH_4}{0,668 \frac{\text{mg}}{\text{mL}}} = 38642,87 \text{ mL } CH_4$$

$$\text{Moles producidos de } CO_2 \rightarrow 537,78 \text{ mol } C_6H_{12}O_6 * \frac{3 \text{ mol } CO_2}{1 \text{ mol } C_6H_{12}O_6} = 1613,34 \text{ mol } CO_2$$

$$\text{Peso mg de } CO_2 \rightarrow 1613,34 \text{ mol } CO_2 * \frac{44 \text{ mg}_{\text{mol}} CO_2}{1 \text{ mol } CO_2} = 70986,96 \text{ mg } CO_2$$

$$\text{Volumen teórico de } CO_2 \rightarrow \frac{\text{masa}}{\text{densidad}} = \frac{70986,96 \text{ mg } CO_2}{1,976 \frac{\text{mg}}{\text{mL}}} = 35924,57 \text{ mL } CO_2$$

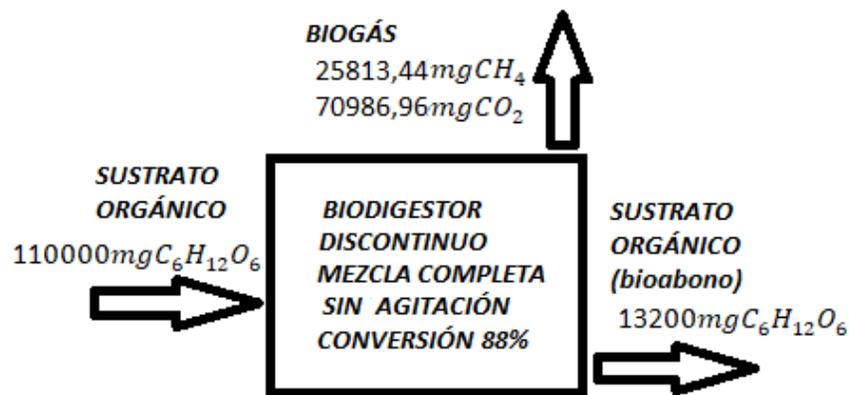


Figura 36. Balance de materia para Mezcla II

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

### Balance de materia para mezcla III

Se alimenta un biodigestor con sustrato orgánico no cítrico inicial de 86000 mg/L, con una conversión de 86% para obtener los valores de los productos teóricos a partir de la degradación del reactivo, con base de 1 litro.

$$C_6H_{12}O_6 \text{ degradado} \rightarrow 86000 \text{ mg} (0,86) =$$

$$73960\text{mgC}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 * \frac{1\text{molC}_6\text{H}_{12}\text{O}_6}{180\text{mg}_{\text{mol}}\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6} = 410,89\text{molC}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$$

$$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \text{ restantes} \rightarrow 86000\text{mg} - 73960\text{mg} = 12040\text{mgC}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$$

$$\text{Moles producidos de CH}_4 \rightarrow 410,89\text{molC}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 * \frac{3\text{molCH}_4}{1\text{molC}_6\text{H}_{12}\text{O}_6} = 1232,67\text{molCH}_4$$

$$\text{Peso mg de CH}_4 \rightarrow 1232,67\text{molCH}_4 * \frac{16\text{mg}_{\text{mol}}\text{CH}_4}{1\text{molCH}_4} = 19722,67\text{mgCH}_4$$

$$\text{Volumen teórico de CH}_4 \rightarrow \frac{\text{masa}}{\text{densidad}} = \frac{19722,67\text{mgCH}_4}{0,668 \frac{\text{mg}}{\text{mL}}} = 29524,95\text{mlCH}_4$$

$$\text{Moles producidos de CO}_2 \rightarrow 410,89\text{molC}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 * \frac{3\text{molCO}_2}{1\text{molC}_6\text{H}_{12}\text{O}_6} = 1232,67\text{molCO}_2$$

$$\text{Peso mg de CO}_2 \rightarrow 1232,67\text{molCO}_2 * \frac{44\text{mg}_{\text{mol}}\text{CO}_2}{1\text{molCO}_2} = 54237,48\text{mgCO}_2$$

$$\text{Volumen teórico de CO}_2 \rightarrow \frac{\text{masa}}{\text{densidad}} = \frac{54237,48\text{mgCO}_2}{1,976 \frac{\text{mg}}{\text{mL}}} = 27448,12\text{mlCO}_2$$

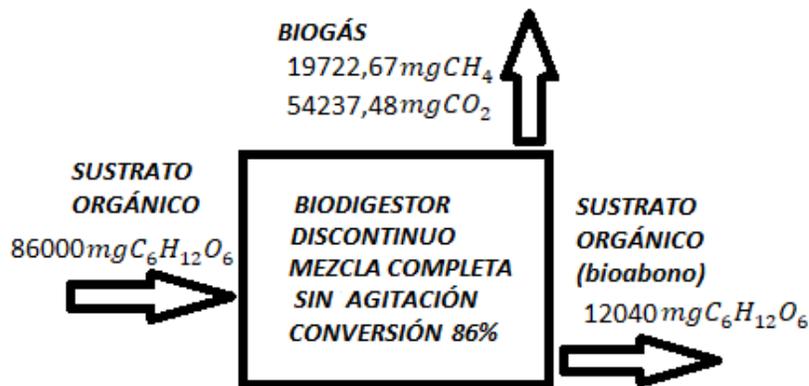


Figura 37. Balance de materia para Mezcla III

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

**Anexo B: Costos de producción y estudio cinético**

<b>Cant.</b>	<b>N° Pieza</b>	<b>Descripción</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Precio total</b>
1	Abrazadera pequeña	Acero inoxidable	\$1,00	\$1,00
3	Adaptadores de tanque de ½ in	Dos bridas PP con cauchos	\$7,00	\$21,00
1	Banda de lavadora	Caucho	\$1,50	\$1,50
1	Bufler	Caucho	\$10,00	\$10,00
2	Caucho	Caucho	\$10,00	\$20,00
1	Codo de 90°	PP	\$6,80	\$6,80
1	Llave de paso ½ in	Acero inoxidable	\$7,50	\$7,50
1	Llave de paso de ½ in	PVC	\$8,00	\$8,00
1	Lona	1.50x50 cm	\$10,00	\$10,00
1	Manómetro ½ 0-30 psi	Aluminio, latón	\$3,50	\$3,50
4	Mariposas	Acero inoxidable	\$1,00	\$4,00
1	Motor de 1 hp	Acero inoxidable (prestado)	\$0,00	\$0,00
4	Paletas	Nylon	\$20,00	\$80,00
12	Pernos	Acero inoxidable	\$1,00	\$12,00
2	Poleas diámetro de 5-10 cm	Acero inoxidable	\$7,50	\$15,00
2	Rulimanes 808	Acero inoxidable	\$5,00	\$10,00
1	Tanque de 58 L	PVC	\$50,00	\$50,00
1	Tapón de ½ in	Caucho	\$2,00	\$2,00

4	Teflón	PP	\$1,50	\$6,00
1	Termómetro bimetálico de 0-100C°	Acero inoxidable	\$10,00	\$10,00
1	Tubo transparente ¼ in	1 m LDFE	\$5,00	\$5,00
1	Válvula de globo 1 in	PVC	\$7,50	\$7,50
1	Chumacera	Acero inoxidable	\$16,85	\$16,85
3	Uniones	PVC	\$1,16	\$3,48
6	Jeringas	PP	\$1,00	\$6,00
2	Caja de fósforo y vela	Madera y cera	\$8,20	\$14,40
1	Materiales para prueba hidrostática	Hielo seco	\$10,00	\$10,00
1	Sustrato orgánico	Papaya y banano	\$10,00	\$10,00
1	Caracterización de sustrato final	Análisis de DQO, ST	\$93,00	\$93,00
1	Otros gastos	Comida, transporte e impresiones	\$100,00	\$100,00
1	Mano de obra	Construcción de biodigestor	\$100,00	\$100,00
			<b>Subtotal</b>	\$645,53
			<b>IVA 12%</b>	\$77,46
			<b>TOTAL</b>	\$722,99

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

## Anexo C: Formulaciones para las mezclas iniciales a utilizar

### Formulación para alimentación 43,10 L sin tamización

58 L → 100% volumen del tanque

Para preparar la carga se cambia el volumen por masa asumiendo una densidad del agua de 0,997 kg/L, con la siguiente fórmula:

$$\text{masa} = \text{volumen} * \text{densidad}$$

$$75\% \text{ sustrato liquido} \rightarrow 43,10 \text{ L} (0,997 \text{ kg/L}) = 42,97 \text{ kg}$$

El mismo que estará compuesto de la siguiente manera:

$$12\% \text{ sustrato sólido (estiércol vacuno)} = 12\% * \frac{42,97 \text{ kg}}{75\%} = 6,88 \text{ kg}$$

$$3\% \text{ sustrato frutal no cítrica (banano y papaya)} = 3\% * \frac{42,97 \text{ kg}}{75\%} = 1,72 \text{ kg}$$

$$50\% \text{ agua (inóculo y potable)} = 50\% * \frac{42,97 \text{ kg}}{75\%} = 28,65 \text{ kg}$$

$$"10\% \text{ inóculo orgánico} = 10\% * \frac{42,97 \text{ kg}}{75\%} = 5,73 \text{ kg}"$$

### Formulación para alimentación 3 L con tamización

4L → 100% volumen del tanque

Para preparar la carga se cambia el volumen por masa asumiendo una densidad del agua de 0,997kg/L, con la siguiente fórmula:

$$\text{masa} = \text{volumen} * \text{densidad}$$

$$75\% \text{ masa de sustrato liquido} \rightarrow 3 \text{ L} (0,997 \text{ kg/L}) = 2,99 \text{ kg}$$

El mismo que estará compuesto de la siguiente manera:

$$12\% \text{ sustrato sólido (estiércol vacuno)} = 12\% * \frac{2,99 \text{ kg}}{75\%} = 0,48 \text{ kg}$$

$$3\% \text{ sustrato frutal no cítrica (banano y papaya)} = 3\% * \frac{2,99\text{kg}}{75\%} = 0,12\text{kg}$$

$$50\% \text{ agua de inóculo} = 50\% * \frac{2,99\text{kg}}{75\%} = 1,99\text{kg}$$

$$10\% \text{ inóculo orgánico} = 10\% * \frac{2,99\text{kg}}{75\%} = 0,40\text{kg}$$

Se procede a tamizar las materias primas con la finalidad de disminuir el contenido de sólidos, se utiliza una malla con un diámetro de 0,2 cm y agua de inóculo.

Tabla 34. Totales de las masas tamizadas y agua de inóculo usada en la preparación de las mezcla II

	<b>Masa tamizada</b>		<b>Agua de inóculo usada</b>
Estiércol	0,48 kg	+	200 ml = 0,2 kg
Inóculo	0,40 kg	+	200 ml = 0,2 kg
Banano	0,06 kg	+	300 ml = 0,35 kg
Papaya	0,06 kg	+	300 ml = 0,35 kg
Agua (inóculo) a complementar			1000 ml = 1 kg
<b>TOTAL</b>	1 kg	+	2000ml = 2kg

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

### **Formulación para alimentación 3L con tamización**

$$4\text{L} \rightarrow 100\% \text{ volumen del tanque}$$

Para preparar la carga se cambia el volumen por masa asumiendo una densidad del agua de 0,997kg/L, con la siguiente fórmula:

$$\text{masa} = \text{volumen} * \text{densidad}$$

$$75\% \text{ masa de sustrato liquido} \rightarrow 3\text{L} (0,997\text{kg/L}) = 2,99\text{kg}$$

El mismo que estará compuesto de la siguiente manera:

$$12\% \text{ sustrato sólido (estiércol vacuno)} = 12\% * \frac{2,99\text{kg}}{75\%} = 0,48\text{kg}$$

$$1\% \text{ sustrato frutal no cítrica (banano y papaya)} = 1\% * \frac{2,99\text{kg}}{75\%} = 0,04\text{kg}$$

$$52\% \text{ agua de inóculo} = 52\% * \frac{2,99\text{kg}}{75\%} = 2,07\text{kg}$$

$$10\% \text{ inóculo orgánico} = 10\% * \frac{2,99\text{kg}}{75\%} = 0,40\text{kg}$$

Se procede a tamizar las materias primas con la finalidad de disminuir el contenido de sólidos, se utiliza una malla con un diámetro de 0,20 cm y agua de inóculo.

Tabla 35. Totales de las masas tamizadas y agua de inóculo usada en la preparación de las mezcla III

	<b>Masa tamizada</b>		<b>Agua de inóculo usada</b>
Estiércol	0,48 kg	+	200 ml = 0,2 kg
Inóculo	0,40 kg	+	200 ml = 0,2 kg
Banano	0,02 kg	+	300 ml = 0,3 kg
Papaya	0,02 kg	+	300 ml = 0,3 kg
Agua (inóculo) a complementar			1070 ml = 1,07 kg
<b>TOTAL</b>	1 kg	+	2070ml = 2,07 kg

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

## Anexo D: Evidencias fotográficas



Fotografía 1. Tanque y agitador empleados en el biodigestor con agitación

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)



Fotografía 2. Acoplamiento del agitador al biodigestor

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)



Fotografía 3. Elaboración y presentación del chaleco térmico

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)



Fotografía 4. Biodigestores con agitación y biodigestores sin agitación discontinuos sin alimentación

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)



Fotografía 5. Preparación de las materias primas individualmente

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)



Fotografía 6. Caracterización de las materias primas individualmente y mezclas iniciales

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)



Fotografía 7. Lectura de pH de izquierda a derecha mezcla I, mezcla II y mezcla III

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)



Fotografía 8. Lectura de los sólidos disueltos de las materias primas individualmente

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)



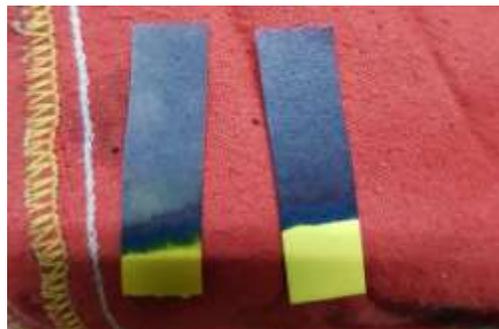
Fotografía 9. Prácticas del sistema de desplazamiento volumétrico utilizado

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)



Fotografía 10. Vista frontal de los biodigestores sin agitación y su respectivo sistema de desplazamiento volumétrico

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)



Fotografía 11. Lectura de pH del NaOH al 4% antes y después del entrar en contacto con el  $\text{CH}_4$

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

## Anexo E: Diseño de experimentos

El resultado de los tres experimentos realizados presenta una disminución progresiva en los valores de caracterización de cada una de las muestras; a continuación, se visualizan las siguientes tablas:

Tabla 36. Disminución del pH en variación del tiempo de operatividad

<b>Tiempo acumulativo de residencia</b>	<b>pH</b>		
	<b>Mezcla I</b>	<b>Mezcla II</b>	<b>Mezcla III</b>
0	8	8	8
3	8	8	8
5	8	8	8
7	7,20	7,70	7,50
10	7,10	7,60	7,40
12	7	7,50	7
14	7	7,30	6,80
17	7	6,70	6,60
19	6,80	6,60	6,50
21	6,60	6,50	6,40
24	6,50	6,40	6,40

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

Tabla 37. Disminución de los sólidos totales y sólidos volátiles en variación del tiempo de operatividad

<b>Tiempo acumulativo de residencia</b>	<b>ST [mg/L]</b>			<b>SV [mg/L]</b>		
	<b>Mezcla I</b>	<b>Mezcla II</b>	<b>Mezcla III</b>	<b>Mezcla I</b>	<b>Mezcla II</b>	<b>Mezcla III</b>
0	160000	120000	135000	86500	76500	67780
3	130300	100100	110230	75330	66400	56420
5	127670	80040	95780	70123	60340	42230
7	124050	60450	79350	65543	58230	37235
10	119350	58980	74140	61540	54029	33170
12	115800	56820	67360	59001	50120	32120
14	110970	48010	54370	54205	44550	29930
17	101830	42980	44620	50337	39990	25090
19	90740	40840	39950	48390	22230	23340
21	87480	22500	26500	43339	16055	14220
24	86160	19230	11305	41320	9190	7770

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

Tabla 38. Disminución del DQO en variación del tiempo de operatividad

<b>Tiempo acumulativo de residencia</b>	<b>DQO [mg/L]</b>		
	<b>Mezcla I</b>	<b>Mezcla II</b>	<b>Mezcla III</b>
0	150000	110000	86000
3	127000	89450	75300
5	125000	65110	71070
7	109000	52120	65320
10	95000	49490	60900
12	90000	42230	52430
14	87440	38450	41010
17	72300	35150	37500
19	67800	30130	33110
21	63000	19190	25970
24	60840	13002	11970

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

El resultado de los tres experimentos realizados presenta un incremento progresivo en los valores de producción de biogás de cada una de las muestras; a continuación, se visualiza en la siguiente tabla:

Tabla 39. Incremento de la producción de biogás con la variación del tiempo de residencia

<b>Tiempo acumulativo de residencia</b>	<b>Producción Gas [ml/d]</b>		
	<b>Mezcla I</b>	<b>Mezcla II</b>	<b>Mezcla III</b>
0	4	4	4
3	10	12	11
5	25	30	20
7	50	95	90
10	100	150	125
12	500	585	250
14	700	750	300
17	800	900	500
19	836	950	565
21	962	1081	633
24	1087	1221	800

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

**Anexo F: Estudio de la cinética química de la digestión anaerobia**

Tabla 40. Ajuste a la cinética de Monod

Tiempo acumulativo de residencia	1/DQO [L/mg]			Datos obtenidos		
	Mezcla I	Mezcla II	Mezcla III	Mezcla I	Mezcla II	Mezcla III
0	6,67E- 06	9,09E- 06	1,16E- 05	m	m	m
3	7,87E- 06	1,12E- 05	1,33E- 05	4,32E- 07	2,25E- 06	2,11E- 06
5	0,0000 08	1,54E- 05	1,41E- 05	b	b	b
7	9,17E- 06	1,92E- 05	1,53E- 05	6,00E- 06	2,00E- 06	1,00E- 06
10	1,05E- 05	2,02E- 05	1,64E- 05	ks	ks	ks
12	1,11E- 05	2,37E- 05	1,91E- 05	1,67E+ 05	5,00E+ 05	1,00E+ 06
14	1,14E- 05	2,60E- 05	2,44E- 05	kc	kc	kc
17	1,38E- 05	2,84E- 05	2,67E- 05	7,19E- 02	1,13E+ 00	2,11E+ 00
19	1,47E- 05	3,32E- 05	3,02E- 05			

21	1,59E-05	5,21E-05	3,85E-05
24	1,64E-05	7,69E-05	8,35E-05

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

Tabla 41. Método diferencial aplicado a mezcla I

(-RA)	log (CA)	log (-RA)
0	5,18	0
7666,67	5,10	3,88
1000,00	5,10	3,00
8000,00	5,04	3,90
4666,67	4,98	3,67
2500,00	4,95	3,40
1280,00	4,94	3,11
5046,67	4,86	3,70
2250,00	4,83	3,35
2400,00	4,80	3,38
720,00	4,78	2,86

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

Tabla 42. Concentración y conversión de DQO

Tiempo acumulativo de residencia	CA			XA=1-(CA/CAo)		
	DQO [mg/L]			Conversión DQO [-]		
	Mezcla I	Mezcla II	Mezcla III	Mezcla I	Mezcla II	Mezcla III
0	150000	110000	86000	0,00	0,00	0,00
3	127000	89450	75300	0,15	0,19	0,12
5	125000	65110	71070	0,17	0,41	0,17
7	109000	52120	65320	0,27	0,53	0,24
10	95000	49490	60900	0,37	0,55	0,29
12	90000	42230	52430	0,40	0,62	0,39
14	87440	38450	41010	0,42	0,65	0,52
17	72300	35150	37500	0,52	0,68	0,56
19	67800	30130	33110	0,55	0,73	0,62
21	63000	19190	25970	0,58	0,83	0,70
24	60840	13002	11970	0,59	0,88	0,86

Fuente: (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

Tabla 43. Método integral para orden 0

<b>ORDEN 0</b>						
<b>Tiempo acumulativo de residencia</b>	<b>CAo-CA [mg/L]</b>			<b>CAo*XA [mg/L]</b>		
	<b>Mezcla I</b>	<b>Mezcla II</b>	<b>Mezcla III</b>	<b>Mezcla I</b>	<b>Mezcla II</b>	<b>Mezcla III</b>
0	0	0	0	0	0	0
3	23000	20550	10700	23000	20550	10700
5	25000	44890	14930	25000	44890	14930
7	41000	57880	20680	41000	57880	20680
10	55000	60510	25100	55000	60510	25100
12	60000	67770	33570	60000	67770	33570
14	62560	71550	44990	62560	71550	44990
17	77700	74850	48500	77700	74850	48500
19	82200	79870	52890	82200	79870	52890
21	87000	90810	60030	87000	90810	60030
24	89160	96998	74030	89160	96998	74030

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

Tabla 44. Método integral para orden 1

		<b>ORDEN 1</b>					
<b>Tiempo acumulativo de residencia</b>	<b>(-ln(CA/CAo)) [-]</b>			<b>(-ln(1-XA)) [-]</b>			
	<b>Mezcla I</b>	<b>Mezcla II</b>	<b>Mezcla III</b>	<b>Mezcla I</b>	<b>Mezcla II</b>	<b>Mezcla III</b>	
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
3	0,17	0,21	0,13	0,17	0,21	0,13	
5	0,18	0,52	0,19	0,18	0,52	0,19	
7	0,32	0,75	0,28	0,32	0,75	0,28	
10	0,46	0,80	0,35	0,46	0,80	0,35	
12	0,51	0,96	0,49	0,51	0,96	0,49	
14	0,54	1,05	0,74	0,54	1,05	0,74	
17	0,73	1,14	0,83	0,73	1,14	0,83	
19	0,79	1,29	0,95	0,79	1,29	0,95	
21	0,87	1,75	1,20	0,87	1,75	1,20	
24	0,90	2,14	1,97	0,90	2,14	1,97	

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

Tabla 45. Método integral para orden 2

		<b>ORDEN 2</b>				
<b>Tiempo acumulativo de residencia</b>	<b>(1/CA)-(1/CAo) [L/mg]</b>			<b>XA/CAo(1-XA) [L/mg]</b>		
	<b>Mezcla I</b>	<b>Mezcla II</b>	<b>Mezcla III</b>	<b>Mezcla I</b>	<b>Mezcla II</b>	<b>Mezcla III</b>
0	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00
3	1E-06	2E-06	2E-06	1E-06	2E-06	2E-06
5	1E-06	6E-06	2E-06	1E-06	6E-06	2E-06
7	3E-06	1E-05	4E-06	3E-06	1E-05	4E-06
10	4E-06	1E-05	5E-06	4E-06	1E-05	5E-06
12	4E-06	1E-05	7E-06	4E-06	1E-05	7E-06
14	5E-06	2E-05	1E-05	5E-06	2E-05	1E-05
17	7E-06	2E-05	2E-05	7E-06	2E-05	2E-05
19	8E-06	2E-05	2E-05	8E-06	2E-05	2E-05
21	9E-06	4E-05	3E-05	9E-06	4E-05	3E-05
24	1E-05	7E-05	7E-05	1E-05	7E-05	7E-05

**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

Tabla 46. Método integral para orden 3

ORDEN 3						
Tiempo acumulati vo de residencia	$(1/2CA^2)-(1/2CAo^2) [(L/mg)^2]$			$(2XA-XA^2)/(2(CAo^2)(1-XA)^2) [(L/mg)^2]$		
	Mezcla I	Mezcla II	Mezcla III	Mezcla I	Mezcla II	Mezcla III
0	0	0	0	0	0	0
3	8,78E- 12	2,12E- 11	2,06E-11	8,78E- 12	2,12E-11	2,06E-11
5	9,78E- 12	7,66E- 11	3,14E-11	9,78E- 12	7,66E-11	3,14E-11
7	1,99E- 11	1,43E- 10	4,96E-11	1,99E- 11	1,43E-10	4,96E-11
10	3,32E- 11	1,63E- 10	6,72E-11	3,32E- 11	1,63E-10	6,72E-11
12	3,95E- 11	2,39E- 10	1,14E-10	3,95E- 11	2,39E-10	1,14E-10
14	4,32E- 11	2,97E- 10	2,3E-10	4,32E- 11	2,97E-10	2,3E-10
17	7,34E- 11	3,63E- 10	2,88E-10	7,34E- 11	3,63E-10	2,88E-10
19	8,65E- 11	5,09E- 10	3,88E-10	8,65E- 11	5,09E-10	3,88E-10

21	1,04E-10	1,32E-09	6,74E-10	1,04E-10	1,32E-09	6,74E-10
24	1,13E-10	2,92E-09	3,42E-09	1,13E-10	2,92E-09	3,42E-09

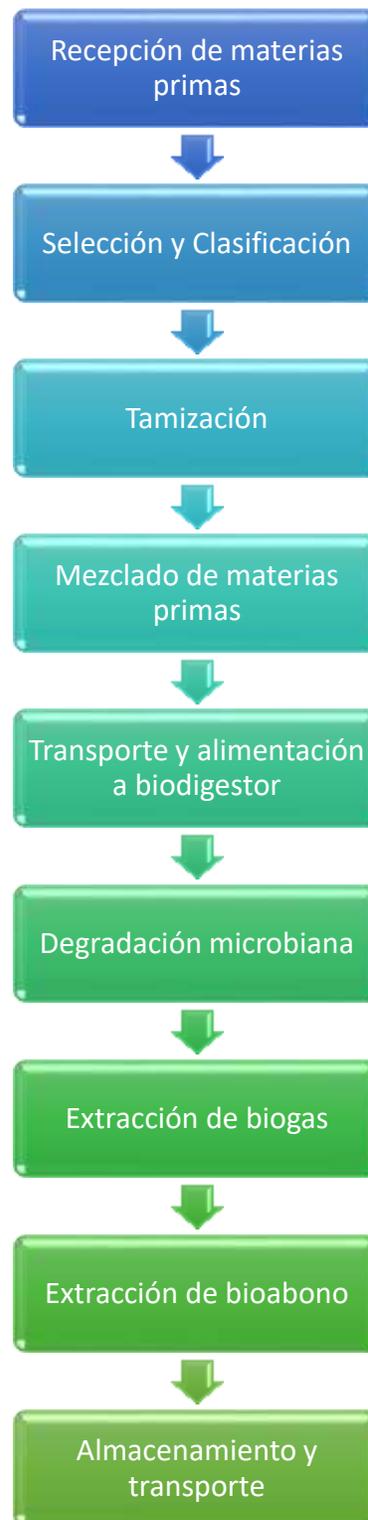
Fuente: (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

Tabla 47. Valores de constante y velocidad de reacción para orden 1

ORDEN 1						
Tiempo acumulativo de residencia	k [1/d]			(-RA)=KCA <sup>1</sup>		
	Mezcla I	Mezcla II	Mezcla III	Mezcla I	Mezcla II	Mezcla III
0	0,04	0,08	0,07	5851,20	8594,25	5982,62
3	0,04	0,08	0,07	4954,02	6988,68	5238,27
5	0,04	0,08	0,07	4876,00	5087,01	4944,01
7	0,04	0,08	0,07	4251,87	4072,11	4544,01
10	0,04	0,08	0,07	3705,76	3866,63	4236,53
12	0,04	0,08	0,07	3510,72	3299,41	3647,31
14	0,04	0,08	0,07	3410,86	3004,08	2852,87
17	0,04	0,08	0,07	2820,28	2746,25	2608,70
19	0,04	0,08	0,07	2644,74	2354,04	2303,31
21	0,04	0,08	0,07	2457,50	1499,31	1806,61
24	0,04	0,08	0,07	2373,25	1015,84	832,70

Fuente: (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

## Anexo G: Diagrama de flujo del proceso



**Fuente:** (Chica, Adrián & Vaca, Jamilet, 2018)

## Anexo H: Hoja de seguridad del gas metano

### Fichas Internacionales de Seguridad Química

<b>METANO</b>		<b>ICSC: 0291</b> Febrero 2000	
CAS: 74-82-8      Hidruro de metilo RTECS: PA1490000      CH <sub>4</sub> NU: 1971      Masa molecular: 16.0 CE Índice Anexo I: 601-001-00-4 CE / EINECS: 200-812-7			
TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SINTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
<b>INCENDIO</b>	Extremadamente inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar.	Cortar el suministro; si no es posible y no existe riesgo para el entorno próximo, dejar que el incendio se extinga por sí mismo; en otros casos apagar con agua pulverizada, polvo seco, dióxido de carbono.
<b>EXPLOSIÓN</b>	Las mezclas gas/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. Utilícense herramientas manuales no generadoras de chispas.	En caso de incendio: mantener fría la botella rociando con agua. Combatir el incendio desde un lugar protegido.
EXPOSICIÓN			
<b>Inhalación</b>	Astisia. Ver Notas.	Ventilación. A altas concentraciones protección respiratoria.	Aire limpio, reposo. Respiración artificial si estuviera indicada. Proporcionar asistencia médica.
<b>Piel</b>	EN CONTACTO CON LÍQUIDO: CONGELACIÓN.	Guantes aislantes del frío.	EN CASO DE CONGELACIÓN: aclarar con agua abundante, NO quitar la ropa. Proporcionar asistencia médica.
<b>Ojos</b>	EN CONTACTO CON LÍQUIDO: CONGELACIÓN.	Gafas ajustadas de seguridad	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
<b>Ingestión</b>			
DERRAMES Y FUGAS		ENVASADO Y ETIQUETADO	
¡Evacuar la zona de peligro! Consultar a un experto. Ventilar. Eliminar toda fuente de ignición. Protección personal: equipo autónomo de respiración. NO verter NUNCA chorros de agua sobre el líquido.		Clasificación UE Símbolo: F+ R: 12 S: (2-)9-16-33 Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 2.1	
RESPUESTA DE EMERGENCIA		ALMACENAMIENTO	
Ficha de Emergencia de Transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-20G1F Código NFPA: H1; F4; R0;		A prueba de incendio. Mantener en lugar fresco. Ventilación a ras del suelo y techo.	
Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © CE, IPCS, 2005			
			

## Fichas Internacionales de Seguridad Química

<b>METANO</b>	<b>ICSC: 0291</b>
<b>DATOS IMPORTANTES</b>	
<p><b>ESTADO FÍSICO; ASPECTO</b> Gas licuado o comprimido incoloro e inodoro.</p> <p><b>PELIGROS FÍSICOS</b> El gas es más ligero que el aire.</p> <p><b>LÍMITES DE EXPOSICIÓN</b> TLV: (Hidrocarburos Alifáticos Alcanos (C1-C4), gases) 1000 ppm (como TWA) (ACGIH 2005). MAK no establecido.</p>	<p><b>VÍAS DE EXPOSICIÓN</b> La sustancia se puede absorber por inhalación.</p> <p><b>RIESGO DE INHALACIÓN</b> Al producirse pérdidas en zonas confinadas, este gas puede originar asfixia por disminución del contenido de oxígeno en el aire.</p> <p><b>EFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN</b> La evaporación rápida del líquido puede producir congelación.</p>
<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>	
<p>Punto de ebullición: -161°C Punto de fusión: -183°C Solubilidad en agua, ml/100 ml a 20°C: 3.3 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 0.6</p>	<p>Punto de inflamación: gas inflamable Temperatura de autoignición: 537°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 5-15 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 1.09</p>
<b>DATOS AMBIENTALES</b>	
<b>NOTAS</b>	
<p>Densidad del líquido en el punto de ebullición: 0.42 kg/l. Altas concentraciones en el aire producen una deficiencia de oxígeno con riesgo de pérdida de conocimiento o muerte. Comprobar el contenido de oxígeno antes de entrar en la zona. Con el fin de evitar la fuga de gas en estado líquido, girar la botella que tenga un escape manteniendo arriba el punto de escape. Una vez utilizado para la soldadura, cerrar la válvula; verificar regularmente el estado de la tubería, etc., y comprobar si existen escapes utilizando agua y jabón. Las medidas mencionadas en la sección PREVENCIÓN son aplicables a la producción, llenado de botellas y almacenamiento del gas. Otro número NU: 1972 (líquido refrigerado), clase de peligro: 2.1. Esta ficha ha sido parcialmente actualizada en octubre de 2005: ver Respuesta de Emergencia</p>	
<b>INFORMACIÓN ADICIONAL</b>	
<p>Límites de exposición profesional (INSHT 2012): VLA-ED: (como Hidrocarburos alifáticos alcanos (C1-C4) y sus mezclas, gases) 1000 ppm</p>	
<b>NOTA LEGAL</b>	<p>Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.</p>
© IPCS, CE 2005	

**Anexo I: Resultado de los análisis finales realizados en un laboratorio acreditado**

 UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL	 <b>UNIDAD DE CONTROL DE CALIDAD LABORATORIOS AGUAS PETROLEO Y MEDIO AMBIENTE</b> Facultad de Ingeniería Química Universidad de Guayaquil Cda. Universitaria Salvador Allende Teléfono: 2292949 - FAX: 2294772 Guayaquil - Ecuador	<b>LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO</b>  <b>FOR EL SAE CON ACREDITACIÓN</b>  <b>N° OAE LE C 08-003</b>
---	---	--

**INFORME DE ANALISIS FISICO - QUIMICO**

<b>INFORME N°: LA / 217 / 18</b>	
SOLICITADO POR:	Adrian Chica Mero / Jamilet Vaca Chonillo
EMPRESA:	-
DIRECCIÓN:	Martín Icaza y 2do peatonal
Fecha de inicio de análisis:	2018 / 12 / 21
Fecha de culminación de análisis:	2019 / 01 / 03
	Fecha de recepción: 2018 / 12 / 21

<b>IDENTIFICACIÓN DE LOS ANALISIS TABULADOS</b>	
A: MUESTRA SUATRATO ORGÁNICO (M 0)	TIPO DE MUESTRA: PUNTUAL <sup>(1)</sup> FECHA DE MUESTREO: 2018 / 12 / 21 <sup>(1)</sup>

Parámetros	Expresado como	Unidad	Resultados	Incert. U (k=2)	Límites Máximos Permisibles <sup>(2)</sup>	Método
			A			
**Demanda Química de Oxígeno	D.Q.O.	mg/l	60.842	-	200	5220D PERUCCOLAS1
**Sólidos totales	-	mg/l	86.165	-	1.600	5340 B PERUCCOLAS1

**OBSERVACIONES:**

\*Los ensayos marcados (\*) NO están incluidos en el alcance de la Acreditación del SAE.

\*\*Rango de acreditación: SST: 100 - 1 000 mg/l; DQO: 100 - 900 mg/l.

<sup>(1)</sup> Dato proporcionado por la empresa.

<sup>(2)</sup> Legislación Ambiental para descargas a un cuerpo de agua dulce. Acuerdo Ministerial N° 083B; 097-A; 140. Noviembre 2015.

 ING. MARLON RAMIREZ DIRECTOR TÉCNICO	Fecha de emisión: 2019 / 01 / 11
--	-------------------------------------

Los análisis fueron realizados de acuerdo al STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER, SEWAGE AND INDUSTRIAL WASTE 23RD EDITION

\* Los resultados obtenidos en este informe son exclusivos de la Muestra sometida a ensayo.  
 Nota: \* Queda prohibido la reproducción parcial o total de este informe sin previa autorización de esta Unidad.

	 <b>UNIDAD DE CONTROL DE CALIDAD</b> <b>LABORATORIOS</b> <b>AGUAS PETROLEO Y MEDIO AMBIENTE</b> Facultad de Ingeniería Química Universidad de Guayaquil Cda. Universitaria Salvador Allende Teléfono: 2292549 - FAX: 2294772 Guayaquil - Ecuador	<b>LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO</b>  <b>POR EL SAE CON ACREDITACIÓN</b>  <b>N° OAE LE C 05-003</b>
---	---	--

**INFORME DE ANALISIS FISICO - QUIMICO**

		INFORME N°: LA / 217 / 18
SOLICITADO POR:	Adrian Chico Mero / Jamilet Vaca Chonillo	
EMPRESA:	-	
DIRECCIÓN:	Martín Icaza y 2do peatonal	
Fecha de inicio de análisis:	2018 / 12 / 21	Fecha de recepción:
Fecha de culminación de análisis:	2019 / 01 / 03	2018 / 12 / 21

<b>IDENTIFICACION DE LOS ANALISIS TABULADOS</b>	
C: MUESTRA SUSTRATO ORGÁNICO (M 1)	TIPO DE MUESTRA: PUNTUAL <sup>(1)</sup> FECHA DE MUESTREO: 2018 / 12 / 21 <sup>(1)</sup>

Parámetros	Expresado como	Unidad	Resultados	inver. U (σ-2)	Límites Máximos Permisibles <sup>(2)</sup>	Método
			C			
**Demanda Química de Oxígeno	D.Q.O.	mg/l	11 970	-	200	4230 PESUCCLA02
**Sólidos totales	-	mg/l	11 305	-	1 600	2540 B PESUCCLA07

**OBSERVACIONES:**

\*Los ensayos marcados (\*) NO están incluidos en el alcance de la Acreditación del SAE.

\*\*Rango de acreditación: SST: 100 - 1 000 mg/l; DQO: 100 - 900 mg/l.

<sup>(1)</sup> Dato proporcionado por la empresa.

<sup>(2)</sup> Legislación Ambiental para descargas a un cuerpo de aguas dulces. Acuerdo Ministerial N° 083B, 097-A, 140, Noviembre 2015.

 <b>INEJ. MAKLON RAMIREZ</b> DIRECTOR TÉCNICO	Fecha de emisión: 2019 / 01 / 11
--	-------------------------------------

Los análisis fueron realizados de acuerdo al STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER, SEWAGE AND INDUSTRIAL WASTE 23RD EDITION

\* Los resultados obtenidos en este informe son exclusivos de la Muestra sometida a ensayo.  
 Nota: \* Queda prohibido la reproducción parcial o total de este informe sin previa autorización de esta Unidad.

 UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL	 <b>UNIDAD DE CONTROL DE CALIDAD LABORATORIOS AGUAS PETROLERO Y MEDIO AMBIENTE</b> Facultad de Ingeniería Química Universidad de Guayaquil C/da. Universitaria Salvador Allende Teléfono: 2292949 - FAX: 2294772 Guayaquil - Ecuador	<b>LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO</b>  <b>FOR EL SAE CON ACREDITACIÓN</b>  <b>N° OAE LE C 08-003</b>
---	---	--

**INFORME DE ANALISIS FISICO - QUIMICO**

<b>INFORME N°: LA / 217 / 18</b>	
SOLICITADO POR:	Adrian Chica Moro / Jamilet Vaca Chonillo
EMPRESA:	-
DIRECCIÓN:	Martin Izata y 2do pentonal
Fecha de inicio de análisis:	2018 / 12 / 21
Fecha de culminación de análisis:	2019 / 01 / 03
	Fecha de recepción: 2018 / 12 / 21

<b>IDENTIFICACIÓN DE LOS ANÁLISIS TABULADOS</b>
TIPO DE MUESTRA: PUNTUAL <sup>(1)</sup>
FECHA DE MUESTREO: 2018 / 12 / 21 <sup>(2)</sup>
E: MUESTRA SUTRATO ORGÁNICO (M 2)

Parámetros	Expresado como	Unidad	Resultados	Incert. U (k=2)	Límites Máximos Permisibles <sup>(3)</sup>	Método
			B			
**Demanda Química de Oxígeno	D Q O	mg/l	13.002	-	200	5220 PER/CC/CLAS
**Sólidos totales	-	mg/l	19.225	-	1.600	2540 B PER/CC/CLAS

<b>OBSERVACIONES:</b>
*Los ensayos marcados (*) NO están incluidos en el alcance de la Acreditación del SAE.
**Rango de acreditación: SST: 100 - 1 000 mg/l; DQO: 100 - 900 mg/l.
<sup>(1)</sup> Dato proporcionado por la empresa.
<sup>(2)</sup> Legislación Ambiental para descargas a un cuerpo de agua dulce: Acuerdo Ministerial N° 0838, 097-A; 140. Noviembre 2015.

 <b>ING. MARLON RAMIREZ</b> DIRECTOR TÉCNICO	Fecha de emisión: 2019 / 01 / 11
---	-------------------------------------

Los análisis fueron realizados de acuerdo al STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER, SEWAGE AND INDUSTRIAL WASTE 23RD EDITION

\* Los resultados obtenidos en este informe son exclusivos de la Muestra sometida a ensayo.  
 (Nota: \* Queda prohibido la reproducción parcial o total de este informe sin previa autorización de esta Unidad.