



UNIVERSIDAD ESTATAL DE BOLIVAR
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS, RECURSOS
NATURALES Y DEL AMBIENTE
ESCUELA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

TEMA

“DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA BACTERIANA DE LA
CODIGESTIÓN ANAEROBIA A PARTIR DE LA BIOMASA RESIDUAL DE
LA COL (*Brassica oleracea*)”

Tesis de Grado Previo a la Obtención del Título de Ingeniera Agroindustrial otorgado por la Universidad Estatal de Bolívar, a través de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, Recursos Naturales y del Ambiente, Escuela de Ingeniería Agroindustrial.

AUTORA

Pullas Rea María Doris

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Juan Gaibor

GUARANDA – ECUADOR

2015

TEMA:

**“DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA BACTERIANA DE LA
CODIGESTIÓN ANAEROBIA A PARTIR DE LA BIOMASA RESIDUAL DE
LA COL (*Brassica oleracea*)”.**

REVISADO POR:

ING. JUAN GAIBOR

DIRECTOR DE TESIS

PHD MOISÉS ARREGUÍN

BIOMETRISTA

APROBADO POR LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL DE CALIFICACIÓN

DRA. ODERAY MERINO

ÁREA TÉCNICA

DRA. HERMINIA SANAGUANO

ÁREA DE REDACCIÓN TÉCNICA

Fecha de defensa.....

DECLARACIÓN

Yo: PULLAS REA MARÍA DORIS, autora de la tesis declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; este documento no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que las referencias bibliográficas que se incluyen han sido consultadas.

La Universidad Estatal de Bolívar puede hacer uso de los derechos de publicación correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

PULLAS REA MARÍA DORIS

0201667250

DEDICATORIA

A Dios en primer lugar quien está conmigo tanto en los momentos más sacrificados como en los de felicidad que he pasado durante mi vida.

A mis queridos Padres Miguel y María quienes estuvieron pendientes de mí y me motivan día a día para seguir adelante, gracias a su apoyo y consejos he llegado a realizar la más grande de mis metas.

A mis Hermanos por su amor y apoyo incondicional por siempre confiar en mí quienes supieron brindarme esa energía y entusiasmo en continuar aun cuando estaba por rendirme. A mi hija Valentina, de la cual me siento muy orgullosa quien con su luz ilumina mis días.

A mis amigos y a todos, espero no defraudarlos y contar siempre con su valioso apoyo, sincero e incondicional.

María Doris Pullas Rea

AGRADECIMIENTO

Agradezco infinitamente a Dios por darme las fuerzas necesarias para luchar y ganar esta batalla, por ser el amigo que me acompaña en cada paso que doy a los seres que me dieron la vida mis padres Miguel Ángel y María Teresa porque creyeron en mí y me sacaron adelante, dándome ejemplos dignos de superación y entrega, que con su gran esfuerzo y sacrificio hoy puedo ver alcanzada mi meta y porque el orgullo que sienten por mí fue lo que me hizo ir hasta el final.

A mis hermanos, Nelly, Miguel, Gustavo, Mercedes y a mi hija, que han sido un pilar fundamental gracias por haber fomentado en mí el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida.

Agradezco a mi Director de tesis Ing. Juan Gaibor por sus conocimientos, enseñanzas, consejos y por la confianza brindada día a día.

Al Dr. Sergio Pérez y a la Dra. Zulay Niño por su ayuda y conocimientos que me supieron brindar para salir adelante y poder culminar con mi carrera, a la Dra. Herminia y Dra. Oderay por confiar plenamente en mí.

A la Universidad Estatal de Bolívar por acogerme en sus aulas y ser nuestro hogar durante todo este tiempo.

Mil palabras no bastarían para agradecerles su apoyo, su comprensión y sus consejos en los momentos difíciles, GRACIAS A TODOS.

María Doris Pullas Rea

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Número	DESCRIPCIÓN	Pág.
I	INTRODUCCIÓN	1
II	MARCO TEÓRICO	5
2.1	Generación de residuos en el Ecuador	5
2.1.1	Generación de residuos Sólidos en la Provincia Bolívar	5
2.1.2	Situación de los residuos Sólidos en la Ciudad de Guaranda	7
2.2	Concepto de Biomasa	9
2.2.1	Tipos de Biomasa	11
2.2.2	Características de la Biomasa Residual	12
2.2.3	Clasificación de la Biomasa	13
2.3	Situación Actual de la Biomasa en el Ecuador	13
2.4	Residuos Orgánicos Biodegradables	14
2.4.1	Residuos Ganaderos	15
2.4.2	Residuos de Col	16
2.5	La Codigestión Anaerobia	18
2.5.1	Codigestión Anaerobia de Residuos Orgánicos Biodegradables	19
2.6	Descripción del Proceso de digestión anaerobia	20
2.6.1	Producción y Aplicación del Biogás	23
2.7	Cinética de Crecimiento Microbiano Anaerobio	23
2.7.1	Curva Normal de Crecimiento	24

Número	DESCRIPCIÓN	Pág.
2.8	Modelos de la Cinética Bacteriana	25
2.8.1	Determinación y Modelamiento de la Digestión Anaerobia	27
2.8.1.1	Balance de Materia	28
2.8.1.2	Tasa de Crecimiento	28
2.8.1.3	Decaimiento o muerte de los microorganismos	30
2.8.1.4	Crecimiento Neto	30
2.9	Parámetros Operacionales para el Proceso de Digestión	31
2.9.1	Temperatura	31
2.9.2	pH	32
2.9.3	Sólidos Totales y Volátiles	33
2.9.4	Relación Carbono/Nitrógeno	34
2.9.5	Nutrición Microbiana	35
2.9.6	Tiempo de Retención	35
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	37
3.1	Localización del Experimento	37
3.2	Ubicación del Experimento	37
3.3	Situación Geográfica y Climática	37
3.4	Materiales	38
3.4.1	Material Experimental	38
3.4.2	Materiales de Campo	38
3.4.3	Materiales de Laboratorio	38
3.4.4	Materiales de Oficina	39
3.4.5	Equipos	39
3.4.6	Recursos institucionales	40

Número	DESCRIPCIÓN	Pág.
3.4.7	Fuente de Información	40
3.5	Factores en Estudio	40
3.5.1	Tratamientos	41
3.5.2	Diseño Experimental	41
3.6	Características del Experimento	41
3.7	Metodología	42
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	46
4.1	Conteo Microbiana	46
4.2	Parámetros Utilizados	47
4.3	Cinética de Crecimiento Microbiano	52
4.4	Discusión de la Cinética Bacteriana	59
4.4.1	Análisis de Varianza	60
V	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
5.1	Conclusiones	72
5.2	Recomendaciones	74
VI	RESUMEN Y SUMMARY	75
6.1	Resumen	75
6.2	Summary	76
VII	BIBLIOGRAFÍA	77
	ANEXOS	85

ÍNDICE DE TABLAS

Número	DESCRIPCIÓN	Pág.
1	Proyecto Generación Residual Bolívar 2015	7
2	Caracterización de los Residuos Sólidos de Guaranda	8
3	Tipos de Biomasa y su Descripción	11
4	Características Físicas de la Biomasa Según su Origen	12
5	Modelos Matemáticos para la Cinética Bacteriana	27
6	Ubicación del Experimento	37
7	Parámetros Climáticos del Cantón Guaranda	37
8	Factores para Cuantificación de Biomasa Residual	40
9	Tratamientos para Cuantificación de Biomasa Residual	41
10	Características del Experimento y sus Cantidades	41
11	Promedio de pH	94
12	Promedio de DQO	95
13	Promedio de Sólidos Totales	96
14	Promedio de Sólidos Volátiles	97
15	Promedio de Metano	98
16	Promedio de Biogás Acumulado/g SV	99

ÍNDICE DE CUADROS

Número	DESCRIPCIÓN	Pág.
1	Análisis de Varianza de Sólidos Totales	60
2	Prueba de Medias Sólidos Totales	61
3	Análisis de Varianza Sólidos Volátiles	62
4	Pruebas de Medias Sólidos Volátiles	63
5	Análisis de Varianza pH	65
6	Prueba de Medias pH	66
7	Análisis de Varianza DQO	67
8	Análisis de Varianza del Metano	68
9	Prueba de Medias del Metano	69
10	Análisis de Varianza Conteo Microbiano	69
11	Prueba de Medias Conteo Microbiano	70

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Número	DESCRIPCIÓN	Pág.
1	UFC promedio (50% col-50% estiércol) temperatura de 30°C	46
2	Promedios de pH	47
3	Promedios de DQO	48
4	Promedio de Sólidos Totales	49
5	Promedio de Sólidos Volátiles	50
6	Promedios de Metano Acumulado/g SV	51
7	Promedios de Biogás Acumulado/g SV	52
8	Modelo de Monod para el sustrato	54
9	Modelo de Monod para la Biomasa	55
10	Modelo de Haldane para el sustrato	57
11	Modelo de Haldane para la Biomasa	58
12	Gráficas de Medias Sólidos Totales	61
13	Gráfica de Interacción Sólidos Totales	62
14	Gráfico de Medias Sólidos Volátiles	64
15	Gráfico de Interacción Sólidos Volátiles	64
16	Gráfico de Medias pH	66
17	Gráfico de Interacción pH	67
18	Gráfico de Interacción Conteo Microbiano	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Número	DESCRIPCIÓN	Pág.
1	Col de Repollo	17
2	Proceso de Digestión Anaerobia	21
3	Fases de Crecimiento Bacteriano	25
4	Modelo del Digestor Discontinuo	43
5	Reactor en Funcionamiento	44

ÍNDICE DE ANEXOS

Número	DESCRIPCIÓN	Pág.
1	Ubicación del experimento	86
2	Fotografías del Procedimiento	87
3	Glosario de términos	92
4	Tablas de Datos	94

I. INTRODUCCIÓN

La generación de residuos sólidos es consecuencia de la actividad humana, crece en proporción del incremento de la población, el nivel de urbanización de las ciudades y la industrialización; se asocia la cantidad de residuos principalmente con el estatus económico de la sociedad (Ajay, *et al* 2011).

El tratamiento y disposición final de los residuos es considerado un problema, acentuándose en ciudades donde no existe una cultura de clasificación, situación que dificulta su manejo posterior. Es necesario tomar en cuenta que el correcto manejo de residuos conlleva costos económicos e inversión tecnológica, para asegurar la eliminación de futuros focos de contaminación que afecten los ríos, y disminuyan la emisión de gases indeseables al ambiente; de esta manera los gobiernos promueven el proceso de la digestión anaerobia de residuos orgánicos y de estiércol, como una alternativa válida para la reducción de las emisiones de gas de efecto invernadero y olores desagradables, produciendo energía renovable como metano y mejorando las propiedades como fertilizante (Masse, *et al* 2011).

La codigestión anaerobia es el proceso en el cual microorganismos descomponen material biodegradable en ausencia de oxígeno; siendo este proceso una forma de bioconversión. Este proceso tiene tres ventajas particulares: los desechos orgánicos son transformados en biogás cuyo principal componente es metano, se reduce la masa del desperdicio y el efluente del digestor, llamado digestato, puede ser utilizado como fertilizante (Chiriboga, 2010).

La digestión anaerobia de la materia orgánica produce gases que representan del 50 al 65% del total de la materia, el cual puede ser utilizado como una fuente directa de energía. El resto se conserva en forma de lodo que tiene altos contenidos de nitrógeno, fósforo y potasio, materiales esenciales para el crecimiento de las plantas

y, por lo tanto, puede ser utilizado como fertilizante después de ser sometido a un proceso de estabilización, es decir el digestato es un valioso abono orgánico (Almeida, *et al* 2010).

En el Ecuador la biomasa está incrementando su atención a nivel estatal, investigativo y académico. La energía de la biomasa se encuentra en cada enlace químico formado mediante los procesos químicos. Existe disponibilidad de biomasa residual, en forma especial de los desechos en los mercados municipales; para el caso de la ciudad de Guaranda; son escasos los estudios que se han realizado sobre la utilización de la biomasa residual, y más aún sobre los distintos procesos físicos, químicos y biológicos para su aprovechamiento (PECG 2010).

La generación de residuos varía dependiendo de las ciudades, la densidad poblacional, el nivel de industrialización, el nivel de educación sobre manejo de desechos; lo que dificulta su manejo, reutilización y disposición final. El material orgánico generado, se considera como materia prima para utilizar en procesos de fermentación anaerobia en la obtención de biogás que contiene metano, hidrógeno, y digestato que se utiliza como biofertilizante de acuerdo al Gobierno Autónomo Descentralizado de Guaranda (GADG, 2013).

La investigación tiene mucha relevancia en la codigestión anaerobia la cual nos permite disminuir los residuos sólidos que contaminan los ríos produciendo malos olores al ambiente y el deterioro de la tierra (Sakar *et al* 2009). La reducción de las emisiones de metano, evitando la espontaneidad al ambiente así como el aprovechamiento de los residuos orgánicos los cuales produce energía renovable que puede ser utilizada como fuente de energía (Pagés *et al*, 2011). Por otra parte los subproductos ya sean estos sólidos o líquidos se los puede dar su uso como fertilizantes (Lomas *et al* 1999).

El propósito de la investigación es dar un soporte técnico a futuros proyectos y estudios de la codigestión anaerobia porque obtendremos datos que nos permitan buscar el mejor tratamiento en el proceso y disminuir la contaminación del medio ambiente, los residuos ganaderos contienen mayores cantidades de macro y micro nutrientes reduciendo la materia orgánica biodegradable, mientras que los residuos alimenticios tienen mayor relación carbono nitrógeno que ayudan a lograr un mejor proceso (Flotats, *et al* 2011).

La codigestión anaerobia de residuos es una actividad desarrollada en lo referente a lo tecnológico y además tiene una gran importancia en la industria puesto que se cuenta con residuos agrícolas, residuos de origen animal, residuos agroindustriales y residuos forestales, generando un potencial en biomasa para ser transformado en biogás mediante el proceso de digestión anaeróbica. Por ello el proyecto de investigación propuesto tiene como finalidad generar datos actualizados sobre la cinética bacteriana de la codigestión anaerobia para la producción de biogás empleando los residuos de ganado vacuno como el estiércol debido a que tiene altos contenidos de bacterias metanogénicas y residuos agrícolas como la col que nos permite obtener una acidificación rápida, se utiliza como alimento para las bacterias en los procesos de digestión anaerobia la cual ayuda a la obtención de metano debido a que es rico en fuentes de carbono en una composición que va del 28 al 30% y del 1% al 3 % de nitrógeno, siendo la relación C:N óptima para la investigación; con la realización de este estudio se ha buscado facilitar la disponibilidad de una información para la ciudad de Guaranda, en la que el potencial de sus residuos es alto y no son aprovechados, de esta manera aportar con datos científicos que puedan servir de base para la contribución al proceso de cambio de la matriz productiva, conducente hacia una seguridad energética más sustentable/sostenible, lo que fortalecerá los lineamientos del Plan Nacional de Buen Vivir (2015).

Como hipótesis se planteó que la cinética bacteriana en el proceso de codigestión anaerobia a partir de la biomasa residual de col se ajusta al modelo de Monod.

El objetivo general de la investigación fue el determinar la cinética bacteriana en el proceso de la codigestión anaerobia a partir de la biomasa residual de la col; y como objetivos específicos:

- Cuantificar periódicamente la población bacteriana durante la fase de crecimiento logarítmica.
- Establecer parámetros de medición de la cinética bacteriana a partir de biomasa residual de la col.
- Modelar matemáticamente el proceso de la cinética bacteriana.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. GENERACIÓN DE RESIDUOS EN EL ECUADOR

En Ecuador se producen semanalmente 58.829 toneladas de residuos sólidos, de estas, únicamente el 20% se dispone en condiciones adecuadas, el porcentaje restante se distribuye entre vertederos a cielo abierto, botaderos controlados, ríos e incineradores. (Solíz, 2015). En Ecuador, cada persona produce 0,75 kilos de residuos promedio al día, lo que suma un total de 4'139.512 Tm/año, en promedio. Asimismo, se conoce que cada bolsa de basura contiene un 61,4% de residuos orgánicos, un 11% de plásticos, un 9,4% de papel y cartón, un 2,6% de vidrio, un 2,2% de chatarra y un 13% de otros desechos según el Ministerio del Ambiente (MAE, 2015).

En Ecuador, a nivel cantonal, encontramos que el promedio nacional al 2012 era de 0,81 kg/hab/día, siendo el valor mínimo 0,1 kg/hab/día y el máximo 2,21 kg/hab/día. De las 61.117 toneladas que se producen semanalmente en el país, el 25% de los cantones (52 cantones que se ubican sobre el percentil 75) es responsable de la producción de 56.206,80 ton/semana, equivalente al 91,97% del total de residuos, con un índice de producción de residuos per cápita de 0,95 kg/hab/día. Por el contrario, el 75% de cantones restantes, genera únicamente 4.910,43 ton/semana equivalente al 8,03% y su índice per cápita es de 0,31 kg/hab/día (Solíz, 2015).

2.1.1. GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN LA PROVINCIA BOLÍVAR

La Provincia Bolívar está en el centro oeste del Ecuador. El Gobierno del Cantón Guaranda está ejecutando algunos proyectos con el propósito de mejorar la calidad ambiental de su cantón, Guaranda fue uno de los cantones beneficiados con este

programa y lo que se logró fue realizar el “Plan Ambiental participativo del Cantón Guaranda”, el cual permitió desde una perspectiva ambiental determinar la situación del cantón, con una descripción técnica y científica. Los desechos orgánicos degradables y utilizables provenientes de unos de los mercados municipales son llevados al vivero municipal donde se les da el respectivo tratamiento para ser aprovechados como abono orgánico. El resto de los residuos se trasladan al botadero de Curgua de acuerdo al Estudio de Impacto Ambiental del nuevo relleno sanitario del Cantón Guaranda 2013. Los residuos que se encuentran en los mercados en mayor cantidad son los residuos de col los cuales han servido para realizar dicho proyecto.

Actualmente, la generación de residuos en el país es de 4,06 millones de toneladas métricas al año y una generación per cápita de 0,74 Kg. Se estima que para el año 2017 el país generará 5,4 millones de toneladas métricas anuales, por lo que se requiere de un manejo integral planificado de los residuos. Los desechos se disponen en un 20% en rellenos sanitarios y el 80% en botaderos.

En la tabla 1. se presenta la Generación de Residuos

Tabla 1. Proyecto Generación Residuos Bolívar 2015

CANTONES	POBLACIÓN	GENERACIÓN RESIDUOS ORGÁNICOS/ DÍA (Kilogramos)	Ton/ Día	Ton/ Mes	Ton/ año	GENERACIÓN RESIDUOS ORGÁNICOS (Ton)
CALUMA	13.129,00	4.595	5	138	1.654	1,84
CHILLANES	17.406,00	6.092	6	183	2.193	2,44
ECHEANDÍA	12.114,00	4.240	4	127	1.526	1,70
GUARANDA	91.877,00	32.157	32	965	11.577	12,86
LAS NAVES	6.092,00	2.132	2	64	768	0,85
CHIMBO	15.779,00	5.523	6	166	1.988	2,21
SAN MIGUEL	27.244,00	9.535	10	286	3.433	3,81
TOTAL	183.641,00	64.274,35	64,27	1.928,23	23.138,77	25,71

Fuente: Juan Gaibor 2015

2.1.2. SITUACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS EN LA CIUDAD DE GUARANDA

El actual sistema de recolección de residuos sólidos en la ciudad de Guaranda está lejos de ser autosustentable y de tener los márgenes de calidad mínimos, puesto que existen varios factores que afectan de manera negativa a esta importante actividad, podemos citar algunos claros ejemplos de ineffectividad de este sistema. Como habíamos descrito con anterioridad en el presente estudio, las personas encargadas de esta labor no poseen ninguna garantía al no cumplir normas de seguridad básica como son el uso de equipos de protección personal y al realizar su trabajo en horas de poca visibilidad están expuestos a estar involucrados en accidentes de tránsito.

Las diferentes categorías y porcentajes se pueden observar en la tabla 2.

Tabla 2. Caracterización de los residuos sólidos de Guaranda

Componente	Muestra 1(Kg)	Muestra 2(Kg)	Muestra 3(Kg)	Muestra 4(Kg)	Muestra 5(Kg)	Muestra 6(Kg)	Promedio (%)
TOTAL PAPEL	27	59.5	62.5	26	42.5	67	21.86
Cartón	22	42.5	24	13	30	22	
Periódicos			4				
Papel de oficina			34.5				
Papel mezclado	5	17		13	12.5	45	
Resto							
TOTAL VIDRIO	0	2	9	2	5.5	5	1.81
Botellas claras		1	9		5.5	5	
Botellas de color				2			
Vidrio plano							
Resto		1					
TOTAL METAL	16	5	4	13	12	5	4.23
Ferrosos	16	5	4	13	7	2	
No Ferrosos					5	3	
Lavadoras							
Resto							
TOTAL PLASTICO	44	28.5	31	35	36.5	15	14.60
PET	28	12	18	23	12	10	
PVC							
Duro	16	3	6	12	11.5	3	
Funda y similares		13.5	7		12	2	
Caucho							
Resto							
TOTAL ORGÁNICOS	173.5	74	108	70	98.5	88	47.02
Comida	124	43	81	34	44.5	80	
Jardín/áreas verdes	9	12.5	22	14	41	8	
Estiércol	30						
Madera							
Textiles	10.5	18.5	5	22	13		

TOTAL INORGANICOS	0	6	12	0	0	0	1.38
Otros inorgánicos		6	12				
Inertes							
TOTAL RESTO	0	46	13	13	38.5	8	9.10
Resto		46	13	13	38.5	8	

Fuente: Earthgreen S.A (2011)

Los datos en la Tabla 2, indican que uno de los componentes más importantes en los residuos orgánicos de Guaranda incluye materia orgánica (47.02%) rápidamente biodegradable sobre todo los residuos de comida, de los cuales el (5,23%) corresponde a los residuos de col, existiendo también demuestran que el resto (una mezcla de papel higiénico, pañales desechables y toallas sanitarias) llega a un nivel de aproximadamente 9.10%. El total de materiales de plástico suma a 14.60%. Los materiales reciclables (papel, plástico, vidrio y metales) dan un total de 43.88%. Si se toma en cuenta que en un sistema integral de manejo de residuos incluye un buen programa de reciclaje y de compostaje, los datos en la tabla indican que el resto es de aproximadamente el 10.48% de los residuos generados (Earthgreen, 2010).

2.2. CONCEPTO DE BIOMASA

El término biomasa, en sentido amplio, se refiere a la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. Este término suele emplear para hacer referencia a maderas, cultivos energéticos, algas marinas, residuos de actividades agrícolas y procesos forestales, así como a determinados residuos animales, industriales y humanos. Se trata pues, de energía solar retenida en forma química en plantas y animales, lo que le otorga a este recurso notable valía y versatilidad (Vargas, 2012).

La biomasa es producida por organismos vivos, principalmente a través de la actividad fotosintética de las plantas, pero también es producida por los animales, los insectos, los microorganismos, etc. Está compuesta esencialmente de polímeros complejos de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y de elementos inorgánicos (Damien, 2010).

La biomasa residual procedente de la agricultura ecuatoriana constituye un recurso potencialmente aprovechable como fuente de biocombustibles y otros subproductos. Sin embargo, no ha sido utilizado hasta ahora, debido a que presenta diferentes dificultades técnicas, así como por la carencia de suficiente información sobre la cantidad y calidad para su transformación. Su gestión energética podría suponer un ingreso adicional para los agricultores, que por un lado comercializarían la cosecha alimentaria, y por otro los residuos como fuente de energía, materia prima, o subproductos elaborados, al tiempo de rentabilizar las operaciones de mantenimiento dentro de una gestión sostenible. Esto fortalecerá los lineamientos del Plan Nacional de Buen Vivir (Rosero, Chilibinga, 2011).

2.2.1. TIPOS DE BIOMASA

Tabla 3. Tipos de biomasa y su descripción

Biomasa natural	<p>La biomasa natural es la que se produce en ecosistemas naturales. La explotación intensiva de este recurso no es compatible con la protección del medio ambiente, aunque sea una de las principales fuentes energéticas en los países subdesarrollados.</p> <p>La biomasa natural se produce sin la intervención del hombre para potenciarla o para modificarla. Se trata fundamentalmente de residuos forestales:</p> <p>Derivados de limpieza de bosques y de restos de plantaciones</p> <p>Leñas y ramas</p> <p>Coníferas</p> <p>Fronosas</p>
Biomasa residual	<p>La biomasa residual es la que generada en las actividades humanas que utilizan materia orgánica. Su eliminación en muchos casos supone un problema. Este tipo de biomasa tiene asociadas unas ventajas en su utilización:</p> <p>Reduce la contaminación y riesgos de incendios.</p> <p>Reduce el espacio en vertederos.</p> <p>Los costes de producción pueden ser bajos.</p> <p>Los costes de transporte pueden ser bajos.</p> <p>Evita emisiones de CO₂.</p> <p>Genera puestos de trabajo.</p> <p>Contribuye al desarrollo rural.</p> <p>La biomasa residual se divide a su vez en una serie de categorías que se estudian a continuación.</p>
Excedentes agrícolas	<p>Los excedentes agrícolas que no sean empleados en la alimentación humana pueden ser considerados utilizados biomasa con fines energéticos. Este uso de productos agrícolas utilizados en la cadena de alimentación humana ha provocado una mala fama injustificada del uso de la biomasa con fines energéticos, al haberse acusado a este uso de una subida del coste de determinados productos agrícolas que son la base de la alimentación en muchos países del tercer mundo y en vías de desarrollo.</p> <p>Estos excedentes agrícolas pueden ser utilizados tanto como combustible en plantas de generación eléctrica como transformados en biocombustibles.</p>
Cultivos energéticos	<p>Los cultivos energéticos son cultivos específicos dedicados exclusivamente a la producción de energía. A diferencia de los agrícolas tradicionales, tienen como características principales su gran productividad de biomasa y su elevada rusticidad, expresada en características tales como resistencia a la sequía, a las enfermedades, vigor, precocidad de crecimiento, capacidad de rebrote y adaptación a terrenos marginales.</p> <p>Entre los cultivos energéticos se pueden incluir cultivos tradicionales (cereales, caña de azúcar, semillas oleaginosas) y otros no convencionales (pataca, sorgo dulce) que están siendo objeto de numerosos estudios para determinar sus necesidades de cultivo.</p>

Fuente: (Garrido, 2009-2012)

2.2.2. CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA RESIDUAL

Las características físicas (Tabla 4) de la biomasa dependen del tipo de residuo e influyen en el proceso de conversión energética que se desea utilizar, por lo tanto es necesario conocer la composición del residuo con el fin de seleccionar una tecnología para su aprovechamiento energético. Los residuos pecuarios debido a su alto contenido de humedad se utilizan en procesos de biodigestión con producción de gas, cuya composición presenta altos contenidos de metano.

Tabla 4. Características físicas de la biomasa según su origen.

FUENTE GENERADORA DE BIOMASA	TIPO DE RESIDUO	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS
RESIDUOS FORESTALES	Restos de aserrío: corteza, aserrín, astillas	Polvo sólido, H 30 -45%
	Restos de ebanistería: aserrín, trozos, astillas	Sólidos de baja humedad
	Restos de plantaciones: ramas, corteza, raíces	Sólidos, H>55%
RESIDUOS AGROPECUARIOS	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales	Sólido muy húmedo
	Cáscaras y polvo de granos secos	Polvo, H<25%
	Estiércol	Sólido muy Húmedo
	Tallos, hojas, cáscaras, maleza, pastura	Sólidos H>55%
RESIDUOS INDUSTRIALES	Pulpa y cáscara de frutas y vegetales	Sólido moderadamente húmedo
	Residuos de procesamiento de carne	Sólido muy húmedo
	Aguas de lavado de carnes y vegetales	Líquido
	Grasas y aceites vegetales	Líquido, gaseoso

Fuente: Atlas Bioenergético del Ecuador, 2014

2.2.3. CLASIFICACIÓN DE LA BIOMASA

La biomasa se clasifica de la siguiente manera:

- Biomasa natural: Biomasa producida en forma espontánea en los ecosistemas naturales, por ejemplo bosques.
- Biomasa residual: Los subproductos derivados de las actividades agrícolas, ganaderas, humanas y forestales. Pueden ser:
 - 1) Biomasa residual seca: Procedentes de recursos generados por actividad agrícola, forestal, industria agroalimentaria e industria maderera.
 - 2) Biomasa residual húmeda: Constituyen los vertederos biodegradables, tales como aguas residuales e industriales (Atlas Bioenergético del Ecuador, 2014)

2.3. SITUACIÓN ACTUAL DE LA BIOMASA EN ECUADOR

Según (García, *et al* 2013), Ecuador tiene un gran potencial agrícola, 7% del Producto interno bruto (PIB) y la Biomasa Residual Agrícola (BRA) obtenida de sus cultivos puede ser utilizada para obtener biocarburantes o para generar energía eléctrica a partir de codigestión.

En el Ecuador al igual que en el resto del mundo existe un creciente interés por el uso de las energías renovables, debido a su riqueza agrícola ha convencido su interés en el aprovechamiento de la (BRA) para la obtención de energía, la misma que presenta un futuro bastante prometedor. Actualmente en el país el estudio de la BRA es considerada como un desecho de la producción agrícola y en gran parte es llevada a

vertederos a cielo abierto o se deja sobre el suelo en las mismas parcelas para su degradación, por tanto su uso como fuente de energía eliminaría tanto el problema de su destrucción como la reducción de los malos olores a nivel nacional (U.S.EIA 2014).

El uso tradicional más importante de la biomasa se da en el sector rural doméstico que, según cálculos, cubre alrededor del 7% de las necesidades de energía primaria, principalmente para cocinar los alimentos. Se han aplicado nuevas tecnologías de la biomasa en programas rurales (como 65 instalaciones de biogás en el sector ganadero y programas de cocinas eficientes de biomasa). El Ministerio de Energía cuenta con la Dirección de Energías Renovables y Eficiencia Energética (DEREE), la cual entre sus objetivos tiene el desarrollo de Energías Alternas incluyendo Biomasa (Barriga, 2011).

Se han desarrollado instrumentos como el Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017 (PNBV), que establece en el objetivo número 7 la importancia de “Garantizar los derechos de la naturaleza y promover la sostenibilidad ambiental, territorial y global”, identificando en su lineamiento número 7.7 la prioridad de “Promover la eficiencia y una mayor participación de energías renovables sostenibles como medida de prevención de la contaminación ambiental” según la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (Senplades, 2013). También hay que señalar la Estrategia Nacional de Cambio Climático del Ecuador, como otro instrumento que trata de impulsar las energías renovables con la finalidad de disminuir las emisiones de gases. Ministerio del Ambiente (MAE, 2012).

2.4. RESIDUOS ORGÁNICOS BIODEGRADABLES

Los desechos agroindustriales comprenden un amplio conjunto de residuos orgánicos biodegradables, los cuales pueden ser clasificados en dos tipos generales: residuos de

frutas, verduras o plantas y residuos provenientes de animales (estiércoles y purines). Los desechos generados por el sector primario comprenden los residuos agrícolas ganaderos y forestales; los desechos generados por el sector secundario incluyen los residuos industriales (agroalimentarios, textiles, curtiembres, residuos del papel, etc.) y finalmente se encuentran los residuos producidos por el sector terciario de servicios dentro de los que se tienen dos grandes afluentes como la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y las aguas residuales domésticas (Klinger, *et al* 1991).

Tradicionalmente los residuos se han venido clasificando en función de su origen en los distintos sectores de producción: primarios o de producciones de materias primas, secundarias o industriales y terciarias o de servicios.

En el sector primario de producción se engloban los residuos ganaderos como estiércoles y o-purines, residuos agrícolas constituidos por restos de cosechas, de poda, etc. En el sector industrial se genera una gran variedad de residuos orgánicos, tanto sólidos como líquidos, tan variados como las propias industrias que los generan. De especial interés son los residuos de la industria agroalimentaria, que generan residuos vegetales y residuos líquidos procedentes del procesado de frutas y verduras, lodos y aguas residuales procedentes de la transformación y procesados de los alimentos. Por último el sector servicios genera los residuos domésticos (residuos sólidos urbanos), de limpieza y mantenimiento de jardines, de la depuración de aguas residuales urbanas, residuos municipales las fracciones de residuos biodegradables de cocinas y restaurantes, aceites y grasas comestibles, residuos de mercados de toda variedad de limpieza diaria, etc. (Joaquín, 2011)

2.4.1. RESIDUOS GANADEROS

La libre disposición de estiércol de ganado en el campo o su tratamiento inadecuado lo convierte en una fuente de contaminación ambiental y en un foco infeccioso para

seres humanos, puesto que propicia el desarrollo de vectores de enfermedades (Atlas *et al.*, 2002).

El estiércol de los rumiantes, particularmente vacuno, es muy útil para iniciar el proceso de fermentación, puesto que este tiene un contenido elevado de bacterias metanogénicas. Por el contrario, la producción de gas será menor que la obtenida por otro tipo de sustratos por dos factores: en primer lugar, los vacunos extraen mayor parte de nutrientes del forraje y dejan complejos lignosos del forraje más fibroso, que son muy resistentes a la degradación anaerobia, y en segundo lugar, porque realizan una digestión anaerobia parcial y reducen así el potencial de producción de la biomasa (Van Lier *et al.*, 2008).

(Brinkman, 1999) consiguió buenos resultados en la co-digestión de residuos ganaderos con varios tipos de residuos orgánicos industriales; señalando también que la co-digestión de residuos ganaderos y residuos orgánicos en sistemas de mezcla completa es una metodología exitosa tanto en rango termófilo como en el mesófilo.

Sin embargo, estos residuos son una buena base para la co-digestión porque generalmente presentan un contenido de agua más alto que la mayoría de los residuos industriales, una mayor capacidad tampón y aportan una amplia variedad de nutrientes necesarios para el crecimiento de los microorganismos anaerobios (Angelidaki, 1997).

2.4.2. RESIDUOS DE COL

La col nos permite obtener una acidificación rápida, se utiliza como alimentación para las bacterias en los procesos de digestión anaerobia la cual ayuda a obtener una buena producción de metano debido a que es rico en carbono en una composición que va del 28 al 30% y del 1% al 3 % de nitrógeno, también contiene, además de tener un alto contenido de fibra.

Es una de las especies de hortalizas más antiguas que se conoce, fue utilizada como alimento por las civilizaciones antiguas de Grecia y Roma.

Figura 1. Col de repollo



Fuente: fichas.infojardin.com 2012

fichas.infojardin.com, (2012), señala que la col de repollo es particularmente rica en carbohidratos y vitaminas, en especial el contenido de vitamina C varía de 35 a 60 mg y según la experiencia de algunos investigadores, las hojas exteriores del repollo son más ricas en este elemento que las interiores. Es importante el contenido de azufre que posee (0,03 –0,04%). La col o repollo, contiene 92% de agua, fibra, pocas calorías e hidratos de carbono.

Natureduca (2012), expresa que la col es una hortaliza sumamente apreciada y popular por sus hojas, tanto como alimento humano como para forraje. Se trata de verduras que permiten un cultivo escalonado a lo largo del año, dadas las numerosas formas que el hombre ha creado mediante técnicas de cultivo y selección, adaptables a diferentes condiciones climatológicas. Presentan además un gran rendimiento, son resistentes al almacenamiento y admiten varias formas de conservación. Botánicamente se describe la col como una planta herbácea anual, de hojas anchas y variadas formas según la variedad (circulares, lisas, rizadas), lobuladas en su base, pencas gruesas; pequeñas flores blancas o amarillas que se disponen en racimo en el extremo del tallo, y frutos en silicuas con semillas muy menudas.

2.5. LA CODIGESTIÓN ANAEROBIA

La codigestión anaerobia se utiliza para expresar la digestión anaerobia de dos o más sustratos de diferente origen (animal o vegetal). La fermentación anaeróbica es un proceso biológico en el cual la materia orgánica se degrada sin la presencia de oxígeno atmosférico para producir agua, dióxido de carbono y metano (Romero, 2000).

La digestión anaeróbica es un proceso de descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno (O₂), este proceso de descomposición realizado por los microorganismos anaeróbicos es favorecido por las condiciones herméticas que se dan en el interior del digester. Debido a esto se generan temperaturas altas en el interior del digester, indicando que la digestión o descomposición de la carga de materia orgánica se lleva a cabo por parte de las bacterias (Oyuela, 2010).

Este proceso biológico también conocido como respiración anaeróbica o fermentación anaeróbica se desarrolla naturalmente tanto en ecosistemas formados por la naturaleza como pantanos, lagos, manglares, lechos de los ríos; así como en ecosistemas formados por el hombre como los rellenos sanitarios, pozos sépticos, cultivos de arroz, lagunas anaeróbicas para la acumulación de residuos ganaderos y biodigestores (Watanabe *et al*, 2009).

A diferencia de otros procesos de producción de combustibles a partir de biomasa, la bioconversión que se lleva a cabo bajo condiciones anaeróbicas permite conservar todos los nutrientes inorgánicos en el lodo. Otra ventaja de este proceso es que se evita la acidificación de los suelos, lo que ocurre al utilizar el estiércol directamente en los suelos debido a su alto contenido de ácidos. Al ser sometido a la digestión anaerobia se remueven los ácidos del estiércol y se produce un fertilizante orgánico con lo que se evita que los suelos se acidifiquen (Monroy *et al*, 1990).

2.5.1. CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS ORGÁNICOS BIODEGRADABLES

La técnica de codigestión anaerobia permite el desarrollo eficiente del proceso debido al comportamiento sinérgico de los co-sustratos utilizados, los cuales compensan las falencias que cada uno presenta al realizar el proceso por separado (Nordberg *et al* 2005).

La codigestión de residuos ganaderos y residuos orgánicos biodegradables ha presentado excelentes resultados tanto en el rango termófilo como en el mesófilo, la combinación eficiente de diferentes tipos de desechos orgánicos biodegradables puede incrementar la producción de biogás, además de incrementar el valor fertilizante del fango digerido por la conservación del contenido de nutrientes (Álvarez *et al*, 2009). Adicionalmente la codigestión anaerobia puede reducir el efecto de compuestos que resultan tóxicos e inhibitorios sobre el proceso.

La codigestión anaerobia ofrece potenciales beneficios sobre el tratamiento y la utilización de residuos orgánicos biodegradables, en la literatura se encuentran varios estudios que resaltan las ventajas del proceso de codigestión anaerobia de los desechos bovinos, residuos agroindustriales, residuos de frutas y verduras (El Mashad *et al*, 2010).

Dentro de estas ventajas se encuentra el aumento en la producción de metano, el cual suele atribuirse al aumento en la concentración de sólidos orgánicos presentes en el reactor o la satisfacción del requerimiento de algún nutriente específico necesario para el desarrollo de las poblaciones de microorganismos (Callaghan *et al*, 1999). Por su parte la codigestión de los desechos con algún otro residuo orgánico biodegradable de origen agroindustrial como el estiércol bovino permite superar condiciones

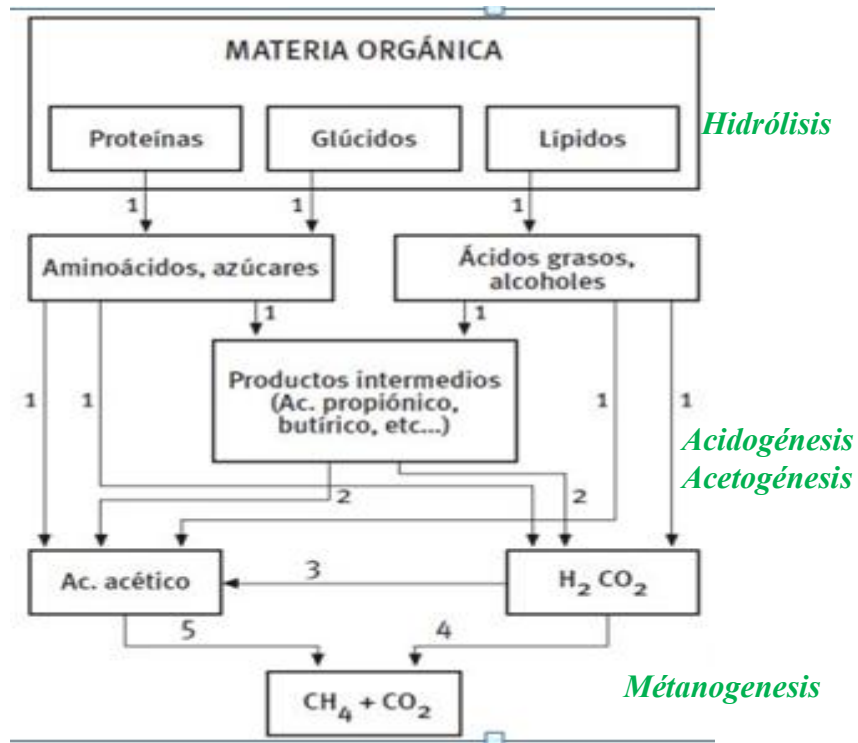
inhibitorias del proceso como la acidificación total del sustrato, evidente durante la digestión anaerobia del residuo (Kaparaju 2006).

A continuación se describen los detalles del proceso de digestión anaerobia, los modos de operación y finalmente los parámetros operacionales bajo los cuales se lleva a cabo este proceso.

2.6. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia de desechos orgánicos se lleva a cabo en cuatro fases como se observa en la Figura 2, en primer lugar ocurre la hidrólisis de los constituyentes complejos de la materia orgánica biodegradable, son desintegrados en moléculas más simples como los carbohidratos (polisacáridos), las proteínas y los lípidos, los cuales posteriormente sirven como materia prima para el desarrollo de los procesos subsecuentes. Seguidamente ocurre la fermentación (acidogénesis) de los metabolitos generados durante la hidrólisis; como producto de la fermentación se obtienen los ácidos grasos volátiles y dióxido de carbono, los cuales son transformados posteriormente en acetato (acetogénesis) y finalmente intervienen las bacterias metanogénicas que utilizan el ion acetato y el H₂ para obtener el metano y el CO₂ durante la fase metanogénica del proceso de digestión anaeróbica (Batstone *et al*, 2002).

Figura 2. Proceso de digestión anaerobia



Fuente: (Flotats et al. 1997).

La composición química de los desechos orgánicos es principalmente carbohidratos, lípidos y proteínas que se presentan como polímeros, o cadenas estructurales grandes. Los carbohidratos se presentan como polisacáridos, celulosa y almidón. Debido al contenido de oxígeno en los carbohidratos, este actúa como aceptor de electrones. Así una población de carbohidrato es oxidada en CO₂ y ácidos grasos. Los polisacáridos son hidrolizados por enzimas extracelulares, excretadas por bacterias, en monosacáridos que son principalmente glucosa, algo de fructosa y manosa. A la hidrólisis se la considera parte esencial de la digestión ya que la misma puede limitar el proceso anaerobio, razón por la cual es necesario que exista una población grande de microorganismos, un sustrato orgánico concentrado y una temperatura uniforme para la digestión (Romero 2000).

En el siguiente paso, en la acetogénesis, los monosacáridos son transformados en ácidos orgánicos y en alcoholes. Esta etapa es una transformación del material orgánico complejo en materia más simple. Los ácidos formados con mayor presencia son el ácido acético y el butírico, siendo el ácido acético el más importante. Se ha demostrado que el 72% de metano producido proviene del ácido acético y un 13% proviene del ácido butírico. El restante 15% se forma partir de hidrógeno y dióxido de carbono proveniente de la reducción del metanol y de la degradación de otros compuestos intermedios (Monroy 1990).

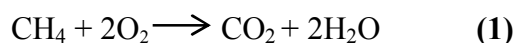
Las cadenas largas de ácidos grasos pueden ser fermentadas por β -oxidación. Esta fermentación requiere la remoción de un fragmento de dos carbonos del final de la cadena que se encuentra lejos del grupo carboxilo. Posteriormente, ocurre la conversión de este fragmento en un ión acetato, que luego será fermentado por las bacterias metanogénicas a dióxido de carbono y metano. El hidrógeno que es producido en la β -oxidación puede ser combinado con dióxido de carbono para formar más metano. El metano es el producto final del proceso bacteriano bajo condiciones anaerobias de acuerdo a las reacciones descritas anteriormente (Monroy *et al*, 1990).

Las bacterias metanogénicas son de crecimiento lento y por ello es necesario tener un tiempo de residencia o retención prolongado. Existe un rango de 2 a 20 días que deben permanecer las bacterias dentro de un sistema y no deben ser removidas para que puedan producir metano. Se considera que la fermentación metanogénica es el paso limitante o el paso que controla el proceso de digestión, razón por la cual es necesario optimizar las condiciones para que la metanogénesis se lleve a cabo adecuadamente (Romero 2000).

2.6.1 PRODUCCIÓN Y APLICACIÓN DEL BIOGÁS

En el proceso anaerobio la producción de metano está en función de la cantidad de materia orgánica disponible para la degradación anaerobia. El metano es poco soluble de manera que no es probable que existan pérdidas por solubilización del gas en la fase líquida. El Metano (CH₄), el Dióxido de Carbono (CO₂) y el Amoníaco (NH₃) son los gases producidos en la biodigestión y constituyen entre un 95% y un 98% del gas total producido. El resto de gases producidos son el Ácido Sulhídrico H₂S y el Hidrógeno (H₂).

La combustión de metano requiere de dos moles de oxígeno para ser transformado completamente en CO₂ de acuerdo a la siguiente reacción:



La degradación bacteriana de materia orgánica bajo condiciones anaerobias produce una mezcla gaseosa conocida como biogás que tiene aproximadamente un 50% a 60% de metano, y un 30% a 40% de dióxido de carbono. Puede contener también trazas de otros gases como sulfuro de hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, hidrógeno y monóxido de carbono.

2.7. CINÉTICA DE CRECIMIENTO MICROBIANO ANAEROBIO

La palabra “crecimiento” es el incremento del número de células por unidad de tiempo de una población microbiana. Si un microorganismo es multinucleado, no se acompañan de divisiones celulares, el crecimiento produce un incremento de tamaño por el número de células. El crecimiento ocasiona un aumento del número de células cuando los microorganismos se multiplican por procesos como gemación o fisión binaria. En este caso las células individuales se agrandan y dividen para originar dos células hijas de un tamaño aproximadamente igual (Prescott *et al*, 1999).

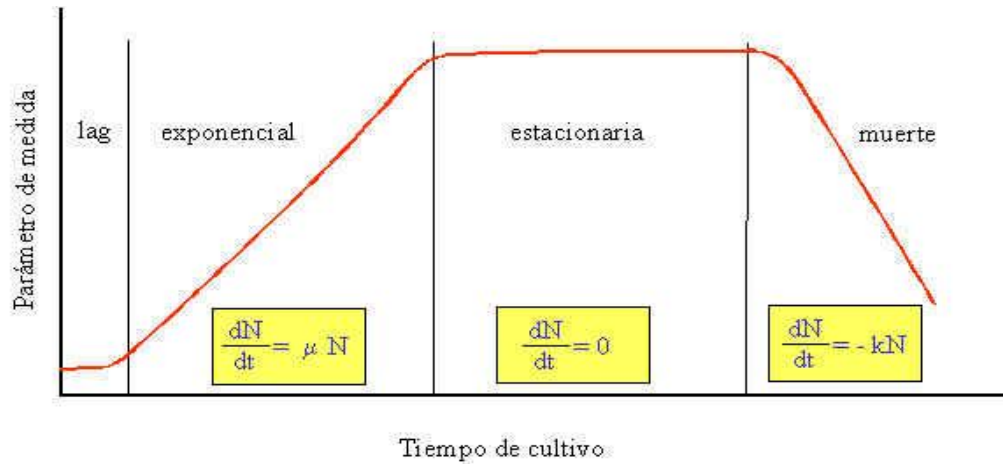
La microbiología predictiva está relacionada con la compleja dinámica del comportamiento de la población microbiana, tal como fue observada por Monod. “El crecimiento de los cultivos bacterianos, a pesar de la inmensa complejidad del fenómeno, generalmente obedece a leyes relativamente sencillas, las cuales hacen posible definir ciertas características cuantitativas del ciclo del crecimiento, esencialmente las tres constantes del crecimiento: crecimiento total, tasa del crecimiento exponencial y crecimiento latente. Estas definiciones no son puramente arbitrarias y corresponden a elementos fisiológicamente distintos del ciclo de crecimiento” (McMeekin *et al*, 2002).

2.7.1. CURVA NORMAL DE CRECIMIENTO

La curva de crecimiento de un cultivo microbiano (Figura 3) puede ser subdividida en cuatro partes distintas denominadas fase de latencia, fase exponencial, fase estacionaria y fase de muerte.

La **fase de latencia**, es el período de ajuste que las células experimentan al ser transferidas de un medio al otro antes de iniciar su crecimiento, la **fase exponencial** o logarítmica es aquella durante la cual los microorganismos crecen y se dividen hasta el nivel máximo posible, la **fase estacionaria** es resultado del agotamiento de los nutrientes disponibles que tienen como consecuencia la disminución de la velocidad del crecimiento y la *fase de muerte* es consecuencia del agotamiento de las reservas celulares de energía (Prescott *et al*, 1999).

Figura 3. Fases de Crecimiento Bacteriano



La biomasa crece y se sustenta utilizando los sustratos primarios generadores de electrones y energía, que son sus donantes y aceptores de electrones. La conexión entre la biomasa activa (el catalizador) y los sustratos primarios es el factor más fundamental para comprender y explotar sistemas microbianos para el control de contaminación (Bruce *et al*, 2001).

2.8. MODELOS DE LA CINÉTICA BACTERIANA

La relación más frecuentemente usada para representar la cinética de crecimiento bacteriana es la llamada *ecuación de Monod*, su trabajo original relacionaba la tasa específica de crecimiento de bacterias de rápido crecimiento con la concentración de un sustrato limitador del crecimiento donante de electrones. Ecuación 2:

$$\mu_{sin} = \left(\frac{1}{X_a} \cdot \frac{dX_a}{dt} \right) sin = \hat{\mu} \frac{S}{K+S} \quad (2)$$

En la que:

μ_{sin} = Tasa de crecimiento específico debida a síntesis.

X_a = Concentración de biomasa activa.

t = Tiempo.

S = Concentración del sustrato limitador del crecimiento.

$\hat{\mu}$ = Máxima tasa de crecimiento específico.

K = Concentración mitad de máximo crecimiento.

Esta ecuación es la representación matemática adecuada para una transición suave desde una relación de primer orden (en S) a baja concentración a una relación de orden cero (en S) a alta concentración. La ecuación de Monod se denomina algunas veces función de saturación, debido a que la tasa de crecimiento se satura a valores grandes de S, es muy empírica, encuentra amplia aplicación en sistemas microbianos. La cinética de crecimiento microbiano constituye una de las más utilizadas por la ingeniería alimentaria y la biotecnología, por lo tanto, es menester conocer los diferentes mecanismos de crecimiento, así como, la forma de cuantificación de los mismos (Bruce E. et al, 2001).

A partir de la ecuación de Monod podemos expresar la ecuación 3:

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S}{K_m + S + K_1 S^2} \quad (3)$$

Donde:

μ_{\max} = Tasa máxima de crecimiento específico.

K_m = Constante de media velocidad.

S = Concentración del sustrato.

K = Constante de saturación.

En la digestión anaerobia muchos factores inhiben el proceso, especialmente la etapa metanogénesis. La expresión matemática más utilizada que considera cinética de inhibición es la ecuación de Haldane, introducida por Andrews (1969).

Entre los principales modelos más conocidos se muestran en la tabla 5:

Tabla 5. Modelos Matemáticos para la Cinética Bacteriana

<i>NOMBRE MODELO</i>	<i>MODELO DE ECUACIÓN</i>
<i>Monod</i>	$\mu = \mu_{max} \frac{S}{K_m + S}$
<i>Haldane</i>	$\mu = \mu_{max} \frac{S}{K_m + S + K_1 S^2}$
<i>Moser</i>	$\mu = \mu_{max} \frac{S^n}{K_m + S^n}$
<i>Teissier</i>	$\mu = \mu_{max} \left(1 - \exp\left(\frac{-S}{K_m}\right) \right)$
<i>Hinshelwood</i>	$\mu = \mu_{max} \left(\frac{S}{K_m + S} \right) (1 - K_p P)$

2.8.1. DETERMINACIÓN Y MODELAMIENTO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

Se ha utilizado el modelo para la simulación del proceso de digestión anaeróbica desarrollado bajo condiciones estables de operación; mientras que algunos autores han presentado aplicaciones experimentales y el modelamiento de parámetros distribuidos para sistemas de tratamiento en modo continuo bajo condiciones transitorias (Mladenovska, Z., et al 2003). Adicionalmente se han desarrollado

extensiones del modelo con el objetivo de simular el comportamiento del proceso de digestión anaeróbica para la determinación de parámetros óptimos del tratamiento de diversos tipos de residuos orgánicos biodegradables (Rodríguez 2010). A continuación se describen brevemente los conceptos fundamentales que integran el modelo.

2.8.1.1. Balance de materia

El balance de materia es uno de los elementos conceptuales más importantes en el desarrollo del modelo y forma la base de cualquier proceso de simulación o modelamiento. Mediante las ecuaciones generales de balance de materia se pueden describir los subprocesos de consumo o generación de un material en particular dentro de los límites de un sistema definido. Cada una de estas especies (químicas o biológicas) sobre las cuales se desarrolla la ecuación de balance de masa constituye una de las variables de estado del modelo. (Khanal 2008).

2.8.1.2. Tasa de crecimiento

La razón de crecimiento global de una población microbiana puede ser expresada como se ilustra en la ecuación 4

$$\frac{dX}{dt} = \mu X \quad (4)$$

Donde:

X = Concentración de microorganismos para un instante dado.

μ = Tasa específica de crecimiento de los microorganismos.

Como se observa en la ecuación 5, la tasa de crecimiento es función del producto entre la concentración de los microorganismos en un momento dado y la tasa de crecimiento específica. Similarmente existe una función que relaciona la tasa de crecimiento específica de un grupo de microorganismos respecto a la concentración del sustrato que consumen:

$$\mu = \mu_{max} \frac{S}{K_s + S} \quad (5)$$

Donde:

μ_{max} = Tasa máxima de crecimiento específico.

K_s = Constante de saturación para la concentración del sustrato.

S = Concentración del sustrato.

En general estas relaciones solo pueden ser aplicadas bajo condiciones en las que la biomasa microbiana se encuentre finamente dispersa, los nutrientes requeridos para el desarrollo de esta biomasa se encuentren presentes y no exista limitación para la difusión del sustrato hacia el interior de las células de los microorganismos. El parámetro K_s es el que determina la afinidad del grupo microbiano respecto al sustrato, en efecto cuando el valor de K_s es menor, mayor es la afinidad, es decir las bacterias continúan su crecimiento no obstante la baja concentración del sustrato. Combinando las ecuaciones 4 y 5 se obtiene una relación para el crecimiento de los microorganismos en función de la concentración del sustrato.

$$\frac{dX}{dt} = \mu_{max} \frac{S}{K_s + S} X \quad (6)$$

Donde:

μ_{max} = Tasa máxima de crecimiento específico.

K_s = Constante de saturación para la concentración del sustrato.

S = Concentración del sustrato.

X = Concentración de microorganismos para un instante dado.

t = Tiempo.

2.8.1.3. Decaimiento o muerte de los microorganismos

El crecimiento total microbiano ha terminado en este sentido la tasa de decaimiento puede ser expresada en función del coeficiente de respiración endógeno (K_{dec} [día⁻¹]) como a continuación se muestra:

$$\frac{dX_{dec}}{dt} = -K_{dec}X \quad (7)$$

Donde:

K_{dec} = Decaimiento o muerte de microorganismos.

X = Concentración de microorganismos para un instante dado.

t = Tiempo

2.8.1.4. Crecimiento neto

Combinando las contribuciones al crecimiento poblacional de los microorganismos, mediante el crecimiento total y el decaimiento, se establece la ecuación 8 que determina la razón neta de crecimiento de los microorganismos:

$$\frac{dX}{dt} = \mu_{max} \frac{S}{K_s + S} X - K_{dec}X \quad (8)$$

Donde:

μ_{max} = Tasa máxima de crecimiento específico.

K_s = Constante de saturación para la concentración del sustrato.

S = Concentración del sustrato.

X = Concentración de microorganismos para un instante dado.

t = Tiempo.

Kdec = Decaimiento o muerte de microorganismos.

2.9. PARÁMETROS OPERACIONALES PARA EL PROCESO DE DIGESTIÓN

Para que se realice una descomposición y digestión óptima en los biodigestores, se debe tener en cuenta una serie de factores los cuales son detallados a continuación:

2.9.1. TEMPERATURA

La temperatura es primordial para la producción de biogás según (Werner *et al*, 2010) el proceso de fermentación anaeróbica se da desde los 3 °C hasta los 70 °C. Este amplio rango de temperatura se generan en tres niveles: en el nivel uno se encuentran los Psicrófilos con temperaturas menores a los 20 °C, en el nivel dos los Mesófilos con temperaturas ente 30 °C y 40 °C, y en el nivel tres los Termófilos con temperaturas entre los 50 °C y 70 °C.

Por su parte (Shuler *et al*, 2002) mencionan que la temperatura es un factor muy importante ya que determina el crecimiento bacteriano durante el proceso de

fermentación. La cantidad de metano producido en la zona psicrófila es menor, comparado a las zonas mesófila y termófila, que son de gran interés para la producción comercial de metano.

El biodigestor debe permanecer preferentemente a una temperatura constante, de 35 ° C, que es la óptima para que las bacterias anaerobias vivan y realicen su trabajo eficientemente. Un proceso tendrá una duración aproximada de 20 a 60 días, dependiendo de la temperatura a la cual se trabaje, mientras más cerca de los 35°C, más rápida será la producción de biogás (Chamy *et al*, 2004).

2.9.2. pH

Cada grupo de microorganismos involucrados en la degradación anaeróbica tiene una región de pH óptima para su crecimiento, para los microorganismos acidogénicos el pH óptimo es alrededor de 6, para los microorganismos acidogénicos y metanogénicos el pH óptimo es alrededor de 7. En un proceso de tratamiento anaeróbico de una sola etapa el pH debería mantenerse próximo a la neutralidad dado que las bacterias acidogénicos también trabajan a pH cerca de la neutralidad y la etapa metanogénica es frecuentemente la etapa limitante (Álvarez *et al*, 2004).

El rango del valor del pH en la producción óptima de biogás se logra cuando el valor de pH está entre 6 y 7,2. En el período inicial de la fermentación, los microorganismos productores de ácido crecen rápidamente; pueden producir grandes cantidades de ácidos orgánicos, que no pueden ser consumidos por los microorganismos formadores de metano. El pH en el interior del digestor puede caer rápidamente. Esto inhibe o incluso detiene el proceso de la digestión o fermentación.

Esto puede ocurrir por una desincronización, ya que las bacterias acidogénicas pueden estar produciendo más ácido de lo que pueden consumir las bacterias

metanogénicas. Esto sucede cuando se suministra de manera muy rápida o excesiva la cantidad de sustrato (Chiriboga, 2010).

2.9.3. SÓLIDOS TOTALES Y VOLÁTILES

Sólidos totales es un término aplicado para todo el material que queda de residuo en un recipiente después de la evaporación de una muestra y del secado subsiguiente en un horno a una determinada temperatura (Eaton *et al*, 1995). Para llevar a cabo este análisis se pesa el crisol vacío, luego se pesa el crisol con la muestra y se lo coloca en la estufa a una temperatura de 105 °C durante veinte y cuatro horas. Se retira el crisol de la estufa, se espera que se equilibre el crisol a temperatura ambiente y se procede a pesarlo. El cálculo de los sólidos totales se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$TS = \frac{m_1 - m_0}{V} \times 100 \quad (12)$$

$$\frac{\text{mg TS}}{\text{L}}$$

Donde:

TS = Sólidos totales (mg / L)

m_1 = Peso residuo seco + crisol (mg)

m_0 = Peso crisol (mg)

V = volumen de la muestra (L)

Sólidos Volátiles es un término aplicado para el residuo de sólidos totales, suspendidos y disueltos, luego de haber sido sometidos a un proceso de calcinación en un tiempo específico a una determinada temperatura (Eaton *et al*, 1995). Una vez que se han pesado los crisoles para obtener el dato de sólidos totales se coloca el crisol en la mufla a una temperatura de 550 °C durante seis horas. Se retira los crisoles cuidadosamente, se los deja enfriar a temperatura ambiente y se pesa los

crisoles. El cálculo de los sólidos orgánicos totales se los obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$TS = \frac{m_2 - m_0}{V} \times 100 \quad (13)$$

$$\frac{\text{mg SV}}{\text{L}}$$

Donde:

SV = Sólidos Volátiles (mg / L).

m_2 = Peso residuo seco + crisol calcinado (mg).

m_0 = Peso crisol (mg).

2.9.4. RELACIÓN CARBONO/NITRÓGENO

Ostrem (2004) menciona que la relación C/N es una medida de las cantidades relativas de carbón orgánico y de nitrógeno presentes en la materia de base donde la relación depende del tipo de residuos que se integren al proceso de digestión anaeróbica. (Rodríguez 2010) reportó que las mezclas de materiales de fermentación con alto contenido de nitrógeno (por ejemplo estiércol de gallina) con material de fermentación con alto contenido de carbono (por ejemplo tamo de arroz) dan una elevada producción de gas.

La relación carbono nitrógeno es la fuente principal de alimento de las bacterias formadoras de metano. Una alta relación C/N retarda el proceso y una muy baja impide la descomposición, por lo que se considera que una relación de 30:1 es favorable para el desarrollo de los microorganismos (Soto y Muñoz, 2002), después del carbono el elemento más abundante en la célula es el nitrógeno.

2.9.5. NUTRICIÓN MICROBIANA

Consiste en suministrar a las células los ingredientes químicos, estos compuestos químicos son los nutrientes, no todos los nutrientes se precisan en grandes cantidades; mientras que otros llamados micronutrientes se requieren en menores cantidades y a la vez sólo en cantidades trazas (Madigan *et al*, 2002).

2.9.6. TIEMPO DE RETENCIÓN

Se le llama tiempo de retención al tiempo adecuado o cantidad de días necesarios para que se dé una digestión eficiente de la materia orgánica, el tiempo óptimo en un proceso de digestión es de 50 días, pero puede ser afectado por diferentes factores como la temperatura, el tipo de dilución usada y el contenido de sustancias inhibitoras. (Aliaga 2006). Es el tiempo que se mantiene la materia orgánica dentro del digestor, varía con los parámetros del proceso, tales como temperatura y composición de los residuos. Bajo condiciones mesófilicas el rango es de 15 a 30 días y en condiciones termófilicas es de 12 a 14 días (Monnet 2004).

(Castelar 2010) señala que mientras más largo es el tiempo de retención, más alto es el contenido de metano, y con esto el poder calorífico. Con tiempos de retención cortos el contenido de metano puede disminuir hasta en un 50%. Con un contenido de metano mucho menor del 50%, el biogás deja de ser inflamable. Define como el tiempo que el sustrato está sometido a la acción de los microorganismos en el reactor. Cabe indicar que este parámetro solo puede ser claramente definido en los sistemas discontinuos, donde el tiempo de retención coincide con el tiempo de permanencia del sustrato dentro del digestor. Una mayor temperatura implicará una disminución en los tiempos de retención requeridos y consecuentemente serán menores los volúmenes de reactor necesarios para digerir un determinado volumen de material. Con relación al tipo de sustrato, generalmente los materiales con mayor proporción de carbono retenido en moléculas resistentes como la celulosa

demandarán mayores tiempos de retención para ser totalmente digeridos (Castelar 2010).

Los análisis físico – químicos que se llevaron a cabo durante la experimentación sirven para dar un seguimiento a la degradación anaerobia. Los análisis efectuados son: demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y medición de pH.

La DQO corresponde al volumen de oxígeno requerido para oxidar la fracción orgánica de una muestra susceptible de oxidación al dicromato en medio ácido. Susceptibilidad se refiere a la capacidad o no de ser oxidado por el dicromato.

Sólidos totales es un término aplicado para todo el material que queda de residuo en un recipiente después de la evaporación de una muestra y del secado a una determinada temperatura, los sólidos volátiles es un término aplicado para el residuo de sólidos totales suspendidos y disueltos, luego de haber sido sometidos a un proceso de calcinación en un tiempo especificado a una determinada temperatura y la medida de pH indica la concentración de iones hidronio.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO

El presente trabajo de investigación se lo realizó en las instalaciones del Laboratorio de Suelos y Aguas de la Universidad Estatal de Bolívar.

3.2. UBICACIÓN DEL EXPERIMENTO

Tabla 6. Ubicación del experimento

UBICACIÓN	LOCALIDAD
Provincia	Bolívar
Cantón	Guaranda
Sector	Laguacoto I
Dirección	Km 0,5 vía Guaranda San Simón

Fuente: (Pullas D, 2015)

3.3. SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y CLIMÁTICA

Tabla 7. Parámetros Climáticos del Cantón Guaranda

PARÁMETRO	VALOR
Altitud	2445msnm
Latitud	01°34'15" Sur
Longitud	79°0'02"Oeste
Temperatura mínima	10°C
Temperatura media anual	14°C
Temperatura máxima	18°C
Humedad	74%

Fuente: (Estación Meteorológica. Universidad Estatal de Bolívar. Laguacoto II, 2014).

3.4. MATERIALES

3.4.1. Material Experimental

- Sustrato biomasa residual de la col
- Estiércol de ganado vacuno (inóculo)

3.4.2. Materiales de Campo

- Guantes
- Mascarillas
- Cofia
- Palas
- Jarras
- Baldes

3.4.3. Materiales de Laboratorio

- Kitasatos de 2000 ml
- Kitasatos de 500 ml
- Tampones de caucho
- Barrillas de agitación
- Gradillas pequeñas metálicas
- Probetas de 1000ml
- Soportes universales
- Aros de hierro
- Pinzas para cápsulas
- Cápsulas

- Desecador
- Espátulas
- Planchas de calentamiento
- Platos de aluminio
- Pipetas de 1ml
- Pipetas de 5ml
- Pipetas de 10ml
- Placas Petri film
- 1 Frasco de Agua peptonada
- 1 Frasco de Agar de recuento en placas (PCA)
- Vasos de precipitación 250 ml
- Alcohol
- Viales para la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

3.4.4. Materiales de Oficina

- Equipo de computo
- Filmadora
- Cámara fotográfica
- Esferográficos
- Hojas de papel bond
- Calculadora
- Memorias portátiles
- Libreta de apuntes

3.4.5. Equipos

- Espectrofotómetro HACH DR 2800

- Digestor HACH DRB 200
- Potenciómetro HACH HQ40d
- Balanza Analítica CITIZEN
- Mufla THERMOLYNE
- Estufa MEMMERT

3.4.6. Recursos institucionales

Laboratorio de Suelos y Aguas de la Universidad Estatal de Bolívar.

3.4.7. Fuente de información

- Biblioteca General de la Universidad Estatal de Bolívar.
- Biblioteca de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, Recursos Naturales y del Ambiente.
- Internet.

3.5. FACTOR EN ESTUDIO

A continuación se presenta las tablas de factores y tratamientos para la cuantificación de la biomasa residual.

Tabla 8. Factores para Cuantificación de biomasa residual

FACTOR	CODIGO	NIVELES
Concentración y naturaleza del sustrato	A	a1=EG =25% C=75% a2=EG =50 % C=50%
Temperatura	B	b1=Temperatura ambiente b2 = 30 ⁰ C

Fuente: (Pallas D. 2015).

EG = Estiércol de Ganado vacuno

C = Desechos de Col

3.5.1. TRATAMIENTOS

Tabla 9. Tratamientos para Cuantificación de biomasa residual

Tratamientos	Código	Niveles	
		A	B
1	a1b1	EG=25% y C=75%	Temperatura ambiente
2	a1b2	EG=25% y C=75%	30°C
3	a2b1	EG=50% y C=50%	Temperatura ambiente
4	a2b2	EG=50% y C=50%	30°C

Fuente: (Pallas D. 2015).

3.5.2. DISEÑO EXPERIMENTAL

Se aplicó el diseño completamente al azar A x B con 3 repeticiones

3.6. CARACTERÍSTICAS DEL EXPERIMENTO

Tabla 10. Características del experimento y sus cantidades

CARACTERÍSTICAS	CANTIDAD
Número tratamientos	4
Número de repeticiones	3
Total unidades experimentales	12

Fuente: (Pallas D. 2015)

3.7. METODOLOGÍA

Para la realización de este estudio se empleó seis digestores de manera discontinua bajo condiciones específicas de operación. La secuencia experimental que se aplicó fue la siguiente:

- Puesta a punto de los equipos e identificación de las técnicas de análisis específicas para cuantificar las variables del proceso.
- Selección de los parámetros iniciales de operación potencial de Hidrógeno (pH), temperatura, Demanda Química de Oxígeno (DQO), etc.), así como los diversos rangos de variación.
- Determinación de parámetros cinéticos del proceso para simular el progreso de la reacción con un modelo matemático desarrollado para tal fin.
- Realización de seguimiento del desarrollo bacteriano mediante el conteo de microorganismos en forma diaria durante el tiempo que duró el proceso de crecimiento bacteriano.

Se realizó el montaje de digestores discontinuos a escala de laboratorio. En estos digestores se introdujo desechos de col con estiércol bovino a distintas proporciones para determinar la mezcla óptima.

La materia prima utilizada fueron los desechos de col proveniente del mercado 24 de Mayo de Guaranda. Estos residuos permitieron tener una acidificación más rápida, la cual ayudó a obtener una buena producción de metano debido a que es rico en carbono en una composición que va del 28 al 30% y del 1% al 3 % de Nitrógeno, la cual es idónea para el proceso de digestión anaerobia.

Los reactores discontinuos fueron montados con dos kitasatos, una probeta, mangueras y tapones de caucho. En el kitasato 1 es donde se lleva a cabo la digestión;

mediante una manguera los gases producidos fueron llevados al kitasato 2 que contiene una solución de Hidróxido de Sodio (NaOH) al 0,1 normal en el cual retiene al CO_2 . La solución pasa por otra manguera a la probeta invertida que se encuentra sumergida en un vaso de precipitación llena de agua en la cual podemos cuantificar la cantidad de gas que se produce mediante el desplazamiento del agua. Para mantener la temperatura a 30°C se utilizó planchas de calentamiento y se colocó un termómetro dentro de la mezcla que se controla manualmente.

Se montó otro reactor discontinuo (Figura 4) con las mismas características del anterior pero en el kitasato 2 se añade agua destilada para observar el comportamiento y la producción de gas y metano en la probeta invertida.

Figura 4. Modelo del digestor discontinuo



Fuente: *Trabajo experimental 2015*

Una vez armado el reactor se colocó la mezcla (los residuos de col, el agua y el estiércol), se selló el tapón de caucho con silicona y se controló de acuerdo a las condiciones establecidas en la investigación. La producción de gas se midió diariamente, también los parámetros experimentales de proceso como el pH, temperatura, conteo microbiano, CO₂, metano, sólidos totales, sólidos volátiles y DQO.

El reactor en funcionamiento se presenta en la Figura 5.

Figura 5. Reactor en funcionamiento



Fuente: Trabajo experimental 2015

Los parámetros experimentales como el pH se realizaron diariamente en la muestra con la ayuda de un potenciómetro de mano.

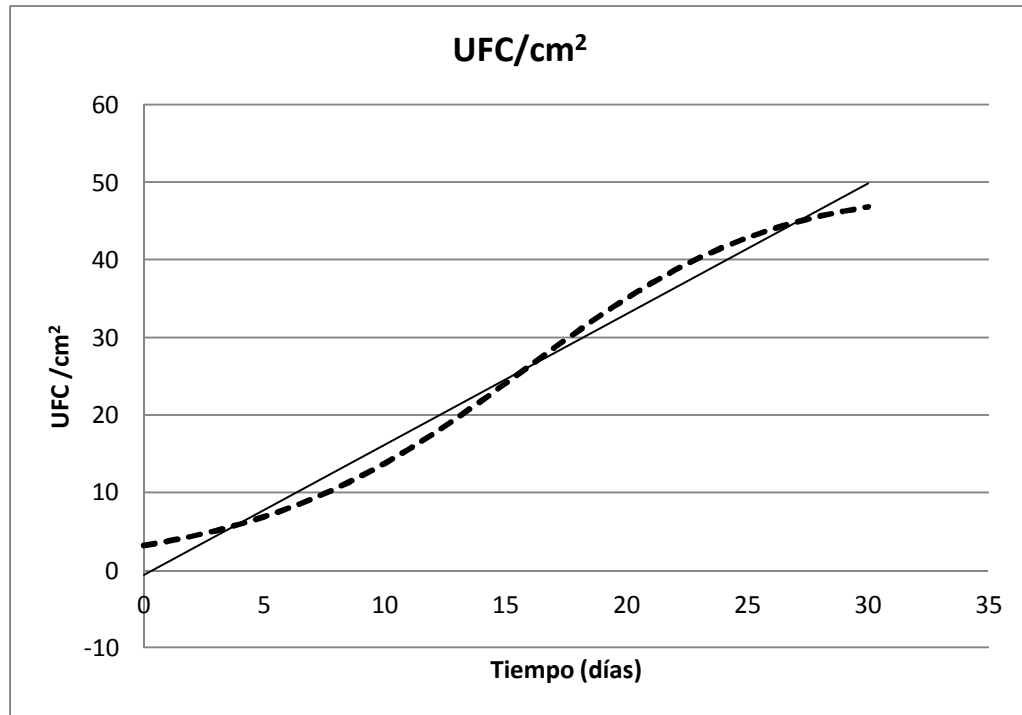
El análisis del DQO se realizó calentando una muestra de volumen determinado con un exceso conocido de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) en un Digestor Hach durante un periodo de dos horas a 150 °C. La materia orgánica en la muestra se oxida, como resultado se consume el dicromato de color amarillo que se reemplaza por el ión crómico que es de color verde. Luego de esto se deja enfriar durante 20 minutos en el mismo digestor, 10 minutos en la gradilla y se procede a realizar la medición de DQO en el Espectrofotómetro. Se utilizó viales de rango alto.

Para los sólidos totales y volátiles se pesa el crisol vacío, luego se pesa el crisol con la muestra y se lo coloca en la estufa a una temperatura de 105 °C durante veinte y cuatro horas. Se retira el crisol de la estufa, se espera que se equilibre el crisol a temperatura ambiente y se procede a pesarlo. El cálculo de los sólidos totales se obtuvo mediante la ecuación presentada en la bibliografía. Una vez que se han pesado los crisoles para obtener el dato de sólidos totales se coloca el crisol en la mufla a una temperatura de 550 °C durante seis horas. Se retira los crisoles cuidadosamente, se los deja enfriar a temperatura ambiente y se pesa los crisoles.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. CONTEO MICROBIANO

Gráfico 1. UFC promedio (50% col -50% estiércol) temperatura de 30 °C



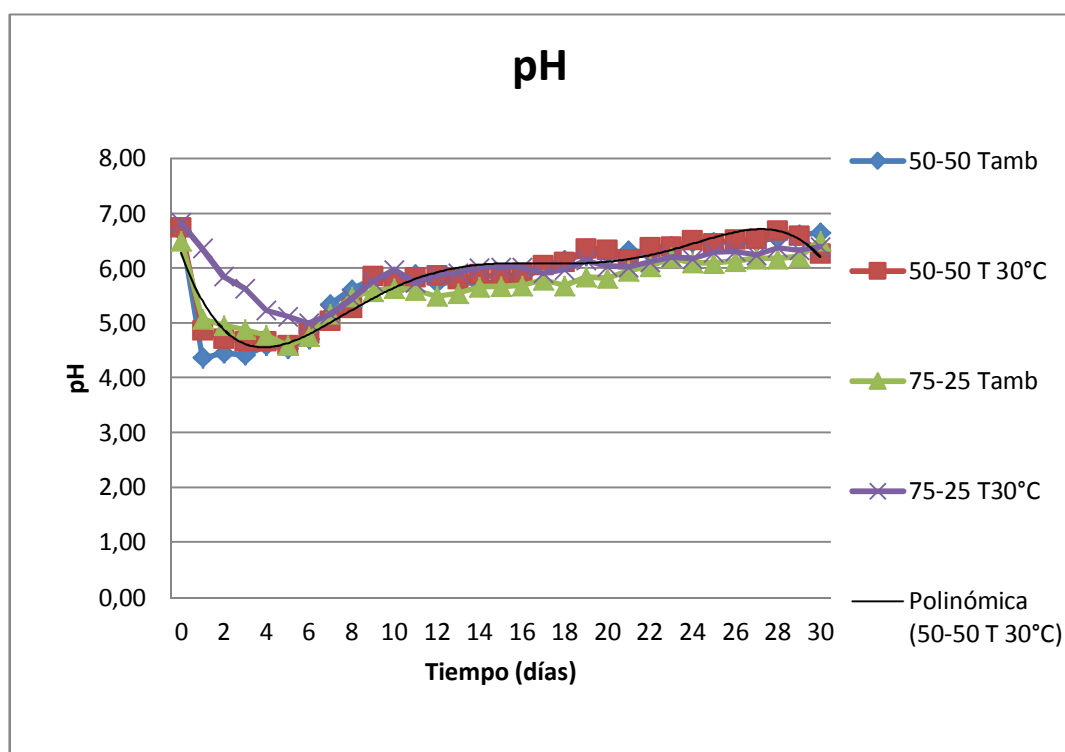
Fuente: Trabajo experimental 2015

Comparando los resultados entre los tratamientos se observó que el crecimiento microbiano que tuvo mejor ajuste a la curva de crecimiento fue en la relación 50% de col y 50% de estiércol a 30 °C, la gráfica se efectuó con relación al tiempo debido a que se mantiene constante la temperatura. Se observó que los microorganismos iban creciendo conforme iban pasando los días hasta que llegó al día veintidós y los microorganismos ya no tenían el mismo crecimiento que al principio, se iban manteniendo estables hasta llegar a no crecer más.

4.2. PARÁMETROS UTILIZADOS

Los parámetros planteados para la medición de la cinética bacteriana fueron: temperatura, pH, metano, CO₂, sólidos totales, sólidos volátiles y DQO; estas mediciones se los realizó diariamente durante los treinta días que duró el experimento.

Gráfico 2. Promedios de pH



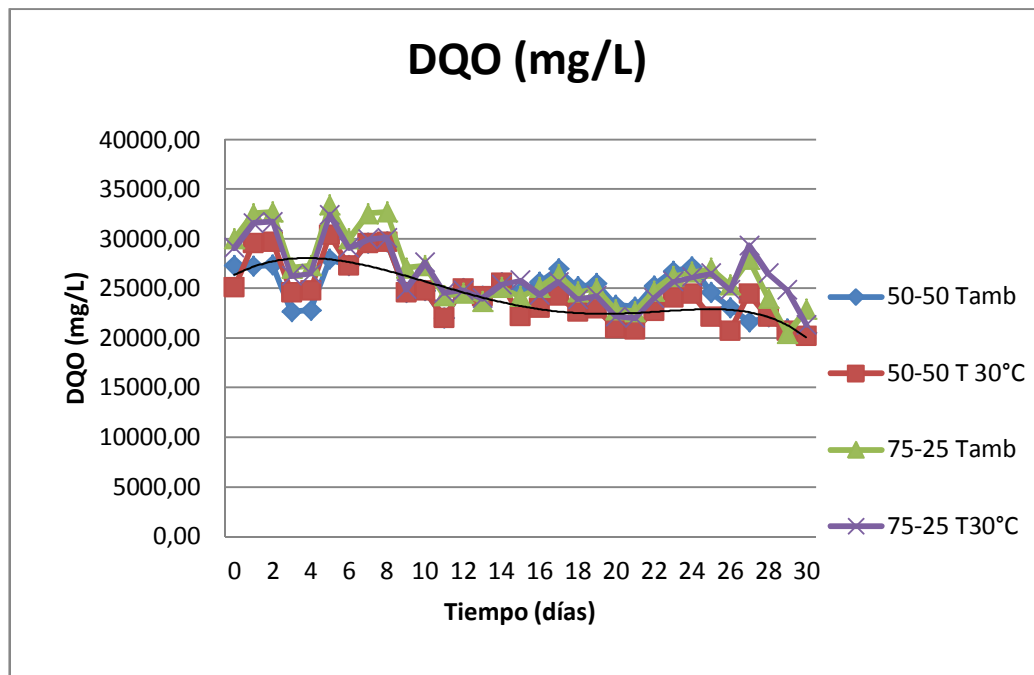
Fuente: Trabajo experimental 2015

Los niveles de pH de los reactores discontinuos, al inicio y al fin de la digestión, muestran la cantidad de ácidos producidos durante los treinta días. Se observa en la Gráfica 2 que el pH inicial se encuentra 6,5 y 6,8 descendiendo hasta 4 y teniendo nuevamente el aumento hasta estabilizarse en un pH final entre 6 en todos los experimentos. Los reactores con mezcla de 50% y 50% a 30 °C tienen un pH final de 6,5. Estos niveles de pH se deben a que durante la biodigestión se producen ácidos.

Los ácidos son transformados en parte, a metano, mientras que otra parte empieza a acumularse de manera paulatina, no todos los ácidos pueden ser transformados por las bacterias metanogénicas a biogás y se acumulan hasta llegar a niveles que impiden la producción de metano. Esto se basa de acuerdo a la investigación reportada por Chiriboga (2010).

En el gráfico 3 se reportan los datos obtenidos de DQO

Gráfico 3. Promedios de DQO



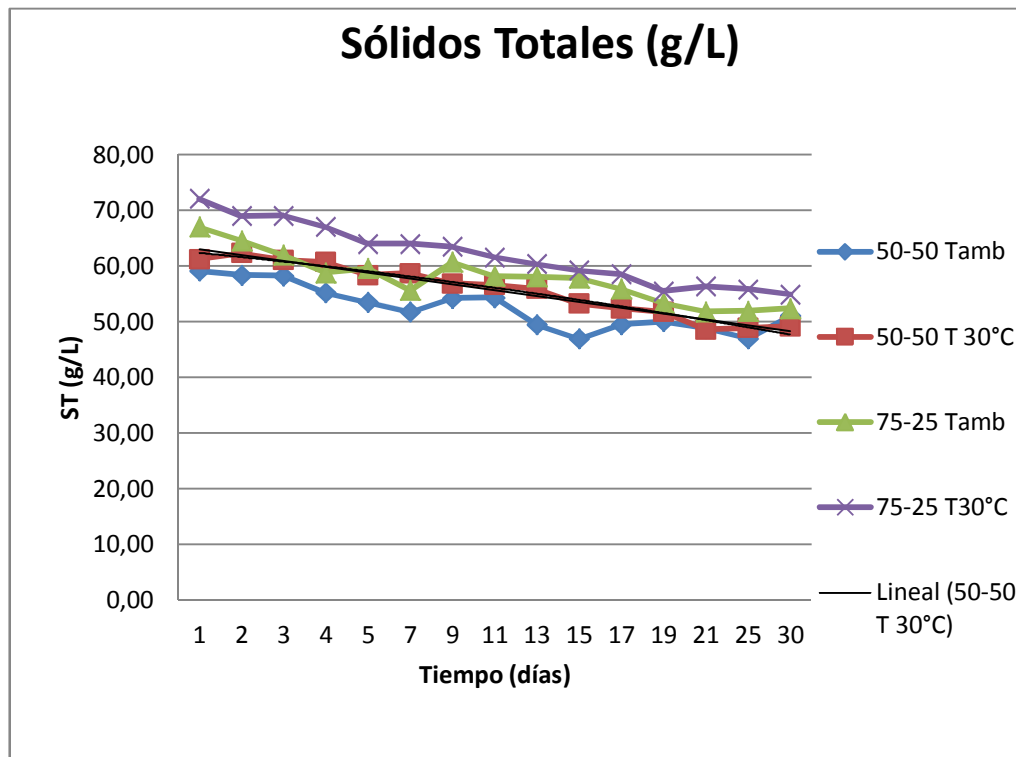
Fuente: Trabajo experimental 2015

En la Gráfica 3 se observó los niveles de DQO al inicio y al final de la digestión. La DQO mínima se encuentra en la mezcla de 50% col y 50% estiércol a temperatura de 30 °C. Durante la digestión anaerobia los niveles de DQO aumentaron y disminuyeron hasta llegar a estabilizarse. Hay un gran cambio en los niveles de DQO para el reactor de mezcla (50% col - 50% estiércol) T 30 °C, lo cual se explica por la

gran cantidad de gas que se produce en este digester. Mientras que en los demás experimentos hay poca degradación de la materia orgánica por lo que la DQO no disminuye considerablemente, se basa de acuerdo a la investigación realizada por Chiriboga (2010). Es notable la similitud que presentan en conjunto estas gráficas los cuales representaron el comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno.

En el gráfico 4 se presenta los promedios de sólidos totales

Gráfico 4.- Promedio de sólidos totales



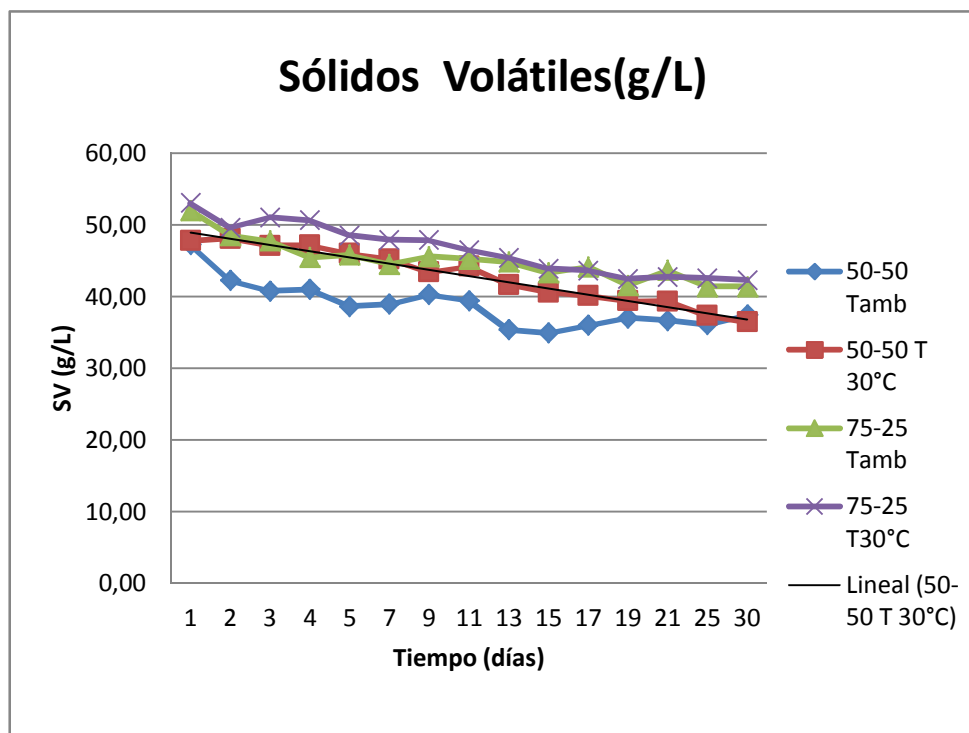
Fuente: Trabajo experimental 2015

Los niveles de Sólidos Totales muestran cambios significativos durante todo el proceso de biodigestión de acuerdo al Gráfico 4. Comparando los sólidos totales en los cuatro tratamientos, se llegó a la conclusión que en el tratamiento 50% de col y 50% de estiércol a 30 °C es la que degradó más a la materia orgánica contenida en la

muestra, basada en la investigación de Chiriboga (2010). Los sólidos totales comenzaron con un valor alto y conforme fueron pasando los días los sólidos disminuyeron.

En el gráfico 5 se presenta los promedios de sólidos volátiles.

Gráfico 5.- Promedio de sólidos volátiles

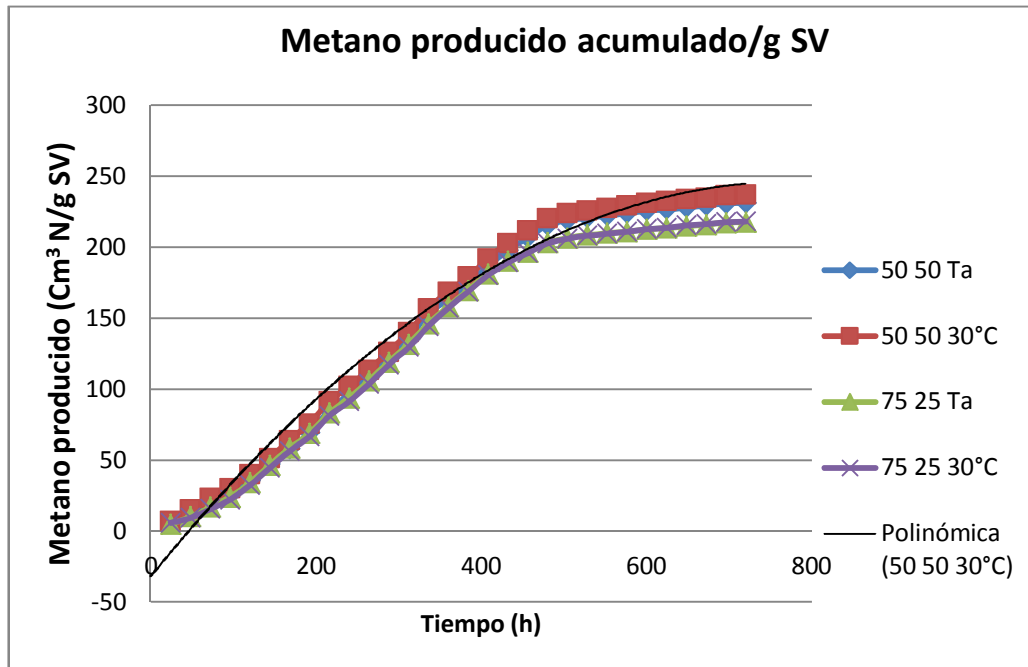


Fuente: Trabajo experimental 2015

Los cambios en Sólidos Volátiles son pequeños, esto quiere decir que al fin de la digestión los sólidos volátiles son menores que al inicio, lo que implica que tanto las bacterias acetogénicas como las metanogénicas consumen estos sólidos volátiles para producir biogás y degradar la materia orgánica basándose en la investigación de Chiriboga (2010). En la relación 50% de col y 50% de estiércol a temperatura de 30 °C es el que mejor comportamiento tuvo.

En el gráfico 6 se muestra el promedio de metano

Gráfico 6.- Promedio de metano acumulado/g SV

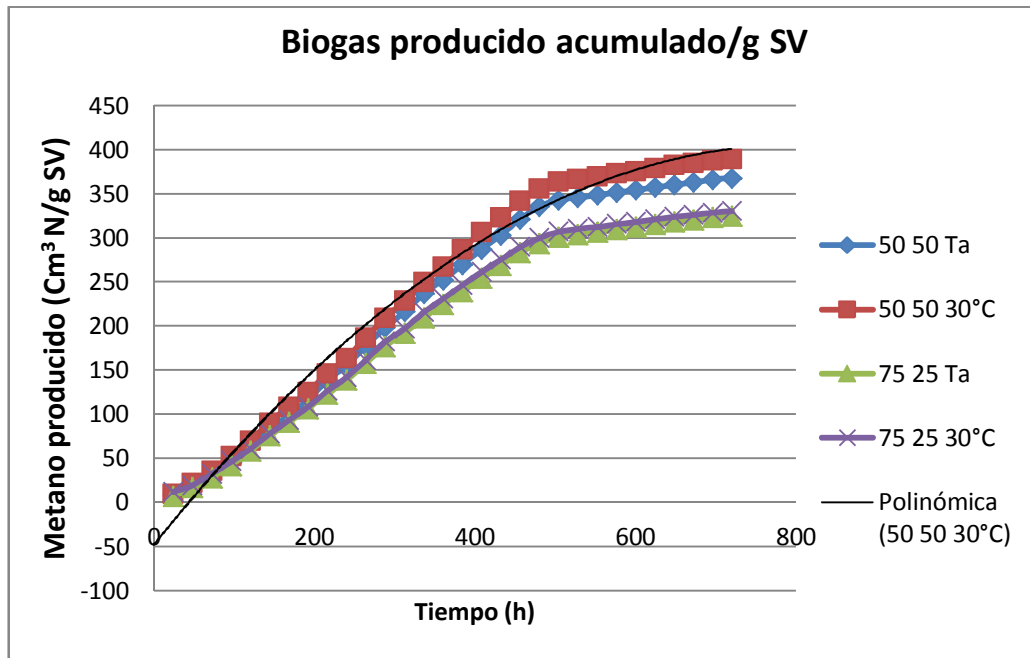


Fuente: Trabajo experimental 2015

En el gráfico 6 muestra el comportamiento en función del tiempo de la producción acumulada de metano durante el ensayo de biodegradabilidad anaeróbica para cada una de las cargas evaluadas, los valores presentados corresponden al promedio de las mediciones realizadas en los reactores disponibles durante el tiempo de desarrollo del ensayo. Se observó la similitud entre las tendencias de las curvas experimentales de los cuatro tratamientos. No obstante la simulación de los valores promedios de metano se encuentra en un rango relativamente cercano. La mejor producción de Metano se produjo en la relación 50% de col y 50% de estiércol a Temperatura 30 °C.

En el Gráfico 7 se presenta el promedio de biogás.

Gráfico 7.- Promedio de biogás acumulado/g SV



Fuente: Trabajo experimental 2015

En el gráfico 7 se observó la producción de biogás durante el tiempo de digestión, las tendencias de las curvas experimentales en las tres repeticiones tienen una similitud en los valores que se encuentran en un rango relativamente cercano. Las curvas van disminuyendo conforme van pasando los días, en esta etapa decrece la producción de CO₂ y la producción de metano empieza a incrementar, debido a que la materia orgánica va disminuyendo y la producción de biogás cesa por completo. La mejor producción de Biogás se produjo en la relación 50% de col y 50% de estiércol a Temperatura de 30 °C.

4.3. CINÉTICA DE CRECIMIENTO MICROBIANO

Los modelos utilizados fueron los de Monod y Haldane

- **Modelo de Monod para el sustrato**

$$\frac{dS}{dt} = \mu_{max} \frac{S}{K_s + S} \frac{X}{Y} \quad (14)$$

$$S = S - \frac{\mu_{max}}{Y} * \frac{S * X}{K_s + S} \quad (15)$$

Donde:

S = Concentración del sustrato limitador del crecimiento.

X = Concentración de microorganismos (biomasa).

K_s = Constante de saturación.

Y = Coeficiente de producción de biomasa.

μ_{max} = Tasa Máxima de crecimiento.

t = Tiempo.

- **Modelo de Monod para la Biomasa**

$$X = X + \frac{\mu_{max} * S * X}{K_s + S} - K_{dec} X \quad (16)$$

Donde:

S = Concentración del sustrato

X = Concentración de microorganismos (biomasa).

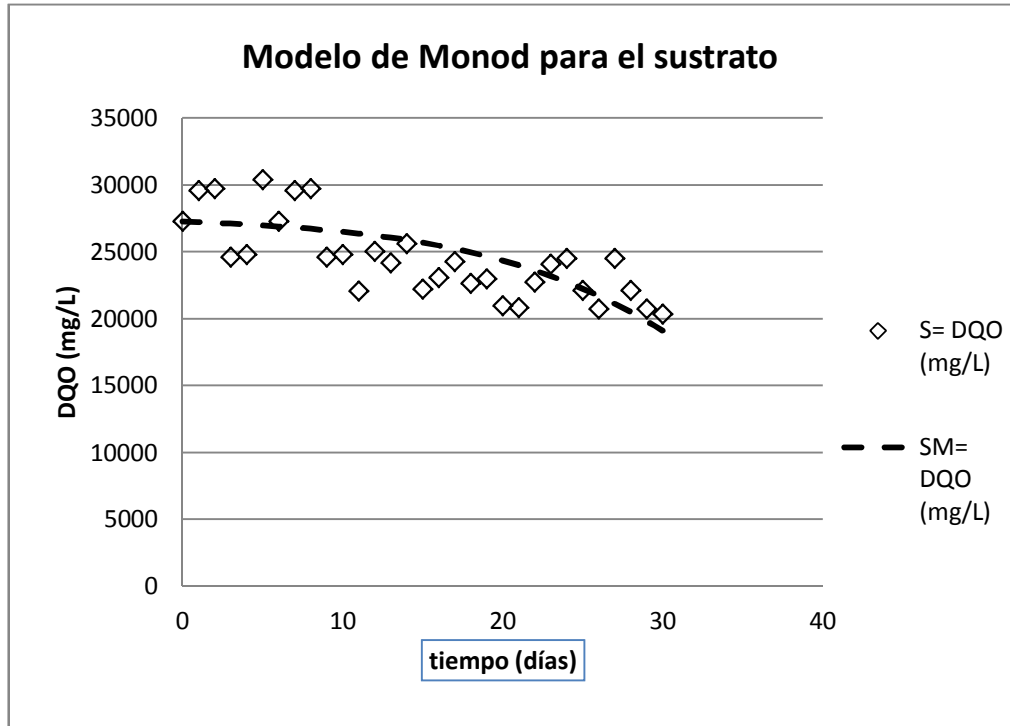
K_s = Constante de saturación.

Y = Coeficiente de producción de biomasa.

μ_{max} = Tasa Máxima de crecimiento.

K_{dec} = Decaimiento o muerte.

Gráfico 8.- Modelo de Monod para el sustrato

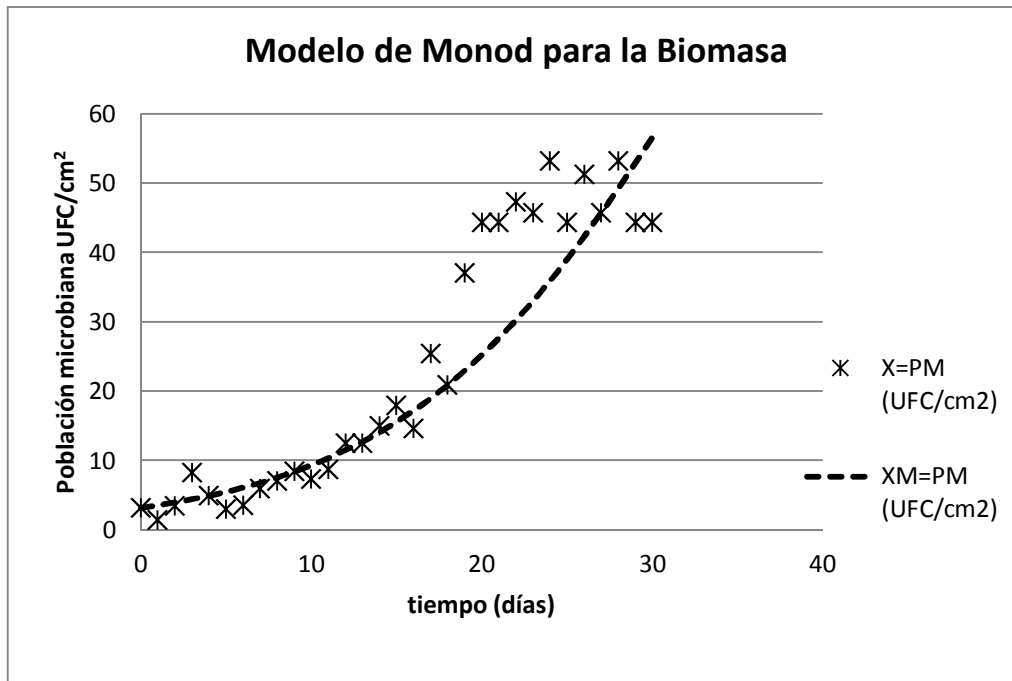


Fuente: Trabajo experimental 2015

Se observó que variando las constantes establecidas (concentración de sustrato, constante de saturación, etc.) tuvieron mejor acercamiento a la línea del modelo la relación 50% de Col y 50% de estiércol a 30 °C. Se comprobó que el Modelo de Monod se acercó más a la línea de tendencia que se obtuvo con los datos de la investigación. Además se constató que la DQO va decreciendo debido a que la carga orgánica disminuye por ende terminó el proceso de fermentación. La gráfica se efectuó con relación al tiempo debido a que la temperatura permaneció constante.

En la gráfica 9 se presenta el modelo de Monod para la biomasa.

Gráfico 9.- Modelo de Monod para la biomasa.



Fuente: Trabajo experimental 2015

Se observó que variando los valores de las constantes establecidas como la concentración de sustrato, constante de saturación, etc., tuvieron mejor acercamiento a la línea del modelo la relación 50% de col y 50% de estiércol a 30 °C. Se constató que la población microbiana a medida que pasaron los días fueron incrementando su crecimiento, por ende la biomasa fue alta. La gráfica se efectuó con relación al tiempo debido a que la temperatura se mantuvo constante.

- **Modelo de Haldane para el sustrato:**

$$\frac{dS}{dt} = \mu_{max} \frac{S}{K_S + S} \frac{X}{Y + K_I S^2} \quad (17)$$

$$S = S_0 - \frac{\mu_{max}}{Y} * \frac{S * X}{K_S + S + K_I S^2} \quad (18)$$

Donde:

S = Concentración del sustrato limitador del crecimiento.

X = Concentración de microorganismos (biomasa).

K_s = Constante de saturación.

Y = Coeficiente de producción de biomasa.

μ_{max} = Tasa Máxima de crecimiento.

t = Tiempo.

K_i = Coeficiente de Inhibición.

- **Modelo de Haldane para la Biomasa:**

$$\frac{dX}{dt} = X \left(\frac{\mu_{max} * S}{K_s + S + K_i S^2} - K_{dec} \right) \quad (19)$$

Donde:

S = Concentración del sustrato limitador del crecimiento.

X = Concentración de microorganismos (biomasa).

K_s = Constante de saturación.

Y = Coeficiente de producción de biomasa.

μ_{max} = Tasa Máxima de crecimiento.

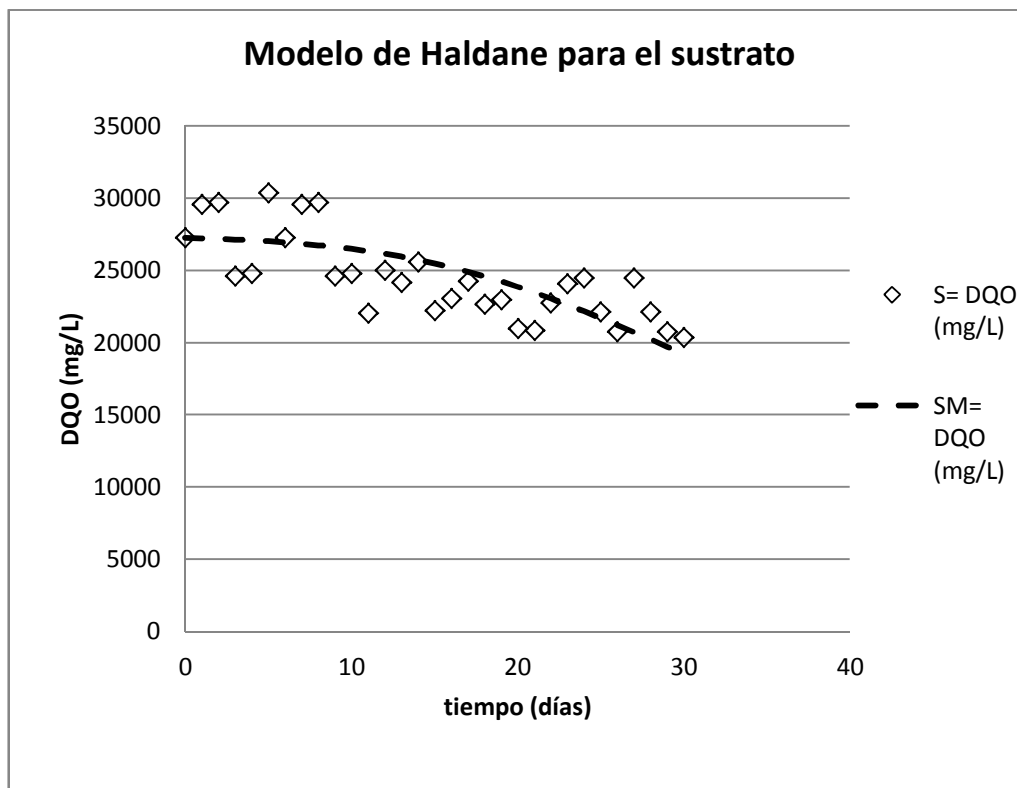
t = Tiempo.

K_i = Coeficiente de Inhibición

K_{dec} = Decaimiento o muerte.

En el Gráfico10 se presenta el modelo de Haldane para el sustrato.

Gráfico 10.- Modelo de Haldane para el sustrato.

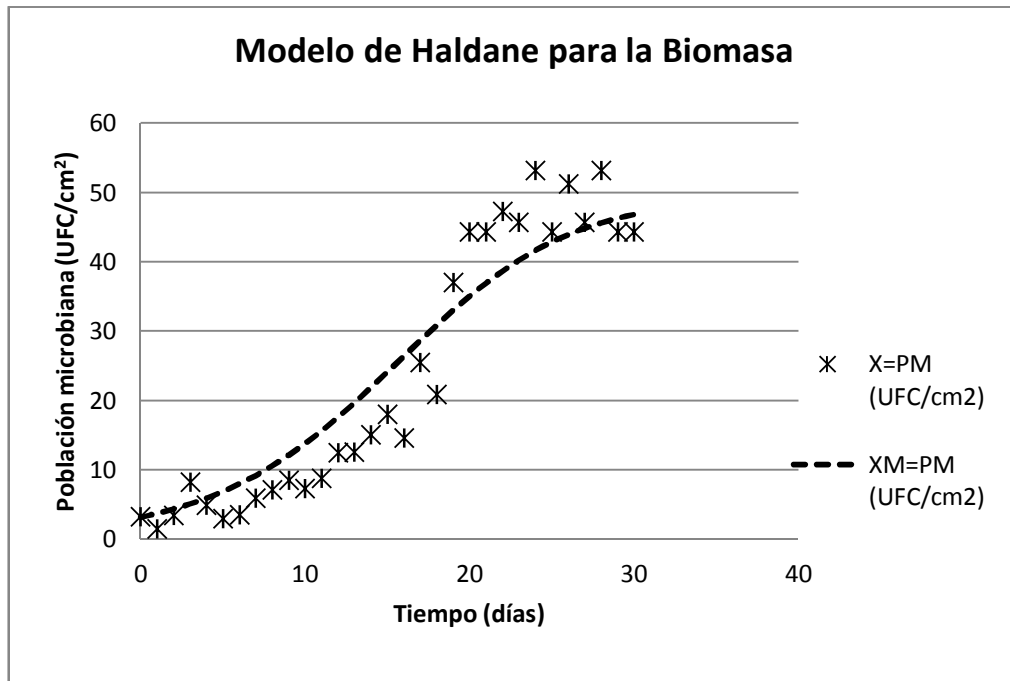


Fuente: Trabajo experimental 2015

Se observó que variando los valores obtenidos en la investigación (constante de saturación, coeficiente de inhibición, etc.) tuvieron mejor acercamiento a la línea del modelo de Haldane la relación 50% de Col y 50% de estiércol a una temperatura de 30 °C, la gráfica se efectuó con el tiempo debido a que la temperatura permaneció constante. Se constató que el DQO va decreciendo debido a que la carga orgánica disminuyó y terminó la fermentación, coincidiendo con el Modelo de Monod.

En el Gráfico 11 se presentó el modelo de Haldane para la biomasa

Gráfico 11.- Modelo de Haldane para la biomasa



Fuente: Trabajo experimental 2015

Las diferentes variaciones de los valores obtenidos en la investigación (concentración del sustrato, coeficiente de inhibición, etc.) tuvieron mejor acercamiento a la línea del modelo la relación 50% col y 50% estiércol a 30⁰C. Se constató que la población microbiana a medida que pasaron los días fueron incrementando su crecimiento, por ende la biomasa aumentó y la gráfica se lo realizó con el tiempo debido a que la temperatura permaneció constante durante todo el proceso.

Comparando entre modelos se observó que tuvieron una semejanza entre las gráficas.

4.4. Discusión de la Cinética Bacteriana

En esta sección se tratan todos los resultados obtenidos durante el proceso de experimentación y su interpretación de los datos obtenidos en el laboratorio.

En la Gráfica 6 se observó la producción de Metano teniendo una mayor producción de la misma la relación 50% de col y 50% de estiércol a temperatura de 30 °C; también se observó la producción de biogás durante el tiempo de digestión. Las curvas presentaron una gran pendiente en todos los experimentos, debido a la producción de biogás. Conforme transcurrieron los días, las pendientes iban disminuyendo. En esta etapa decreció la producción de dióxido de carbono y la producción de metano empezó a incrementar.

Esto se basa de acuerdo a los datos reportados por El-Mashad, H. (2010) Es notable la similitud que presentan en conjunto estas gráficas los cuales representaron el comportamiento de la producción de biogás a partir de la digestión anaeróbica.

Cuando se alcanza el máximo de producción, la DQO presenta un mínimo en el intervalo. Conforme se incrementó la carga orgánica, los valores de DQO también se incrementan. En consecuencia, en los puntos máximos de producción de biogás existe degradación de la materia orgánica. Al incrementarse la carga orgánica después de los puntos máximos, la DQO se incrementó y la producción de biogás cae, lo que significa que la degradación empieza a ser menor y la DQO comienza a acumularse dentro del reactor. La mezcla con 50% de col y 50% de estiércol a 30 °C mostró la máxima producción de biogás con respecto a las otras mezclas.

En términos de maximización de producción de biogás se observó que el reactor con la mezcla de mejor rendimiento es de 50% de Col con 50% de estiércol debido a que su producción se prolongó a lo largo de los treinta días de digestión y superó los niveles de producción de biogás de las otras mezclas experimentales.

En las Gráficas 9 y 11 se observó la producción de biomasa que tuvieron mejor acercamiento a la línea del modelo tanto de Monod como de Haldane por ende se comparó que si hubo producción de biomasa.

4.4.1. ANÁLISIS DE VARIANZA

Cuadro1. Análisis de varianza de Sólidos Totales

Análisis de la Varianza para Sol_ Totales - Sumas de Cuadrados de Tipo III					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:A	104,548	1	104,548	52,60	0,0001
B:B	40,996	1	40,996	20,62	0,0019
INTERACCIONES					
AB	0,9408	1	0,9408	0,47	0,5109
RESIDUOS	15,9016	8	1,9877		
TOTAL (CORREGIDO)	162,386	11			

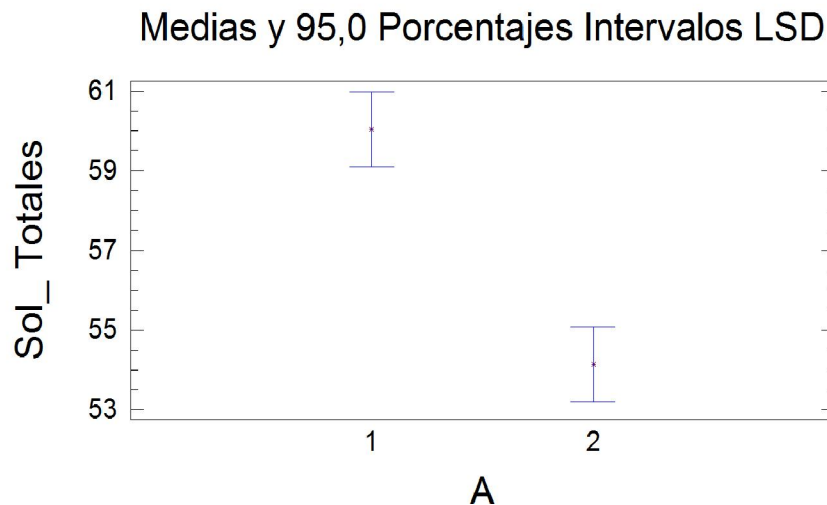
En lo referente al análisis de varianza de los Sólidos Totales, el cuadro descompone la variabilidad de las contribuciones debidas a varios factores. De acuerdo a la contribución de cada factor y eliminando los efectos del resto de los factores, se tiene que los valores de probabilidad comprueban la importancia estadística de cada uno de los factores. Dado que 2 valores de probabilidad son inferiores a 0,05, estos factores tienen efecto estadísticamente significativo en sólidos totales para un 95% de confianza.

Cuadro2. Prueba de Medias Sólidos Totales

Tabla de Medias por mínimos cuadrados para Sol_ Totales con 95,0 Intervalos de confianza						
Nivel		Frecuencia	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
Media Total		12	57,0867			
A						
1		6	60,0383	0,575572	58,7111	61,3656
2		6	54,135	0,575572	52,8077	55,4623
B						
1		6	55,2383	0,575572	53,9111	56,5656
2		6	58,935	0,575572	57,6077	60,2623
A según B						
1	1	3	57,91	0,813982	56,0329	59,7871
1	2	3	62,1667	0,813982	60,2896	64,0437
2	1	3	52,5667	0,813982	50,6896	54,4437
2	2	3	55,7033	0,813982	53,8263	57,5804

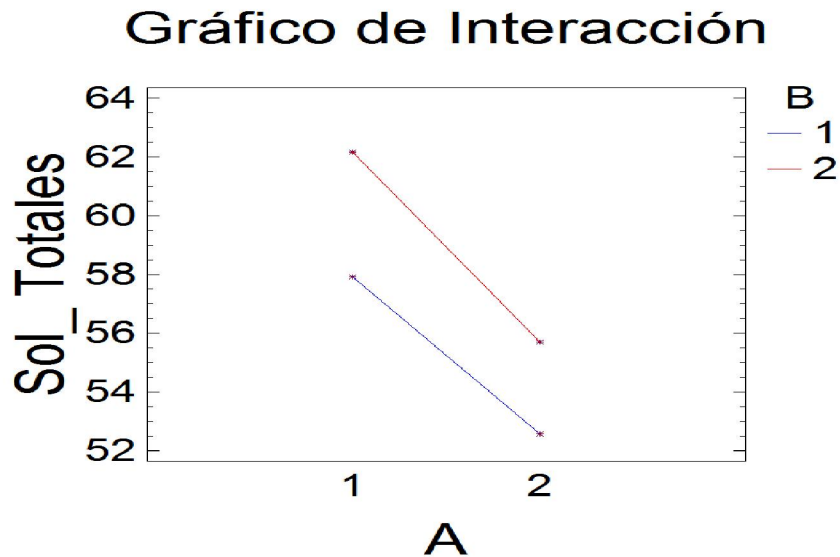
De acuerdo al cuadro de medias, se muestra la variable Sólidos Totales para cada nivel de factores. Se da a conocer el error estándar de cada media, lo cual es una medida de su variabilidad en la muestra. Las dos columnas de la derecha muestran 95,0% intervalos de confianza para cada una de las medias. El tratamiento A1B2 muestra la mejor media con un valor de 62,16.

Gráfico 12. Gráficas de Medias Sólidos Totales.



El gráfico indica que son valores diferentes

Gráfico 13. Gráfica de Interacción Sólidos Totales



Este gráfico indica que no existe interacción entre los valores.

Cuadro 3. Análisis de Varianza Sólidos Volátiles

Análisis de la Varianza para Sol_Volatiles - Sumas de Cuadrados de Tipo III					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:A	75,7519	1	75,7519	80,13	0,0000
B:B	24,9697	1	24,9697	26,41	0,0009
INTERACCIONES					
AB	5,34668	1	5,34668	5,66	0,0447
RESIDUOS	7,5632	8	0,9454		
TOTAL (CORREGIDO)	113,631	11			

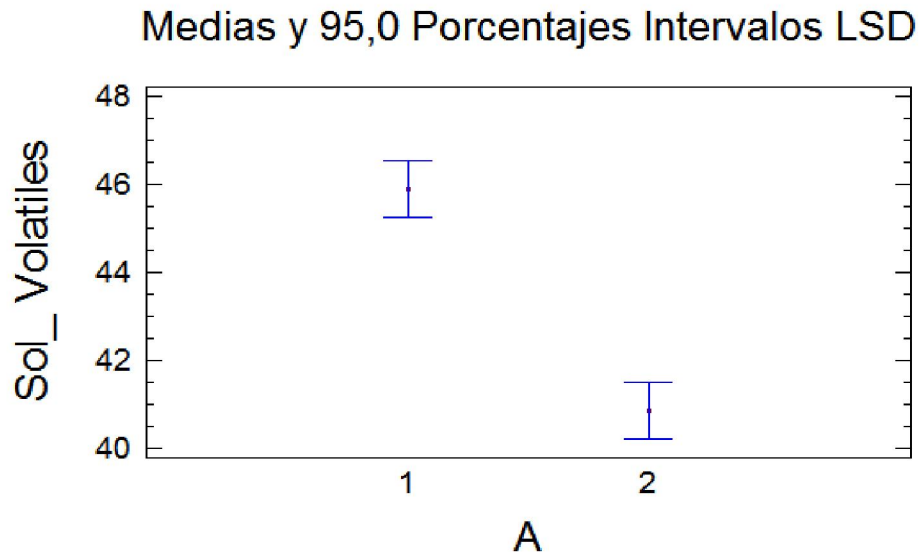
En lo referente al análisis de varianza de los sólidos volátiles se observó la descomposición de la variabilidad en las contribuciones debidas a varios factores, se ha medido la contribución de cada factor eliminando los efectos del resto de los factores. Los valores de probabilidad comprueban la importancia estadística de cada uno de los factores, dado que 3 valores son inferiores a 0,05, estos factores tienen efecto estadísticamente significativo en Sólidos Volátiles para un 95,0% de confianza.

Cuadro 4. Prueba de Medias Sólidos Volátiles

Nivel		Frecuencia	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
Media Total		12	43,3725			
A						
1		6	45,885	0,396947	44,9696	46,8004
2		6	40,86	0,396947	39,9446	41,7754
B						
1		6	41,93	0,396947	41,0146	42,8454
2		6	44,815	0,396947	43,8996	45,7304
A según B						
1	1	3	45,11	0,561367	43,8155	46,4045
1	2	3	46,66	0,561367	45,3655	47,9545
2	1	3	38,75	0,561367	37,4555	40,0445
2	2	3	42,97	0,561367	41,6755	44,2645

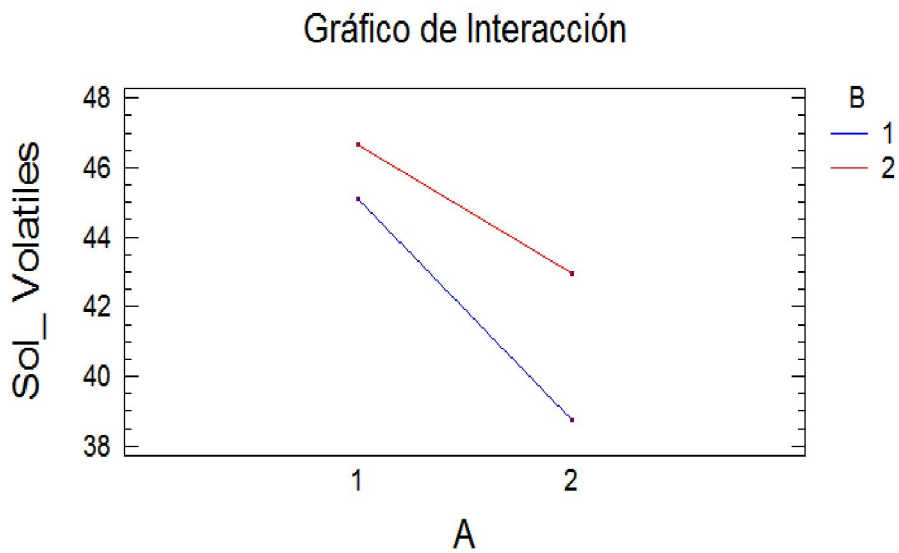
De acuerdo al cuadro de medias se muestra los Sólidos Volátiles media para cada nivel de los factores. También presenta el error estándar de cada media, lo cual es una medida de su variabilidad en la muestra que representa el 95,0% intervalos de confianza para cada una de las medias. El tratamiento A1B2 muestra la mejor media con un valor de 46,66.

Gráfico 14. Gráfico de Medias Sólidos Volátiles



Este gráfico indica que los valores son diferentes entre 1 y 2

Gráfico 15. Gráfico de Interacción Sólidos Volátiles



Este gráfico indica que no hay interacción entre valores.

Cuadro 5. Análisis de Varianza pH

Análisis de la Varianza para pH - Sumas de Cuadrados de Tipo III					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFECTOS PRINCIPALES					
A:A	0,00333333	1	0,00333333	0,76	0,4073
B:B	0,0800333	1	0,0800333	18,36	0,0027
INTERACCIONES					
AB	0,0456333	1	0,0456333	10,47	0,0120
RESIDUOS	0,0348667	8	0,00435833		
TOTAL (CORREGIDO)	0,163867	11			

En lo referente al análisis de varianza de pH descompone la variabilidad de varios factores, se ha medido la contribución de cada factor eliminando los efectos del resto de los factores. Los valores de probabilidad prueban la importancia estadística de cada uno de los factores, dado que 2 valores son inferiores a 0,05, los valores de A y la interacción AB, estos factores tienen efecto estadísticamente significativo en pH para un 95,0%.

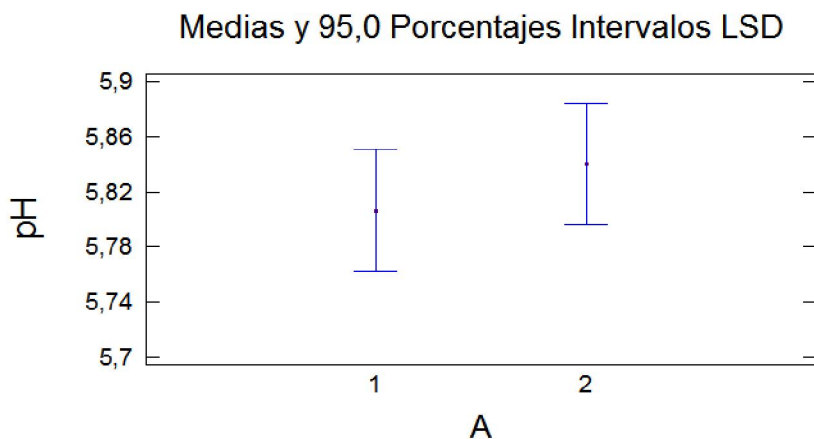
Cuadro 6. Prueba de medias pH

Tabla de Medias por mínimos cuadrados para pH con 95,0 Intervalos de confianza

Nivel	Frecuencia	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior	
Media Total	12	5,82333				
A						
1	6	5,80667	0,0269516	5,74452	5,86882	
2	6	5,84	0,0269516	5,77785	5,90215	
B						
1	6	5,74167	0,0269516	5,67952	5,80382	
2	6	5,905	0,0269516	5,84285	5,96715	
A según B						
1	1	3	5,66333	0,0381153	5,57544	5,75123
1	2	3	5,95	0,0381153	5,86211	6,03789
2	1	3	5,82	0,0381153	5,73211	5,90789
2	2	3	5,86	0,0381153	5,77211	5,94789

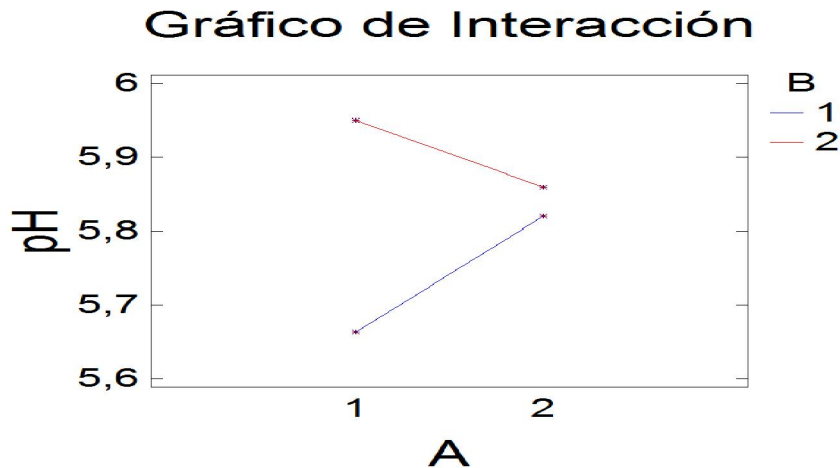
Este cuadro muestra el pH media para cada nivel de factores, también presenta el error estándar de cada media, lo cual es una medida de su variabilidad en la muestra. Las dos columnas de la derecha muestran el 95,0% intervalos de confianza para cada una de las medias.

Gráfico 16. Gráfico de Medias pH



Este gráfico indica que los valores son diferentes.

Gráfico 17. Gráfico de Interacción pH



Este gráfico indica que no hay interacción entre valores.

Cuadro 7. Análisis de Varianza DQO

Análisis de la Varianza para DQO - Sumas de Cuadrados de Tipo III					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:A	9,70021E6	1	9,70021E6	1,94	0,2008
B:B	502252,0	1	502252,0	0,10	0,7592
INTERACCIONES					
AB	6120,08	1	6120,08	0,00	0,9729
RESIDUOS	3,99215E7	8	4,99018E6		
TOTAL (CORREGIDO)	5,01301E7	11			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

En lo referente al análisis de varianza descompone la variabilidad de DQO en las contribuciones debidas a varios factores, se ha medido la contribución de cada factor

eliminando los efectos del resto de los factores. Los valores de probabilidad comprueban la importancia estadística de cada uno de los factores, dado que ningún valor es inferior a 0,05, ninguno de los factores o interacciones tienen efecto estadísticamente significativo en DQO para un nivel de confianza del 95,0%.

Cuadro 8. Análisis de Varianza del METANO

Análisis de la Varianza para CH₄ - Sumas de Cuadrados de Tipo III					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:A	33,5002	1	33,5002	0,32	0,5880
B:B	317,961	1	317,961	3,02	0,1203
INTERACCIONES					
AB	248,339	1	248,339	2,36	0,1630
RESIDUOS	841,703	8	105,213		
TOTAL (CORREGIDO)	1441,5	11			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

En lo referente al análisis de varianza descompone la variabilidad de CH₄ en las contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha elegido la suma de cuadrados, se ha medido la contribución de cada factor eliminando los efectos del resto de los factores. Los valores de probabilidad comprueban la importancia estadística de cada uno de los factores. Dado que ningún valor es inferior a 0,05, ninguno de los factores o interacciones tienen efecto estadísticamente significativo en el CH₄ para un nivel de confianza del 95,0%.

Cuadro 9. Prueba de Medias de Metano

Tabla de Medias por mínimos cuadrados para CH ₄ con 95,0 Intervalos de confianza						
Nivel		Frecuencia	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
Media Total		12	120,658			
A						
1		6	122,328	4,18754	112,672	131,985
2		6	118,987	4,18754	109,33	128,643
B						
1		6	125,805	4,18754	116,148	135,462
2		6	115,51	4,18754	105,853	125,167
A según B						
1	1	3	122,927	5,92207	109,27	136,583
1	2	3	121,73	5,92207	108,074	135,386
2	1	3	128,683	5,92207	115,027	142,34
2	2	3	109,29	5,92207	95,6336	122,946

De acuerdo a la tabla de medias, el valor de 128,683 que corresponde al tratamiento A2B1 es el que mayor producción de CH₄ tiene en relación a los demás tratamientos. De acuerdo al estudio realizado por Chiriboga O. (2010), la mayor producción de biogás, donde está mayoritariamente presente el CH₄, en la mezcla de residuos vegetales no especificados de 75% – 25% les dio mejores resultados.

Cuadro 10. Análisis de Varianza Conteo Microbiano

Análisis de la Varianza para Conteo Microbiano - Sumas de Cuadrados de Tipo III						
Fuente		Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFFECTOS PRINCIPALES						
A:A		524,966	1	524,966	1152,34	0,0000
B:B		21,574	1	21,574	47,36	0,0001
INTERACCIONES						
AB		14,1919	1	14,1919	31,15	0,0005
RESIDUOS		3,64453	8	0,455567		
TOTAL (CORREGIDO)		564,377	11			

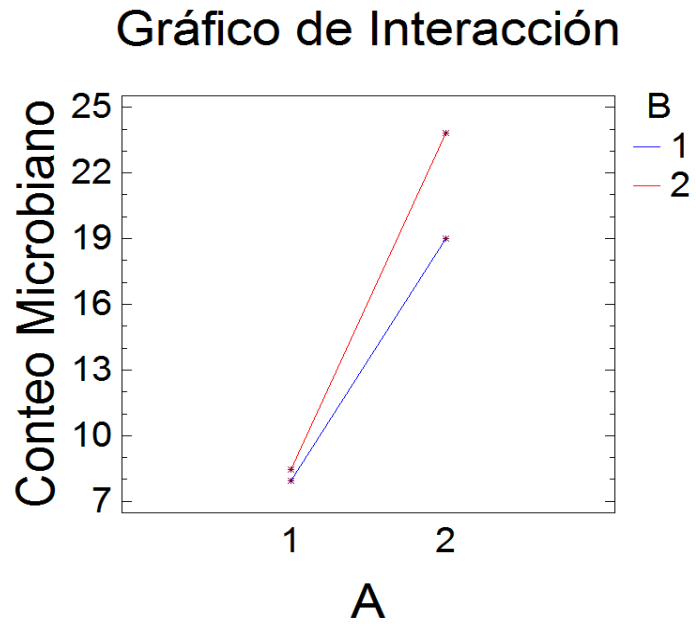
El Cuadro ANOVA descompone la variabilidad de Conteo Microbiano en las contribuciones debido a varios factores. Puesto que se ha elegido la suma de cuadrados Tipo III (valor por defecto), se ha medido la contribución de cada factor eliminando los efectos del resto de los factores. Los valores de probabilidad comprueban la importancia estadística de cada uno de los factores. Dado que 3 valores probabilísticos son inferiores a 0,05, estos factores tienen efecto estadísticamente significativo en Conteo Microbiano para un 95,0%.

Cuadro 11. Prueba de Medias Conteo Microbiano

Tabla de Medias por mínimos cuadrados para Conteo Microbiano con 95,0 Intervalos de confianza						
Nivel		Frecuencia	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
Media Total		12	14,7975			
A						
1		6	8,18333	0,27555	7,54791	8,81875
2		6	21,4117	0,27555	20,7762	22,0471
B						
1		6	13,4567	0,27555	12,8212	14,0921
2		6	16,1383	0,27555	15,5029	16,7738
A según B						
1	1	3	7,93	0,389686	7,03138	8,82862
1	2	3	8,43667	0,389686	7,53805	9,33529
2	1	3	18,9833	0,389686	18,0847	19,882
2	2	3	23,84	0,389686	22,9414	24,7386

Este cuadro muestra el Conteo Microbiano media para cada nivel de factores. También presenta el error estándar de cada media, lo cual es una medida de su variabilidad en la muestra que representa el 95,0% de intervalos de confianza para cada una de las media.

Gráfico 18. Gráfico de Interacción Conteo Microbiano



Este gráfico nos indica que no hay interacción entre valores.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

En el proceso de la codigestión anaerobia a partir de la biomasa residual de la col, se determinó que la mejor mezcla fue de 50% de col y 50 % de estiércol de ganado vacuno a 30 °C correspondiente al tratamiento A2B1; en estas condiciones la cinética de crecimiento bacteriano degrado la materia orgánica en diferentes compuestos de acuerdo a la fase de fermentación anaerobia correspondiente, esto es la hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis; dando como resultado final la producción de CH₄ superior al 60%, y, digestatos que en su contenido presentan nutrientes con potencial de uso agrícola como portador de elementos al suelo y plantas; resultados que están acordes a lo reportado por otros autores: López Buritica (2013), Forster-Carneiro (2004), Richardson et al. (2015) entre los principales.

Se cuantificó periódicamente la población bacteriana, el tratamiento que mayor producción de CH₄ se obtuvo corresponde al tratamiento A2B1 con 128,683 cm³/g SV, lo que significó la existencia de un alto contenido de microorganismos, por lo que se podría utilizar como fuente de energía de energía calórica (combustible).

Los parámetros de medición establecidos fueron como el pH, Sólidos Totales, Sólidos Volátiles, DQO; cuyos valores caracterizan a la cinética microbiana bajo condiciones anaerobias; en función de estos parámetros, el proceso inició al segundo día y finalizó el día 30, donde cesó la producción de CH₄.

Los valores de pH inicial de 6,5 y final de 6 durante el proceso, evidencia la cantidad de ácidos producidos durante los 30 días de duración del proceso.

Los valores de DQO, explican la gran cantidad de gas producido en el digestor, lo cual evidencia la degradación de la materia orgánica bajo las condiciones establecidas.

Los valores de ST mostraron los cambios significativos durante todo el proceso de biodigestión, evidenciando la degradación de la materia orgánica.

Los valores de SV, indican que tanto las bacterias acetogénicas como las metanogénicas consumen materia orgánica para producir biogás.

Los datos obtenidos de los diferentes parámetros del proceso de codigestión, evidencian que el modelo de Monod es el que mejor se ajusta para este proceso, por tanto se prueba la hipótesis planteada. El modelo de Monod, permitió relacionar la concentración del sustrato, la concentración de los microorganismos como su tasa máxima de crecimiento; en función de ellos, los datos se ajustaron a este modelo en relación al de Haldane.

5.2. RECOMENDACIONES

Para estudios futuros se recomienda utilizar tiempos de retención más altos que los utilizados en este estudio, para comparar cual podría ser el mejor tratamiento que se adapte a la calidad del biogás y/o el rendimiento de metano producido.

Se recomienda realizar estudios de digestión y codigestión enfocándose en otros residuos vegetales y estiércol de otros animales.

Es necesario la adquisición de un sistema a escala de laboratorio para realizar estos estudios de digestión y codigestión anaerobia, y principalmente contar con un medidor de gases en tiempo real para conocer la producción del mismo por parte de los microorganismos involucrados.

Se recomienda contar con equipos de análisis instrumental, en especial el cromatógrafo de gases, espectrómetro de masas, HPLC, para poder conocer la composición de los digestatos obtenidos resultado del proceso de digestión.

VI. RESUMEN Y SUMMARY

6.1. RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se estudió la determinación de la cinética bacteriana para la obtención de biogás (metano, CO₂), incluye la mezcla óptima de estiércol de ganado y residuos de col mediante digestión anaerobia, el biogás producido se midió por desplazamiento de agua en las probetas invertidas durante los días que duró el proceso. Dicho trabajo se realizó para determinar la cinética bacteriana cuantificando la población microbiana, estableciendo parámetros de medición y modelando matemáticamente la cinética.

Durante el desarrollo de la etapa experimental se realizaron mediciones periódicas de las variables de control tales como pH, DQO, Sólidos Totales y Volátiles, conteo microbiano, medición de Metano y CO₂ con el fin de establecer los parámetros de desempeño del proceso.

Para evaluar el rendimiento de biomasa se trabajó con combinaciones de mezclas en porcentaje, concentración y naturaleza de sustrato (50:50; 25:75) y la temperatura (ambiente, 30°C), obteniendo mejores resultados en la relación (50% - 50%).

El aporte de esta investigación se basa en la determinación de la biodegradabilidad anaeróbica de la mezcla de residuos, de acuerdo con los parámetros establecidos, con lo cual se demostró la factibilidad que presenta la tecnología de digestión anaeróbica para la generación de energía renovable a partir de estos residuos orgánicos. Este estudio es una primera aproximación al desarrollo de una estrategia óptima tanto para el tratamiento de residuos orgánicos biodegradables de origen agroindustrial, como para la obtención de biogás a partir del proceso de fermentación en la digestión anaeróbica.

6.2. SUMMARY.

In this thesis the determination of bacterial kinetics for obtaining biogas (methane, CO₂) was studied, including the optimal mix of cow manure and waste cabbage through anaerobic digestion, the biogas produced was measured by water displacement in specimens reversed during the days of the process. This work was performed to determine the bacterial kinetic quantifying the microbial population, establishing metrics and mathematical model of the kinetics.

During the development of the pilot phase periodic measurements of the control variables such as pH, COD, Total and Volatile Solids, microbial count, measurement of Methane and CO₂ in order to establish the performance parameters of the process were conducted.

To evaluate the performance of biomass it worked with mix combinations in percentage, concentration and nature of substrate (50:50; 25:75) and temperature (ambient, 30° C), obtaining better results in the ratio (50% - 50%).

The contribution of this research is based on the determination of the anaerobic biodegradability of mixed waste, according to the established parameters, which presents the feasibility of anaerobic digestion technology for generating energy from these organic wastes. This study is a first approach to the development of an optimal strategy for both the treatment of biodegradable organic waste from agroindustrial origin and the production of biogas from fermentation process in anaerobic digestion.

VII. BIBLIOGRAFIA

1. Atlas Bioenergético de Ecuador (2014).
2. Ajay, K., Jiandzheng, L., Loring, N. Research advances in dry anaerobic digestion process of solid organic wastes. *African Journal of Biotechnology*. (2011). Vol. 10. Pp. 242 – 253.
3. Almeida, A., Regalado, D., Ampudia, M. (2010). Estudio de la co-digestión anaeróbica de desechos orgánicos agroindustriales. *Avances en ciencias e ingenierías*. Artículo científico. Sección C. p.p c12-c17.
4. Álvarez, R.; Lid_en, G. (2009) Low temperature anaerobic digestion of mixtures of llama, cow and sheep manure for improved methane production. En: *Biomass and Bioenergy* 33, p. 527–533.
5. Andrews J.F.J Sanit Engng Div Am Soc Civ Engrs, (1969); SA 1:95.
6. Angelidaki, I. (1997). Anaerobic Digestion in Denmark past, present and future. *Aprovechamiento Energético de Residuos Orgánicos*, Nov. Berlín (Alemania), pp 214-215.
7. Atlas, R. y Bartha, R. (2002). *Ecología Microbiana y Microbiología Ambiental*. Madrid. AddisonWesley.
8. Barriga, A. (2011), *Potencialidades de Uso Energético de la Biomasa (Beneficios Socio Ambientales y Económicos)*. ESPOL – ECUADOR.

9. Batstone, D. ; Keller, J. ; Angelidaki, I. ; Kalyuzhnyi, S. ; Pavlostathis, S.; Rozzi, A. ; Sanders, W. ; Siegrist, H. ; Vavilin, V.: Anaerobic Digestion Model 1,(ADM1). En: IWA Task Group for Mathematical Modelling of Anaerobic Digestion Processes. IWA Publishing London. (2002).
10. Brinkman, J. Anaerobic digestion of mixed waste slurries from kitchens, slaughterhouses and meat processing industries. Proceedings of the II International symposium on Anaerobic Digestion of Soild Waste, (1999) p. 190–191.
11. Bruce E. Rittmann; Perry L. McCarty. Biotecnología del Medio Ambiente 1^a Edición en español. 157 – 190 (2001). Capítulo 3.
12. Callaghan, F.; Wase, J.; Thayanithy, K.; Forster, C.: Co-digestion of waste organic solids: batch studies. En: Bioresource Technology 67 (1999), p. 117–122.
13. Castelar, F. Manual para la producción de biogás. Instituto de Ingeniería Rural, I.N.T.A. (2010).
14. Chamy, R. y Pizarro, C. Biogás: energía limpia a partir de la basura. Valparaíso. Laboratorio de Biotecnología Ambiental, Escuela de Ingeniería Bioquímica, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (2004).
15. Chiriboga, O. Tesis. Desarrollo del Proceso de Producción de Biogás y Fertilizante Orgánico a partir de Mezclas de Desechos de Procesadoras de Frutas, (2010). pág. 2.

16. Damien, A. La Biomasa. Fundamentos, Tecnologías y Aplicaciones (2010). Editorial Mundi - Prensa. España. Pág. 15-16.
17. Eaton, A.; Clesceri, L.; Greenberg, A. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA, AWWA, WEF, 19th edition. EEUU (1995).
18. El Mashad, H.; Zhang, R.: Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. En: Bioresource Technology 101 (2010), p. 4021–4028.
19. Earthgreen. Estudio y diseño del cierre técnico y saneamiento del botadero de Curgua, Cantón Guaranda, Provincia de Bolívar (2011).
20. Flotats, X; Campos, E. Bonmatí, A. Aprovechamiento energético de residuos. Ganaderos. Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo. “Universitat de Lleida”. 21p. (1997)
21. Flotats y Sarquella. Producción de biogás por codigestión anaerobia pág. 33 (2011).
22. Garcia, J., Machimura, T. & Matsui, T. A Nation-wide Planning of Agro-residue. Utility for Bioethanol Production and Power Generation in Ecuador. Energy Procedia (2013).
23. Garrido, S. Centrales Termoeléctricas de Biomasa. Renovetec Madrid. Pág. 17. (2009-2012).
24. Gerardi, M. The Microbiology of Anaerobic Digesters. Wastewater Microbiology Series. Published by John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey. (2004).

25. Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Guaranda. Plan estratégico de Ordenamiento Territorial (2010).
26. Hiler, E.; Stout, B. Biomass Energy, A Monograph. TEES Monograph Series. (1985) págs. 76 - 112.
27. Joaquín M.; Moral R.; Compostaje. Ediciones Mundi-Prensa, Eds. Científicas (2011), p 11- 12.
28. Khanal, S.: Anaerobic biotechnology for bioenergy production - principles and applications. Iowa, USA: Blackwell Publishing, (2008).
29. Kaparaju, P.; Rintala, J.: Thermophilic anaerobic digestion of industrial orange waste. En: Environmental Technology 27 (2006), p. 623–633.
30. Klinger, I.; Alexander, R.; Marchaim, U: A suggested solution for slaughterhouse wastes: Uses of the residual materials after anaerobic digestion. En: Bioresource Technology 37 (1991), p. 127–134.
31. Lomas J.M., C. Urbano, L.M. Camarero. Evaluation of a pilot scale downflow stationary fixed film anaerobic reactor treating piggery slurry in the mesophilic range, Biomass Bioenergy 17, 49-58 (1999).
32. López, K., Casanova S., Acosta, C. Análisis del crecimiento microbiano mediante la técnica de Monod y Haldane en un RCTA utilizado para el tratamiento de aguas residuales. Resvista NOOS Volumen 2. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de Colombia. (2013).

33. MAE (2012).Ministerio del Ambiente. Estrategia Nacional de Cambio Climático del Ecuador 2012-2025. [En línea] Available at: <http://www.redisas.org/pdfs/ENCC.pdf>.
34. Madigan, M., Martinko, J., Parker, J. (1997) Brock Biology of Microorganisms. Ed. Prentice Hall International; (1999) Ed. Prentice Hall Iberia. 8ª Ed. Revisada, Inc. pp. 149 - 177, (2002) Brock Biología de los microorganismos. Décima Edición Ed. Pearson.
35. Masse, D.I., Talbot, G., Gilbert, Y. On farm biogas production: a method to reduce GHG emissions and develop more sustainable livestock operations. Anim. Feed Sci. Tech. 166-67 (SI), 436-445 (2011).
36. McMeekin, T. A. and Ross, T. Predictive microbiology: providing a knowledge-based framework for change management. International Journal of Food Microbiology 78:133 - 153 (2002).
37. Monnet, F. An introduction to anaerobic digestion of organic waste, Final Report, Remade Scotlan, November. (2004).
38. Monod, J; La Technique de culture continuo: Theorie et applications. En: Ann. Inst. Pasteur, Paris 79 (1950), p. 390-410.
39. Monroy, O.; Viniegra, G. Biotecnología para el aprovechamiento de los Desperdicios Orgánicos. AGT Editor. (1990), México págs. 44, 65-93.
40. Natureduca. 2012. Naturaleza Educativa. Portal Educativo de Ciencias Naturales y aplicadas. Consultado 10 junio 2012.
Disponibile en http://www.natureduca.com/agro_hort_col.php

41. Nordberg, A.; Edstrom, M.: Codigestion of energy crops and the source sorted organic fraction of municipal solid waste. En: Water science and technology. 52 (2005), p. 217–222.
42. Ostrem, K. Greening Waste: Anaerobic Digestion for Treating the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes. Earth Engineering Center Columbia University (2004).
43. Oyuela, F. Evaluación de la producción de biogás y biol a partir de la torta de *Jatropha curcas* L. Tegucigalpa, Honduras, (2010).
44. Pagés Díaz J, Ileana Pereda Reyes, Magnus Lundin e Iлона Sárvári Horváth. Bioresource Technology. Co-digestion of different waste mixtures from agro-industrial activities: Kinetic evaluation and synergetic effects. 102, 10834–10840 (2011).
45. Plan De Desarrollo y Ordenamiento Territorial. Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Guaranda. (2010).
46. Prescott, L. M., Harley, J. P., and Klein, D. A. Microbiología 4^a Edición, McGraw-Hill. Interamericana. 114 – 136 (1999).
47. Richardson, Y., Drobek, M., Julbe, A., Blin, J., Pinta, F. Biomass Gasification to Produce Syngas. Recent Advances in Thermo-chemical Conversion of Biomass. Chapter 8. Elsevier. (2014).
48. Rodríguez, F. Puesta en marcha de un Laboratorio para la producción de Biogás-Nicaragua. (2010).

49. Romero, J. Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y Principios de Diseño. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. (2000), Colombia págs. 223 – 250.
50. Sakar, S., Yetilmezsoy, K., Kocak, E. Anaerobic digestion technology in poultry and livestock waste treatment- a literature review. Waste Manage (2009) Res., 27, 3–18.
51. Semplades. Plan Nacional del Buen Vivir 2013 -2017. [En línea]
Available at: <http://www.buenvivir.gob.ec/objetivo-7.-garantizar-los-derechos-de-la-naturaleza-y-promover-la-sostenibilidad-ambiental-territorial-y-global#tabs2>.
52. Shuler, M.; Kargi, F. Bioprocess Engineering. Prentice Hall, 2da Edición. Estados Unidos, págs. 120-133 (2002).
53. Solíz, M.: Ecología política y geografía crítica de la basura en el Ecuador. Letras Verdes. Revistas Latinoamericana de Estudios Socioambientales. (2015).
54. Soto, G y Muñoz C. Consideración es teóricas y prácticas sobre el compost, y su empleo en agricultura orgánica. Manejo integrado de plagas y Agroecología. (2002). Costa rica. Nº 65:123-129.
55. Van Lier, J. Zeeman, G., Current. Trends in Anaerobic Digestion. Lettinga Associates Foundation & Wageningen University. The Netherlands (2008).
56. Vargas Moreno, José Manuel. "Revisión de modelos matemáticos de predicción de poder calorífico de materiales biomásicos. Propuesta de nueva metodología 2012".

57. Wang, Junye, Decentralized biogas technology of anaerobic digestion and farm ecosystem: opportunities and challenges. *Front. Energy Res* (2014).
58. Watanabe, T.; Kimura, K.; Asakawa, S., Distinct members of a stable methanogenic archaeal community transcribe genes under flooded and drained conditions in Japanese paddy field soil. En: *Soil Biology and Biochemistry* 41, (2009). p. 276–285.
59. Werner, U.; Stöhr, U.; Hees, N. *Biogas Plants in Animal Husbandry*. Deutsche Zentrum für Entwicklungs technologien (GATE), Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH (2010).

ANEXOS

ANEXO 1
UBICACIÓN



ANEXO 2

FOTOGRAFIAS DEL PROCEDIMIENTO.



Fotografía 1. Recepción



Fotografía 2. Pesado



Fotografía 3. Triturado



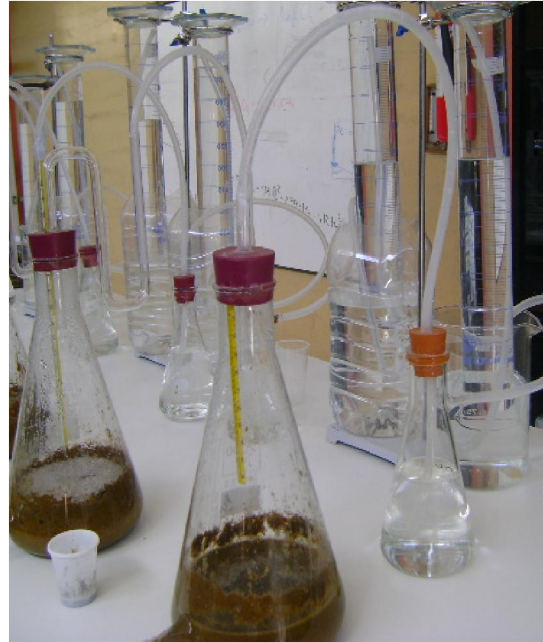
Fotografía 4. Mezclado



Fotografía 5. Envasado



Fotografía 6. Sellado



Fotografía 7. Digestión Anaerobia con Temperatura y sin Temperatura



Fotografía 8. Toma de pH



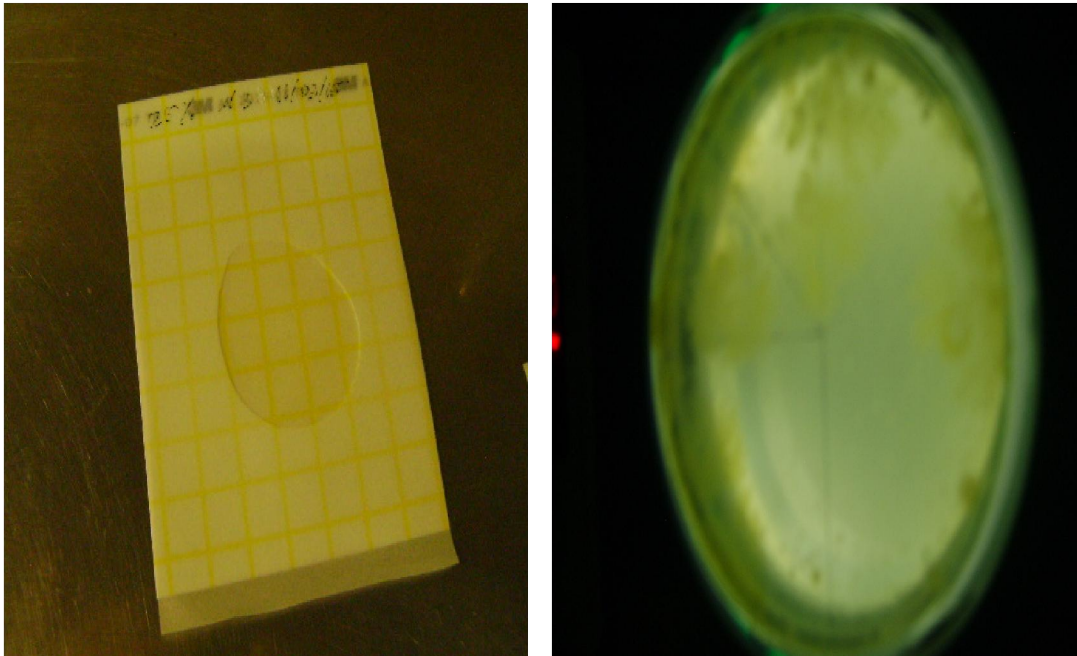
Fotografía 9. Análisis de DQO



Fotografía 10. Análisis de Sólidos Totales



Fotografía 11. Medición de CO₂ y Metano



Fotografía 12. Siembra y Conteo Microbiano

ANEXO 3

GLOSARIO

Codigestión Anaerobia.- Se utiliza para expresar la digestión anaerobia conjunta de dos o más sustratos de diferente origen es el proceso en el cual microorganismos descomponen material biodegradable en ausencia de oxígeno. Este proceso genera diversos gases, entre los cuales el dióxido de carbono y el metano son los más abundantes (dependiendo del material degradado).

pH.- Es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones hidronio [H₃O] presentes en determinadas disoluciones.

DQO.- La demanda química de oxígeno es un parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida. Se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mgO₂/l).

Sólidos Totales.- Los sólidos totales es la expresión que se aplica a los residuos de material que quedan en un recipiente después de la evaporación de una muestra y su consecutivo secado en estufa después de la evaporación de una muestra y su consecutivo secado en estufa a una temperatura definida de 103 a 105.

Cinética de fermentación.- Se describe como el crecimiento y formación de producto por microorganismos no sólo el crecimiento celular activo, sino también a las actividades de descanso y la muerte de las células.

Biomasa vegetal.- Resultado directo de la actividad fotosintética de los vegetales.

Biomasa animal.- Se obtiene a través de la cadena biológica de los seres vivos que se alimentan de la biomasa vegetal.

Fermentación anaerobia.- Es el proceso de producción del metabolito de interés se desarrolla en ausencia de oxígeno; los productos finales son sustancias orgánicas, por ejemplo, ácido láctico, ácido propiónico, ácido acético, butanol, etanol y acetona. Sin embargo en la mayoría de las fermentaciones anaeróbicas, se requiere un poco de oxígeno al inicio del proceso para favorecer el crecimiento y la reproducción del microorganismo.

ANEXO 4

TABLAS

Tabla 11- Promedios de pH

Tiempo (d)	pH			
	50-50 T amb promedio 3R	50-50 T30 °C promedio 3R	75-25 T amb promedio 3R	75-25 T30 °C promedio 3R
0	6,68	6,74	6,50	6,83
1	4,37	4,86	5,07	6,37
2	4,45	4,71	4,96	5,85
3	4,42	4,66	4,88	5,63
4	4,60	4,67	4,78	5,24
5	4,54	4,60	4,59	5,12
6	4,71	4,80	4,76	5,00
7	5,34	5,04	5,16	5,16
8	5,62	5,28	5,48	5,45
9	5,81	5,86	5,58	5,75
10	5,78	5,74	5,63	5,98
11	5,90	5,83	5,60	5,74
12	5,74	5,87	5,49	5,88
13	5,75	5,80	5,54	5,92
14	5,72	5,89	5,66	6,01
15	5,77	5,84	5,67	6,02
16	5,78	5,91	5,68	6,02
17	6,06	6,06	5,79	5,91
18	6,15	6,11	5,68	5,98
19	6,25	6,36	5,84	6,15
20	6,27	6,34	5,82	6,04
21	6,32	6,16	5,95	6,02
22	6,28	6,38	6,04	6,12
23	6,41	6,39	6,19	6,21
24	6,48	6,51	6,10	6,18
25	6,48	6,46	6,09	6,29
26	6,49	6,52	6,13	6,31
27	6,49	6,53	6,17	6,24
28	6,56	6,69	6,18	6,38
29	6,61	6,60	6,21	6,33
30	6,65	6,27	6,50	6,40

Tabla 12.- Promedios de DQO

Tiempo (d)	DQO (mg/L)			
	50-50 T amb promedio 3R	50-50 T30 °C promedio 3R	75-25 T amb promedio 3R	75-25 T30 °C promedio 3R
0	27277,78	25095,56	30005,56	29105,39
1	27223,06	29590,28	32549,31	31572,83
2	27344,44	29722,22	32694,44	31713,61
3	22642,22	24611,11	27072,22	26260,06
4	22821,11	24805,56	27286,11	26467,53
5	27945,00	30375,00	33412,50	32410,13
6	27277,78	27277,78	30005,56	29105,39
7	29590,28	29590,28	32549,31	29945,36
8	29722,22	29722,22	32694,44	30078,89
9	24611,11	24611,11	27072,22	24906,44
10	24805,56	24805,56	27286,11	27613,54
11	22041,67	22041,67	24245,83	24536,78
12	25013,89	25013,89	24513,61	24807,77
13	24187,50	24187,50	23703,75	23988,20
14	25597,22	25597,22	25085,28	25386,30
15	24673,61	22206,25	24180,14	25800,21
16	25611,11	23050,00	25098,89	24345,92
17	26965,28	24268,75	26425,97	25633,19
18	25159,72	22643,75	24656,53	23916,83
19	25513,89	22962,50	25003,61	24253,50
20	23319,44	20987,50	22853,06	22167,46
21	23145,83	20831,25	22682,92	22002,43
22	25256,94	22731,25	24751,81	24009,25
23	26750,00	24075,00	26215,00	25690,70
24	27201,39	24481,25	26657,36	26124,21
25	24583,33	22125,00	27041,67	26500,83
26	23047,22	20742,50	25351,94	24844,91
27	21645,31	24481,25	27934,65	29323,10
28	22143,00	22125,00	24041,67	26500,83
29	20932,00	20742,50	20456,54	24844,91
30	20545,00	20242,65	22921,53	21323,10

Tabla 13.- Promedios de sólidos totales

Tiempo (d)	Sólidos Totales(g/L)			
	50-50 T amb	50-50 T30 °C	75-25 T amb	75-25 T30° C
	promedio 3R	promedio 3R	promedio 3R	promedio 3R
1	59,08	61,23	67,04	72,08
2	58,31	62,30	64,53	68,96
3	58,24	61,11	61,95	69,04
4	55,16	60,68	58,78	67,00
5	53,44	58,36	59,55	63,99
7	51,70	58,70	55,66	63,97
9	54,22	56,87	60,68	63,45
11	54,33	56,53	58,16	61,57
13	49,43	55,89	58,05	60,37
15	46,91	53,24	57,81	59,22
17	49,46	52,34	55,86	58,51
19	49,98	51,72	53,36	55,47
21	48,77	48,58	51,79	56,30
25	46,93	48,85	51,9	55,82
30	51,05	49,12	52,34	54,91

Tabla 14.- Promedios de sólidos volátiles

	Sólidos Volátiles(g/L)			
	50-50 T amb	50-50 T30 °C	75-25 T amb	75-25 T30 °C
Tiempo (d)	promedio 3R	promedio 3R	promedio 3R	promedio 3R
1	47,23	47,76	51,99	53,02
2	42,24	48,07	48,52	49,61
3	40,74	47,10	47,76	51,02
4	40,97	47,15	45,45	50,61
5	38,60	45,98	45,80	48,54
7	38,92	45,21	44,48	47,91
9	40,25	43,38	45,56	47,84
11	39,44	44,20	45,21	46,46
13	35,37	41,65	44,81	45,41
15	34,91	40,56	43,30	43,87
17	35,98	40,10	44,14	43,62
19	36,98	39,35	41,55	42,44
21	36,65	39,35	43,67	42,70
25	36,05	37,30	41,37	42,54
30	37,41	36,44	41,36	42,26

Tabla 15.- Promedios de metano

tiempo (h)	50 50 T amb Promedio acumulado	50 50 Temp 30 °C Promedio acumulado	75 25 T amb Promedio acumulado	75 25 Temp 30 °C Promedio acumulado
	cm ³ N/g SV	cm ³ N/g SV	cm ³ N/g SV	cm ³ N/g SV
0	0	0	0	0
24	6,03701206	7,33571726	4,94735316	5,93642123
48	13,877049	15,0931976	10,1488933	9,40572554
72	20,1801129	23,198282	16,9352717	15,5584159
96	26,4285741	30,0197297	24,0751104	22,2762787
120	35,7862179	39,8822522	34,3459052	32,3023804
144	47,2055277	51,4705077	46,5347168	44,4963761
168	58,3273376	63,8339386	58,5302126	56,5251221
192	69,3349112	75,9332564	68,940147	66,8465682
216	85,235432	91,5933168	83,2536625	81,3342389
240	96,7665301	102,296619	93,9346969	91,3294156
264	109,641768	113,822592	106,097797	103,723484
288	122,436485	126,235721	119,175777	117,229239
312	136,577332	140,159776	131,733683	129,613946
336	152,971356	156,93199	146,242457	144,446356
360	163,727623	168,693851	158,453741	157,283532
384	174,10119	179,223282	169,683094	168,825019
408	186,631783	192,116296	181,328153	180,230748
432	197,918298	203,03283	190,066079	189,174324
456	206,822999	212,082041	196,629576	195,994418
480	215,699966	220,669812	203,228749	202,773446
504	219,180674	224,219811	206,521486	206,191204
528	220,713295	225,95229	208,588189	208,197457
552	222,398767	227,850228	209,940761	209,572329
576	224,011384	229,531958	211,224779	210,941017
600	225,727258	231,128537	212,595018	212,661548
624	226,763335	232,62118	213,598738	213,793846
648	228,176055	233,873306	215,05525	215,519874
672	229,389195	235,07348	216,014204	216,581837
696	230,85994	236,585845	217,355488	217,603966
720	231,306672	237,325013	217,799424	218,230831

Tabla 16.- Promedios de biogás acumulados /g SV

Tiempo	50 50 T	50 50 Temp	75 25 T	75 25 Temp
	amb Promedio acumulado	30 Promedio acumulado	amb Promedio acumulado	30 Promedio acumulado
	cm ³ N/g	cm ³ N/g	cm ³ N/g	cm ³ N/g
	SV	SV	SV	SV
0	0	0	0	0
24	8,17196272	9,83274	7,11868594	12,0068641
48	19,2505803	21,7811238	16,7571568	19,5353212
72	30,8990462	36,0359554	28,201098	32,5814333
96	45,6575875	52,3048637	41,8220904	46,4617725
120	64,6673786	70,1341201	58,6378205	60,7651029
144	82,0946502	90,1955741	75,6346188	77,6885891
168	99,5178558	108,507678	90,850537	93,2098562
192	117,031806	125,432664	106,279971	108,329591
216	138,01109	146,366454	123,17342	126,246825
240	155,528877	163,829232	138,802027	142,145591
264	177,311515	186,952594	157,603163	161,626292
288	198,437153	209,453621	177,005075	182,371127
312	216,300938	228,650188	192,11721	196,962167
336	236,72886	250,292976	209,343569	215,582132
360	252,436658	267,378114	224,731796	231,217002
384	269,384163	286,769692	239,073534	246,344046
408	287,265448	306,757477	254,136419	261,374004
432	303,276204	323,400685	268,663084	275,429989
456	321,428671	341,916354	283,536457	289,694542
480	335,46545	355,820471	293,311839	299,882923
504	342,928071	364,105874	301,037765	307,023762
528	345,833281	366,997954	303,991336	310,172064
552	348,418272	369,658209	306,666912	312,660505
576	351,648784	373,196617	309,536023	315,708281
600	354,319404	375,864122	312,322603	318,26307
624	357,388432	379,284552	315,477902	321,228925
648	360,6302	382,53237	318,223659	323,711549
672	363,27925	385,041449	320,64265	326,016864
696	366,44416	387,805018	323,413268	328,700859
720	367,862546	389,466262	325,00769	330,525988