

3522

T-UES
1506
C313c
1992
Ej.1

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA



**INCORPORACION AL CICLO
ECOLOGICO DE UNA MEZCLA DE HECES Y ORINA
HUMANA Y DESECHOS VEGETALES PARA LA
OBTENCION DE BIOGAS Y ABONO
ORGANICO NIVEL LABORATORIO**

TRABAJO DE GRADUACION PRESENTADO POR:

**WILFREDO CARRANZA MEJIA
CELINA ERLINDA ELIAS PORTILLO**

PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO



15100955

15100955

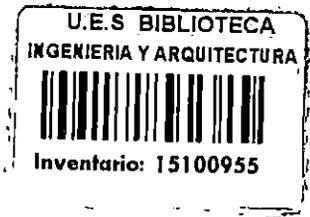
AGOSTO 1992.

SAN SALVADOR, EL SALVADOR, CENTRO AMERICA.

Recibido, el 10/nov/92

THE UNIVERSITY OF CHICAGO
DEPARTMENT OF CHEMISTRY

PHYSICAL CHEMISTRY



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

AUTORIDADES

DR. FABIO CASTILLO FIGUEROA
RECTOR

LIC. MIRNA ANTONIETA PERLA DE ANAYA
SECRETARIO GENERAL

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

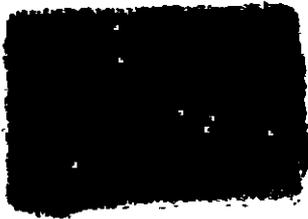
ING. JUAN JESUS SANCHEZ SALAZAR
DECANO

ING. JOSE RIGOBERTO MURILLO CAMPOS
SECRETARIO

ESCUELA DE INGENIERIA Y QUIMICA


ING. ROBERTO ARISTIDES CASTELLON MURCIA
DIRECTOR





1950

1951

1952

1953

1954

1955

1956

1957

1958

1959

1960

1961

1962

1963

1964

1965

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

TRABAJO DE GRADUACION

"INCORPORACION AL CICLO ECOLOGICO DE UNA MEZCLA DE HECES
Y ORINA HUMANA Y DE DESECHOS VEGETALES PARA LA OBTENCION
DE BIOGAS Y ABONO ORGANICO A NIVEL DE LABORATORIO"

COORDINADOR

ING. ANA MARÍA GONZALEZ TRABANINO



ASESORES

ING. CARLOS EDUARDO CAÑAS GUTIERREZ

TEC. NELSON FLORES BLANDON

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros más sinceros agradecimientos por su valiosa colaboración a las siguientes personas e Instituciones :

COORDINADOR :

Ing. Ana María Elizabeth de los Angeles González Trabani, por habernos apoyado en forma constante y darnos la fé, la esperanza el valor para poder culminar nuestro Trabajo de Graduación.

ASESORES :

Ing. Carlos Cañas, por su constante ayuda técnica y científica en el desarrollo de nuestro trabajo así como sus consultas que fueron a nuestro criterio fructíferas.

Tec. Nelson Flores, por habernos trasladado sus conocimientos en el campo técnico.

CENTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA AGRICOLA-CENTA. Por permitimos realizar la investigación experimental en sus instalaciones. En especial :

Dra. Ruth Calderón, Jefe de los Laboratorios de Química del CENTA

Dr. Manuel Martínez, Jefe del Laboratorio de Química Agrícola

Ing. Rolando Sánchez, Técnico del Laboratorio de Química Agrícola

Así como también a todas aquellas personas que nos permitieron relizar con más facilidad nuestro trabajo.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR - U.E.S. - Por su colaboración técnica e investigación. En especial :

Lic. Digna Dalicia Padilla de García, Docente de Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Agronómicas.

Ing. Delmy Rico Peña, por asesorarnos técnicamente en la presentación correcta del documento de Trabajo de Graduación.

Señores que laboran en la PLANTA PILOTO por su apoyo incondicional.

COMISION EJECUTIVA HIDROELECTRICA DEL RIO LEMPA - C.E.L. - Por darnos su apoyo en especial a las siguientes unidades y personas que laboran en estos :

Ing. Saúl Ayala, Gerente de GEOCEL

Dra. Elizabeth de Mayen, Jefe del Laboratorio del Centro de Investigaciones Geotérmicas (C. I. G.).

Lic. Guillermo Cacao, Técnico de Laboratorio del Centro de Investigaciones Geotérmicas (C. I. G.). GERENCIA DE GEOCEL.

LABORATORIO CLINICO " DR. E. FASQUELLE "; en especial a la Doctora Lucrecia Q. de Medina, por su colaboración en los análisis microbiológicos.

INSTITUTO CENTROAMERICANO DE INVESTIGACION Y TECNOLOGIA INDUSTRIAS (ICAITI), por colaborar con toda la documentación técnica, referente al tema de BIOGAS, en especial al Ing. Carlos Vargas, quien permitiera utilizarla para los fines de este trabajo de investigación.

DEDICATORIA

A NUESTRO PADRE CELESTIAL : POR PERMITIRME Y CONCEDERME LA PACIENCIA Y SABIDURÍA DE LOBRAR MI OBJETIVO.

A MIS PADRES : JOSÉ NIEVES CARRANZA CÁRCAMO Y MARÍA ESTHER MEJÍA DE CARRANZA.

POR EL APOYO, AMOR Y CARIÑO CONSTANTE BRINDADO EN FORMA INCONDICIONAL.

A MI ESPOSA : MARÍA VICTORIA CONTRERAS DE CARRANZA

POR DARME LA FE Y ESPERANZA, ASÍ COMO EL AMOR Y CARIÑO DE ESPOSA.

A MI HERMANA, FAMILIARES Y AMIGOS

A MEMORIA DE : RIGOBERTO CARRANZA MEJÍA CON AMOR DE SU HERMANO

ROSA CARTAGENA, CON CARIÑO Y AMOR DE SU NIETO

WILFREDO CARRANZA MEJIA

DEDICATORIA

A DIOS TODOPODEROSO :

POR DARME FORTALEZA Y CONFIANZA INFINITA EN CADA MOMENTO DE MI VIDA.

A MIS PADRES :

LUIS ELIAS GUADRON

MARTHA DE ELIAS

POR ESE AMOR TAN INTENSO E INCOMPARABLE QUE ME PRODIGARON,
PARA QUE CONSOLIDARA ESTA ETAPA DE MI VIDA.

A MI ESPOSO :

CON MUCHO AMOR Y AGRADECIMIENTO POR SU COMPRENSIÓN Y APOYO
BRINDADO CADA DÍA.

A MIS QUERIDAS HIJAS :

CELINA STEFANIE

FATIMA ELVIRA ESTHER

BRENDA CAROLINA

COMO UN TESTIMONIO DE AMOR, CONSTANCIA Y VALOR, PARA QUE DE ESTA MISMA FORMA AFRONTEN TODAS LAS SITUACIONES DE LA VIDA.

A MIS HERMANOS :

RICARDO ANTONIO

MARTHA ESTHER

LUIS ERNESTO

COMO UNA MUESTRA DE FE Y ESPERANZA, DE LOGRAR UNA META

A LA MEMORIA DE :

JUANA EVANGELINA MARTINEZ

MARIA ERLINDA GUADRON DE GUERRERO

RICARDO ADOLFO GUERRERO, Y

A TODAS AQUELLAS PERSONAS QUE ME BRINDARON SU APOYO DURAN
TE LA REALIZACIÓN DE ESTE TRABAJO.

CELINA ERLINDA ELIAS PORTILLO

1. The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that this is essential for the proper management of the organization's finances and for ensuring compliance with relevant laws and regulations.

2. The second part of the document outlines the various methods used to collect and analyze financial data. It describes how this information is used to identify trends, assess performance, and make informed decisions about the future of the organization.

3. The third part of the document focuses on the role of the accounting department in the overall business strategy. It highlights how the department provides critical insights into the company's financial health and helps to identify areas for improvement and growth.

4. The fourth part of the document discusses the importance of transparency and accountability in financial reporting. It stresses that providing clear and accurate information to stakeholders is crucial for building trust and maintaining the organization's reputation.

5. The fifth part of the document addresses the challenges faced by organizations in the current economic environment. It discusses how these challenges can be overcome through effective financial management and strategic planning.

6. The sixth part of the document provides a summary of the key findings and recommendations. It reiterates the importance of maintaining accurate records and provides practical advice on how to implement these recommendations.

7. The final part of the document concludes with a statement of the author's hope that the information provided will be helpful to the reader in their own financial management efforts.

R E S U M E N

En el presente estudio, se evalúa a partir del diseño y montaje de equipos de la etapa experimental, a nivel de laboratorio, una mezcla de heces y orina humana, lechuga y repollo como desechos vegetales y agua , para la obtención de biogás y abono orgánico en un sistema discontinuo y medio anaeróbico, en el cual se lleva a cabo la fermentación.

La investigación se desarrolla en forma global de la siguiente manera :

1. Etapa de Recolección y Revisión Bibliográfica.

La cual consiste en investigar todos los temas relacionados con el presente trabajo, así como de entrevistas realizadas a técnicos y profesionales conocedores del tema, para constatar la factibilidad de poder realizar la investigación y definir el alcance de éste.

2. Etapa del Método Experimental

La cual consiste en selección, disponibilidad, recolección y transporte de la materia prima; así como del diseño experimental, que está sustentado desde la preparación de la carga, evaluación de los sustratos, esquema del diseño experimental a escala de laboratorio, variables del diseño experimental, variables de control del proceso, evaluación del biogás y bioabono, hasta marcha generalizada del proceso experimental.

3. Etapa de Desarrollo de Fase Experimental

La cual consiste en desarrollar una etapa inicial, la cual es el desglose de todas las actividades planteadas en la marcha generalizada del proceso, en cada una de las mezclas A,B,Co y Cf; efectuándose posteriormente la selección de una mezcla óptima, la cual refleje los mejores resultados en m^3 Biogás/día/Kgs)

Esta mezcla óptima, en realidad no pudo ser evaluada, por medio de un criterio de análisis estadístico estricto, debido a que la mezcla C_F sólo una vez fue realizada.

Para finalizar se realizó un análisis de resultados para el que se utilizó el análisis comparativo de los resultados obtenidos con datos teóricos de referencia, así como el análisis estadístico de los mismos. Ambos criterios al unirlos, permitieron que se llegaran a obtener conclusiones y emitir recomendaciones del presente trabajo.

I N D I C E

	Página
INDICE DE CUADROS	iv
INDICE DE FIGURAS	xiv
INTRODUCCION	1
1. EL MEDIO AMBIENTE	3
1.1. Definición de Ecosistema	3
1.2. El Ecosistema y el Hombre	4
1.3. Relación entre el Ecosistema, el Hombre y la Contaminación Ambiental	5
1.4. Alternativas de solución a la contamina- ción ambiental	6
1.5. Reciclaje de materia orgánica	7
2. MICROBIOS METANOGENICOS	9
2.1. Los microbios Metanogénicos en la Natura- leza	9
2.2. Los microbios en las tres fases de fermen- tación metanogénica	10
2.3. Grupos y Acción de los Microbios que no producen Metano	14
2.4. Los microbios no Metanogénicos y su Acción	16
2.5. Morfología y Clasificación de las Bacterias Productoras de Metano	17
2.6. La Acción entre Bacterias no Productoras de Metano	19

	Página
3. BIOQUIMICA DE LA FERMENTACION DEL BIOGAS	23
3.1. Características de la fermentación del bio gás	23
3.2. Procesos Bioquímicos de Fermentación	29
3.3. Fermentación anaeróbica de Compuestos orgá nicos complejos	36
3.4. Formación de Metano	48
4. PROCESOS DE DIGESTION PARA PRODUCIR BIOGAS	54
4.1. Clasificación de los Procesos de Digestión para producir biogás	54
4.2. Material de Carga para la Fermentación de la producción del Biogás	58
4.3. Condiciones de Operación para la Fermenta- ción Metanogénica	69
4.4. Procesos de Fermentación Metanogénica	77
5. MATERIA PRIMA	86
Materia Prima Convencional para preparar la carga	86
	89
6. EL BIOGAS Y ALGUNAS DE SUS APLICACIONES	102
6.1. Características Principales de la combus- tión del biogás	104
6.2. Biogás en la Agricultura	106

	Página
6.3. Uso múltiple del biogás: Función e importancia en la Agricultura	109
6.4. Purificación del biogás	111
6.5. Quemadores de biogás	112
6.6. Lámparas de biogás para uso doméstico	116
6.7. Biogás como combustible para motores de combustión interna	117
7. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION EXPERIMENTAL	120
7.1. Recolección y Revisión de Información Básica	120
7.2. Etapa del Método Experimental	121
7.3 Etapa de Desarrollo de Fase Experimental	148
8. ANALISIS DE RESULTADOS	151
8.1. Descripción del Método de Análisis	151
8.2. Aplicación del Método de Análisis	152
CONCLUSIONES	221
RECOMENDACIONES	227
REFERENCIAS	229
APENDICES	232

INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Clasificación de las Methanobacterias	20
2	Gases Generados por diversos compuestos orgánicos en condiciones totalmente anaeróbicas	40
3	Rendimiento de gas con distintas materias en diferentes regiones de la República popular China, (concentración de 6% S.T.) (m^3/Kg S.T.)	44
4	Rendimiento de gas con materiales empleados comúnmente a distinta temperatura (m^3/Kg S.T)	45
5	Velocidad de generación de gas a partir de materiales de uso común en zonas agrícolas de la república popular China	46
6	Relación de carbono a nitrógeno de las materias primas utilizadas para la producción de biogás.	67
7	Contenido de sólidos totales (en seco) en materiales de fermentación comúnmente utilizados en zonas rurales, realizados en digestores continuos	68

Cuadro		Página
8	Producción de residuos humanos y animales (datos estimados) en zonas rurales de Shangai	68
9	Concentración inhibidora de algunos metales y de otros compuestos químicos, en los procesos de fermentación anaeróbica	75
10	Composición promedio del Biogás	90
11	Propiedades Físicas y Químicas del Metano	92
12	Requerimientos y aplicaciones específicas de cantidad de biogás	93
13	Concentraciones de algunas sustancias de importancia fisiológica en la orina humana y en el plasma, y composición de la orina humana en base seca.	113
14	Composición aproximada de las heces humanas con una dieta promedio	114
15	Composición media de algunas hortalizas	116
16	Hortalizas Nitrogenadas, elementos nutritivos contenidos en cien partes en estado natural	118
17	Riqueza en proteínas (en gramos) de 1 Kg. de legumbres y hortalizas nitrogenadas	119

Cuadro		Página
18	Hortalizas mucilaginosas y salinas, elementos nutritivos contenidos en cien partes en estado natural	121
19	Relación volumétrica de mezcla Base B	128
20	Composición porcentual de mezclas A, B, C _F , C _F (% V/V)	129
21	Análisis a realizar a cada sustrato	130
22	Composición de mezclas experimentales que conforman la carga para la digestión anaeróbica	137
23	Análisis realizados al Bioabono	140
24	Determinación de análisis físicos para los sustratos de lechuga y repollo por separado	152
25	Análisis físicos de origen vegetal de mezcla de lechuga y repollo (afluente) presentado como promedio de promedios de las mezclas A, B y C _F .	154
26	Contenido porcentual de nutrientes de las hortalizas	155

Cuadro		Página
27	Macro elementos y micro elementos en desechos vegetales (mezclas de lechuga y repollo) utilizados en la fermentación anaeróbica para la producción de biogás	157
28	Análisis físico químico de orina, heces y de ambos de una persona de 150 libras de peso	159
29	Resultados de análisis físicos para los sustratos de heces, orina y mezcla de ambos	160
30	Resultados de análisis Físico Químicos de mezclas de heces y orina de origen humano en las mezclas A,B y C _f	162
31	Composición porcentual de macronutrientes de desechos humanos	163
32	Resultados de macroelementos del componente de origen humano (Heces y Orina) de las mezclas A,B y C _f (% P/P)	164
33	Análisis Físico Químico de mezclas totales que entran a digestores A,B y C _f respectivamente	167

Cuadros		Página
34	Macro elementos y micro elementos de mezclas totales A, B y C_f , que entran a los digestores para efectuar el proceso de fermentación anaeróbica	169
35	Resultados obtenidos en el Centro de Investigaciones Geotérmicas (CIG), del análisis de componentes gaseosos que conforman el biogás producido en la fermentación anaeróbica con la mezcla B y C_f (% mol).	177
36	Densidad del biogás presente en las mezclas B y C_f , producido por fermentación anaeróbica a $T=25^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{ Atm}$	181
37	Peso molecular promedio de Biogás	182
38	Volúmenes (ml) de biogás, de las mezclas A, B y C_f , depositados en el recolector de agua (Gasómetro), así como el total de biogás producido por las mezclas A, B y C_f , (ml), en el espacio <u>li</u>	

Cuadro		Páginas
	bre del digestor, tubería del sistema y en el recolector de agua (Gasmómetro) (ml)	184
39	Sólidos volátiles transformados en el proceso de fermentación anaeróbica de las mezclas A, B y C _f	186
40	Rendimientos en base a los m ³ /día obtenidos experimentalmente con respecto a los Kg de sólidos volátiles para las mezclas A, B y C _f	188
41	Balance de Nitrógeno total para las mezclas B y C _f	189
42	Descenso de Nitrógeno en la fase líquida de las mezclas B y C _f	191
43	Datos comparativos de análisis físicos de la mezcla "A", como promedio de promedios de afluentes y efluentes	193
44	Datos comparativos de análisis físicos de la mezcla "B", como promedio de promedios de afluentes y efluentes	193
45	Datos comparativos de análisis físicos de la mezcla "C", como promedio de afluentes y efluentes	194

Cuadro		Página
46	Porcentajes de Nitrógeno, fósforo y potasio, presentes en algunos fertilizantes sintéticos (% P/P)	196
47	Promedio de macro y micro elementos de las mezclas afluentes A, B y C _f (bioabono)	197
48	Organismos causantes de algunas enfermedades originadas por el manipuleo de excretas humanas	200
49	Algunos microorganismos presentes en las excretas humanas sometidos al proceso de digestión anaeróbica	201
50	Contenido de Ascaris lumbricoides de heces humanas, recolectadas en zonas rurales (Comunidad Santa Eduvigés, en carretera a Turicentro "Los Chorros")	203
51	Comparación de requerimientos nutricionales del maíz utilizando un fertilizante químico y bioabono obtenido de la mezcla C _f	212
52	Macronutrientes necesarios (Kg) de una mezcla de fertilizante químico (Triple 15) y bioabono (Mezcla C _f), para la producción de maíz	213

Cuadro		Página
53	Macronutrientes y micronutrientes de mezclas A,B y C _f de entrada y salida de los digestores en la fermentación anaeróbica	216

A P E N D I C E S

B1	Promedio de Mezcla B, de composición de Biogás, antes y después de incorporar el vapor de agua en la fase gaseosa.	240
C1	Volúmenes totales iniciales de aire en los digestores para mezclas A, B y C (ml).	243
C2	Radios,Alturas y Longitudes Finales de los Digestores utilizados en el proceso de Fermentación Anaeróbica, para las mezclas A, B y C _f .	244
C3	Volumen Final de Biogás en los Digestores para las Mezclas A, B Y C _f (ml).	244
E1	Estándares para determinación de fósforo	255
F1	Sustratos de origen vegetal como mezcla de lechuga más repollo de afluyente, para los digestores A,B y C.	257

Cuadro		Página
F2	Sustratos de Origen humano como mezcla de heces más orina de afluentes para los digestores A, B y C	257
G1	Densidades para los digestores "A", con referencia a la mezcla "A"	259
G2	Densidades para los digestores "B", con referencia a la mezcla "B"	258
G3	Densidades para los digestores "B" y "C" con referencia a las mezclas B y C respectivamente	260
H1	Variable de Control de la mezcla "A", al inicio del proceso de Fermentación Anaeróbica	261
H2	Volúmenes Acumulados de Biogás en el Gasómetro, mezcla "A" (ml)	262
H3	Variable de Control de la mezcla "A", al final del Proceso de Fermentación Anaeróbica	263
H4	Variables de Control de las mezclas "B" y "C" al inicio del proceso de Fermentación Anaeróbica	263

Cuadro		Página
H5	Volúmenes Acumulados de Biogás en el Gasómetro, mezclas "B" y "C"	264
H6	Variable de Control de mezclas "B" y "C" al final del Proceso de Fermentación Anaeróbica	264
H7	Volumen de Biogás, recolectado en el Gasómetro, durante la fermentación anaeróbica de la mezcla "A" (ml)	265
H8	Volumen de Biogás, recolectado en el Gasómetro durante la fermentación anaeróbica de las mezclas "B" y "C" (ml)	266
H9	Rendimiento (L/día/Kg S.T. iniciales) de mezcla "A" durante la Fermentación Anaeróbica	267
H10	Rendimiento (L/día/Kg. S.T. iniciales) de mezclas "B" y "C" durante la fermentación anaeróbica	268
I1	Análisis Estadístico de %H, %S.T., %S.V. y % CENIZAS par ala mezcla "A" (afluente)	273

Cuadros		Página
I2	Análisis Estadístico de %H, %S.T., %S.V. y % CENIZAS para la mezcla "A" (efluente)	274
I3	Análisis Estadístico de %H, %S.T., %S.V. y % CENIZAS, para la mezcla "B" (afluente)	275
I4	Análisis Estadístico de %H, %S.T., %S.V. y % CENIZAS para la mezcla "B" (efluente)	276
I5	Análisis Estadístico de %H, %S.T., %S.V. y % CENIZAS para la mezcla "C" (afluente y efluente)	277

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Microbios que participan en las tres fases del proceso de fermentación metanogénica	10
2	Catabolismo de compuestos orgánicos complejos	13
3	Morfología de las metanobacterias	18
4	Procesos de descomposición anaeróbica de un compuesto orgánico	25
5	Curva de crecimiento típico de la colonia de bacterias	26
6	Procesos bioquímicos de fermentación anaeróbica	31
7	Digestión anaeróbica y sus etapas	34
8	Trayectoria de formación de metano a partir de ácidos complejos contenidos en los lodos municipales; los porcentajes indican las tasas de transferencia del consumo de oxígeno por vía química	39
9	Degradación anaeróbica de la glucosa	43
10	Oxidación B de ácidos grasos	47

Figura		Página
11	Diagrama Generalizado de la Degradación anaeróbica de los tres principales compuestos orgánicos	49
12	Estructura química de coenzima F ₄₂₀	50
13	Hipótesis Barker, para producir metano	54
14	Efecto de la temperatura en la producción de biogás	70
15	Tiempo de retención vrs. temperatura de digestión	78
16	Diagrama de proceso de fermentación semi-contínuo	81
17	Proceso generalizado de fermentación anaeróbica	110
18	Componentes del Sustrato Utilizado como carga para la producción de Biogás	125
19	Esquema del diseño experimental a escala de laboratorio del proceso anaeróbico para la producción de biogás.	133

INDICE DE FIGURAS DE APENDICES

Figura		Página
H1	Curva de Volumen de Biogás acumulado en el transcurso de la Operación de Fermentación anaeróbica (para el digestor "A")	269
H2	Curva de Volumen de Biogás Acumulado en el transcurso de la Operación de Fermentación Anaeróbica (para los digestores "B" y "C")	270
H3	Curva de Rendimiento de Biogás durante la Operación de Fermentación Anaeróbica (para digestor "A").	271
H4	Curva de Rendimiento de Biogás durante la Operación de Fermentación Anaeróbica (para digestores "B" y "C")	272

INTRODUCCION

El presente trabajo está planteado en base a la obtención del biogás y abono por vía anaeróbica, a nivel experimental, a partir de una mezcla de sustratos (heces y orina humana, desechos vegetales y agua), con el fin de caracterizar las materias primas utilizadas, productos, subproductos obtenidos y la eficiencia del proceso, considerando los principales parámetros que intervienen en el mismo.

Específicamente, el presente trabajo se enfocó en determinar a escala de laboratorio, la mezcla óptima de heces y orina humana y desechos vegetales (lechuga y repollo) en la producción de biogás y abono orgánico por fermentación anaeróbica, a partir de las diferentes mezclas consideradas en el experimento en particular.

Se establece: una Metodología y la eficiencia de conversión en biogás y abono de las mezclas en estudio, lo cual viabiliza la realización de trabajos posteriores para optimizar el grado de conversión del proceso y sustratos estudiados.

Con este trabajo, se pretende dar una herramienta más de análisis para la producción de biogás y abono orgánico, utilizando la combinación de sustratos mencionada anteriormente, lo cual representa un trabajo original debido a que en el país, no se han efectuado estudios con combinaciones de estos tres sustratos; únicamente se han realizado trabajos

de graduación e investigación con los sustratos por separado, por lo que representa una investigación en fase experimental pionera.

Los conceptos básicos, que son aplicados en este estudio, se refieren a aquellos proporcionados en microbiología industrial, los cuales están incluidos en el glosario que se encuentra al final de este trabajo. De igual manera, intervienen en el proceso de fermentación anaeróbica conceptos vertidos por las diversas materias primas que conforman el currículum de Ingeniería Química.

Para el desarrollo de este trabajo, se hizo una cuidadosa recopilación de información bibliográfica, y se contó con la asesoría técnica de profesionales especializados en el tema, así mismo se dispuso de la colaboración de técnicos analistas de: la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL), el Centro de Tecnología Agrícola (CENTA), Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA) y otras instituciones gubernamentales.

Finalizada la fase experimental, se dispuso de la caracterización de los sustratos, productos y subproductos; así como de la eficiencia de conversión que permitió evaluar la factibilidad de este proceso de fermentación anaeróbica, la cual proporcionó las bases para futuros trabajos de investigación que deseen ahondar o ampliar este tema.

1 EL MEDIO AMBIENTE

Para la ecología, el medio ambiente, en forma genérica se define como el conjunto de factores y fuerzas externas a los que responde efectiva o potencialmente un organismo o agregado de organismos (10).

El medio ambiente comprende además las materias primas de la vida y las condiciones, ya sean favorables o desfavorables que afectan el uso de esos materiales (10).

Debido a que el concepto de ambiente, como ha quedado definido, tiene un contenido muy amplio y muy general, ha surgido la necesidad de emplear un término más específico para asignar sus respectivos ambientes a ciertos organismos en particular o a una asociación concreta de organismos. Tal término es el habitat, definido como el tipo de ambiente, lugar o situación donde reside un organismo y grupo de organismos relacionados ecológicamente (10).

1.1 DEFINICIÓN DE ECOSISTEMA

Es el lugar o espacio en el que se lleva a cabo cambios de energía entre las diversas especies vivas o no vivas que se encuentran habitando dicho espacio. Para que este ecosistema no sufra alteraciones debe de conservar un EQUILIBRIO; es decir que debe de existir un intercambio de energía, simultáneo, entre todas las especies que se encuentran habitando el sistema, para que éste no se destruya o se pierda (10).

También se define así :

Es el habitat, un lugar o situación donde reside un organismo o grupo de organismos relacionados ecológicamente con todos sus factores, o sea seres vivos o ambiente biótico y componentes no vivos o ambiente abiótico (10).

El ecosistema consta de cuatro partes esenciales :

- Sustancias ambientales no vivas (elementos químicos) y
- Gradiente (humedad, vientos, radiación solar, etc.)
- Los productores llamados también conversores o transductores, o sea las plantas autótrofas
- Los descompositores o sea las bacterias, hongos y otros organismos.

En el ecosistema interviene la energía solar, la cual es la fuente de energía primordial para el mismo (10).

1.2 EL ECOSISTEMA Y EL HOMBRE

A través del tiempo, las comunidades de seres vivos, así como de seres no vivos, han ido evolucionando, transformándose o destruyéndose, estableciéndose un factor preponderante para la consecución de esta transformación el cual es :

Luchar por la vida, sobreviviendo el ser más apto.

Este factor ha traído genéricamente cambios bruscos en el ambiente biótico y abiótico; sin embargo, es el hombre como ser racional, que ha logrado el lugar especial en el dominio de estos ambientes

(biótico y abiótico), comportándose como el principal destructor y usurpador de ecosistemas completos bien organizados (10).

1.3 RELACIÓN ENTRE EL ECOSISTEMA, EL HOMBRE Y LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL.

El hombre, a través de los años ha ido irrumpiendo cada vez más los procesos espontáneos y reversibles que se dan en la naturaleza, desequilibrando en forma parcial o total el medio ambiente.

Este desequilibrio puede ser causado por :

- Gases tóxicos
- Materia no biodegradable. Ejemplo : Plásticos, papel, etc.
- Efluentes de proceso industriales
- Aguas negras
- Radiación atómica
- Alimentos enlatados

Todas estas sustancias son las causantes de la contaminación ambiental, las cuales en diversas partes del mundo son problemas muy graves, que han destruido flora y fauna completamente. Así es el caso del Lago Michigan (Canadá), que requería (en el caso de que dejaran de vertir en él los desechos químicos) de cinco siglos para recuperar los medios fisiológicos de dar vida a la flora y fauna (10).

1.4 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN A LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

Las alternativas de solución a la contaminación ambiental estarán su jetas a los siguientes factores :

- Factores culturales
- Factores políticos
- Factores sociales
- Factores económicos

Los cuales ejercerían una influencia favorable o desfavorable hacia la solución de la contaminación ambiental; sin embargo, a partir del año 1980, se comenzaron a generar soluciones de aprovechamiento de los contaminantes, como fuentes alternativas de energía. Hoy en la presente década, las necesidades de disminuir o erradicar dicha contaminación se vuelven más imperantes por lo que existe una serie de proyectos a nivel nacional encaminados a resolver el problema en mención.

Las alternativas de solución han sido retomadas de los estudios y problemas ecológicos que se han presentado en otros países, devastados por este problema. Estos son :

- Colocar filtros especiales, para los contaminantes gaseosos
- Reciclaje de materia orgánica
- Reciclaje de papel
- Reciclaje del plástico
- Lagunas de aereación
- Disminución de la concentración del CO₂ gaseoso.

Sin embargo, las soluciones existen pero el problema no termina, debido a que : Existe un ELEVADO COSTO ECONOMICO, para desarrollar cada uno de ellos, y por lo tanto, no es un incentivo para los industriales el invertir en algo que no tiene un retorno económico favorable. Es por ello que este problema deberá ser resuelto a través del impulso a este tipo de proyectos, y la elaboración del marco regulatorio apropiado de parte del Gobierno, así como con la participación activa de entidades ecológicas que tengan como finalidad el mejoramiento y saneamiento del medio ambiente.

1.5 RECICLAJE DE MATERIA ORGÁNICA

El reciclaje se ha venido trabajando principalmente con los países industrializados, que tienen problemas muy severos de contaminación ambiental. Así el reciclaje se ha desarrollado para incorporar muchos contaminantes de diversas industrias y así evitar efectos nocivos al medio ambiente. Existen diversos tipos de reciclaje, según sea el tipo de desechos, como son :

- Reciclaje de papel
- Reciclaje de materia orgánica, etc.

En el presente trabajo se da criterio primordial al reciclaje de materia prima.

La materia orgánica presenta muchas sustancias químicas que pueden ser reincorporadas al ambiente; sin embargo, éstas deben ser transformadas a su forma más simple por lo que se requiere del proceso de reciclaje, el cual trae muchos beneficios al medio ambien-

te y a la comunidad. Estos son :

- Disminución de contaminación ambiental
- Generación de energía
- La obtención del producto agotado para utilizarlo como fertilizante orgánico en la agricultura.

Por lo que en el presente trabajo se utiliza este proceso, para observar los beneficios que presenta el reciclaje de la materia orgánica, en los países en desarrollo como El Salvador.

2 MICROBIOS METANOGENICOS.

Hace cien años que se vienen estudiando los microbios que producen el biogás por fermentación. Los microbios de fermentación conducen a la producción de biogás y, engloban tanto las bacterias que descomponen los materiales orgánicos sin producir Metano (fase de latencia) como aquellas que si lo producen (bacterias metanogénicas); por diversos procesos y gracias a la cooperación e interacción entre ellos, estos microbios convierten distintos materiales y, a la vez degradan las materias orgánicas para formar el Metano. Por tanto conocer la biología de la fermentación es base teórica importante, para llevar adelante la producción de biogás. Las técnicas que se apliquen a el proceso de fermentación, el diseño del equipo, la organización del proceso y el control de las condiciones técnicas, deberán basarse en el conocimiento de la microbiología de la fermentación metanogénica (1).

2.1 LOS MICROBIOS METANOGENICOS EN LA NATURALEZA

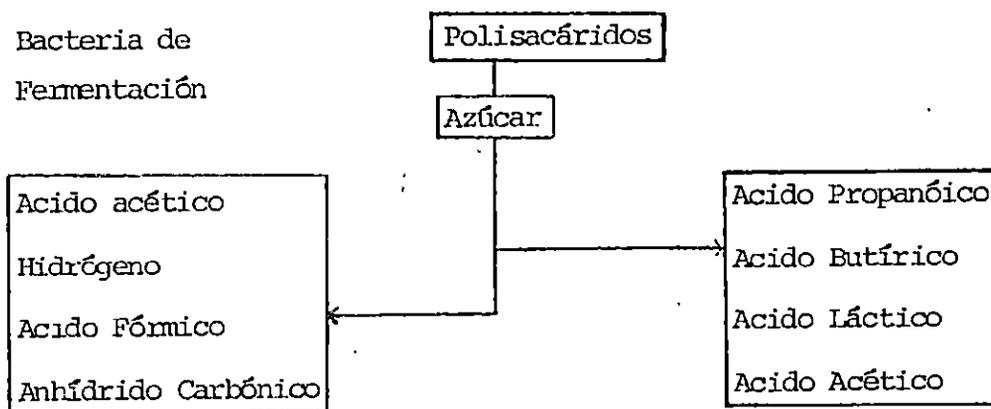
La fermentación metanogénica es un proceso común y típico en la naturaleza y un componente importante del ciclo de los materiales orgánicos. Los microbios de fermentación que producen biogás están ampliamente distribuidos en la naturaleza, sobre todo en lagos, montones de estiércol, aguas de albañal y diversos otros lodos organizados, éstos constituyen recursos para obtener microbios metanogénicos útiles para el hombre. Las bacterias metanogénicas se encuentran también en algunas plantas y animales superiores, entre ellos el estómago del rumiante que ofrece un ejemplo típico de órgano especializado en este tipo de fermentación (1).

2.2 LOS MICROBIOS EN LAS TRES FASES DE FERMENTACIÓN METANOGENICA.

Actualmente se conocen muy pocos detalles de los procesos generales de la fermentación que produce biogás.

Basándose en el conocimiento de la acción de los microbios en la fermentación metanogénica, se planteó que ésta se desarrolla en un proceso de dos fases : Una acidogénica y otra de producción de gas que fueron modificadas posteriormente dividiendo el proceso de fermentación de biogás en tres fases : Hidrólisis, producción de ácido y producción de gas, etapas que cumplen tres clases principales de microbios (Ver Fig. 1) (1).

1ª. ETAPA



2ª. FASE

Bacterias Acetogénicas
Que producen hidrógeno

3ª. ETAPA

Bacterias Metanogénicas → $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

FIG..1 MICROBIOS QUE PARTICIPAN EN LAS TRES FASES DEL PROCESO DE FERMENTACION METANOGENICA (1).

1 LA PRIMERA FASE

Las bacterias de fermentación secretan enzimas que hidrolizan las bacterias orgánicas, estas bacterias se presentan en variables y cantidad diferente, según las materias orgánicas utilizadas (1).

Sobre la base del sustrato sobre el cual actúan, pueden dividirse en bacterias catabolizadoras de la celulosa, grasas o proteínas (1).

Por su acción los polisacáridos se hidrolizan y se convierten en monosacáridos, las proteínas en péptidos o aminoácidos, las grasas en glicerol y ácidos grasos (1).

2 LA SEGUNDA FASE

Las bacterias que producen hidrógeno y ácido acético como el Aceto Bacterium Xylinum, algunos Clostridium y otros, pueden catabolizar ácidos grasos superiores para producir hidrógeno y ácido acético. Además, los ácidos grasos de cadena larga y los aminoácidos aromáticos producidos en la primera fase pueden también degradarse lo que producirá hidrógeno y ácido acético (1).

3 LA TERCERA FASE

Las bacterias metanogénicas utilizan los compuestos simples, es decir el ácido acético, el hidrógeno, el ácido fórmico y el CO_2 , para formar Metano y anhídrido carbónico. En aras de la sencillez, el proceso general de fermentación del biogás se reduce a dos fases y los microbios de fermentación pueden agruparse en aquellos que no producen Metano y los que sí lo producen. Sin embargo, hay diferentes conceptos, ya sea que el proceso de fermentación del biogás se divida en dos o tres fases. (1). Muchos investigadores piensan que no conviene dividir el proceso de la fermentación metanogénica, en fases de acidificación y aerificación, ya que lo que se produce en la primera fase no es sólo un ácido, mientras que los gases no se producen solamente en una segunda fase. En realidad ambas fases no se distinguen claramente ya que se dan simultáneamente (1).

En 1977, se propuso un diagrama para el proceso del catabolismo de las materias orgánicas complejas (Ver Fig. 2). Para que un proceso de fermentación metanogénica se realice en forma normal y vital, es preciso contar con la acción conjunta y combinada de bacterias que producen Metano y las que no producen. El exceso o falta de cualquier grupo de bacterias y su función más o menos activa o inactiva tienden a

destruir el equilibrio cinético, lo que lleva a la anomalía o incluso al fracaso del proceso de fermentación

(1).

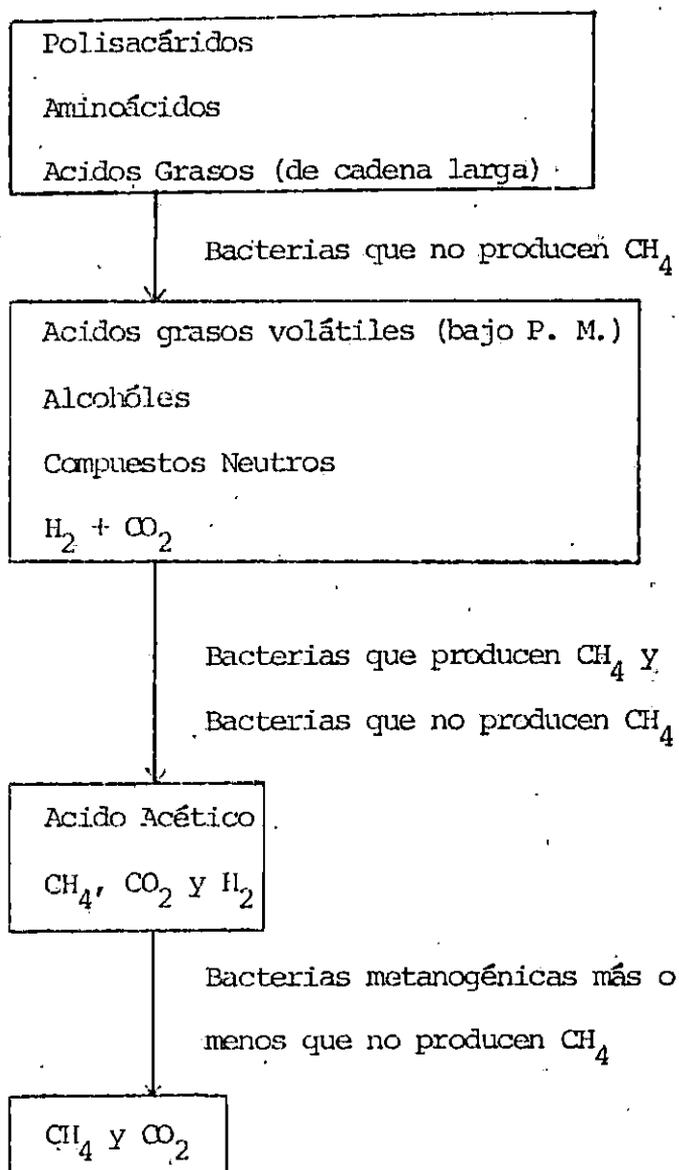


FIG. 2 CATABOLISMO DE COMPUESTOS ORGANICOS
COMPLEJOS (1).

2.3 GRUPOS Y ACCIÓN DE LOS MICROBIOS QUE NO PRODUCEN METANO.

Los microbios que no producen Metano son una serie de microorganismos que convierten complejos productos orgánicos en compuestos de moléculas más sencillas y más pequeñas; es decir, aquéllas que hemos mencionado anteriormente : Las bacterias de fermentación y las bacterias que producen hidrógeno y ácido acético (1).

Participan en esta etapa numerosos y variados microbios anaeróbicos y facultativos, dependiendo de su número y variedad de los materiales de fermentación. Aunque se conocen en términos generales los grupos fisiológicos de microbios que participan en la etapa ácida y se han aislado e identificado algunos linajes puros de bacterias, queda todavía mucho por estudiar sobre la microbiología de esta fase (1).

VARIEDAD Y CANTIDAD DE MICROBIOS QUE NO PRODUCEN METANO.

Los microbios que no producen Metano pueden clasificarse en tres grupos, a saber: bacterias, mohos y protozoos, entre los cuales tienen mayor importancia las bacterias (1).

a) BACTERIAS

Hay muchos tipos de bacterias que no producen Metano y son grandes también sus poblaciones. Pero aquellos microbios que ejercen una actividad hidrolítica cons

tituyen un pequeño grupo en las colonias totales, entre ellos anaeróbicos que cumplen un papel muy importante y representan de 100 a 200 veces que los facultativos. Las bacterias anaeróbicas que cumplen un papel de gran importancia en el proceso comprenden las siguientes : Clostridium, Butyrium, Bacillus, Lactum, los bacilos Cocci Gran (+), etc. En la década de 1950 - 1960 muchos investigadores realizaron estudios de aislamiento e identificación de bacterias no productoras de Metano (1).

b) MOHOS

En la década de 1950 - 1960, se encontró en unos estudios gran número de mohos y levadura en la ingestión anaeróbica; aisló 36 géneros de mohos entre los cuales había numerosas bacterias semiconocidas y algunas Zygosynchus.

Mediante el cultivo artificial y aplicado la prueba de recuperación, llegó a la conclusión que los mohos y las levaduras podrían participar en el proceso de la digestión, del cual obtendrían los nutrientes para reproducirse (1).

c) PROTOZOOS

También se advirtieron protozoos en el proceso de fermentación metanogénica, señalándose que se trataba principalmente de plasmodium, Flagelados y Amebas; totalizaban 18 especies y eran menos numerosas, de manera que se consideró que podrían desempeñar un papel de menor importancia en el proceso (1).

2.4 LOS MICROBIOS NO METANOGÉNICOS Y SU ACCIÓN

Los compuestos orgánicos-hidratados de carbono, proteínas y grasas, presentes en el material de fermentación, se convierten por la acción licuadora de los microbios no productores de Metano (exoenzimas) en compuestos más solubles y sencillos, después de penetrar en las células bacterianas, estos compuestos sufren diversos procesos de descomposición y dan ácidos orgánicos, alcohol, cetonas, CO_2 , H_2 , NH_3 , H_2S y otros (1).

Las bacterias metanogénicas no pueden aprovechar directamente los compuestos orgánicos al menos que éstos hayan sido desgradados y convertidos en compuestos más sencillos, de menor peso molecular, gracias a la acción de las bacterias metanogénicas. Por esta razón éstas tienen gran importancia en la producción de biogás (1).

LAS BACTERIAS PRODUCTORAS DE METANO Y SU CLASIFICACION.

El principal producto de la fermentación en la fabricación del biogás, es el Metano resultado de la acción de las bacterias metanogénicas. Estas forman un grupo más importante de microbios de fermentación en este proceso y su interés para la investigación radica sólo en su utilidad para la fermentación y la producción de biogás, sino también porque ofrecen indicios sobre los orígenes de la vida (1).

CARACTERISTICAS DE LAS BACTERIAS METANOGENICAS

Estas bacterias forman un grupo de microbios muy específico.

Son muy sensibles al oxígeno y a los óxidos y por lo tanto su anaerobiosis es muy específica. Sólo pueden usar como sustrato los compuestos orgánicos e inorgánicos más sencillos. Crecen con bastante lentitud. Las bacterias metanogénicas sólo pueden emplear los compuestos orgánicos e inorgánicos más sencillos en condiciones de cultivo puro, todas estas bacterias pueden emplear el H_2 y el CO_2 como sustratos, produciendo Metano. Hay una especie, el Octaphloil - Cocci que puede utilizar el metanol, el metil amino y el ácido acético, pero no el ácido fórmico. En la fermentación natural del biogás, el ácido acético constituye el sustrato crítico para la formación del Metano, debiendo representar aproximadamente 74% del sustrato (1).

2.5 MORFOLOGÍA Y CLASIFICACIÓN DE LAS BACTERIAS PRODUCTORAS DE METANO.

FORMA DE METANOBACTERIAS

Hay cuatro formas de metanobacterias :

Octanococos, Bacilos, Glóbulos y Espirales (Ver Fig. 3).

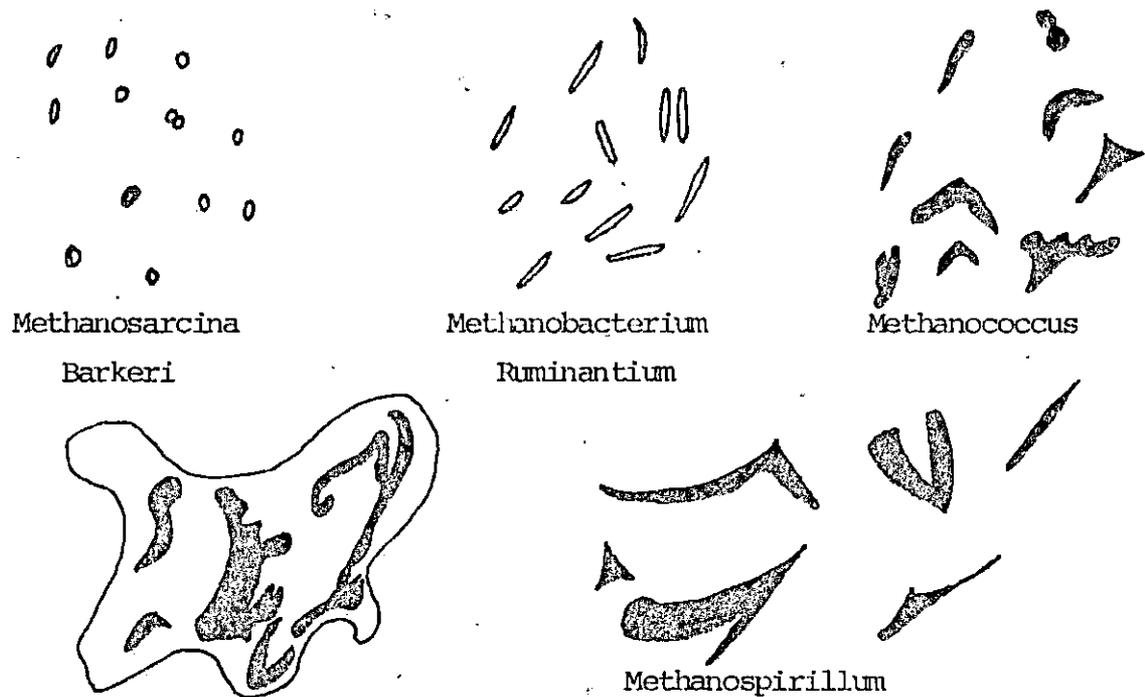


FIG. 3 MORFOLOGIA DE LAS METANOBACTERIAS (1).

1. METHANOSARCINA

La multiplicación celular de la metanosarcina es regular y su estructura es parecida a la de las partículas de arena aplicadas; no sólo su forma sino su tamaño son diferentes de la verdadera sarcina. Aún en la misma especie de Metanosarcinas, hay diferencias en su envoltura.

2. METHANOBACTERIUM

El metanobacterium suele ser curvo como una cadena o

un largo filamento en tanto que el M. Arbophilcum es corto y derecho sin formación filamentososa en su cultivo en líquido.

3. METHANOCOCCUS

Las células globulares varían de redondo a ovalado, en pares o en cadenas.

4. METHANOPARILLUM

Las células aparecen en forma regular, curvas y por último formando espiremas (Ver cuadro 1) (1).

2.6 LA ACCIÓN ENTRE BACTERIAS NO PRODUCTORAS DE METANO

En un sistema de fermentación para producir biogás las bacterias productoras de Metano dependen unas de otras y proporcionan la base material y las condiciones óptimas para su desarrollo vital, pero al mismo tiempo se imponen restricciones unas con otras. Las bacterias que no producen Metano proporcionan las sustancias requeridas para el crecimiento y producción de Metano de las bacterias metanogénicas en tanto que éstas últimas contrarrestan la inhibición retroactuante de las primeras (1).

Las bacterias metanogénicas producen varias sustancias orgánicas complejas y por efecto de la fermentación anaeróbica forman H_2 , CO_2 , NH_3 , CH_3COOH , $HCCOOH$, CH_3CH_2COOH , $CH_3CH_2CH_2COOH$, CH_3OH ,

C_2H_5CH y otras más, entre las cuales CH_3CH_2COOH , $CH_3CH_2CH_2COOH$, C_2H_5OH , etc.; por la acción de los microbios productores de hidrógeno y ácido acético (1).

CUADRO 1

CLASIFICACION DE LAS METHANOBACTERIAS

(BALCH, 1984)

ORDEN	FAMILIA	GENERO	ESPECIES		
Methanobacteria- tes	Methanobacteria- ceae	Methanobacterium	M. Formicicum M. Bryantii M. Thermoauto- thophilicum.		
		Methanobrevibac- ter.	M. Ruminantium M. Arboriphilus M. Smithii		
		Methanococcales	Methanococcus	M. Vannilii M. Voltae	
		Methanomicrobia- tes	Methanomicrobia- ceae	Methanoge	M. Caraci M. Marisnigri
				Methanopilum	M. Hungatei
Methanomicrobium	M. Mobile				
	Methanosarcina- ceae	Methanosarci	M. Barkeri		

Es así como las bacterias que no producen Metano (CH_4), a través de su proceso vital, proporcionan material y energía para la síntesis continua de los componentes celulares, precursores y energía que necesitan las metanobacterias. Por otra parte sus subproductos podrían inhibir el proceso de fermentación: La acumulación de ácidos podría inhibir la acción subsiguiente de las bacterias acidogénicas y la acumulación de hidrógeno inhibir así mismo la producción posterior de hidrógeno, si no fuera por que los H_2 y CO_2 son utilizados por las Metanobacterias, las que le permiten a las no productoras de Metano (CH_4) crecer y metabolizar normalmente. Debido a esta acción recíproca entre ellas, se produce un equilibrio entre los mecanismos productores de ácidos y de CH_4 , por el cual el proceso se desarrolla normalmente.

Las bacterias no productoras de Metano producen un ambiente óptimo de reducción-oxidación (condición anaeróbica) para las metano bacterias en las fases tempranas de fermentación de biogás ya que el exceso de aire que entra en el digestor, en la etapa de carga de materiales y agua, es por cierto nocivo para las bacterias metanogénicas.

Pero gracias a la acción de las bacterias anaeróbicas y facultativas, se produce un descuento continuo de los potenciales de reducción-oxidación en el sustrato de fermentación (mientras más bajo sea el potencial tanto mejor será la condición anaeróbica), lo que gradualmente crea una condición anaeróbica favorable al crecimiento y formación de Metano de las bacterias metanogénicas (1).

Las bacterias no metanogénicas eliminan sustancias que podrían ser tóxicas para las bacterias productoras. Las aguas residuales y desechos de la industria que se emplean como recursos para la fermentación suelen contener sustancias tóxicas nocivas para las bacterias metanogénicas como: fenoles, bencenos, cianuros, ácidos grasos de cadena larga y metales pesados.

Por fortuna estas sustancias tóxicas pueden ser eliminadas y aprovechadas por muchas bacterias que no producen Metano, lo que favorece el proceso de fermentación (1).

Se mantiene un pH óptimo mediante la acción recíproca entre las bacterias.

En la primera etapa de la fermentación del biogás, los almidones y azúcares se desgradan en primer lugar por la acción de las bacterias no metanogénicas, produciendo una gran cantidad de ácidos orgánicos; al propio tiempo el CO_2 resultante se disuelve en el agua, lo que provoca una caída en el pH del medio de fermentación. Sin embargo, el sistema se vuelve amoniacal por la formación de NH_3 , lo que neutraliza parte de las bacterias metanogénicas, y el NH_3 resultante promueve la estabilización del pH en el tramo favorable. Es así como normalmente al poner en funcionamiento un digestor de biogás, se mantiene automáticamente el pH requerido en vez de necesitar un reajuste artificial (1).

3 BIOQUIMICA DE LA FERMENTACION DEL BIOGAS

3.1 CARACTERÍSTICAS DE LA FERMENTACIÓN DEL BIOGÁS

Una de las reacciones más espontáneas y comunes que se lleva a cabo en la naturaleza, es la digestión o fermentación anaeróbica en la que el producto principal es el biogás. Desde el punto de vista cinético y macroscópico puede clasificarse como una red de reacciones auto-catalíticas, heterogéneas, complejas y que puede superarse implican un mecanismo en serie. Una parte del carbono se oxida completamente formando anhídrido carbónico, y la otra se reduce en alto grado para formar Metano. El anhídrido carbónico es un compuesto estable, y a falta de oxígeno molecular, el Metano tampoco puede oxidarse más, de manera que también es estable. En el proceso de fermentación anaeróbica, se lleva a cabo por completo la oxidación y reducción del carbono (1), (9).

En el proceso de fermentación para producir biogás se cataboliza continuamente una serie de compuestos orgánicos para formar Metano, que por consiguiente constituye una parte importante en el ciclo de las masas y la energía en la naturaleza (1).

La fermentación anaeróbica para la producción del biogás, reúne las siguientes características :

- a) Los microbios metanogénicos consumen menos energía
- b) Requiere alta concentración de los compuestos orgánicos
- c) Demanda menos nutrientes y es más variada la cantidad de residuos que pueden tratarse con los microbios del biogás.

- d) La producción de biogás se ve afectada por la temperatura
- e) Los productos finales, el Metano y el anhídrido carbónico de la fermentación se aislan fácilmente del líquido de digestión.

a) Los microbios Metanogénicos consumen menos Energía

En el proceso de formación por catabolización de sustratos de fermentación, los microbios correspondientes obtuvieron energía y materiales para su crecimiento y multiplicación. En el caso de sustratos equivalentes, la energía liberada por la digestión anaeróbica representa de una veintava a una treintava parte de la que consume la degradación aeróbica, calculada según la siguiente ecuación :



$$\Delta G = 202.6 \text{ Kcal/reacción}$$



$$\Delta G = 7.4 \text{ Kcal/reacción}$$

Como se produce menos energía, los propios microbios del biogás crecen y se multiplican con lentitud y es menor la cantidad de lodo producido también; pero en el sustrato mismo aproximadamente 90% del CO_2 se convierte para formar Metano. En consecuencia, es menor no sólo la cantidad de residuos de fermentación que necesita tratamiento sino que la energía producida queda disponible para uso del hombre (1).

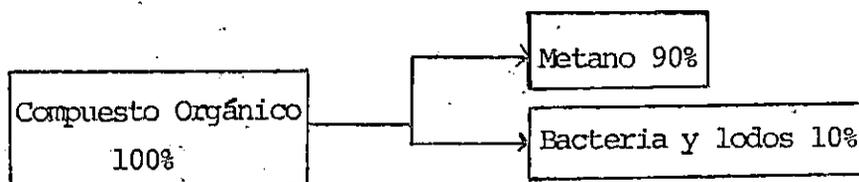


FIG. 4. PROCESO DE DESCOMPOSICION ANAEROBICA DE UN COMPUESTO ORGANICO (EN % PESO).

Como es lento el crecimiento y multiplicación de los microbios, es menor la velocidad de descomposición de los materiales orgánicos, se prolonga el tiempo de retención para la digestión anaeróbica y se necesita una mayor capacidad en el digestor (1).

La energía liberada en el proceso de fermentación anaeróbica es producida por la degradación del sustrato que ha sido consumido por las bacterias metanogénicas, así como por otras cepas de microbios que han interferido en dicho proceso(1).

La energía liberada puede verse influenciada por la cantidad de microbios metanogénicos que existan en determinado momento en el proceso de fermentación, la cual dependerá del ambiente adecuado o del medio adecuado que tengan las bacterias para poder o no desarrollarse. El crecimiento y multiplicación de la bacteria sigue un camino definido en condiciones controladas, como se muestra en la Fig. 5(9).

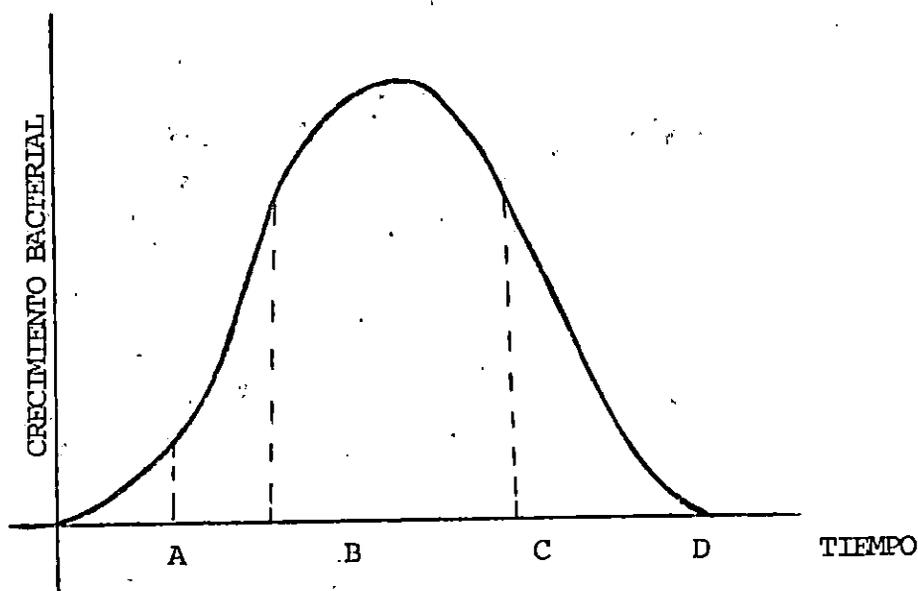


FIG. 5 CURVA DE CRECIMIENTO TIPICO DE LA COLONIA DE BACTERIAS (9).

- A -- Etapa de Estancamiento
- B -- Etapa Logarítmica
- C -- Etapa de Estabilidad
- D -- Etapa de Decadencia

En la FIG. 5; se puede ver el tiempo de duración de la etapa de estancamiento como afecta a la fermentación. Disminuir el tiempo de duración de esta etapa es provechoso para el proceso de fermentación.

El tiempo de duración de la etapa de estancamiento tiene que ver con la cantidad de bacterias sembradas en el sustrato y con la edad de las bacterias sembradas. Hacer el sembrado en la etapa logarítmica contribuye al logro de este fin.

b) Alta Concentración de los Compuestos Orgánicos.

El efectuar un proceso de fermentación anaeróbica conlleva la utilización principal de un sustrato, el cual, según su origen puede ser vegetal, animal, mineral o combinación de ellos; sin embargo debe ser un compuesto orgánico, para que efectúe la reacción completa y se obtenga como producto principal Metano y Dióxido de Carbono.

Un proceso de fermentación anaeróbica es realizado partiendo de una materia prima, a la cual se le llamará sustrato, el cual puede ser de diversa naturaleza (vegetal, animal o mineral). El sustrato debe ser incorporado al digestor con una determinada concentración de sólidos para que se produzca biogás; sin embargo, para que este proceso sea una fuente de energía barata, se acostumbra utilizar como sustrato: desechos orgánicos e industriales, así como: aguas residuales, residuos agrícolas y urbanos. Todos ellos deben de presentar (en el momento de realizarse el proceso de fermentación anaeróbica) una alta concentración de sólidos, para que se de la Producción de Biogás. El colocar un sustrato con una baja concentración de sólidos, simplemente no se efectúa la reacción completa y por lo tanto no hay producción de biogás; en sentido opuesto, al colocar un sustrato con una alta concentración sucede una producción espontánea de biogás, que podría identificarse en el digestor por medio de una explosión, o sea que se rebalse és-

te; por lo que ocasionaría daños de consideración en el diseño del proceso. Todo esto, indica que el producir biogás combustible, no es una tarea sencilla y que por lo tanto, debe buscarse una concentración o una dilución de sólidos adecuada, para que se de esta reacción, la cual según datos experimentales, puede obtenerse con un porcentaje de sólidos totales de 6% a 9%, las cuales son el óptimo para producir biogás combustible, por medio de la digestión anaeróbica (1), (3), (9).

Existe una parte de los sólidos presentes en el sustrato de carga, la cual se volatiliza durante la fermentación anaeróbica, a ella se le llama sólidos volátiles, con los cuales se puede obtener la cantidad de biogás producida (1), (9), (10).

- c) Se requieren menos nutrientes y es más variada la cantidad de residuos que pueden tratarse con los microbios de biogás (1).

Al utilizar desechos agrícolas e industriales, para la producción del biogás, se tiene la ventaja de que la cantidad de nutrientes que se le deben de incorporar al sustrato, es menor debido a que éstos (desechos) son ricos en nutrientes, por lo la bacteria metanogénica se puede adaptar fácilmente al medio. Por ello mismo, existe una gran variedad de residuos que pueden tratarse con las bacterias metanogénicas para producir biogás. Entre estos residuos están: lodos urbanos, desechos a

grícolas, licóres residuales de fábricas de alcohol, lodos de fábricas de cuero, etc. (1), (9), (18).

- d) La Fermentación de Biogás se ve afectada marcadamente por la temperatura.

Como la temperatura influye poderosamente en la velocidad de reacción, en la fermentación de biogás muchas veces es preciso emplear calefacción y mantener la temperatura, a fin de conservar una velocidad estable de digestión. La temperatura controla la velocidad de crecimiento microbiano. Para que estas bacterias formadoras de Metano trabajen en una forma óptima se requiere mantenerlas a temperaturas que oscilan entre 30° y 60°C. La temperatura es muy importante, ya que todo proceso bacteriano es muy sensible a las variaciones de temperatura, especialmente si son muy bruscas. Esto puede evitarse aislando de la mejor forma el digestor (1), (9), (18).

Puede trabajarse en rangos de temperatura.

- e) Los productos finales, (el Metano y el Anhídrido Carbónico) de la fermentación se aíslan fácilmente del líquido de digestión (1).

El Metano es un combustible gaseoso extremadamente útil. Además, el proceso mismo consume muy poca energía y también es muy poca la fuerza necesaria para mantener el proceso de fermentación, lo que hace que la fermentación para producir biogás sea un proceso muy conveniente para la fabricación de bio-energía (1), (2), (3), (9), (18).

3.2. PROCESOS BIOQUÍMICOS DE FERMENTACIÓN

Fundamentos

Los procesos bioquímicos de fermentación anaeróbica son básicamente una compleja red de reacciones bioquímicas, autocatalíticas, heterogéneas y complejas, que implican un mecanismo en serie.

El mecanismo generalizado que se desarrolla en reacciones de cadena en serie es el siguiente:

- i) Digestión inicial de macromoléculas por enzimas extracelulares.
- ii. Conversión de las sustancias solubles producidas en

ácidos orgánicos y alcoholes por microorganismos productores de ácidos.

iii) Fermentación de los productos de la etapa anterior a bióxido de carbono e hidrógeno.

iv) Conversión del hidrógeno y bióxido de carbono a Metano.

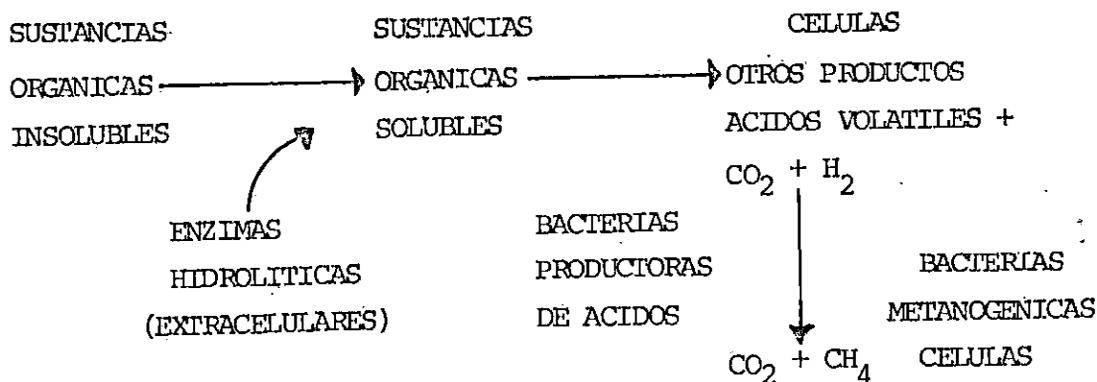


FIG. 6. PROCESOS BIOQUIMICOS DE FERMENTACION ANAEROBICA (1).

Etapas de la Fermentación Anaeróbica para la Producción de biogás.

Casi todas las materias orgánicas pueden emplearse para la fermentación, con el fin de producir Metano. Las cuales se clasifican según su origen, así :

- Desechos Vegetales
- Desechos de Origen Animal
- Desechos de Origen Humano
- Desechos Orgánicos de Industrias y Agroindustrias

- Desechos de Cultivos Acuáticos

La composición química principal de estos recursos es:

- Polisacáridos
- Proteínas
- Grasas
- Pequeñas cantidades de metabolitos, la mayoría de ellos insolubles en agua.

El proceso general a partir de los materiales sólidos hasta la formación de Metano puede dividirse en TRES ETAPAS, las cuales se mencionan a continuación :

1. Licuación de la materia orgánica
2. Formación de ácidos
3. Formación de Metano

De las cuales las primeras dos etapas son las no productoras de Metano o fases de formación de ácidos (1), (9).

1. Licuación de la materia orgánica

La primera etapa es la licuación, generalmente, en esta etapa aparece la limitación a la velocidad de la fermentación que determina la velocidad de producción de Metano.

Hay diversos materiales sólidos que pueden penetrar las

células de los microbios que los utilizan; pero la mayoría de los microbios pueden sintetizar y secretar EXOENZIMAS, la mayoría de ellas enzimas líticas. Por la acción de estas exoenzimas, se hidrolizan los materiales orgánicos sólidos y se forman compuestos de bajo peso molecular que son solubles. La energía requerida para la acción de la hidrólisis no pueden proporcionarla los microbios participantes. Mediante la hidrólisis los polisacáridos se degradan en monosacáridos solubles, las proteínas en péptidos o aminoácidos, las grasas en glicerol y ácidos grasos, que son ingeridas y aprovechadas por los microbios (1), (9).

2. Formación de Acidos

Los materiales solubles ingeridos por las células de los microbios son catabolizados para formar diversos ácidos grasos volátiles, gracias a la acción de una variedad de endoenzimas. Los ácidos acético y propiónico son los productos principales, y también H_2 , CO_2 , y una pequeña cantidad de otras sustancias; sin embargo, el ácido acético es probablemente el compuesto más simple e importante para la formación de Metano.

Los procesos microbiológicos de la segunda etapa no están muy bien definidos, muchas especies bacteriales están involucradas, y la proporción de ácidos, hidrógeno, CO_2 y alcoholes simples producidos dependen de las bacterias presentes, como también de las condiciones del medio (1), (9), (18).

3. Formación de Metano

La proliferación de las bacterias metanogénicas en el medio depende de las bacterias celulolíticas y acidificantes ya que éstas proveen a aquellas de los nutrientes que necesitan (1), (9), (18).

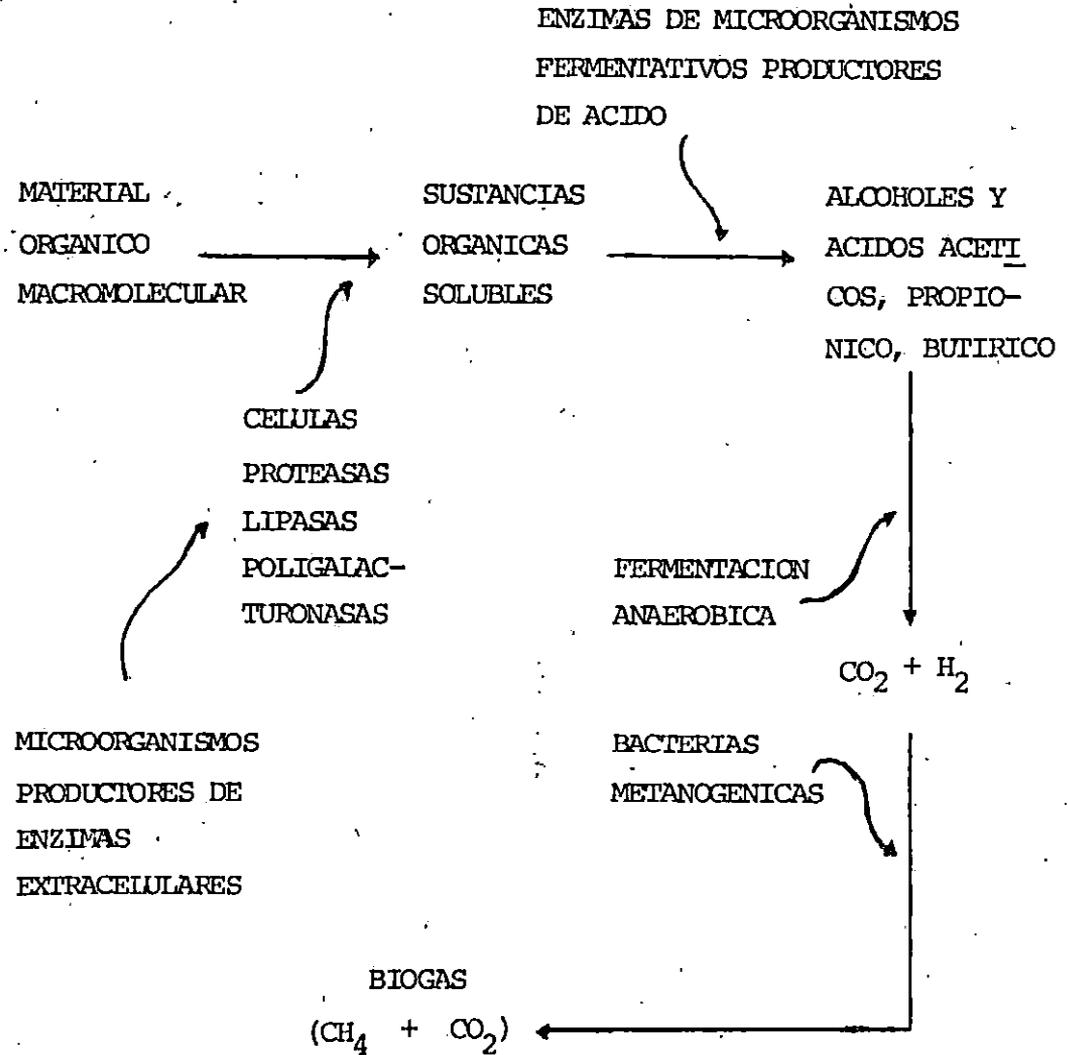


FIG. 7 DIGESTION ANAEROBICA Y SUS ETAPAS (1), (19).

Las metanobacterias son sensitivas a cambios en el medio; ya que son anaeróbicas estrictas su crecimiento es inhibido por pequeñas cantidades de oxígeno presentes en el medio. También las afectan materiales altamente oxidantes, como nitritos y nitratos (1).

El pH es otro factor importante, el pH óptimo para la producción de Metano, fluctúa entre 7.0 y 7.2 aunque también la producción de gas es satisfactoria entre 6.6 y 7.2 (1), (9).

La temperatura afecta directamente las condiciones del proceso en cuanto al control de la velocidad de crecimiento de las bacterias.

Las metanobacterias son muy sensitivas a los cambios bruscos de temperatura, lo que habrá que evitar para que no se interrumpa la producción de gas (Ver fig. 7) (1), (9).

Relación entre las tres fases de Fermentación Anaeróbica y efecto de los cambios ambientales sobre ellas.

Las tres etapas se suceden muy próximas unas a otras y se restringen entre sí, por lo que se mantiene entre ellas un EQUILIBRIO.

EL EQUILIBRIO SE ROMPE, por los siguientes factores :

1. La sobrecarga que ocurre en un digestor cuando se agrega un exceso de materiales de una sola vez o aumenta súbitamente la

concentración del fluido del digestor.

2. El fluido del digestor se vuelve ya sea demasiado ácido o demasiado alcalino o se contamina con sustancias tóxicas.

Los síntomas que suelen suceder cuando se rompe el equilibrio son :

1. Disminuye súbitamente el volumen de Metano producido, que puede llegar a cero.
2. Cambia la composición del biogás, es decir, disminuye su contenido de Metano y aumenta el de CO_2 .
3. Varía el pH en el fluido de fermentación, llegando a menos de 6.5 ó más de 8.
4. Aumenta la concentración de ácidos volátiles o de nitrógeno gaseoso.

Aunque la fermentación del biogás es muy sensible a los cambios ambientales, tiene cierta capacidad para adaptarse a ellos. Si los cambios se producen dentro de ciertos límites, el desequilibrio puede regularse automáticamente y se restaura el equilibrio sin necesidad de reajuste artificial. El tiempo requerido para establecer el equilibrio normal, puede ser de días o semanas. Si el cambio en el medio ambiente rebasa cierto nivel y no lo puede soportar el sistema, habrá que tomar medidas de reajuste artificial.

En fase inicial de un digestor, por mucho que se agregue inóculos o se emplean materiales específicos inoculados con bacterias sin cultivar, la fermentación no suele iniciarse, por lo que el digestor no llega a su operación normal hasta pasado un largo tiempo (1), (9), (18).

3.3 FERMENTACIÓN ANAERÓBICA DE COMPUESTOS ORGÁNICOS COMPLEJOS.

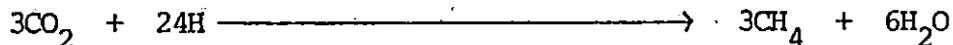
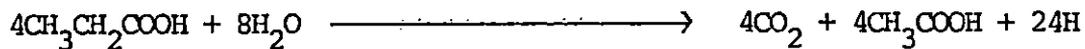
Trayectoria de la Fermentación de Compuestos Orgánicos Complejos.

Mediante la fermentación anaeróbica, los compuestos orgánicos complejos presentan diversas trayectorias de conversión para llegar a obtener Metano, así :

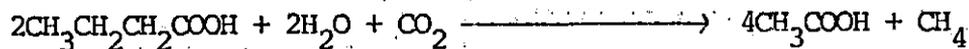
Polisacáridos, Proteínas y Grasas —————→ Acido Acético
o también Polisacáridos, Grasas —————→ Acido Propiónico

Lo que a su vez da lugar a la formación de ácido acético y Metano. El ácido acético es el precursor más importante para la formación de Metano ya que aproximadamente un 70% del Metano proviene del ácido acético.

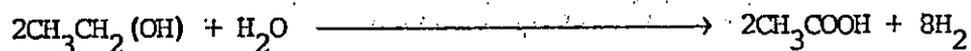
Los ácido propiónico y acético son los dos ácidos volátiles más importantes en la digestión anaeróbica. Del consumo químico de oxígeno por el ácido propiónico alrededor de un 43% se destina al Metano y 57% al ácido acético (1), (9), (18).



En la figura 8, se aprecia que de los compuestos orgánicos complejos, un 20% se convierte directamente en Metano por vía del ácido acético y un 65% en algún producto intermedio como ácido: Butírico, Etanol, H_2 y CO_2 , que luego se convertirá en Acido o Metano.



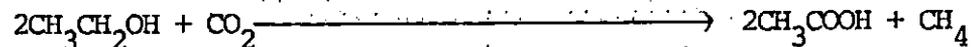
ácido butírico + dióxido de carbono ácido acético + metano (1)



Etanol + Agua Acido Acético + Gas Hidrógeno (2)



Hidrógeno Gaseoso + Dióxido de Carbono Agua + Metano (3)



Etanol + Dióxido de Carbono Acido Acético + Metano

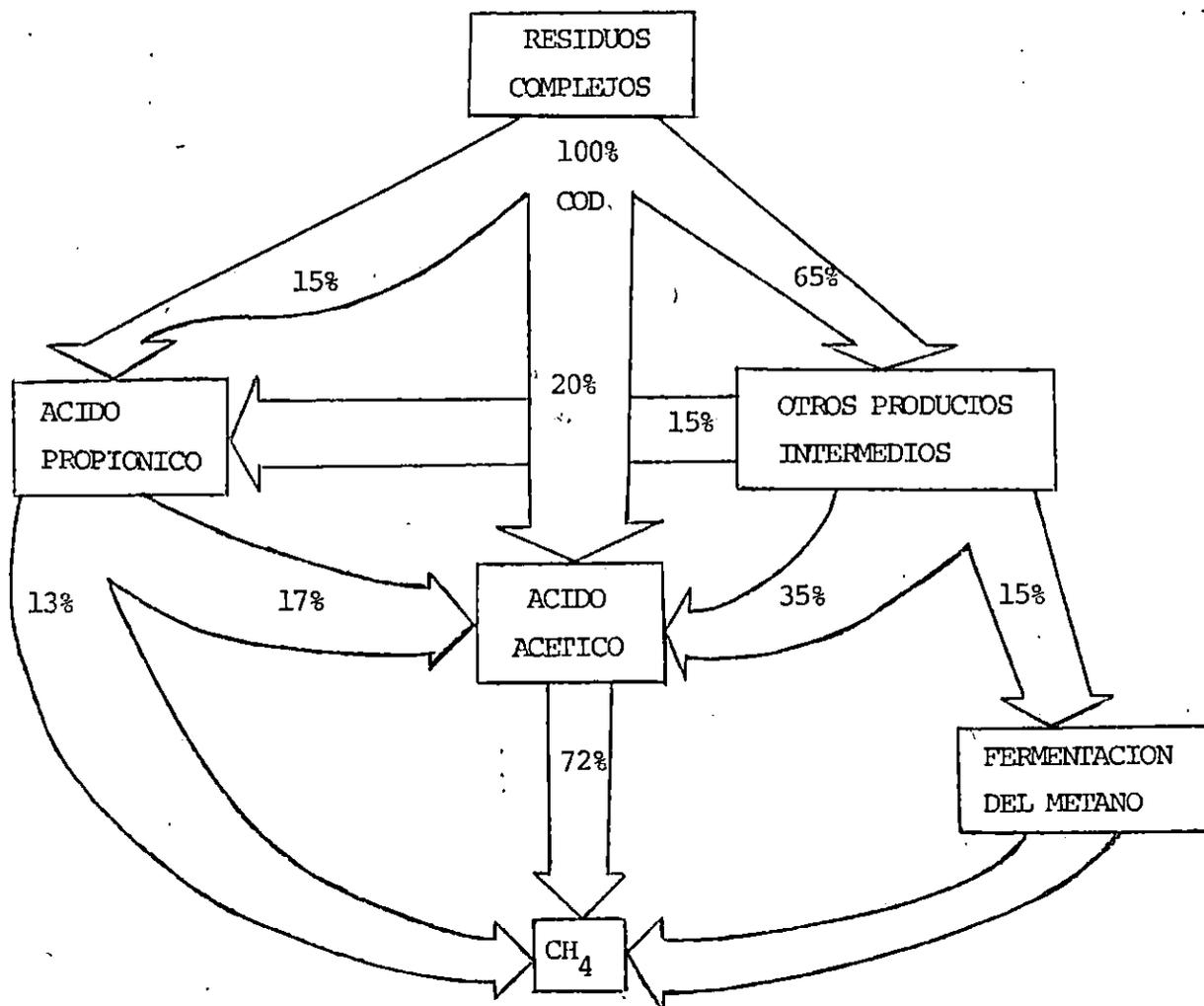


Fig. 8 Trayectoria de formación de Metano a partir de ácidos complejos contenidos en los lodos municipales; los porcentajes indican las tasas de transferencia del consumo del oxígeno por vía química (1).

Metabolismo de Compuestos Orgánicos Complejos

Como se expuso anteriormente los compuestos orgánicos que conforman el sustrato para la producción de Metano son :

- 1) Polisacáridos
- 2) Lípidos

3) Proteínas

Por lo que la producción de Metano se verá influenciada positivamente o negativamente por la variación en que estén presentes proporcionalmente estos compuestos. A continuación, se presenta el Cuadro 2, en el que se observa el comportamiento de dichos compuestos orgánicos con relación a la producción de Metano.

CUADRO 2

GASES GENERADOS POR DIVERSOS COMPUESTOS ORGANICOS EN CONDICIONES TOTALMENTE ANAEROBICAS.

COMPUESTOS	PESO %		CANTIDAD DE GAS PRODUCIDO/MATERIAL DESECADO	
	CO ₂	CH ₄	(m ³)/Kg Biogás	(m ³)/Kg CH ₄
Hidratos de Carbono	73	27	0.75	0.37
Lípidos	52	48	1.44	1.04
Proteínas	73	27	0.98	0.49

Ref. (1)

1) Los Polisacáridos

Están formados principalmente por: Carbono, Hidrógeno y Oxígeno, expresados genéricamente por la fórmula $C_n (H_2O)_n$. Por lo que son hidratos de carbono.

Según el grado de hidrólisis se clasifican :

Monosacáridos

Oligosacáridos y

Polisacáridos

Existe una gran variedad de polisacáridos entre los que se incluyen :

Celulosa, almidón, xilosa, la lignina, etc. (1), (9).

Metabolismo de Polisacáridos

En condiciones anaeróbicas, los polisacáridos se HIDROLIZAN POR EFECTO DE LAS EXOENZIMAS SECRETADAS POR LOS MICROBIOS, lo que rinde principalmente GLUCOSA, la que puede ser degradada aún más, por ello son los principales materiales de la fermentación para producir BIOGAS.

- a.) Degradación Anaeróbica de la Glucosa
- b.) Degradación Anaeróbica de la Celulosa
- c.) Degradación Anaeróbica de la Hemicelulosa, del gel de pectina, el almidón y la celulosa en condiciones anaeróbicas.

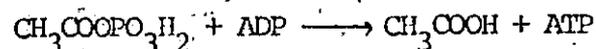
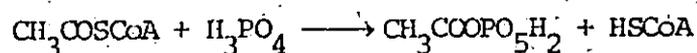
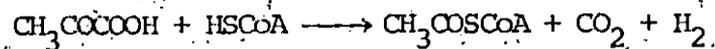
- a) Degradación Anaeróbica de la Glucosa

Se han efectuado muchas investigaciones sobre la degradación anaeróbica de la glucosa y los resultados muestran que ésta sufre principalmente un proceso de : Glicólisis Anaeróbica que forma ácido pi

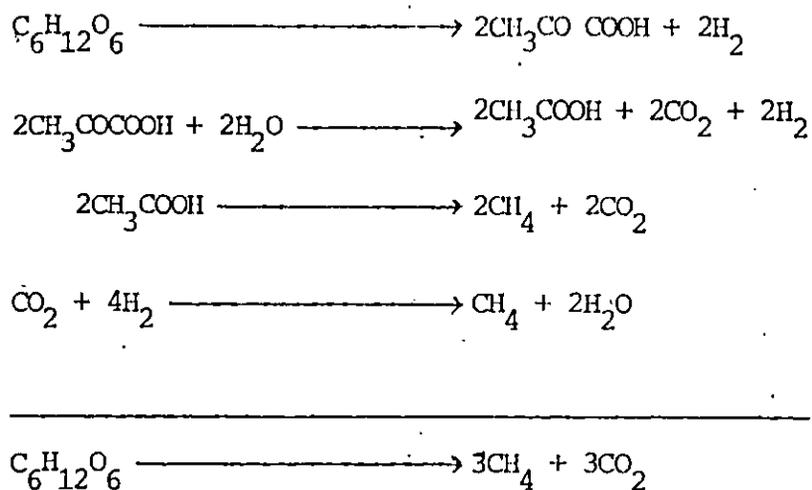
rívico; sin embargo, puede seguir otra trayectoria de Fosfato de Pentosa, con el cual formaría glicerol-fosfato y de allí se convertiría en ácido pirúvico (1), (9), (18).

El ácido pirúvico es el principal producto intermedio que puede en diferentes maneras degradarse en diferentes productos. Así : Acido pirúvico ($\text{CH}_3\text{COCO}(\text{OH})$).

- 1) Para formar ácido fórmico
- 2) Para formar Etanol
- 3) Para formar ácido láctico
- 4) Para formar ácido propiónico
- 5) Para formar ácido acético



El ácido acético se convierte fácilmente en Metano. Es así como del ácido pirúvico, a través del ácido acético y por último el Metano se sigue la principal trayectoria en la fermentación de biogás. Cada mol de glucosa puede producir tres moles de Metano y tres de anhídrido carbónico, entre las cuales dos tercios del Metano proviene del ácido acético.



Las trayectorias metabólicas generales de la degradación anaeróbica de la glucosa, se representa en Figura 9.

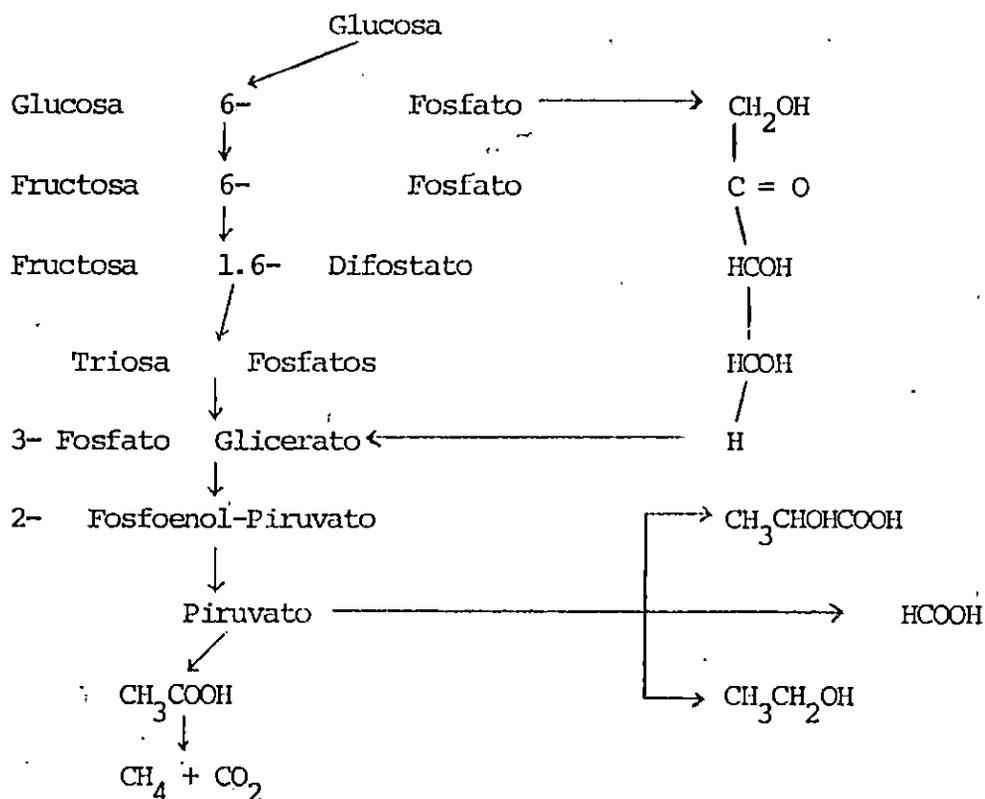


FIG. 9 DEGRADACION ANAEROBICA DE LA GLUCOSA (9), (18), (19).

b) Degradación Anaeróbica de la Celulosa

La celulosa es componente importante de los recursos empleados para la fermentación en la producción rural de biogás; junto con la hemicelulosa, representa cerca de 50-60% de los sólidos totales de la paja y de 30-50% de los estiércoles.

La celulosa pura y neta se degrada fácilmente por efecto de los microbios del biogás en tanto que la que ocurre en la naturaleza, por su combinación con lignina, etc. no es fácil de descomponer por acción microbiana. Al picarla menuda, molerla y tratarla, termoquímicamente se acelera su descomposición (1).

Algunos microbios anaeróbicos pueden cambiar la celulosa para formar un complejo CELULOSA-ENZIMA, es decir una "ENZIMA COMPUESTA" que está formada por :

C_1 , C_x y β - glucosidasa. El orden de esta acción es el siguiente :

C_1 = Natural sin ramificaciones

C_x = Celulosa

β - Glucosidasa

Celulosa \longrightarrow celulosa \longrightarrow diosa \longrightarrow glucosa

Gracias a la acción de estas enzimas, la celulosa se

hidroliza en glucosa. Las enzimas son de dos tipos:

1. Exoenzimas : Se disuelve en el fluído de fermentación.
2. Enzima Adherida : Se encuentra adherida a la superficie de la célula.

Si se toma la celulosa como el único recurso de carbono para la fermentación del biogás, y se procede a realizar la curva de producción de biogás vrs. celulosa transformada, se obtienen tres máximos, y el segundo muestra la mayor producción de gas. En el proceso de fermentación, los microbios que utilizan el butirato se multiplican aceleradamente. Cuando se detiene la fermentación hay un aumento marcado en la cantidad de microbios que utilizan el ácido butírico y el ácido acético, que podrán incrementarse en miles de veces. Todo ello ilustra la siguiente trayectoria :

GLUCOSA → ACIDO → ACIDO → FORMACION
 BUTIRICO ACETICO DE METANO

- c) Degradación Anaeróbica de la hemicelulosa, del gel de pectina, el almidón y la celulosa en condiciones anaeróbicas.

La hemicelulosa, el gel de pectina, y el almidón, en condiciones anaeróbicas estos tres grupos de ma

teriales pueden hidrolizarse y convertirse en Pactosa y Hexosa, con lo cual sufren una nueva degradación en el proceso de fermentación de sacáridos (1).

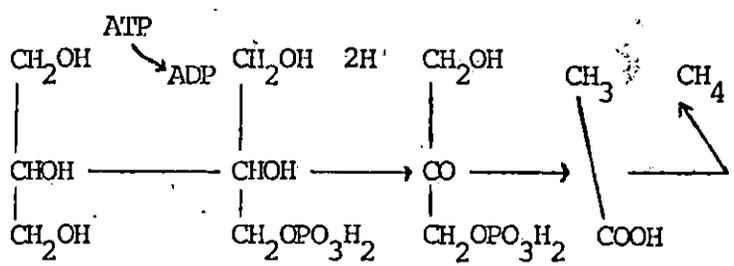
La lignina, que suele existir en combinación con la celulosa, la hemicelulosa y productos parecidos, que son complejos compuestos difíciles de degradar por los microbios. Los recursos de fermentación empleados más frecuentes contienen gran cantidad de lignina que representa 20% del total de los sólidos del estiércol porcino, 35% del estiércol vacuno y 12% de la paja de arroz (1), (9), (18).

2) Lípidos

Los lípidos presentes en los materiales de fementación para la fabricación del biogás, están representados principalmente por las grasas, parte de las cuales se componen de : Glicerol y ácidos grasos (1), (9), (18).

En condiciones anaeróbicas, las grasas se hidrolizan fácilmente para convertirse en GLICEROL Y ACIDOS GRASOS; el Glicerol formado puede entonces convertirse en DICARBOXIL-FOSFOACETONA; y, siguiendo la trayectoria de fermentación forma ácido pirúvi-

co (1), (9), (18).



Los ácidos grasos sufren una oxidación -β- y forman una acetoacilcoenzima A (CH₃CO-SCoA) y luego ácido acético.

El hidrógeno liberado en la oxidación -β- puede reducirse para formar Metano (1), (9), (18).

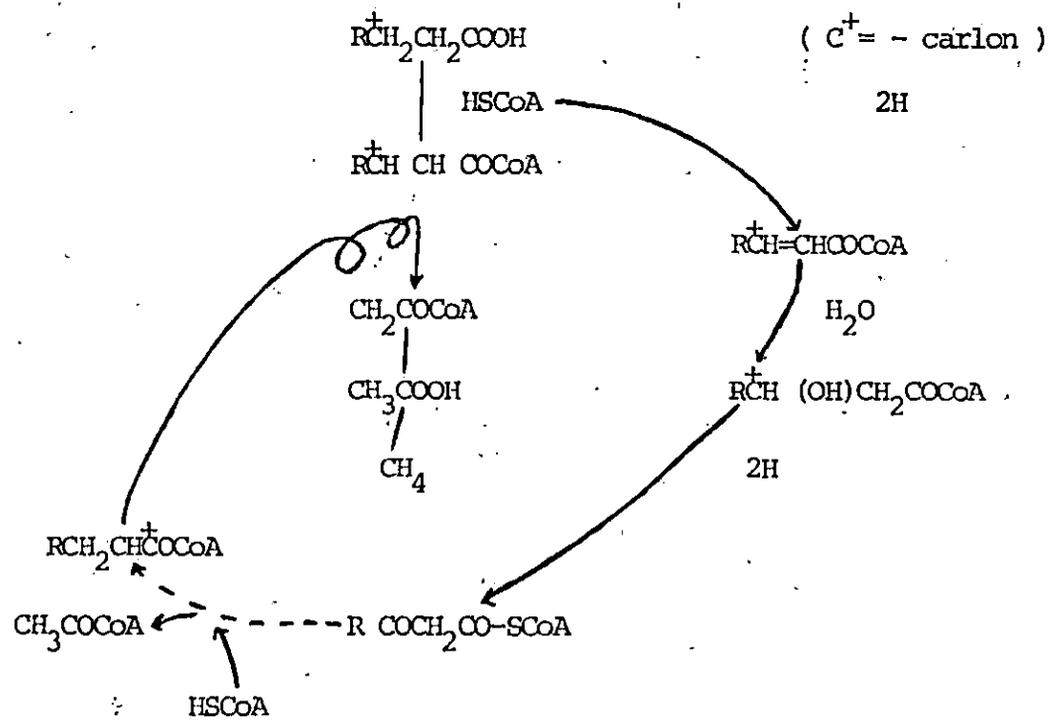


FIG. 10 Oxidación β de ácidos grasos (1), (9).

3) Proteínas

En la fermentación anaeróbica las proteínas se hidrolizan, y se convierten en péptidos o aminoácidos. Estos productos pueden ser aprovechados por los microbios para sintetizar sustancias celulares o para degradarlos aún más en sustancias de menor peso molecular, como los ácidos grasos, H_2S , los aminos, los fenoles, el amoníaco, etc. (1), (9), (18).

Los ácidos y aminos grasos volátiles de bajo peso molecular pueden convertirse para formar Metano; el amoníaco, en cambio, puede emplearse ya sea como fuente nitrogenada para sintetizar los componentes celulares o para formar bicarbonato de amonio, con el cual se aumenta el ión HCO_3^- y se eleva la alcalinidad del fluido de fermentación favoreciendo la formación del Metano (1), (9), (18).

Los sulfuros de hidrógeno pueden hacer precipitar algunos metales pesados, eliminando su efecto tóxico del sistema. En la práctica se ha visto que el fluido de fermentación para el biogás a menudo toma un color oscuro, que resulta de la formación de sulfuro de hidrógeno (1), (9), (18).

Las proteínas y su componente nitrogenado son de importancia para la nutrición y la formación del Metano (1).

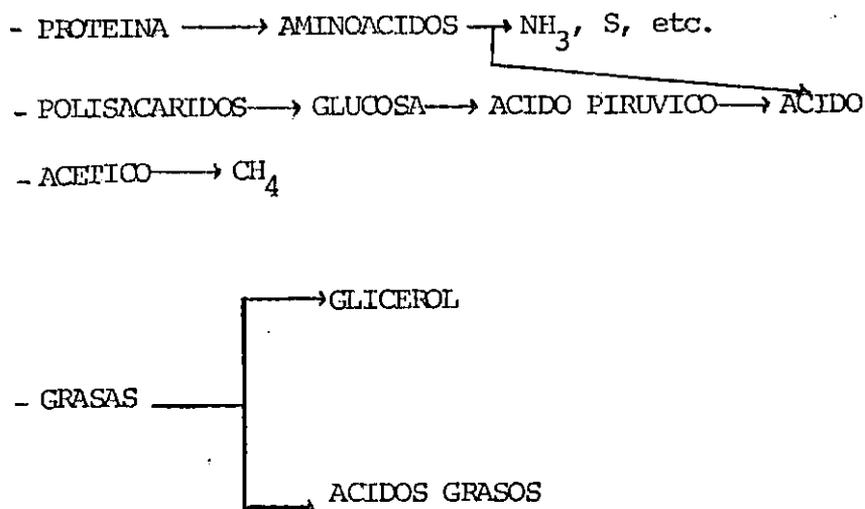


FIG. 11. Diagrama Generalizado de la Degradación Anaeróbica de los tres principales compuestos orgánicos (1), (9).

3.4 FORMACIÓN DE METANO

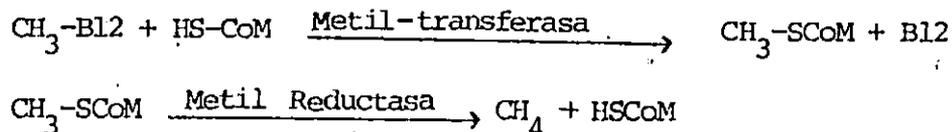
Sustratos de las Metanobacterias

En condiciones anaeróbicas estrictamente controladas, las sustancias que pueden emplearse como sustratos para formar Metano son : Formatos, Metanol, metamina, $\text{COXH}_2/\text{CO}_2$, acetatos, etc. Especial importancia tienen los acetatos, un tipo de precursor del Metano, ya que el 70% de ellos se convierte en este gas. Hasta ahora se han obtenido en cultivo puro de metanobacterias que pueden utilizar H_2/CO_2 , para formar Metano. Además de H_2/CO_2 cada una de las metanobacterias pueden utilizar uno o varios de estos compuestos como sustratos (1), (9), (18).

Coenzima F₄₂₀ y Coenzima M

En los procesos bioquímicos de la formación del Metano, hay dos clases importantes de Coenzimas, la Coenzima M y la Coenzima F₄₂₀, que se relacionan con la formación del Metano y son también específicas de las metanobacterias.

La estructura química de CoM ha sido identificada y se ha realizado su síntesis química. La forma activa es el ácido 2-tio-etano-sulfónico, es decir HSCoM, HSCH₂CH₂SO₃CoM es una de las metil-transferasas y en condiciones anaeróbicas puede emplear la metil-vitamina B12 como grupo metílico donante para formar CH₃-S-CoM y por la acción de los reductores metílicos para desmetilarla y formar Metano (1).



Coenzima F₄₂₀ participa en la reacción con su característica de portador de hidrógeno, y su estructura química es la siguiente :

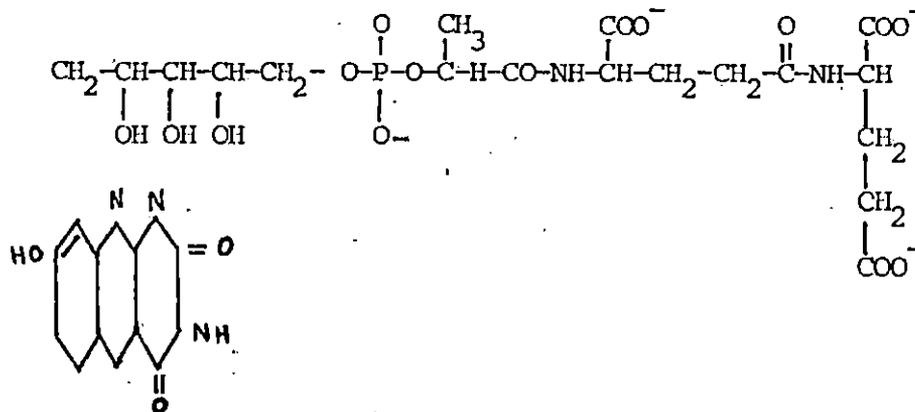


FIG. 12 ESTRUCTURA QUIMICA DE COENZIMA F₄₂₀ (1).

HSCoM tiene un potencial electroquímico (E°) de -373 mvolts y es fluorescente bajo la radiación ultravioleta de onda larga. En condiciones anaeróbicas, en cambio, puede combinar firmemente la proteína para restaurar su capacidad metanogénica. Se reconoce generalmente que las metanobacterias tienen bajos potenciales de oxidación reducción y son sensibles al oxígeno y es por ello que emiten fluorescencia (1), (9), (18).

Aparte de CoM y el CoF_{420} se ha advertido que la formación de Metano se relaciona con ATP, B_{12} y el ácido tetrafolico (1).

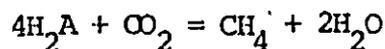
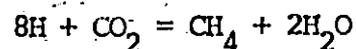
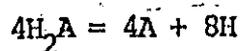
Teorías de la Formación del Metano

Existen dos teorías acerca de la formación del Metano, a saber :

- a) Teoría de la reducción del anhídrido carbónico
- b) Teoría del grupo metilo convertido directamente a Metano
- c) Hipótesis de Barker

a) Teoría de la reducción del anhídrido carbónico

En el año 1930, en todas las condiciones aplicadas por distintos investigadores, los compuestos orgánicos productores de Metano deben convertirse en CO_2 y entonces reducirse para formar Metano. Se considera de la forma siguiente :



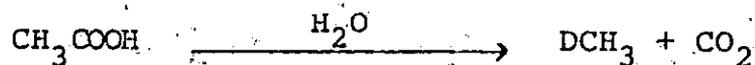
En la ecuación H_2A representa los compuestos capaces de ser empleados por los microbios metanogénicos y CO_2 se genera por oxidación del sustrato.

Los estudios de conversión del Metano a partir del etanol, los butiratos y el monóxido de carbono han confirmado esta teoría. Hasta ahora, todos los materiales conocidos de cultivo puro de metanobacterias son capaces de reducir el hidrógeno para producir el Metano (1), (9), (18).

- b) Teoría del grupo metilo convertido directamente a Metano.

En 1948 los investigadores obtuvieron resultados diametralmente opuestos en comparación con la teoría anterior y por lo tanto desarrollaron una segunda teoría, la cual consiste en :

El Metano puede generarse directamente a partir de un grupo metilo y no a través de formación de CO_2 , como lo muestran los resultados del experimento de los acetatos a continuación :



Lo mismo es válido en los experimentos con el etanol :

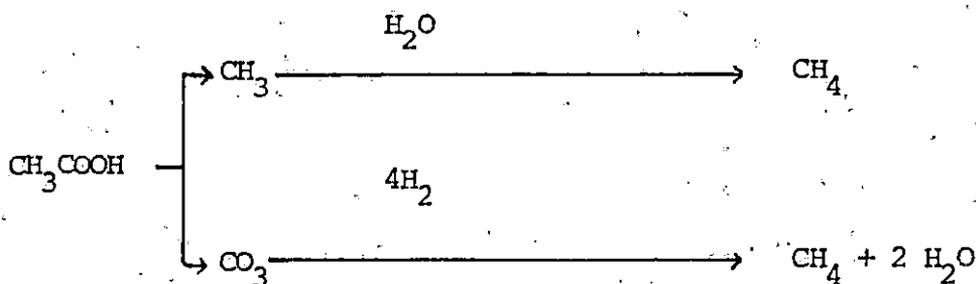


Mediante estos ensayos se ha advertido que la molécula adicional del hidrógeno del CH_4 se obtiene del agua

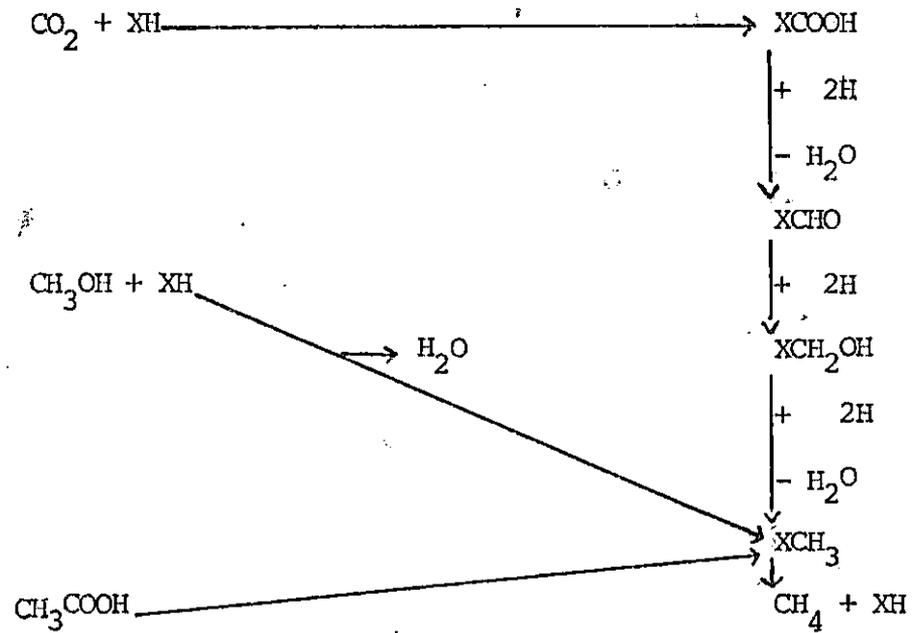
(1), (9).

c) Hipótesis de Barker

Actualmente se piensa que el Metano es formado en dos trayectorias. Durante el proceso el grupo metilo del ácido acético se reduce directamente para formar Metano y el grupo carboxílico del ácido acético se convierte en CO_2 ; entonces nuevamente se reduce para formar Metano (1), (9).



Sobre la base de las dos teorías mencionadas anteriormente, Barker propuso la siguiente hipótesis (FIGURA 13).



XH = Transportador Desconocido

FIG. 13 Hipótesis Barker, para producir Metano (1), (9).

Según esta hipótesis, en condiciones anaeróbicas, el acetato, el CO_2 , el CH_4 se convertirán en CH_3X , y éste se reducirá en Metano.

4 PROCESOS DE DIGESTION PARA PRODUCIR BIOGAS

La digestión para producir biogás es un proceso microbiano. Se necesitan condiciones ambientales adecuadas para que los microbios correspondientes se reproduzcan y ayuden a producir el biogás normalmente. El proceso de fermentación abarca todo el procedimiento desde la carga del digester hasta la generación del gas.

Los procesos de digestión se diseñan según las condiciones sociales, económicas y naturales que existen en el país (1), (9), (18).

4.1 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE DIGESTIÓN PARA PRODUCIR BIOGÁS.

Según sea su finalidad, existen varios procesos para tratar los residuos orgánicos. Estos se pueden dividir en cuatro clases :

- A. Según la forma de alimentación
- B. Según la temperatura con que se desee trabajar
- C. Según las etapas de fermentación
- D. Proceso de fermentación en dos fases

A. Según la forma de alimentación, es decir la forma y tiempo en que son incorporados los sustratos al digester.

La cual comprende :

- a) Fermentación continua
- b) Fermentación semicontinua
- c) Fermentación por lotes o discontinua

a) Fermentación Continúa

Cuando comienza la digestión normal y la producción del biogás, después de cierto período a partir de una carga inicial, se agregan materiales continuamente al digestor todos los días (o cada hora) y el efluente se descarga en forma simultánea en la misma cantidad en que entra el material. El proceso se caracteriza por una fermentación constante, una producción uniforme de gas y facilidad de control, y es el que se aplica comúnmente en zonas con ricas materias residuales y digestores de tamaño grande y mediano.

b) Fermentación Semicontinua

La primera carga consta de gran cantidad de materiales. Cuando va disminuyendo gradualmente el rendimiento de gas, se agregan nuevas materias primas y se descarga el efluente regularmente en la misma cantidad. Este proceso es de uso generalizado en los procesos de investigación.

c) Fermentación por lotes o discontinua

Los digestores se cargan con material en un solo lote. Cuando el rendimiento de gas decae a un bajo nivel después de un período de fermentación,

se vacían los digestores por completo y se alimentan una vez más.

Este proceso es el más común en las investigaciones sobre el biogás para descubrir la relación entre la fermentación y la producción de gas y también se emplea en algunas zonas rurales de los países orientales (1), (9), (18).

B. Según la Temperatura con que se desee trabajar, la cual debe ser puntual, en cada proceso de fermentación; sin embargo existen rangos específicos de temperatura; para poder catalogar un proceso de fermentación, los cuales se mencionan a continuación :

- a) Fermentación termofílica
- b) Fermentación mesofílica
- c) Fermentación a temperatura ambiente

a) Fermentación termofílica

La fermentación termofílica, se desarrolla a determinada temperatura siendo ésta considerada dentro de un rango de temperaturas de 51-55°C y se caracteriza por : Digestión rápida, alto rendimiento de gas (m^3 gas/ m^3 carga/día), y corto tiempo de retención. Este proceso se emplea para eliminar excretas y otros residuos por sus buenas características de desinfección.

b) Fermentación mesofílica

La temperatura con la cual se puede trabajar este tipo de proceso se encuentra dentro de un rango que va de 28°-35°C. Características :

La descomposición de la carga es lenta y hay menor consumo de energía. Este proceso es de uso generalizado en todo el mundo.

c) Fermentación a temperatura ambiente.

La temperatura de la fermentación varía según la temperatura de la tierra, la que se relaciona con la temperatura atmosférica, de manera que el rendimiento de gas fluctúa marcadamente, según la estación. Este proceso tiene la ventaja de exigir una estructura simple del digestor y una baja inversión.

C. Según las Etapas de Fermentación, es decir el número de depósitos en los que se llevará a cabo el proceso de fermentación. Se subdivide así :

a) Fermentación en una sola etapa

b) Fermentación en dos etapas o más

a) Fermentación en una sola etapa

Se caracteriza en realidad el proceso de fermentación en un solo depósito de fermentación.

Es de estructura simple, fácil operación y ba

jo costo

b) Fermentación en dos etapas y más

La digestión ocurre en dos ó más depósitos de fermentación. El material de la carga primero se degrada y produce gas en la primera etapa; el efluente de la primera etapa sufre un nuevo proceso de digestión en la segunda etapa. Con este principio, pueden construirse digestores de tres ó cuatro etapas.

Los digestores de etapas múltiples se caracterizan por un largo período de retención, buena descomposición de la materia orgánica y una alta inversión (1), (9), (18).

D. Proceso de Fermentación en dos fases

Este proceso se diseña para tomar en cuenta una fase de formación de ácido y otra de formación de Metano. Se están realizando muchas investigaciones sobre este aspecto en todo el mundo. El proceso tiene la ventaja de un control más fácil y un alto rendimiento de gas (1), (9).

4.2 MATERIAL DE CARGA PARA LA FERMENTACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGAS.

Los microbios metanogénicos deben consumir nutrientes continua

mente durante la fermentación, a fin de seguir multiplicandose y generando el biogás. Por lo tanto, hay que proporcionarles distintos tipos de nutrientes. La base material de carga y éste es el requisito más importante para el proceso de la digestión. Es preciso pues conocer las propiedades de las materias primas para la digestión, las cuales son :

1. Propiedades y clasificación de los materiales de carga.
2. Propiedades de las materias de carga comunes para la producción de gas.
3. Proporción de los componentes

1. Propiedades y clasificación de los materiales de carga.

Casi toda la materia orgánica puede emplearse en la carga. En general suele estar compuesta de residuos de los cultivos (pajas y tallos) y residuos humanos y animales. Según la diferencia en la relación carbono/nitrógeno (C/N) de estos sustratos, pueden dividirse en general en dos tipos, a saber :

- a) Materias primas ricas en nitrógeno
 - b) Materias primas ricas en carbono
-
- a) Materias primas ricas en nitrógeno

Se trata principalmente de residuos humanos y animales. Se caracterizan por estar constituidos por partículas finas, contener compuestos de baja masa molecular, alto grado de nitrógeno, relación C/N inferior a 25:1, y mayor velocidad de biodegradación y generación de gas durante la fermentación (1), (9).

b.) Materias primas ricas en carbono

Los residuos agrícolas, como diversos tallos y pajas generalmente de celulosa, hemicelulosa, lignina, ceras y otros compuestos de estructura compleja. Tiene un mayor grado de carbono y la relación C/N supera a menudo el 30:1 con una generación más lenta de gas en el proceso de digestión (1), (9), (18).

2-Propiedades de las materias de carga comunes para la producción de gas.

Hay distintos tipos de materias de fermentación para producir biogás y cada una presenta sus propias características de generación metanogénica (incluso tasa de producción relativa a la carga y velocidad de producción). Según las características de las materias primas es posible estimar el rendimiento de gas de la materia prima y la factibilidad de aplicar la fermentación.

tación como técnica (1), (9), (18).

Las propiedades son las siguientes :

- a) Rendimiento de gas relativo a la materia prima
- b) Velocidad de la producción de gas

a.) Rendimiento de gas relativo a la materia prima

Diferentes materiales tienen una distinta tasa de generación de gas. En general, las materias primas ricas en carbono producen más gas que las ricas en nitrógeno, es decir, el rendimiento de diversos residuos agrícolas es más alto que el de los excrementos, según se aprecia en los CUADROS 3 y 4. Se advierte del cuadro que los tallos de maíz riden el máximo, con hasta 0.55 m³ de gas por kilogramo/ST, en tanto que el estiércol de vaca presenta la más baja proporción, con sólo 0.11 m³ de gas/kg ST (1), (9), (18).

b) Velocidad de la producción del gas

En cuanto a la diferencia por distinta composición de las cargas, mientras mayor proporción haya de materiales que los microbios pueden degradar y utilizar para formar Metano, mayor será la velocidad de producción de gas y a la inversa. Es más rápida la producción de gas a partir de materias primas nitrogenadas (excretas) que de las ricas en carbono (paja y tallos) (Véase el CUADRO 5).

Según las distintas tasas y velocidades de producción de gas a partir de distintas materias primas, será neces-

rio usar una proporción adecuada de materiales de bajo rendimiento y de distinta velocidad de generación. De esta manera, se podrán conseguir tanto un rendimiento mayor de gas como una generación constante durante la fermentación.

3-Proporción de los Componentes

Antes de considerar la proporción de las distintas materias primas deben tomarse en cuenta los siguientes aspectos :

- a) Relación entre el carbono y el nitrógeno (C/N)
 - b) Dilución de la carga
- a) Relación entre el carbono y el nitrógeno (C/N)

El crecimiento y catabolismo de los microbios necesita diversas cantidades de nutrientes, especialmente carbono, nitrógeno y fósforo. De allí que aparte de las propiedades de las materias empleadas sea necesario también aplicar una relación adecuada entre el carbono y el nitrógeno (1), (9), (18).

El carbono se utiliza para energía y el nitrógeno para la construcción de la estructura celular. Se conoce en general que una relación aceptable de C/N sea de 20 - 30:1. Los diversos tipos de materias pri

CUADRO 3

RENDIMIENTO DE GAS CON DISTINTAS MATERIAS EN DIFERENTES REGIONES DE LA REPUBLICA POPULAR
CHINA (CONCENTRACION DE 6% S.T.) (m³/Kg ST)

	Estiércol de Vaca	Estiércol de Caballo	Estiércol de Cerdo	Excretas Humanas	Pasto Verde	Paja de Arroz	Paja de Trigo	Tallo de maíz	Tallo de Sorgo
Instituto Hebei de Micro- biología	0.154	0.345	0.394	0.432	-	-	-	-	-
Instituto de Liaoning de Recursos Energéticos	0.173	0.243	0.224	----	0.248	0.394	0.392	0.365	0.386
Instituto Shagdong de Re- cursos Energéticos	0.110	----	0.480	0.470	----	0.470	0.510	0.550	----
Colegio Pedagógico del Sud oeste	0.211	----	0.423	0.332	0.442	0.395	0.420	0.400	----
Instituto Liaoning de Cien- cias Agrícolas	0.284	0.280	0.313	----	0.404	0.368	0.367	0.454	----
Instituto Chengdu de Bio- gas	0.300	0.260	0.405	0.376	0.468	0.418	0.435	----	----

Ref. (1)

CUADRO 4

RENDIMIENTO DE GAS CON MATERIALES EMPLEADOS COMÚNMENTE A DISTINTA TEMPERATURA (m³/Kg S.T.) (Concentración 6% S.T.)

MATERIALES	MESOFILICO (35°C)	AMBIENTE (8-25°C)
Estiércol de Cerdo	0.42	0.25-0.30
Estiércol de Vaca	0.30	0.20-0.25
Excretas Humanas	0.43	0.25-0.30
Paja de Arroz	0.40	0.20-0.25
Paja de Trigo	0.45	0.20-0.25
Pasto Verde	0.44	0.20-0.25

Ref. (1)

mas varían en su contenido de carbono y nitrógeno, según se muestra en el Cuadro 6.

b) Dilución de la Carga

Para la fermentación en la producción del biogás, es necesario diluir la carga apropiadamente, lo que implica mantener un porcentaje entre los sólidos totales (ST) en el líquido total de fermentación. Comúnmente se utiliza una concentración de 5-10%, lo que varía según las diferentes regiones y estaciones. El contenido sólido total de las materias primas en fermentación que se emplean aparecen en el Cuadro 7.

En el Cuadro 8 se presenta la cantidad de Excretas Humanas y Animales.

CUADRO 5

VELOCIDAD DE GENERACION DE GAS A PARTIR DE MATERIALES DE USO COMUN EN ZONAS AGRICOLAS DE LA REPUBLICA POPULAR CHINA

DIAS DE FERMENTACION	10	20	30	40	50	60	70	80	90	TASA DE GENERACION (m ³ /kg. ST)
MATERIALES	PORCENTAJE DEL VOLUMEN TOTAL DE GAS GENERADO (%)									
EXCRETAS HUMANAS	40.7	81.5	94.1	98.2	98.7	100				0.478
ESTIERCOL DE CERDO	46.0	78.1	93.9	97.5	99.1	100				0.405
ESTIERCOL DE VACA	34.4	74.6	86.2	92.7	97.3	100				0.300
PASTO VERDE	-	-	-	98.2	-	100				0.410
PAJA DE TRIGO	8.8	30.8	53.7	78.3	88.7	93.2	96.7	98.7	100	0.435

REF. (1).

CUADRO 6
RELACION CARBONO A NITROGENO DE LAS MATERIAS PRIMAS
UTILIZADAS PARA LA PRODUCCION DE BIOGAS

Materias primas	Contenido de carbono de las materias primas por peso (%)	Contenido de nitrógeno de las materias primas por peso (%)	Relación carbono a nitrógeno (C/N)
Paja seca de trigo	46	0.53	87:1
Paja seca de arroz	42	0.64	67:1
Tallo de maíz	40	0.75	53:1
Hojas secas	41	1.00	41:1
Tallo del frijol de soya	41	1.30	32:1
Pasto	14	0.54	27:1
Cacahuetes, tallos y hojas	11	0.59	19:1
Estiércol fresco de oveja	16	0.55	29:1
Estiércol fresco de vaca	7.3	0.29	25:1
Estiércol fresco de caballo	10	0.42	24:1
Estiércol fresco de cerdo	7.8	0.60	13:1
Excretas frescas humanas	2.5	0.85	8:1
Orina Humana	-	0.17	8:1

CUADRO 7

CONTENIDO DE SÓLIDOS TOTALES (EN SECO) EN MATERIALES DE
FERMENTACIÓN COMUNMENTE UTILIZADOS EN ZONAS RURALES
REALIZADOS EN DIGESTORES CONTINUOS

Materiales	Contenido Seco (%)	Contenido hídrico (%)
Paja de arroz seca	83	17
Paja de trigo seca	82	18
Tallo de maíz	80	20
Pasto verde	24	76
Excretas humanas	20	80
Estiércol de cerdo	18	82
Estiércol de vaca	17	83
Orina humana	0.4	99.6
Orina de cerdo	0.4	99.6
Orina de vaca	0.6	99.4

Ref. (1).

CUADRO 8

PRODUCCIÓN DE RESIDUOS HUMANOS Y ANIMALES (DATOS ESTIMADOS)
EN ZONAS RURALES DE SHANGAI

Productor	Peso (kg)	Producción diaria de estiércol (kg)	Producción diaria de orina. (kg)	Producción anual de estiércol (kg)
Cerdo	50	6	15	2190
Vaca	500	34	34	12410
Caballo	500	10	15	3650
Oveja	15	1.5	2	548
Ave	1.5	0.1	0	36.5
Humano	50	0.5	1	182.5

Ref. (1).

4.3 CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA LA FERMENTACIÓN METANOGÉNICA.

Para que se realice la fermentación metanogénica, se requiere el cumplimiento de ciertas condiciones :

1. Ambiente Estrictamente Anaeróbico
2. Materiales de Arranque
3. Control de Temperatura
4. Control de pH
5. Agitación
6. Promotores e inhibidores de la fermentación
7. Tiempo de retención

1. Ambiente Estrictamente Anaeróbico

Todos los microbios que desempeñan un papel importante en la digestión metanogénica son bacterias anaeróbicas. Entre ellas se incluyen las acidogénicas y las metanogénicas (1), (9).

2. Materiales de Arranque

Los materiales de arranque desempeñan un papel de enriquecimiento de bacterias al sustrato no fermentado. Realizando de esta manera el papel de catalizador de la reacción metanogénica (1), (9).

3. Control de Temperatura

La temperatura tiene suma importancia para la digestión,

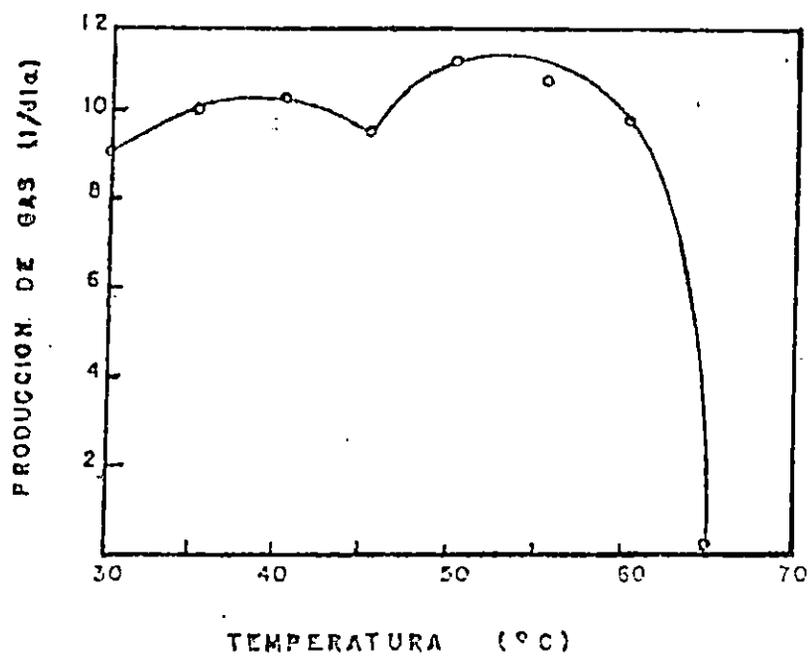


FIGURA 14. EFECTO DE LA TEMPERATURA EN
LA PRODUCCION DE BIOGAS (9)

controla la velocidad del crecimiento microbiano. La Figura 10, muestra el efecto de la temperatura en la producción del Metano (1), (9), (18).

4. Control de pH

Mediante el pH se mide la alcalinidad o acidez de una sustancia. Los procesos biológicos y bacteriológicos son muy susceptibles a las variaciones de pH. La excesiva acidez impide la descomposición anaeróbica, es mejor mantener un pH neutro o con cierta débil alcalinidad (1), (9).

La mayoría de los procesos vivientes tienen lugar en valores de pH que van entre 5 y 9. Un digestor requiere que el pH del material orgánico se mantenga entre valores que van desde 6.6 a 8.6 siendo 6.5-7.5 el óptimo (1), (9), (18).

5. Agitación

Sin agitar, el lodo de fermentación se separa en tres capas nítidas en los digestores pequeños :

Lama de la parte superior

Líquido en el medio, y

Fango en el fondo.

Esta estratificación no fomenta la producción de gas y

debe considerarse la necesidad de agitar la masa.

Actualmente se emplean tres tipos de agitadores :

1. Agitador mecánico
2. Agitador líquido
3. Agitador a gas

1. Agitador mecánico

Se instala dentro del digestor y es adecuado para digestores que emplean estiércol o una mezcla de excrementos y paja molida como material de carga (1), (2), (9).

2. Agitador líquido

Se remueve cierta cantidad de efluentes de la salida del digestor con una bomba y otros dispositivos manuales y se vuelve a poner en la parte de entrada para agitar el líquido fuertemente con esta corriente (1), (2), (7), (9).

3. Agitador a gas

El biogás retirado del digestor se vuelve a colocar en el digestor en forma continua desde el fondo hacia arriba para agitar el lodo de fermentación (1), (9), (18).

6. Promotores e Inhibidores de la Fermentación

La digestión metanogénica guarda estrecha relación con los promotores e inhibidores de la fermentación. Hay muchos materiales que pueden acelerar el proceso de digestión y otros que lo inhiben. Algunos pueden cumplir ambas funciones; es decir, aceleración si el lodo de fermentación es de baja concentración e inhibición si el lodo es de alta concentración. Para fomentar la producción de gas y garantizar una digestión normal es importante descubrir cuáles son los diversos promotores e inhibidores de la fermentación (1), (9), (18).

a) Promotores

Los materiales que pueden fomentar la degradación de la materia orgánica y aumentar la producción de gas se llaman promotores de la fermentación. Entre ellos están : Enzimas, sales inorgánicas, materiales orgánicos y otras sustancias inorgánicas. Así también, cuando se carga el digestor, es útil agregar cierta cantidad de celulosa para promover la biodegradación y la producción de gas. También se utilizan : Urea, CaCO_3 y residuos del aceite de rape (1), (9), (18).

b) Inhibidores

Hay muchos factores que inhiben la actividad vi-

tal de los microbios. Cuando es demasiada alta la concentración de ácidos volátiles (más de 2,000 ppm para la fermentación mesofílica y de 3,600 ppm para la termofílica) se inhibiría la fermentación. Cuando es excesiva la concentración de amoníaco y nitrógeno, se destruyen las bacterias de fermentación metanogénicas.

Todo tipo de productos químicos agrícolas, sales, sobre todo los iones metálicos, son fuertes inhibidores.

En el CUADRO 9, se indican las concentraciones inhibidoras de algunos inhibidores comunes (1), (9), (18).

CUADRO 9
 CONCENTRACION INHIBIDORA DE ALGUNOS METALES Y DE OTROS
 COMPUESTOS QUIMICOS, EN LOS PROCESOS DE FERMENTACION
 ANAEROBICA

INHIBIDORES	CONCENTRACION INHIBIDORA
SO_4^{-2}	5000 ppm
NaCl	40000 ppm
Nitrato (calculado según el con- tenido de nitrógeno)	0.05 mg/ml
Cu	100 mg/L
Cr	200 mg/L
Ni	200 - 500 mg/L
CN (Después que se han domestica- do las bacterias metanogénicas a 2-10 mg/ml).	25 mg/L
ABS (detergente sintético).	20 - 40 mg/L
Na	3500 - 5500 mg/L
K	2500 - 4500 mg/L
Ca	2500 - 4500 mg/L
Mg	1000 - 1500 mg/L

Ref. (1), (9).

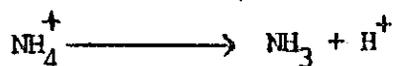
Las bacterias de la primera y segunda etapa son también sensitivas a ciertos compuestos tales como : Amoníaco a una concentración de 1500 a 3000 mg/L, estando el medio a un pH de 7.4; el ión amonio a una concentración de 3000 mg/L con el medio a cualquier valor de pH; sul-
furos solubles a una concentración de 50 a 100 mg/L y sales solubles de metales como el Cu, Zn y Ni; muchos otros materiales orgánicos

producen efectos inhibidores (9), (18).

Concentraciones de sulfuros solubles variando de 50 mg/l a 100 mg/l pueden ser tolerados. La concentración de sulfuros solubles en un digestor es función del azufre entrando en la alimentación, pH, la velocidad de producción de gas y la disponibilidad de metales pesados que actúan como precipitantes (1), (9), (18).

El amoníaco es formado en el proceso anaeróbico de la degradación - de PROTEINA \longrightarrow UREA.

El ión amonio existe en equilibrio con el amoníaco gaseoso disuelto así :



El amoníaco gaseoso disuelto es INHIBIDOR a muy bajas concentraciones como el ión amonio. Los efectos del amoníaco en los procesos de digestión son dependientes de la concentración y del pH. Aún bajo pH el equilibrio es desplazado hacia el ión amonio y la inhibición es debida a la concentración de éste (1), (9), (18).

Bajo condiciones expuestas la toxicidad ocurre a concentraciones de amoníaco cercanas a 3000 mg/l. A valores altos de pH, el equilibrio será desplazado hacia el amoníaco disuelto y si la concentración de amoníaco está entre 1500 y 3000 mg/l, la concentración de éste puede resultar inhibidora (1), (9).

Los materiales orgánicos que pueden inhibir el proceso de digestión

pueden ser : Alcoholes, los cuales son tóxicos a altas concentraciones, pero éstos pueden ser degradados tan rápido como son producidos (1), (9).

7. Tiempo de Retención

El tiempo de retención es el tiempo que una cantidad dada de materia prima orgánica permanece dentro del digestor, desde el momento que entra, hasta que sale ya biodegradado. El tiempo requerido para completar el proceso de fermentación fluctúa, de acuerdo a la temperatura. Se puede adoptar que para temperaturas elevadas, los tiempos de retención serán cortos y el caso de temperaturas bajas, los tiempos de retención serán largos. En algunos casos el tiempo de retención dependerá de la cantidad de materia orgánica que se tenga a la disposición. LA FIGURA 15, muestra tiempo de retención vrs. temperatura de digestión (1), (9).

4.4 PROCESOS DE FERMENTACIÓN METANOGENICA

Los procesos de fermentación metanogénica se clasifican según la forma en que se cargue el digestor así :

- a) Proceso de fermentación semicontinua
- b) Proceso de fermentación de carga completa
 - a) Proceso de fermentación semicontinua

Características :



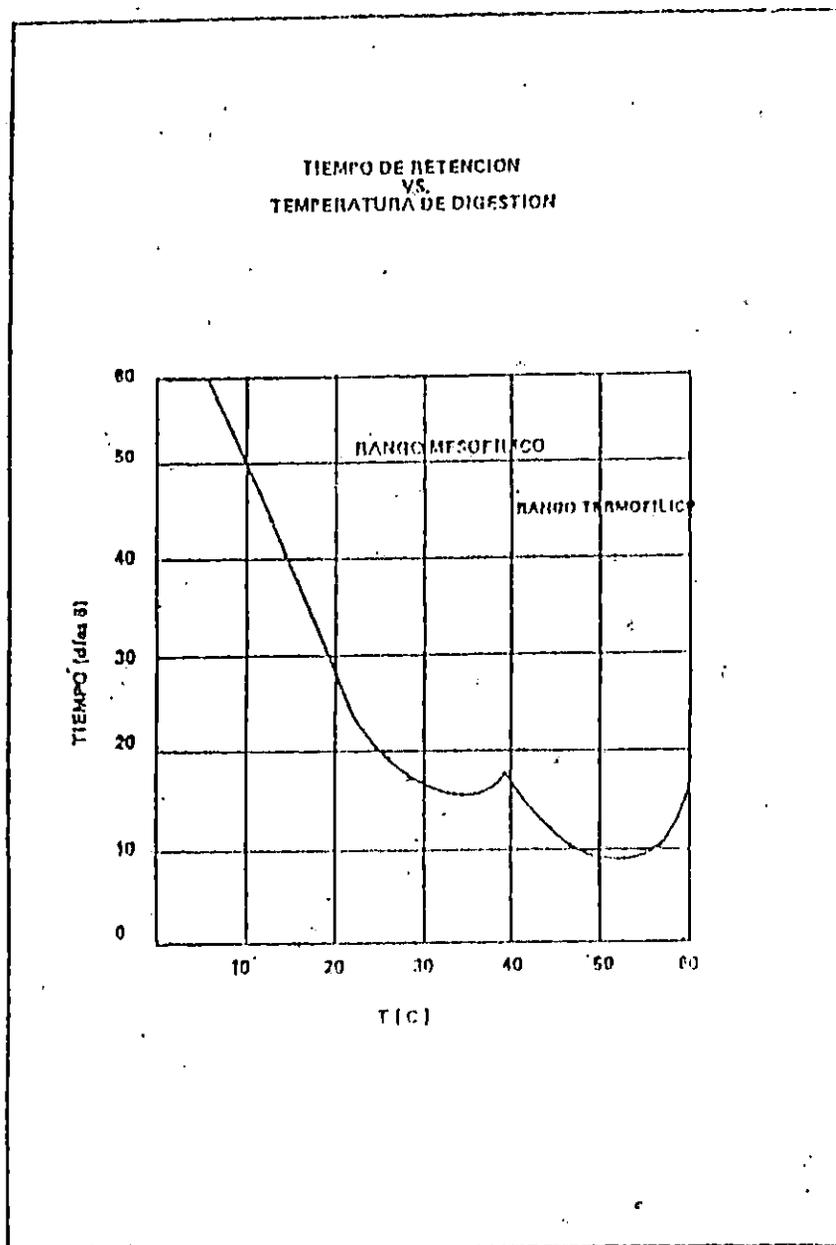


Figura 15 Tiempo de Retención Vs.
Temperatura de Digestión (9).

- Es de uso generalizado
- Satisface las necesidades de combustible para el uso diario.
- Proporciona fertilizantes orgánicos para la agricultura.

El diagrama del proceso se indica en el FIGURA 16.

Procedimiento de Operación:

- a) Preparación de la carga
 - b) Ensayo de los nuevos digestores y mantenimiento de los antiguos
 - c) Preparación de la carga en proporciones
 - d) Mezcla de la carga e incorporación de bacterias de arranque.
 - e) Compostación en el digestor
 - f) Dilución con agua y sellado del digestor
 - g) Fermentación y producción de gas
 - h) Vaciado del digestor
- a) Preparación de la carga

Es necesario acopiar material suficiente antes de cargar el digestor. Por lo que se deben de realizar los siguientes pasos :

- Recolectar

- Preparar la carga u homogenizarla
- Almacenamiento de material de carga

b) Ensayo de los nuevos digestores y mantenimiento de los antiguos.

Es necesario examinar los nuevos digestores ac
siosamente. Sólo cuando hayan sido aprobados po
drán ponerse en marcha. De haber filtraciones
habrá que proceder a repararlas (1), (9).

c) Preparación de las proporciones de la mezcla

Los requisitos son los siguientes :

1. Sólidos totales apropiados
2. Relación adecuada entre carbono y nitrógeno (C/N).

1. Sólidos totales apropiados (ST)

En verano pueden ser ST de 6% y en el in
vierno de 8 a 10% aproximadamente.

2. Relación adecuada entre carbono y nitró-
geno (C/N).

Esta relación es de 20-30 :1 (1), (9), (18).

d) Mezcla de la carga e incorporación de bacterias de arranque (1), (9).

1. Elección de un buen material de arranque.

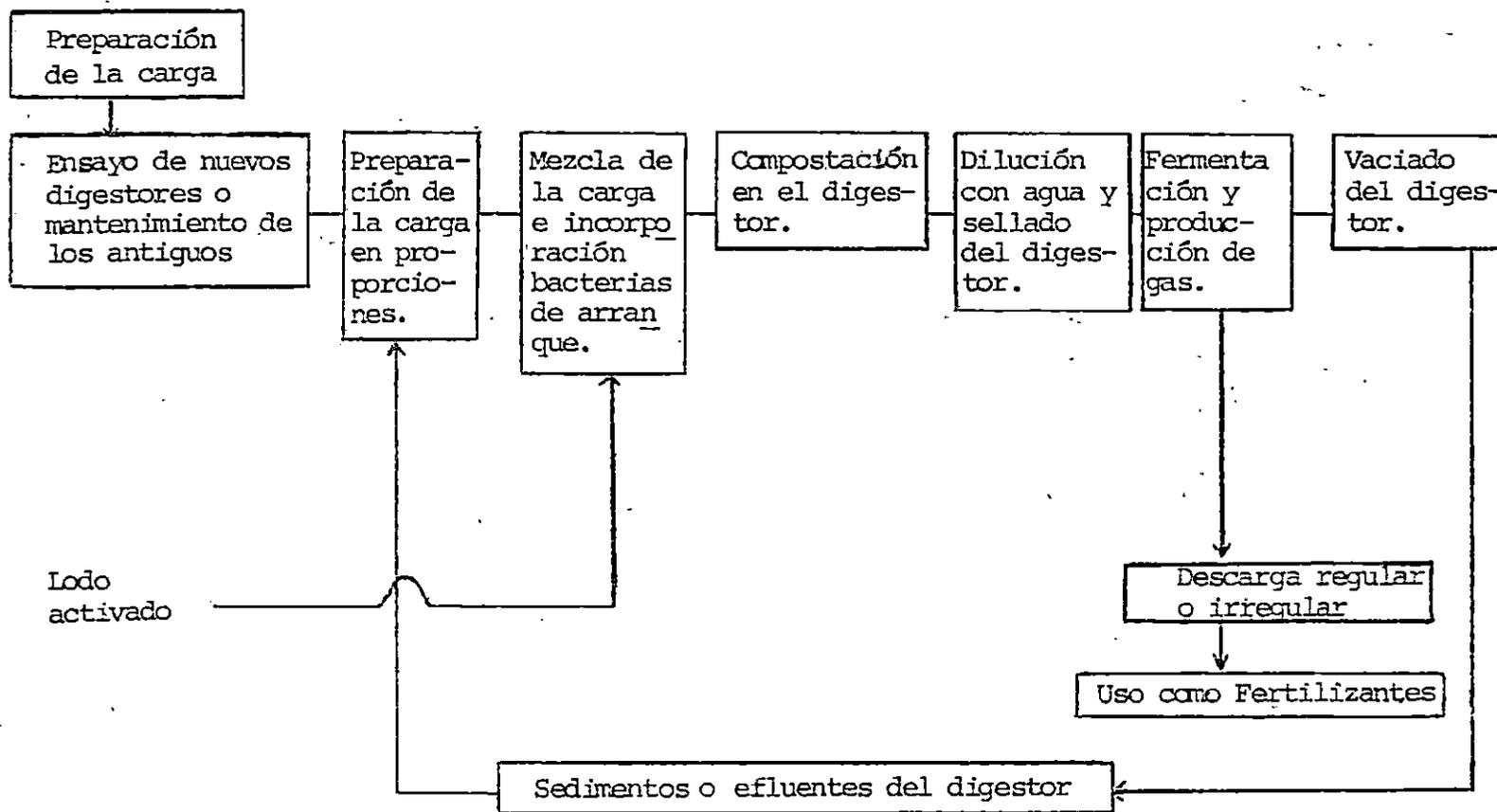


FIGURA 16. DIAGRAMA DE PROCESO DE FERMENTACION SEMICONTINUO (1).

2. Inoculación del material de arranque
3. Remoción y homogenización del material de arranque con la carga.

e) Compostación en el digester (fermentación anaeróbica).

Después que se ha llenado el digester comienza la compostación. Su duración varía en distintas zonas, según la estación : de 1 a 2 días en primavera y verano, de 3 a 5 días en otoño e invierno.

Se prohíbe totalmente cerrar el digester con su cubierta móvil durante esta etapa para que pueda desarrollarse la digestión con bacterias facultativas y aeróbicas (1), (9), (18).

f) Incorporación de agua y sellado del digester

La incorporación del agua al digester se lleva a cabo después de concluido el proceso de composteo, para posteriormente ser sellado cuando el pH ha subido arriba de 6; si no alcanza este valor, será preciso ajustar el pH con cenizas, agua amoniacal, o incluso agua de cal hasta que el pH llegue por lo menos a 7, después de esto se sella el digester. Posteriormente se adaptan los caños, válvulas, luces y cocinas de gas con la llave de

1) Operaciones diarias de los digestores
quemaduras y la intoxicación con gas (1).
También cuando se vacía un digestor debe prestarse especial atención a la protección contra las

efluente como inculco (1), (3), (9), (18).
del fondo del digestor anterior o 20 a 30% del
vaciado el digestor debe dejar un 10% de todos
nuevos materiales para cargarlo. Cuando se está
ocurrir previamente se tengan preparados los
El vaciar los digestores es un proceso que debe

h) Vaciado de los digestores

guiente (1), (9), (18).
digestor y efectuarse la misma prueba al día si-
ciende el gas, debe evacuarse el gas dentro del
que podrá utilizarse al día siguiente; si no en-
so de digestión está funcionando normalmente y
Si el gas es combustible significa que el proce-

bas de combustión antes de usarlo.
nara de digestión. Es conveniente usar las prue-
se gas dos o tres días después de sellada la cá-
Realizados los pasos anteriores puede producir-

g) Fermentación y producción de gas

paso cerrada (1), (9), (18).

Las operaciones diarias de los digestores es la clave para lograr una fermentación normal y una producción constante de gas. Los principales aspectos que deben tenerse en cuenta son los siguientes :

1. Suplemento de nuevas materias primas
2. Agitación frecuente
3. Aumento de la temperatura de fermentación
4. Observación frecuente de los dispositivos del biogás.
5. Vaciado de los digestores
6. Control de los procesos inhibidores (1), (9), (18).

b) Proceso de fermentación con carga completa

Características :

- Llenado completo del digestor, sin depósitos de almacenamiento de gas.
- Alternatividad de compost y materias primas mezcladas entre si.
- Aplicación de proceso combinado de fermentación en seco y con agua.
- Para la fermentación de tallos, es recomendable este proceso, debido a que se utilizan en mayor proporción éstos, obteniéndose una mayor canti-

dad de fertilizante orgánico.

- La mezcla de materias primas se coloca en el digester alternadamente, por capas, en forma pareja y hasta arriba.
- Se obtiene un aumento de producción de gas
- En el período inicial de digestión se produce una fermentación en seco en la parte superior de la masa de fermentación, en tanto que ocurre la fermentación acuosa en la parte inferior. Con el tiempo, todo el proceso se convierte gradualmente en una fermentación acuosa. (1), (2), (9), (18).

Procedimientos de Operación:

Los procedimientos de operación son similares a los estudiados en el sistema de fermentación semicontinuo (Ver pág. 81) (1), (9).

5 MATERIA PRIMA

5.1 MATERIA PRIMA CONVENCIONAL PARA PREPARACIÓN DE CARGA

Las materias utilizadas en general son materias cuya finalidad primaria ya fue realizada, por lo que se les considera un desecho.

Los materiales de desecho son considerados como substratos potenciales para la generación del biogás y pueden contener cantidades adecuadas de nutrientes para el metabolismo de las bacterias anaeróbicas involucradas en este proceso.

Los desechos se clasifican según su medio de origen así :

- Desechos vegetales
- Desechos de origen animal
- Desechos de origen humano
- Desechos orgánicos de industria y agroindustria
- Desechos de cultivos acuáticos y forestales
- Desechos vegetales

El contenido en el material vegetal de sustancias solubles en agua (azúcares, aminoácidos, proteínas, constituyentes minerales), en el material vegetal, decrece con la edad de la planta y el contenido de la celulosa, lignina, hemicelulosa, pectina y goma de mucilago se incrementan con ella. (9).

Aunque los azúcares están presentes como componentes de la celulosa, hasta que ésta es hidrolizada, el proceso de generación de Me-

tano no puede proceder (9).

Además, la lignina presente protege a la celulosa de la acción bacteriana y menos celulosa estará disponible para la digestión, la eficiencia en la utilización de materiales de desecho estará determinada sobre todo por la digestibilidad del sustrato, el cual es una función primaria del contenido de lignina (para los propósitos de los procesos de la fermentación anaeróbica, la lignina puede ser considerada como la fracción del material de la planta que no es biodegradable, la lignina es insoluble en agua, éter, alcohol, soluciones de álcalis y solución de ácido sulfúrico al 70% peso/volumen (9).

En la descomposición de las plantas (exceptuando las leguminosas), la disponibilidad baja de nitrógeno es cercana siempre al factor limitante. El contenido de nitrógeno en los residuos de plantas varía con las especies, edad de la planta, factores del medio que afectan el cultivo de plantas y disponibilidades de nitrógeno orgánico (9), (16), (18), (22).

Experimentos realizados muestran que solamente cerca de seis miligramos de nitrógeno por gramo de sustratos (0.6%) son necesarios para sostener el proceso de digestión anaeróbica (1), (9).

- Desechos de Origen Animal

Los desechos animales en una comunidad agrícola representan una fuente significativa de sustratos para los procesos de biocon-

versión. Estos desechos son una fuente potencial de nitrógeno requerido para la próspera operación de un proceso de fermentación anaeróbica (1), (9), (18).

Entre ellos se encuentran : El estiércol porcino, el estiércol vobino, el estiércol de aves, etc.

- Desechos de Origen Humano

Los desechos humanos son :

- Orina humana

- Heces humanas

Estas son fuentes ricas en nitrógeno, por lo que la relación C/N de ellos es baja.

Se utilizan para aumentar el contenido de nitrógeno, y mejorar la metanogénesis de los substratos altos en su relación C/N (1).

- Desechos Orgánicos de Industrias y Agroindustrias

La discusión de esta fuente de celulosa será limitada a notar que la digestibilidad del papel es generalmente elevada cuando en los procesos de manufactura se remueve una porción significativa de la lignina presente en la madera original. Por lo tanto el papel puede servir como fuente de carbón en los procesos de digestión anaeróbica. La digestibilidad del papel puede ser mejorada si el material alimentado tiene una C/N de

30:1, esto puede ser logrado generalmente cuando el papel es mezclado con desechos de animales en proporciones adecuadas; por lo tanto, si se logran circunstancias especiales, pueden éstas hacer que el papel sea un material disponible para que se incluya en la lista de materiales de desechos a ser tratados (9).

- Desechos de Cultivos Acuáticos y Forestales

Otros productos de plantas, aunque no se consideran normalmente como residuos vegetales son sustratos potenciales para la producción de biogás. Los desechos de silvicultura por ejemplo, son abundantes en los países boscosos y pueden por ésto, tomarse en cuenta para obtener biogás a partir de ellos.

En muchas partes de los países tropicales y semitropicales los cultivos de algas filamentosas, jacinto de agua y otras hierbas acuáticas son un problema perenne en estanques y otros cuerpos de agua; estos cultivos acuáticos son buenas reservas para la producción de energía; por ejemplo, la digestión anaeróbica de una libra de algas (peso seco), puede producir tanto Metano para dar 6000 BTU. (9).

6. EL BIOGÁS Y ALGUNAS DE SUS APLICACIONES

INTRODUCCION

El biogás es un combustible gaseoso que se obtiene a partir de materia prima orgánica por la acción de microorganismos anaeróbicos, a través de un proceso de fermentación. El trabajo se realiza en condiciones anaeróbicas a una temperatura estable, en presencia de una determinada cantidad de agua, y con un valor adecuado de pH (1). La composición del biogás, es diferente para cada sustrato que ha sido utilizado en un proceso de fermentación anaeróbica, presentándose un promedio de él, en el Cuadro 10.

CUADRO 10
COMPOSICION PROMEDIO DEL BIOGAS
(% mol)

COMPONENTE	FORMULA	PORCENTAJE
METANO	CH ₄	54-70%
DIOXIDO DE CARBONO	CO ₂	27-45%
HIDROGENO	H ₂	0.5-3%
NITROGENO	N ₂	0.1-10%
SULFURO DE HIDROGENO	H ₂ S	0.1%

Ref. (9)

Hay dos clases de biogás, el natural y el artificial. Los pantanos, las lagunas de aguas corrompidas y los juncales contienen ricas sustan

cias orgánicas. En el verano pueden observarse las burbujas que emergen desde el fondo a la superficie del agua. Estas burbujas contienen gas natural (1).

Actualmente en zonas rurales de El Salvador al igual que China, el hombre está imitando este patrón de la naturaleza, para ello se utiliza toda clase de materia orgánica y agua como materia prima, las aísla de la atmósfera, y produce un cierto tipo de gas mediante un proceso de fermentación y descomposición, éste es denominado biogás artificial tanto el biogás artificial como el natural, son una mezcla de un componente secundario que es el CO_2 . La composición de esta mezcla depende de muchos factores como son: el tipo de materia prima para fermentación, las cantidades relativas de cada componente en el sustrato de fermentación, las condiciones de la fermentación (temperatura, humedad, valor del pH, etc.). En un estado normal y estable comparado con las diferentes etapas de fermentación, el biogás producido por digestión anaeróbica tiene la composición detallada en el Cuadro 10. Puede también contener cantidades insignificantes de otros gases como: CO , H_2 , H_2S y C_mH_n que son gases combustibles, de O_2 que es un gas comburente y de CO_2 y N_2 que son gases inertes (1).

6.1. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA COMBUSTIÓN DEL BIOGAS.

El metano puro es un gas incoloro e inodoro. El biogás está constituido por 50-70% de gas metano producido en la digestión anaeró

bica. Otro componente primordial es el dióxido de carbono (CO_2), que se encuentra entre un 30-50% juntamente con una pequeña cantidad de sulfuro de hidrógeno (H_2S). El Cuadro 11 da una lista importante de las propiedades físicas y químicas del Metano.

Los digestores de biogás dan una flama azul y está evaluada en un rango de valores caloríficos arriba de 500 a 700 BTU/pie³, (22,000 a 26,000 kJ/m³) si el rango está contenido entre 60 a 70% de Metano. El uso del gas y sus aplicaciones son: calentamiento, cocina, alumbrado y refrigeración, así como también en motores de combustión interna, etc.

CUADRO 11
PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL METANO

PROPIEDAD	VALOR
Fórmula Química	CH_4
Peso Molecular	16.042
Punto de Ebullición normal	-258°F
Punto de Congelamiento normal	-296°F
Presión Crítica	673.1 lb/plg ²
Temperatura Crítica	-116.5°F
Gravedad Específica:	
Líquido (a -263.2°F)	0.415
Gas (a 77°F) y 1 ATM	0.000658
Especificación de volumen a 60°C y 1 atmósfera	23.61 pie ³ /lb ₃
Valor calorífico a 60°F y 1 atm	1.012 BTU ₃ /pie ³
Aire requerido para la combustión.	9.53 (pie ³ /pie ³)
Límite de Inflamabilidad	5 a 10% V/V
Densidad	0.0007 (g/cm ³)
Octanaje	130
Temperatura de ignición	1,202°F

El gas es fácilmente de usar y su aplicación puede relacionarse directamente con la presión, en la cual se trabaja.

Se resumirá la aplicación del biogás como se observa en el Cuadro 12.

Las cantidades de biogás pueden ser utilizadas para motores de vehículos pero su eficiencia dependerá del contenido del Metano que esté presente.

CUADRO 12

REQUERIMIENTOS Y APLICACIONES ESPECIFICAS DE CANTIDAD DE BIOGAS

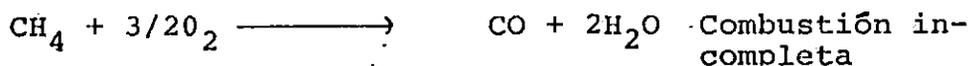
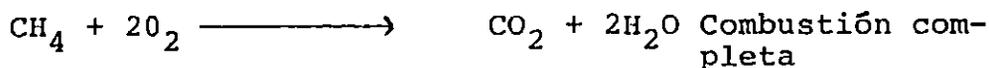
USO	ESPECIFICACION	CANTIDAD DE GAS REQUERIDO	
		pie ³ /h	m ³ /h
Cocina	Quemador 2"	11.5	0.33
	Quemador 4"	16.5	0.47
	Quemador 6"	22.5	0.64
	Quemador 2" - 4"	8-16	0.23-0.45
	Por Persona/día	12-15	0.34-0.42
	Por Persona/día	12	0.34
	Por lámpara de 100 watts	4.5	0.13
Alumbrado	Por Camisa	2.5	0.07
	Por Camisa	2.5-3.0	0.07-0.08
	2 Camisas de lámpara	5.	0.14
	3 Camisas de lámpara	6.	0.17
Ingeniería de Gasolina y Diesel	Convertido a Biogás por HP	16-18	0.45-0.51
Refrigerador	Por pie cúbico de capacidad	1	0.28

Ref (22)

La característica más importante de la combustión del biogás es la ascensión de la llama, esto significa que la llama se separa total

mente de la abertura del gas y luego se extingue. Este fenómeno se explica por las características de los principales componentes de la mezcla del biogás, CH_4 y CO_2 . La velocidad de la llama de CH_4 es muy reducida (1). Puede apreciarse que la velocidad de combustión del CH_4 es la más baja entre las de los gases considerados; la velocidad de combustión del biogás es muy inferior a la del CH_4 por sí solo, debido a su reducida velocidad de combustión, la velocidad del gas en la lumbrera del quemador tiende a sobrecalentarse; y sobrepasarla. Como resultado, mucho biogás escapa sin quemarse, si no se toman las medidas adecuadas, la llama encenderá, mientras más CO_2 contenga frecuentemente en el ascenso de la llama (1).

Reacciones:



6.2. BIOGÁS EN LA AGRICULTURA

La escasez de combustibles, el agotamiento de los piensos y el déficit de abonos son problemas vitales que desde hace muchos años han ido incrementándose en diversos países del mundo; sin embargo, en los países orientales, específicamente en la República Popular -

China, es en donde técnicos y expertos han realizado investigaciones con la finalidad de solucionar dichos problemas, los cuales se plantean cada día más graves. Pudiéndose reducir éstos, cuando se consideren interrelaciones entre el combustible, piensos y fertilizantes, abordándose el tema no únicamente desde el punto de vista de aumentar los recursos para satisfacer una necesidad insatisfecha; sino considerando que la solución a ésta trae consigo el incremento de otros problemas como son: la tala de árboles, el desbrote de la vegetación, la eliminación de las raíces de los árboles, aumento en la utilización de químicos sintéticos, el aumento de la erosión, mal formación de la textura y la desfertilización de los suelos, generándose el deterioro del ciclo de producción agrícola y del medio ecológico, por lo que es un problema en que fácilmente se puede dejar de lado un aspecto vital en la solución para llegar a una conclusión sobre el desarrollo agrícola aparentemente correcta y en realidad completamente errada. En base a esta breve exposición del problema es que se considera la producción de biogás a partir de la fermentación anaeróbica, y se decide instalar en zonas agrícolas digestores anaeróbicos productores de biogás, como solución racional para los problemas aludidos anteriormente. Más aún, desempeña ésta un papel importante en la protección de los bosques, el desarrollo de la ganadería, la rehabilitación de los suelos, el mejoramiento de la higiene rural y el estímulo de la producción agrícola.

La instalación de plantas de biogás en las zonas rurales supone

grandes beneficios y ventajas económicas. La materia prima puede recolectarse fácilmente en la localidad, considerando los recursos agrícolas de desechos. Es una de las mejores formas de resolver el problema energético en la zona rural y forma parte de la reorganización de la agricultura que permitirá acelerar el crecimiento del sector.

En Shangai (República Popular China), especialmente en aquellas zonas de las comunas populares y de las brigadas de Producción, se han obtenido buenos resultados, como son: más biogás, más ganado (cerdos), más abonos y más producción agrícola. Si influyó en los países latinoamericanos únicamente se han obtenido buenos resultados pero no se han desarrollado a gran escala, por lo que sólo ha quedado a nivel de investigación experimental, esperando que exista el subsidio necesario para ponerlo en práctica a nivel estatal.

La condición higiénica mejora con la instalación de una planta de biogás y los miembros de la comuna pueden disfrutar de una serie de beneficios adicionales (1).

La importancia del biogás radica en el aprovechamiento de materias orgánicas, el abono de las prácticas de monocultivo y su reemplazo por sistemas diversificados, y la recuperación adecuada de los residuos agrícolas. Más ventajas y mejor administración se obtie-

nen cuando se combina el biogás con la agricultura orgánica tradicional (1).

El sistema permite asimismo reducir los gastos agrícolas y mejorar el rendimiento de los cultivos, así como establecer un aprovechamiento diversificado de la economía agrícola prevaeciente. Con todo, ello se tiende al equilibrio de la ecología agrícola. Se estaría construyendo también un nuevo tipo de sistema agrícola. No cabe duda del papel relevante que le cabe al biogás en este proceso. (1)

6.3. USO MÚLTIPLE DEL BIOGÁS: SU FUNCIÓN E IMPORTANCIA EN LA AGRICULTURA.

Dos tipos de productos son obtenidos de la digestión anaeróbica: Uno es el biogás, utilizado principalmente como combustible; el otro, el lodo residual que se aplica como fertilizante.

Al extenderse el uso de biogás en las zonas rurales, va desempeñando funciones cada vez más importantes y numerosas.

RECICLAJE Y REAPROVECHAMIENTO DE MATERIAS ORGANICAS

En la agricultura orgánica se centra la atención en el aprovechamiento completo de los recursos agrícolas mediante el reciclaje y el aprovechamiento de las materias orgánicas.

Pueden haber diferentes formas de utilización y aplicación de una sola sustancia y usarla para distintos fines. Su objetivo o propósito es disminuir el desperdicio con un menor costo y mayor producción de los recursos, junto con un aumento de los rendimientos.

La construcción de una planta de biogás en una zona rural se traduce a una nueva forma de utilización completa de las materias orgánicas; soluciona racionalmente el problema de la relación entre combustibles, piensos y fertilizantes; la recuperación de recursos agrícolas residuales transforma la modalidad de utilización única en el sistema múltiple; la mayor disponibilidad de combustible, piensos y fertilizantes estimula el desarrollo de la agricultura y la ganadería; en el ciclo de las materias agrícolas y su transformación en energía se promueve el reciclaje y aprovechamiento de los recursos orgánicos.

MEJORAMIENTO DE LAS CONDICIONES HIGIENICAS Y PROTECCION DEL MEDIO AMBIENTE EN EL CAMPO.

Las excretas humanas, los animales muertos y otras materias orgánicas pueden ser, fermentadas en condiciones anaeróbicas para producir biogás, produciendo energía de alta calidad. Los lodos contienen nutrientes vegetales y humus sin descomponer, útiles para la restauración de los suelos. Desempeñan un papel muy importante en el ciclo de la materia, la transformación de la energía y la reparación del medio ambiente. La construcción de las plantas de biogás, mejora los aspectos higiénicos y ecológicos (1).

6.4 PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS

Como el biogás contiene un 30% a 40% de CO_2 y pequeñas cantidades de H_2S y otras sustancias dañinas, es natural estudiar la posibilidad de purificarlo, a fin de eliminar los componentes tóxicos. Este problema ha sido planteado por los expertos durante muchos años. No debe insistirse en los efectos corrosivos y otros del H_2S en los motores para su utilización a escala industrial y/o agrícola, lo importante es determinar la necesidad de extraer el CO_2 dejando solamente CH_4 puro; si esto redundara en una mayor operación del motor; y, en especial, si con ello se puede solucionar el problema de pérdida cuando se utiliza biogás en motores de ciclo Otto de bajo coeficiente de compresión (1).

En síntesis purificar el biogás es transformarlo en Metano puro o casi puro eliminando el CO_2 .

Ensayos repetidos con gas natural por mucho tiempo en China tanto para motores de combustible mixto como combustible único para el ciclo Otto. De ellos se concluye lo siguiente :

No se requiere purificación del biogás en caso de motores de combustible mixto, porque su eficiencia nunca será inferior a la del motor original; se ha observado también que una determinada proporción de CO_2 puede suavizar el funcionamiento del motor al neutralizar la tendencia detonante, lo que se relaciona directamente con el octanaje para que sea mayor.

Teóricamente, mientras mayor sea la proporción de CO_2 , tanto mayor

será el valor calorífico del biogás y la potencia alcanzada (1).

6.5 QUEMADORES DE BIOGÁS

Hay tres formas de combustión del biogás, a saber, la combustión difusiva, la combustión atmosférica y la combustión sin llama. Cada una de ellas depende del coeficiente del Aire Primario, definido con la letra griega α , el cual puede tener valores de cero, uno y superiores a uno.

QUEMADOR DE TIPO DIFUSIVO

Para este tipo de quemador no es necesaria la mezcla de aire con biogás antes de la combustión, por lo que su coeficiente de aire primario $\alpha = 0$; es decir, el aire necesario para apoyar la combustión es proporcionado exclusivamente por el aire secundario que se mezcla con el biogás durante el proceso de combustión (1).

La manufactura de este tipo de quemador es simple y fácil. La forma de hacerlos consiste en perforar algunos agujeros en un tipo redondo por los cuales sale el biogás para ser consumido; sin embargo, la forma del quemador es bastante primitiva. Tiene como desventaja la combustión incompleta, baja eficiencia calorífica, baja temperatura de llama y una gran cantidad de material tóxico en el gas de escape (1).

QUEMADOR DE TIPO ATMOSFERICO

A este tipo de quemador se le llama también BUNSEN. Antes de la combustión una cierta cantidad de aire se mezcla con el biogás; es decir, el coeficiente de aire se mezcla con el biogás; o sea que el coeficiente de aire primario es mayor que cero, aunque menor que la unidad. La mezcla puede realizarse ya sea con el Fuelle mecánico o utilizando la presión propia del biogás, es decir, la inyección natural. En el caso de un quemador para cocina, la mezcla se hace por lo general de esta última manera, ya que su carga calorífica es relativamente liviana.

Comparando este quemador con el de tipo difusivo, éste tiene la ventaja de una combustión relativamente completa, debido a la mezcla previa del biogás con aire. En consecuencia, en el gas de escape hay menor cantidad de material tóxico, la llama es más corta y potente su temperatura alta y hay mayor eficiencia calorífica.

QUEMADOR SIN LLAMA

Para este tipo de quemador, todo el aire necesario para la combustión debe mezclarse previamente con el biogás. Es decir, el coeficiente de aire primario alfa (α) debe ser igual o superior a uno. En el proceso de combustión, el aire secundario es necesario (1).

Este tipo de quemador es muy poderoso, tiene ventajas tales como combustión relativamente completa, escaso material tóxico en el gas de escape, alta temperatura de la llama y fuerte radiación de calor. Sin embargo, su estructura es más complicada que la de los tipos precedentes. Exige como condición previa a la combustión una presión del biogás relativamente alta y su estabilidad no es tan favorable como la de los otros dos (1).

REQUISITOS TECNICOS BASICOS PARA QUEMADORES DE BIOGAS.

- a) LA CARGA CALORIFICA DE LOS QUEMADORES DE BIOGAS DEBE SATISFACER LAS EXIGENCIAS DE LA COCINA.

La carga calorífica es la incandescencia que se produce. Si la carga calorífica es demasiado pequeña, no habrá calor suficiente para cocinar. La carga calorífica debe terminarse a la luz de los hábitos y costumbres, tamaño de la familia, etc. Si la carga calorífica es demasiado grande, aumentará la pérdida de calor, disminuirá la eficiencia con que se aprovecha y una parte del biogás será desperdiciado (1).

- b) BUENA ESTABILIDAD DEL ENCENDIDO

El valor calorífico y la presión del biogás, varían constantemente por lo que el quemador debiera ser ca

paz de ajustarse esta variación. El diseño a nivel experimental debe garantizar una condición normal de modo que a pesar de variar el valor calórico y de la presión, se eviten fenómenos tales como elevación o la coloración amarilla de la llama y las explosiones. Mientras más amplio sea el margen de variación aceptable, más estable será el quemador (1).

c) BUENAS CONDICIONES HIGIENICAS

Los quemadores de biogás normales para quemar en los laboratorios, no tienen tubo de extracción de humos, de modo que el gas de escape se difunde directamente en recámara donde se lleva a cabo la combustión. Si la combustión no es completa, se producirán algunos materiales dañinos, como el monóxido de carbono y óxido nitroso, estos elementos son tóxicos para el cuerpo humano y contaminan el medio ambiente. Por esta razón no se permite que los compuestos nocivos del gas de escape superen la concentración estipulada, la que se mide habitualmente por el contenido de CO (1).

6.6 LÁMPARAS DE BIOGÁS PARA USO DOMÉSTICO

El excedente diario de biogás después de cocinar, puede ser utilizado para iluminación, ésto depende de la cantidad producida.

Una lámpara de biogás se compone de un inyector, boquilla, cabeza cerámica, camisa, reflector de disco y vidrio (1).

El efecto de la boquilla y el inyector es el mismo que en los quemadores. Están conectados por un tornillo, por lo que la boquilla puede rotarse rápidamente. Cerca de la abertura de la boquilla, hay dos agujeros redondos en el inyector que sirven como abertura para el aire primario.

La cabeza cerámica y su contorno están conectados con tornillo. Por ello es conveniente cambiar la cabeza cerámica si se daña. La camisa está hecha de algodón, seda natural, etc. sumergida luego en líquido de toria (1). El reflector de vidrio está hecho por lo general de un disco de aluminio o esmalte blanco. El vidrio es termoresistente y se utiliza para proteger del viento la camisa y la lámpara (1).

El biogás fluye a la boquilla, a través del conducto, entonces es lanzado al inyector por la boquilla a cierta presión, al mismo tiempo una cierta cantidad de aire es impulsado al interior. El biogás y el aire son mezclados por el inyector y entonces la mezcla escapa por los agujeros de la cabeza cerámica y hace que la camisa tratada pueda producir una luz blan--

ca y brillante a una alta temperatura (1).

6.7 BIOGÁS COMO COMBUSTIBLE PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.

INTRODUCCION

El uso del biogás para el funcionamiento de motores de combustión interna, es una nueva solución para el problema energético que ha llegado a ser apremiante en las zonas netamente rurales (1).

El motor de combustión interna es un tipo de máquina que quema una mezcla de combustible y aire dentro de un cilindro, transformándose esa energía calórica en trabajo mecánico, a través de un mecanismo de cigüeñal y biela. El biogás como combustible contiene principalmente Metano (CH_4) y anhídrido carbónico (CO_2) con cantidades ínfimas de otros gases. El contenido de biogás en las zonas rurales suele ser de un 60%. El Metano es un combustible ideal para el motor de combustión interna, su combustión es limpia (sin humo) y casi no contamina; además presenta una característica muy importante para su uso en motores de combustión interna: Puede soportar altas compresiones sin detonar. Con el uso del biogás puede llegar a alcanzar así, en la práctica, la potencia del motor que corresponde a su volumen (1).

- FORMAS DE CONVERSION DE DISTINTOS MOTORES
DE COMBUSTION INTERNA ALIMENTADOS CON BIOGAS

Los siguientes son métodos de adaptación de distintos tipos de motores al uso de biogás como combustible :

(1) MOTOR DE GAS CARBONICO

El biogás está en condición de hacer funcionar un motor de gas carbónico por la sola conexión directa del tubo de biogás a una mezcladora, ya que el motor a gas sólo sirve para un combustible gaseoso y dispone de un regulador para el control de la válvula de gas. El valor calorífico del biogás es aproximadamente el doble del gas carbónico (principalmente CO, 2,000 kilocalorías), lo que permite aumentar la potencia obtenida con este tipo de motor (1).

(2) MOTOR DE GASOLINA

Sólo se requiere un mezclador de biogás con aire, que debe instalarse a la entrada del carburador; el motor puede funcionar en forma continua y confiable con biogás como combustible (1).

Se utilizó biogás para hacer funcionar un motor de gasolina de 3 HP en 1958 en Sichuan y Hubei. En 1973 en la comuna popular de Lueping del condado de Devang

en la provincia de Sichuan, se utilizó, por primera vez biogás, producido en digestor de 80 metros cúbicos para hacer funcionar un motor de gasolina de 3 HP para bombear agua en un campo seco de 70 m², obteniéndose una abundantísima cosecha. Esto abrió el paso a una nueva forma de aprovechamiento del biogás como generador de potencia en la agricultura (1). En 1980, se utilizó, con éxito biogás para hacer funcionar un camión (de marca liberation).

(3) MOTOR DIESEL

Debido a su económica y alta eficiencia técnica, los motores diesel se encuentran en mucho mayor número que los demás tipos de motores en las zonas rurales. Por ello, modernas investigaciones orientan básicamente a este tipo de motor al estudiar la posibilidad de aprovechar el biogás (1).

7 METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION EXPERIMENTAL

Conlleva la elaboración de una serie de actividades a desarrollar, las cuales sustentarán y darán veracidad a la investigación experimental ayudándose ésta de la fundamentación estadística, para reforzar los resultados obtenidos a escala de laboratorio.

La metodología de la investigación fue realizada desarrollando las siguientes etapas :

7.1 Etapa de Recolección y Revisión Bibliográfica

7.2 Etapa del Método Experimental

7.3 Etapa de Desarrollo de Fase Experimental

7.1 RECOLECCIÓN Y REVISIÓN DE INFORMACIÓN BÁSICA

El mecanismo que se utilizó para obtener la información necesaria, fue el siguiente:

- a) Revisión bibliográfica y hemerográfica
- b) Investigación de campo y entrevistas

a) Revisión Bibliográfica y Hemerográfica

Se llevó a cabo de libros, tesis y revistas que estaban relacionados con el tema, con el objeto de proporcionar los conceptos teóricos y demás informaciones que permitieran desarrollar el trabajo a nivel de laboratorio y alcanzar los objetivos planteados.

b) Investigación de Campo y Entrevistas

En cuanto a la investigación de campo y entrevistas, se llevaron a cabo, haciendo visitas de gira de campo a distintas Instituciones Gubernamentales y Privadas para consolidar la parte teórica y experimental obtenida del tema de la fermentación anaeróbica.

7.2 ETAPA DEL MÉTODO EXPERIMENTAL

El desglose de esta etapa conllevó la elaboración cuidadosa de una secuencia de actividades a realizar, las cuales fueron analizadas una a una con detalle, para poder dar un esbozo más concreto de la realización de este trabajo, tomándose en consideración los imprevistos que se dan con relación a requerimientos de tiempos adicionales, para poder superar algunas fallas tanto técnicas, como de laboratorio.

El desarrollo del método de investigación experimental se inició con una cuidadosa revisión bibliográfica que proporcionó los precedentes teóricos básicos para la realización del método experimental, donde se desarrolló todo un esquema de trabajo a realizar, para concluir con un planteamiento de una manera generalizada, que dio los lineamientos a seguir para generar la fermentación anaeróbica y por ende la producción de biogás y bioabono, de las mezclas de heces y orina humana y desechos vegetales.

La etapa de realización del método experimental se desarrolló te niendo en cuenta el siguiente planteamiento:

- A) Materia Prima
- B) Diseño Experimental

El cual se llevó a cabo, partiendo del proceso generalizado, de la fermentación anaeróbica, que se desglosa a continuación:

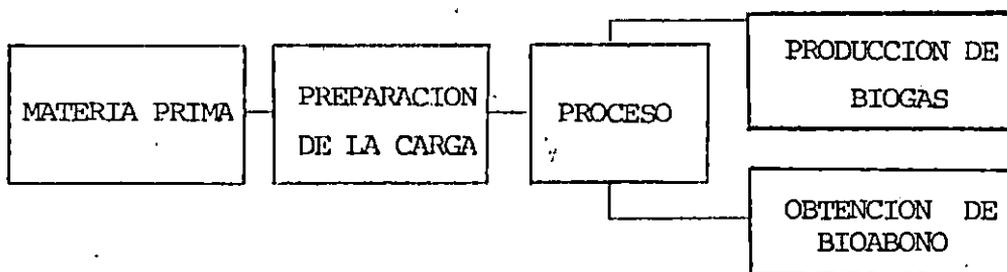


Figura 17. PROCESO GENERALIZADO DE FERMENTACION ANAEROBICA.

A) Materia Prima

La materia prima, con la cual se realizó esta etapa de investigación, fue seleccionada previamente (para obtener la carga experimental), en la siguiente sección.

-Selección de Materia Prima

La selección de la materia prima se analiza tomando en cuenta los siguientes aspectos:

1. Se encuentra en cantidades abundantes.

2. Bajo costo de adquisición
3. Disminuir la contaminación ambiental de las comunidades marginales, así como de los mercados municipales.
4. Producción de biogás, como fuente alterna de energía
5. Obtener fertilizantes químicos, utilizados en la agricultura

Contando con todos estos aspectos se procedió a realizar una selección previa, ameritándose presentar los siguientes substratos :

- Estiércol humano
- Orina humana
- Desechos de hojas de lechuga
- Desechos de hojas de repollo
- Desechos de tallos de zanahoria
- Desechos de tallos de rábano
- Desechos de tallos de remolacha
- Desechos de tallos de apio
- Desechos de tomates
- Lodos de alcantarillas
- Lodos de agroindustrias
- Estiércol vacuno
- Estiércol porcino
- Gallinaza

Sin embargo, para realizar una segunda selección, se tomaron en cuenta fundamentalmente las siguientes variables :

1. Se encuentra en cantidades abundantes

2. Bajo costo de adquisición
3. Disminuir la contaminación ambiental

Por lo que se obtuvieron los siguientes sustratos:

- Orina humana
- Heces humanas
- Desechos de hojas de hortalizas (lechuga, repollo).

a) Orina Humana

En los riñones, un líquido semejante al plasma es filtrado a través de los capitales glomerulares hacia los túbulos renales (filtración glomerular). Según pasa este filtrado glomerular por los túbulos, su volumen es reducido a su composición alterada por los procesos de la resorción tubular (remoción de agua y solutos del líquido tubular) y de la secreción tubular (secreción de solutos hacia el líquido tubular) para formar la orina. La comparación de las composiciones del plasma y de una muestra promedio de orina ilustra la magnitud de algunos de estos cambios (Cuadro 13) y hace resaltar la manera como son eliminados los desechos, mientras que son conservados el agua, los electrolitos y los metabolitos importantes. Además, la composición de la ori

na puede ser variada y muchos mecanismos reguladores homeostáticos minimizan o impiden los cambios en el pH, modificando la cantidad de agua y de diversos solutos específicos en la orina (13), (14), (20).

CUADRO 13

CONCENTRACIONES DE ALGUNAS SUBSTANCIAS DE IMPORTANCIA FISIOLÓGICA EN LA ORINA HUMANA Y EN EL PLASMA Y COMPOSICIÓN DE LA ORINA HUMANA EN BASE SECA.

Substancia	Concentración en				
	Orina (O)	Plasma (P)	Relación (O/P)		
Glucosa (mg/100 ml)	0	100	0		
Na ⁺ (mg/L)	130	150	1		
Urea (mg/100 ml)	900	15	60		
Creatinina (mg/100 ml)	150	1	150		
Composición de Orina (% Peso Seco)					
N	P	K	C/N	%H	%ST
17	3.7	3.7	0.8	94	6

b) Heces Humanas

Las materias fecales contienen material inorgánico, fibras vegetales no digeridas, bacterias y agua. Su composición (Cuadro 14), es relativamente inafecta-

da por variaciones de la dieta porque una gran fracción de la masa fecal es de origen no dietético. Eso también explica por qué continúan pasando cantidades apreciables de heces durante el ayuno prolongado.

(14), (20).

CUADRO 14

COMPOSICION APROXIMADA DE LAS HECES HUMANAS CON UNA DIETA PROMEDIO

Porcentaje del Peso Total			
Aguá	75		
Sólidos	25		
Porcentaje del Total de Sólidos			
Celulosa y otras fibras no Digeribles	Variable		
Bacterias	30		
Material inorgánico (en su mayoría calcio y fosfatos)	15		
Grasas y derivados de ellas	5		
También células mucosas descamadas, moco y pequeñas cantidades de enzimas digestivas.			
% Peso Seco			
N	P	K	C/N
6	4.2	12	8

Ref. (14)

c) Desechos de Hortalizas

1. Definición de Hortalizas:

Las hortalizas constituyen un complemento necesario en la alimentación del hombre.

La carne tiene un valor alimenticio notable superior al de las hortalizas, aquella desarrolla especialmente la energía muscular, pero las legumbres proporcionan los elementos minerales que son indispensables, como los carbonatos de potasa, sosa, etc.

Los vegetales regulan también la digestión intestinal. La ración diaria necesaria para cada persona es de 200 a 300 gramos (15), (17), (22).

2. Clasificación de Hortalizas

Las hortalizas pueden clasificarse tomando como base la cantidad de principios nutritivos que contienen y su naturaleza.

Una clasificación que parece ser útil es la siguiente:

- a) Hortalizas feculentas (patatas, patacas, ñame, etc).
- b) Hortalizas de raíz (remolacha, nabo, rábano, etc)

CUADRO 15
COMPOSICION MEDIA DE ALGUNAS HORTALIZAS (% P/P)

HORTALIZAS	Agua	Sustancia Seca Total	Cenizas	SUSTANCIAS BRUTAS				SUSTANCIAS DIGERIBLES			Parte Nu tritiva	Unidad Comercial
				Proteínas	Grasas	Prod.no Ni- trogenados	Celulosa	Albumi- noides	Materia Grasa	Prod.No NI- trogenados		
a) De Raíces												
Remolacha	88	12	1.07	1.22	0.12	8.67	0.32	0.94	0.06	8.83	9.6	11.77
Zanahoria	87	13	1.1	1.23	0.22	9.30	1.25	0.02	0.13	9.62	10.8	12.61
Name	79.3	16	1.0	1.5	1.1							
Patata	75	25	1.1	2.1	0.15	21	0.65	1.58	0.08	20.94	13.4	25.81
Nabo	90.78	9.22	0.80	1.18	0.22	5.89	1.13	0.76	0.17	5.86	8.2	8.48
Pataca	80	20	1.12	1.63	0.19	16.32	0.74	1.22	0.10	16.24	13.5	20.10
b) De Bulbos y Tallos		Azúcar										
Puerro (bulbos)	87.62	0.11	1.24	2.81	0.29	6.09	1.19					
Puerro (hojas)	90.32	0.81	0.82	2.10	0.14	3.74	1.27					
c) De hojas												
Acedera	92.18	0.37	0.82	2.42	0.48	3.07	0.66					
		Sust.Seca										
Col	87	13	1.69	2.70	0.42	6.77	1.12	1.97	0.25	5.35	3	11.76
Valeriana	93.41	Azúcar	0.78	2.09	0.41	2.73	0.57					
Escarosa mitad de octubre	93.88	0.13	0.63	1.35	0.74	2.45	2.15					
Escarosa fin de agosto	94.30	0.13	0.61	2.18	0.82	1.19	1.19					
d) De Semillas		Sust.Seca										
Judías	14	86	3.60	22.34	1.68	54.88	3.10	20.47	1.51	54.19	2.19	118.62
Habas	14.30	85.7	3.18	25.42	1.52	48.44	7.14	23.87	1.20	53.48	2.9	116
Guisantes	14	86	2.81	22.50	1.60	53.69	5.38	20.04	1.20	53.48	2.9	116

REF. (16), (17)

- c) Legumbres (judías, guisantes, habas, etc.)
- d) Hortalizas nitrogenadas (coles, espárragos, setas, trufas).
- e) Hortalizas dulces o de fruto (melón, fresas, etc.)
- f) Hortalizas mucilaginosas o salinas (lechuga, a chicoria, espinacas).
- g) Hortalizas ácidas (acedera, tomate, etc.).
- h) Hortalizas de condimento (ajo, cebolla, perejil, etc.) (17), (20), (22). También existen otras formas de clasificarlas, como se observa en el Cuadro 15.

Las hortalizas de importancia, para el presente trabajo son: Hortalizas nitrogenadas y hortalizas mucilaginosas.

Por lo que se definen a continuación:

-Hortalizas nitrogenadas.

Estas se diferencian de las legumbres, más que por su composición, porque se consumen en estado herbáceo y porque la mayor parte se produce en las huertas, mientras que las legumbres son harinosas y se cultivan principalmente en el campo. Pertenecen a este grupo la col, el espárrago, la alcachofa, los cardos, las setas y las trufas. (Cuadros 16 y 17).

CUADRO 16
HORTALIZAS NITROGENADAS
ELEMENTOS NUTRITIVOS CONTENIDOS EN 100 PARTES EN ESTADO NATURAL

	AGUA	PROTEINAS	GRASAS	AZUCAR	ALMIDON Y EXTRACTOS NO NITROGENADOS	CELULOSA	CENIZAS	PENTOSANAS
Espárragos	93.72	1.95	0.14	2.40	2.40	1.15	0.64	---
Alcachofa	82.12	12.08	0.60	---	78.56	3.43	5.33	---
Cardo	81.96	---	0.60	---	---	---	4.73	---
Coliflor	90.80	2.48	0.34	1.21	3.31	0.91	0.83	---
Repollo	90.11	1.83	0.18	1.92	3.13	1.65	1.18	0.55
Col ácida	91.41	1.25	0.54	0.68	2.02	1.31	1.64	0.85-0.96
Col de Bruselas	85.63	4.83	0.46	---	6.22	1.57	1.29	---
Colinabo	81.90	3.52	0.14	1.21	10.10	1.82	1.28	1.36-1.38
Colirábano	85.89	2.87	0.21	0.38	7.80	1.68	1.17	1.56
Colirábano con hoja	86.04	2.03	0.45	0.51	6.77	1.55	1.65	0.72
Col roja	90.66	1.83	0.19	1.74	4.12	1.29	0.77	---
Col Parénquina (58.7/100)	89.43	2.14	0.19	1.69	4.54	1.27	0.73	---
Col Costillas (41.3/100)	90.86	1.43	0.18	1.80	3.59	1.31	0.82	---
Col negra o rizada	80.03	3.99	0.90	1.21	10.42	1.88	1.57	2.03
Berza	87.09	3.31	0.71	1.29	4.73	1.23	1.61	---
Berza Parénquina (62.4/100)	85.80	4.63	0.93	1.33	4.62	1.25	1.45	---
Berza hojas (37.6/100)	87.60	1.65	0.36	1.39	6.26	1.64	1.08	---
Setas	80.70	4.88	0.20	---	3.57	0.83	0.82	0.43
Setas Agaricus	---	---	---	---	---	---	---	0.11
Setas Boletus	---	---	---	---	---	---	---	0.17
Setas Secas	11.66	41.69	0.71	---	30.55	7.16	7.03	---
Trufas frescas	74.39	9.07	0.54	---	6.60	7.25	2.09	---
Trufas secas	4.35	33.89	2.01	---	24.88	27.07	7.80	---

REF. (16), (17), (22)

CUADRO 17
 RIQUEZA EN PROTEINAS (EN GRAMOS) DE 1 Kg DE LEGUMBRES
 Y HORTALIZAS NITROGENADAS

LEGUMBRE	CANTIDAD DE PROTEINA (g)	LEGUMBRE	CANTIDAD DE PROTEINA (g)
Cacahuete	275.20	Col rizada negra	39.90
Lentejas	259.40	Hongos inmediatamente des	
Habas	256.80	pués de cogidos	4.88
Judías	236.60	Colinabo	37.50
Guisantes	233.50	Berza	33.10
Carne de vaca	205.40	Colirrábano	28.70
Garbanzos secos	186.50	Judías tiernas	97.20
Alcachofas	120.80	Coliflor	24.80
Trufas	9.07	Espárragos	19.80
Pan común	8.44	Repollo	18.30
Guisantes frescos	65.90	Col de Bruselas	14.90
Habas frescas	52.90	Coles ácidas	17.50

Ref. (16), (17).

Hortalizas mucilaginosas y salinas (Cuadro 18). pertenecen a este grupo todas las hortalizas de hojas (lechuga, achicoria amarga, escarola, berros, angélica, hierba de los canónigos y varias hierbas espontáneas), que se comen cocidas o crudas (16), (22).

La espinaca es bastante nitrogenada; el apio, por la esencia que contiene, es exitante (16), (22).

Las hortalizas de hojas contienen todos los alimentos nutritivos necesarios al hombre en la forma más asimilable, pero éstos se hallan muy diluidos en agua y por tanto deben considerarse como alimentos fríos porque, consumidas crudas, absorben mucho calor del cuerpo para elevar la temperatura del agua hasta igualar la de la sangre.

Las hojas tiernas son más acuosas, pero contienen más proteínas y sustancias minerales que las de cierta edad. El limbo de la hoja es más nutritivo que las raicillas, cuya celulosa es menos digerible (16), (17), (22).

Con esta breve exposición de la selección de la materia prima, se clasifica a ésta según su origen biológico, así:

CUADRO 18
 HORTALIZAS MUCILAGINOSAS Y SALINAS
 ELEMENTOS NUTRITIVOS CONTENIDOS EN 100 PARTES EN ESTADO NATURAL

HORTALIZAS	AGUA	PROTEINAS	GRASAS	AZUCARES	ALMIDON Y EXTRACTOS NO NITROGE- NADOS.	CELULOSA	CENIZAS
Acelga	92.88	2	0.14	1.94	-	1.17	1.87
Diente de león (Leontodon tarazaci)	85.54	2.81	0.69	7.45	-	1.52	1.90
Hierba de los canónigos	93.41	2.09	0.41	2.73	-	0.57	0.79
Escarola	93.88	1.35	0.13	2.45	0.83	0.63	0.71
Escarolarizada	94.38	2.18	0.13	1.19	0.69	0.61	0.82
Promedio	94.13	1.76	0.13	1.82	0.76	0.62	0.78
Achicoria amarga	78.76	1.03	0.35	15.30	2.62	1.00	0.25
Apio : raíz	84.09	1.48	0.39	11.03	0.77	1.40	0.84
Apio : hojas	81.57	4.64	0.70	7.87	1.26	1.41	2.46
Apio : tallos	89.57	0.88	0.34	5.94	0.62	1.24	1.41
Espinaca	89.24	3.71	0.50	3.51	0.10	0.94	2.00
Lechuga arropollada	94.33	1.41	0.31	2.09	0.10	0.73	1.03
Lechuga romana	92.50	1.26	0.54	3.55	-	1.17	0.98

Ref. (16), (17).

Origen Humano: Heces humana, orina humana

Origen Vegetal: lechuga, repollo

Origen Mineral: agua

Partiendo de ellas, se procedió a efectuar mezclas en proporciones definidas, las cuales serán determinadas considerando los fundamentos básicos en el diseño experimental (1), (8), (10).

- Disponibilidad de Materia Prima

Con referencia a la materia prima de origen humano, se dispuso de ésta, de la comunidad marginal Santa Eduvigés, cercana a instalaciones del CINPA, a la cual se le entregó recipientes por separado para recolectar heces y orina.

Con relación a la materia prima de origen vegetal, se plantea la alternativa de utilizar los desechos vegetales del mercado municipal de Santa Tecla.

- Recolección de Materia Prima

a) Recolección de Materia Prima de origen humano

- Se definió que la familia, que suministre muestras para la realización del proceso fuera siempre la misma, a fin de que ello no se constituyera en una variable del proceso
- A la familia seleccionada, se le proporcionaron recipientes

tes de plástico, para sustituir la fosa séptica, en los cuales evacuó por separado heces y orina respectivamente.

- Las materias primas fueron colocadas en recipientes de plástico en donde se acumularon hasta obtener las cantidades deseadas, las cuales fueron trasladadas al CENTA, para ser analizadas e incorporadas a los digestores en la fase experimental.

b) Recolección de Materia Prima de Origen Vegetal

- Se tomó del día anterior a la realización de la digestión anaeróbica.

- La recolección se hizo en bolsas de 5-10 lb de polietileno.

- Medidas de Seguridad e Higiene

- Para la manipulación de esta materia prima en el laboratorio se utilizaron mascarillas y guantes para evitar contaminación.

- Como medida preventiva los recolectores fueron vacunados para evitar cualquier efecto colateral que influyera negativamente en su salud.

- Transporte de Materia Prima

- a) Transporte de Materia Prima de origen humano :

- Se hizo de la Comunidad hacia el CENPA, ya sea en transporte colectivo o privado.
- La investigación de campo (11), señala que el tiempo máximo de transporte de heces y orina recomendado para estos propósitos es de aproximadamente una hora, dado los procesos bioquímicos de degradación a que están sujetos estos sustratos.

b) Transporte de Materia Prima de origen vegetal :

Se realizó del mercado municipal de Santa Tecla hacia el CENPA.

B) Diseño Experimental

Son varias fases de investigación, que se pueden desglosar así:

- 1) Preparación de la carga
- 2) Evaluación de los sustratos
- 3) Esquema del diseño experimental a escala de laboratorio
- 4) Variables del diseño experimental
- 5) Variables de control del proceso
- 6) Evaluación del biogás y bioabono
- 7) Marcha generalizada del proceso experimental

1) Preparación de la Carga

El sustrato utilizado como CARGA, para la producción de biogás y bioabono, es de tipo mixto, dado su origen bio

lógico tal como se muestra en la FIG. 18.

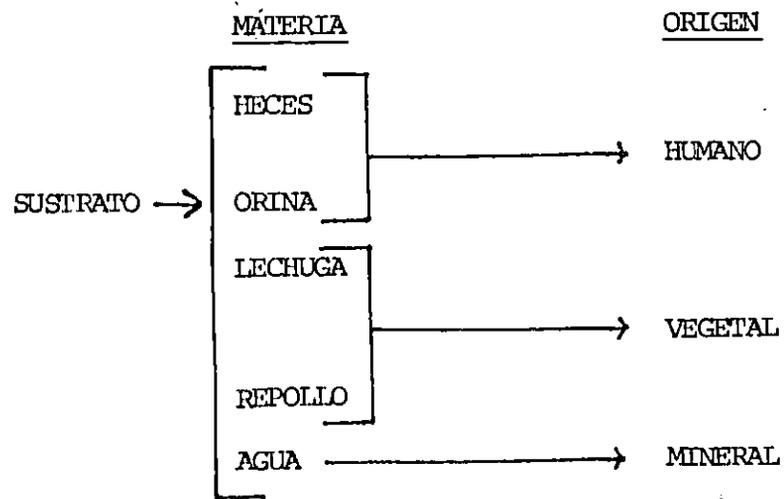


Figura 18. COMPONENTES DEL SUSTRATO UTILIZADO COMO CARGA PARA LA PRODUCCION DE BIOGAS..

FUNFAMENTOS BASICOS PARA LA PREPARACION DE LA CARGA

Para el presente estudio, se realizaron tres mezclas del sustrato de interés, cuya composición porcentual de sus materias primas, así como los criterios de escogitación de dichos porcentajes fueron suministrados tomando en consideración los siguientes planteamientos :

- Con referencia a la carga sólida total que se agregará al digestor en relación a la cantidad de agua, las referencias bibliográficas (1), consideran que la mezcla se puede realizar con partes iguales en volumen de agua y carga sólida, o cinco partes de agua y cuatro partes de carga sólida; sin embargo, para la experiencia de laboratorio se

trabajó con una relación volumétrica de 1:1, y se consideró a la orina como parte del sustrato sólido.

- Otro parámetro que auxilió en la definición de la participación porcentual de cada material (base seca) es la relación C/N de la mezcla de heces y orina humana; lechuga y repollo. No obstante como la literatura no informa sobre el contenido de carbono de los residuos municipales (lechuga, repollo), no fue posible tomar esta relación como premisa para la variación del % peso de dichos compoponentes en la mezcla, aplicándose este criterio únicamente a la determinación de los % de participación de la mezcla heces más orina; dado que sobre estas materias primas si se conocen sus relaciones C/N y % de nitrógeno.
- Del mismo modo, se conoce la matanogénesis de las heces y orina humana, no así de la lechuga y del repollo, por lo cual no fue previsible teóricamente la influencia de estos residuos municipales en la mezcla total.
- Una de las materias primas de las cuales se deseaba conocer la influencia de su presencia en la mezcla total, es la orina humana, sin embargo, presenta una relación C/N bastante baja o sea alto contenido de nitrógeno, por lo que la producción de biogás, es mínima, no obstante a fin de considerar su influencia, permaneció mezclada en una proporción definida con las heces humanas, para observar el impacto de ella en la eficiencia del proceso.

- Las tres mezclas propuestas estaban basadas en la variación del porcentaje de residuos municipales (repollo, lechuga), el cual fluctuaba en base a un criterio que ha sido expuesto anteriormente; que consiste en que la cantidad de desechos vegetales que se encuentran presentes en la carga sólida total que entra al digestor, está definida en 25% de la carga total de los sustratos sólidos. Por lo tanto, el 25% es el que fluctuó a un valor superior e inferior para obtener datos que permitieran verificar el porcentaje propuesto y el impacto de su variación (8). Las mezclas se indican a continuación :

MEZCLA A, con 20% V/V Desechos Vegetales en relación a la carga sólida total.

MEZCLA B, con 25% V/V Desechos Vegetales en relación a la carga sólida total.

MEZCLA Co, con 30% V/V Desechos Vegetales en relación a la carga sólida total

MEZCLA C_f, Con 10% V/V Desechos Vegetales en relación a la carga sólida total

- Cada una de estas mezclas también representan el sustrato complementario de los residuos vegetales en la carga total, tomando como base los porcentajes antes descritos estos residuos vegetales representan los porcentajes en relación a las heces y orina humana, los cuales se mencionan a

continuación :

MEZCLA A, 25% Desechos Vegetales en relación a la carga de heces mas orina.

MEZCLA B, 33% Desechos Vegetales en relación a la carga de heces mas orina.

MEZCLA Co, 11.11% Desechos Vegetales en relación a la carga de heces mas orina.

MEZCLA C_f, 42.9% Desechos Vegetales en relación a la carga de heces mas orina.

La variable heces mas orina se mantuvo fija con un valor en volumen de 18:1, para cada una de las mezclas a estudiar.

- La relación porcentual entre los dos componentes (lechuga y repollo) que forman los residuos vegetales no pudo ser determinada bibliográficamente, habiéndose convenido en mantenerla constante, en todas las mezclas en una relación volumétrica de 1:1, a fin de que ello sea una proporción que se mantuviera constante en las tres mezclas.
- La mezcla base, que fue considerada es la mezcla B, la cual se define proporcionalmente en el CUADRO 19.

CUADRO 19
RELACION VOLUMETRICA DE MEZCLA BASE B

TIPO DE CARGA	RELACION VOLUMETRICA
MEZCLA CARGA SOLIDA/ACUA	1:1
CARGA (HECES + ORINA)/CARGA SOLIDA	3:4
CARGA VEGETAL/CARGA SOLIDA	1:4
CARGA HECES/ORINA	18:1
CARGA LECHUGA/REPOLLO	1:1

- La proporción de heces/orina 18:1, traducida en porcentajes de volumen entre ambos componentes es la siguiente : 5.26% orina y 94.73% heces (en % V/V).

Esta proporción se mantuvo constante en cada una de las mezclas, variando únicamente su participación porcentual en el contenido de la carga total, debido a las variaciones del % de los desechos vegetales en la misma.

La relación C/N (heces y orina) es de 7.0 por lo que se mantendrá fija también.

bos que se mantienen constantes en las tres mezclas:
18 partes de heces para una de orina.

b) Sustrato de Lechuga y Repollo

Fueron analizados en la proporción de 1:1 que se mantienen constante en las tres mezclas.

c) Mezcla Total o Sustrato Total

Asimismo, se realizaron por triplicado análisis de la mezcla: heces, orina, lechuga, repollo y agua en las proporciones en que se prepara la carga para cada mezcla.

Análisis a Realizar a cada Sustrato

Los análisis seleccionados se consideran en el Cuadro 21.

CUADRO 21
ANÁLISIS A REALIZAR A CADA SUSTRATO

TIPO ANALISIS	MÉTODO
% HUMEDAD	GRAVIMETRICO
CENIZA	GRAVIMETRICO
% S.T.	GRAVIMETRICO
% S.V.	GRAVIMETRICO
NITROGENO	MICRO-KJELDAHL
MICROELEMENTOS	INSTRUMENTAL
POTASIO	INSTRUMENTAL
POTASIO	INSTRUMENTAL
FOSFORO	INSTRUMENTAL
ASCARIS LUMBRICOIDES	INSTRUMENTAL

3) Esquema del Diseño Experimental a Escala de Laboratorio

A continuación se presenta el esquema del proceso experimental a escala laboratorio (VER FIG. 19).

- Reactivos Utilizados

- Agua bidestilada
- Indicador Azul de Cromo

- Material y Equipo

a) Material

- CARGA : · ORINA HUMANA
HECES HUMANA
REPOLLO CORTADO (1x1 cm)
LECHUGA CORTADA (1x1 cm)
- DIGESTOR : Un bote de leche vacío de 5 lb (capacidad 3.6 litros).
- GASOMETRO : Dos recipientes de plástico (1 litro)
 - Boquillas plásticas
 - Tres ampollas para la recolección de gas
 - Uniones plásticas de látex
 - Mangueras plásticas de 1/4 "
 - Pegamento de Silicón y/o Parafina
 - Jeringas descartables
 - Dos Beakers de 10 ml
 - Tapones de hule

- Uniones T de plástico
- Par de guantes
- Una mascarilla
- Soportes para el sistema
- Espátula, embudos, papel de empaque
- Papel indicador de pH
- Pintura anticorrosiva gris
- Sistema de válvula paso de flujo
- Dos Beaker de 250 ml
- Dos probetas de 25, 250 ml respectivamente

b) Equipo

- Termómetros pequeños
- Licuadora
- Balanza analítica
- Estufa

- Descripción de Equipo del Diseño Experimental

a) Digestor

El digestor presenta una capacidad de 3.6 litros; sin embargo, sólo el 80% de éste, contendrá la carga. Esto significa que la carga será de 2.888 litros aproximados 2.9 litros.

El digestor como tal consta de :

- Tapadera

Una tapadera, la cual será sellada con pegamento, cuando

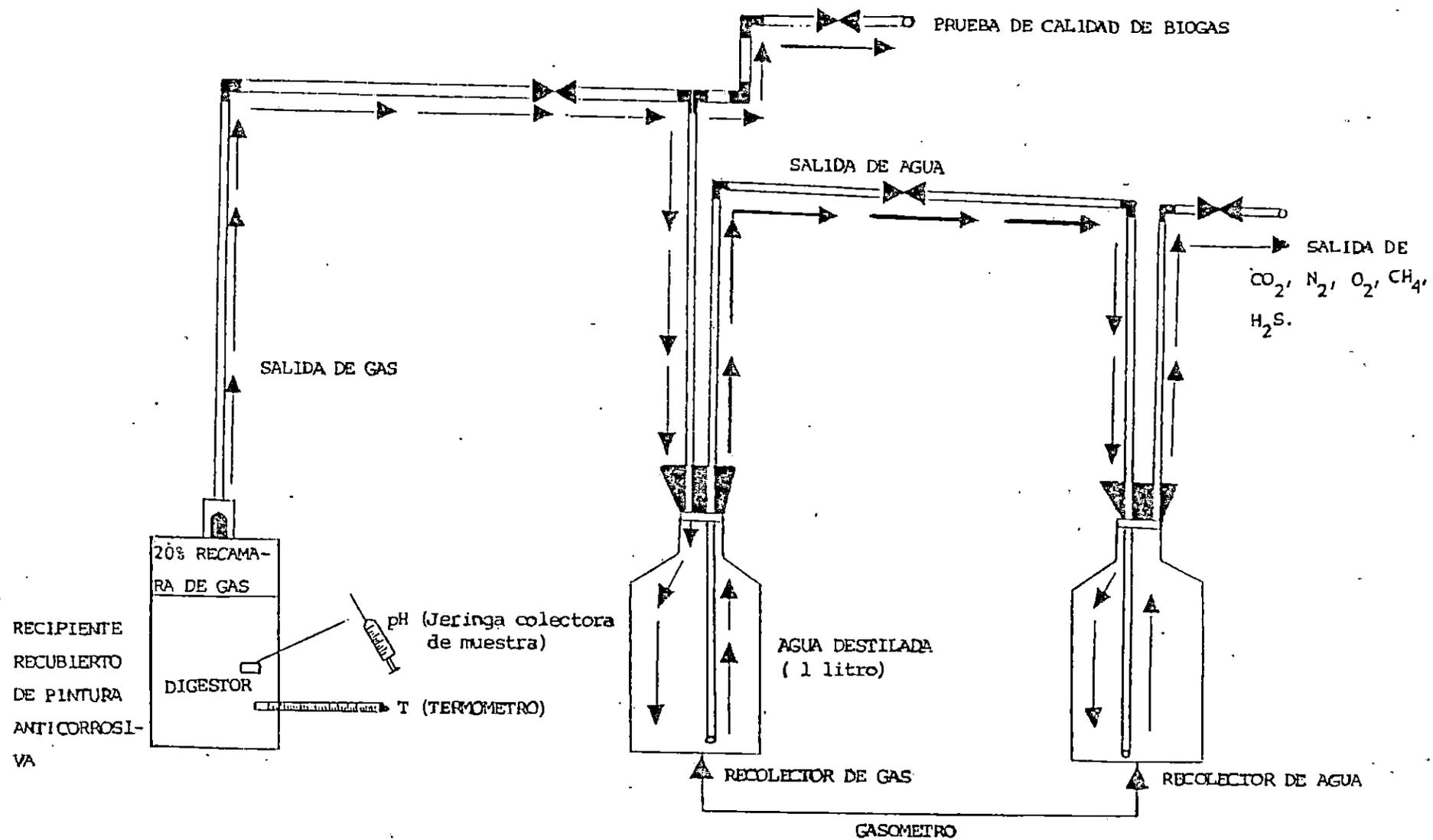


FIG 19 ESQUEMA DEL DISEÑO EXPERIMENTAL A ESCALA DE LABORATORIO DEL PROCESO ANAEROBICO PARA LA PRODUCCION DE BIOGAS.

esté cargado y preparado para el proceso de digestión anaeróbica el digestor.

- Orificio de Salida de la Tapadera

La tapadera presenta un orificio de salida, el cual desempeña la siguiente función : Recolección del gas producido.

Por este orificio sale gas producido. Esta salida se extiende por medio de una manguera, al final de la cual hay una bifurcación. La bifurcación distribuye al gas en dos secciones :

- 1) Medición de calidad del biogás
- 2) Medición de producción de biogás

1.) Medición de Calidad del Biogás

Esta se llevó a cabo, colocando una ampolla especial, al final de la tubería del gas, al llenar ésta con gas, es llevada al aparato de análisis de gases, el cual indicará la composición del gas producido en la fermentación anaeróbica.

2) Medición de Producción de Biogás

Esta se llevó a cabo, a partir del siguiente aparato :

Gasómetro o medida del volumen de biogás producido.

- Orificios del Digestor

- El Primer Orificio

Es el que se muestra a un extremo y desempeña la función de : Medición de pH.

- El Segundo Orificio

Está más bajo, siempre a un extremo, y desempeña la función de : Medición de Temperatura.

Ambos orificios han sido sellados con pegamento sili
cón.

b) Gasómetro

El cual desempeña la función siguiente :

Medición del biogás producido; en base al esquema mostrado, que se menciona a continuación :

- Recolector de gas
- Recolector de agua

- Recolector de gas

El cual consta de :

- Tapón de hule, que tiene dos orificios
- Dos mangueras
- Volumen de agua definido previamente

Una de las mangueras es la de entrada del gas producido, el cual desplaza el agua dentro del recolector.

Otra manguera es la de salida del agua. Esta manguera lleva el agua desalojada hacia el recolector de agua.

- Recolector de Agua

El cual consta de :

- Tapón de hule, que tiene dos orificios
- Dos mangueras
- Vacío completamente

Una de las mangueras es la de entrada del agua desalada hacia el recolector de agua.

La otra manguera elimina el aire y el CO_2 que se encuentra en el recipiente vacío recolector de agua, y se encuentra abierta.

c) Sistema de Válvulas paso de Flujo

Se encuentran representadas en el esquema por una mariposa y son las que permiten o no el paso del flujo de gas y agua, a través del sistema.

4) Variables de Diseño Experimental

Las variables identificadas son las siguientes :

- Tipo de alimentación : discontinua
- Disposición de la carga : homogénea
- Digestor sin agitación
- Composición de cada una de las materias que componen la mezcla, la cual indica la cantidad de carga en unidades de volumen.

La cantidad de carga en unidades de volumen, está basada, teniendo en cuenta que la capacidad total del digestor es de 3.6 litros; sin embargo, el área sugerida según Ref. (1), es del 20%, la cual está libre de carga, por lo que el 80% es el contenido de carga en unidades de volumen, siendo éste entonces igual a 2.9 litros, por lo que es este volumen el que delimitará la cantidad y composición de la carga para cada mezcla. A continuación, se presenta el CUADRO 22, el cual contiene las composiciones de cada una de las mezclas en unidades de volumen.

CUADRO 22

COMPOSICION DE MEZCLAS EXPERIMENTALES QUE
CONFORMAN LA CARGA PARA LA DIGESTION ANAEROBICA
(LITROS)

MATERIA	MEZCLA A	MEZCLA B	MEZCLA C _o	MEZCLA C _f
HECES	1.1	1.03	0.962	1.23
ORINA	0.061	0.057	0.05	0.068
REPOLLO	0.145	0.181	0.22	0.725
LECHUGA	0.145	0.181	0.22	0.725
AGUA	1.45	1.45	1.45	1.45
TOTAL	2.9	2.9	2.9	2.9

5) Variables de Control del Proceso

Las variables que se controlaron fueron : Temperatura, pH, volumen de biogás producido, calidad de biogás, tiempo de retención, dicho control se realizó de la siguiente forma :

- Temperatura : Por medio de un termómetro colocado en el digestor.
- pH : Con papel perhydron, escogido según el rango de trabajo.
- Volumen de biogás producido : Fue controlado por el gasómetro; espacio libre en el Digestor y el volumen de tubería.
- Calidad de biogás : Por medio del aparato cromatógrafo de gases.
- Tiempo de retención : Se midió desde que se colocó el digestor, hasta que terminó el proceso.

6) Evaluación de la producción de Biogás y Obtención del Bioabono.

A) Biogás

El producto de interés es el biogás, constituido por :

CH_4 , CO_2 , SH_2 , O_2 , y otros

Variables de Control del Biogás

Las variables que fueron controladas :

- a) Volumen de biogás producido
- b) Calidad de biogás

a) Volumen del biogás producido : Se expresa en $\text{m}^3/\text{día}$ y finalmente en m^3/kg carga. La medición se efectuó de la siguiente manera :

- Se recolectaba el gas producido en un gasómetro, que reportaba los m^3 producidos por día, por medio del desplazamiento de líquido más los volúmenes de las tuberías, utilizando para su medición el diámetro interno, con lo cual se evaluaba la cantidad de líquido que había quedado en las paredes de dichas tuberías. Así, también los m^3 albergados en el espacio libre del Digestor.

La determinación del volumen en m^3 se realizó sumando la cantidad de agua acumulada del desplazamiento de gas producido y efectuando un balance de materia en base a una entrada y salida de una tubería, que representa un diámetro interno circular. Esta evaluación se realizó para cada una de las mezclas, las cuales se desarrollaron cada una de ellas por triplicado.

- b) Calidad de biogás : Esta fue definida en base al cromatógrafo de gases, el cual es manejado por los métodos de análisis de los manuales ASTM y AOAC. La calidad del gas fue definida tomando como base los componentes CH_4 , CO_2 , SH_2 , N_2 , O_2 los cuales se encuentran presentes en cantidades proporcionales en el gas producido. Fue medida por duplicado como mínimo, en cada mezcla, la cual a su vez, fue realizada tres veces cada una.

B) Bioabono

Es considerado como el sub-producto obtenido después que cesa el proceso de fermentación anaeróbica, y fue evaluado de la

siguiente manera:

- Pesando la cantidad de bioabono obtenida en cada corrida, considerando un 10% de exceso por algunas pérdidas, esto se realizó por triplicado para cada mezcla.
- Evaluando la composición química del bioabono, también se realizó por triplicado para cada mezcla.
- Evaluando el contenido de Ascaris lumbricoides con el bioabono.

Variables de Control de Bioabono

- a) Cantidad de Bioabono Obtenida: Se procedió a recolectar con espátula del digestor y colocarlo en recipientes previamente tarados, para efectuar lecturas del peso, las cuales se evalúan por diferencia de peso.
- b) Composición Química de Bioabono: La evaluación de la composición del sub-producto se realizó a partir de los siguientes análisis y métodos:

CUADRO 23.
ANÁLISIS REALIZADOS AL BIOABONO

TIPO DE ANALISIS	METODO
% HUMEDAD	GRAVIMETRICO
% CENIZAS	GRAVIMETRICO
% S.T.	GRAVIMETRICO
% S.V.	GRAVIMETRICO
% N.	MICRO-KJELDAHL
% P	INSTRUMENTAL
% K	INSTRUMENTAL
MICROELEMENTOS	INSTRUMENTAL
<u>ASCARIS LUMBRICOIDES</u>	INSTRUMENTAL

Los análisis químicos de biogás y bioabono fueron realizados por triplicado respectivamente para cada corrida de la mezcla A; B y C; a manera de ser coherente con la metodología analítica de la carga.

7) Marcha Generalizada del Proceso Experimental

Descripción del Experimento :

El desarrollo de esta etapa se realizó llevando a cabo los siguientes procedimientos :

- A) Montaje del digestor, y
- B) Análisis químicos y de ascaris realizados a sustratos, afluentes y efluentes que participan en el proceso de digestión anaeróbica.

A) Montaje del Digestor

- a) Preparación de los sustratos de origen vegetal y humano.

Lechuga

- Se cortó en pequeños fragmentos de aproximadamente 1 x 1 centímetros.
- Se midió el peso y volumen de lechuga necesaria
- En un Beaker de 250 ml se midió 60 ml de agua destilada, la cual es parte del contenido total

de agua a utilizar en el digestor.

- Después se incorpora la lechuga y el agua al recipiente homogenizador (licuadora).
- Se mezcló lo anterior en aproximadamente 1 minuto.

Repollo

Se realizó de igual manera que la lechuga.

Orina Humana

- Recolectada la orina, se realizó la medición en volumen necesaria (ml) para cada digestor en proceso de montaje.
- Luego, a continuación, se pesó la cantidad detallada para cada digestor en partículas.

Heces Humanas

- Después de recolectadas las heces, se procede a incorporarlas en un balde plástico.
- Luego se homogenizó por medio de una paleta de madera.
- A continuación en un Beaker de 250 ml se midió 240 ml de heces que es equivalente a una taza; 240 ml = 1 taza.

- Luego se pesaron los 240 ml de heces.
- Este procedimiento se repitió tantas veces fueron necesarias, y dependió también con que tipo de mezcla se estaba trabajando.
- Este volumen de heces se llevó a otro balde plástico, en el cual se preparaba la mezcla final.

b) Preparación de la Mezcla de Origen Vegetal

- La lechuga y el repollo, fueron mezclados en una relación de 1:1, con respecto al volumen total de carga sólida del digestor.
- Luego se procedió a pesarla.

c) Preparación de Mezcla de Origen Humano

- Se procedió a mezclar las cantidades de orina y heces humanas que difieren de cada mezcla, de acuerdo a su composición manteniendo la relación C/N estipulada en el anteproyecto.
- Luego esta mezcla fue pesada.

d) Muestreo de Mezclas de Origen Vegetal y Humano.

Vegetal

- Se tararon cápsulas de aluminio, las cuales llegaron a peso constante.
- Se colocaron en cada una de las cápsulas la mezcla de lechuga mas repollo.
- Luego se procedió a pesarlas, y el tipo de análisis a realizarse dependerá del tratamiento químico recomendado para cada muestra en especial.

Humano

- Este se llevó a cabo de igual manera que el anterior.

e) Preparación de Mezcla

Ya preparadas cada una de las mezclas de sustratos, así como la cantidad de agua restante y necesaria para la composición dada, se procede a lo siguiente :

- Introducir cada una de ellas a un recipiente
- Luego se mezclan con una paleta de madera.

f) Muestreo de la Mezcla

Este también se lleva a cabo en cápsulas de alumin

nio previamente taradas y enumeradas.

g) Incorporación de la Mezcla al Digestor

Cuando se ha realizado el muestreo, se procede a tomar la cantidad de mezcla necesaria (2.9 litros) para ser colocadas al digestor.

h) Toma de pH y Temperatura

Ya incorporada la mezcla en el digestor, se realiza la prueba o toma de pH y T° iniciales.

i) Sellado del Digestor

Se realiza el sellado con pegamento de silicón y se comienza a observar el proceso de fermentación; así como también se hacen las tomas periódicas de pH, temperatura, volumen acumulado en el sistema y calidad del biogás.

j) Vaciado del Digestor

Concluida la fermentación anaeróbica se procedió a evaluar el efluente.

k) Muestreo del Efluente

Este se realizó de dos formas :

1. Determinación de la cantidad de efluente.

Se realizó pesando previamente un recipiente y posteriormente se coloca dentro de él la cantidad de efluente obtenida del proceso de fermentación y por diferen-

cia de pesos se obtiene el peso del efluente

2. Caracterización del Efluente

Esta se realizó colocando con una paleta de madera cantidades de efluente en cápsulas de aluminio previamente taradas, las cuales se llevan a pesar en una balanza analítica, para proseguir con la determinación de los análisis respectivos mencionados anteriormente.

B) Análisis Químicos y de Ascaris, Realizados a Sustratos, Afluentes y Efluentes que Participan en el Proceso de Digestión Anaeróbica.

(VER APENDICES).

7.3 ETAPA DE DESARROLLO DE FASE EXPERIMENTAL

Esta etapa consiste fundamentalmente, de una secuencia de actividades, así como de la forma en que se llevaron a cabo estas, para llegar a la finalización de la recolección de datos que fundamenten el presente trabajo.

El desarrollo de esta etapa experimental se clasifica así :

1. Etapa Inicial

2. Selección de mezcla óptima

1. Etapa Inicial

A cada una de las materias primas descritas y clasificadas anteriormente según su origen, (las cuales son utilizadas en las mezclas A, B y C) se les realizó análisis químicos así como los descritos en la sección de evaluación de sustratos.

También a cada mezcla se le realizó su análisis químico por triplicado.

Al producto final o sea al biogás, así como al sub-producto, bioabono, también se les realizaron sus análisis respectivos, a través de cada corrida de cada mezcla analizada cada una de éstas por triplicado.

Al realizar la mezcla Co tres veces, se observó que los digestores habían estallado, por lo que no se pudo deducir hasta este momento, cual de las tres mezclas A, B y Co, sea la mejor. Por lo que se propone otra mezcla Cf, la cual contiene más heces humanas y menos desechos vegetales, cuyos % V/V, se encuentran en el CUADRO 20.

La mezcla Cf, se realizó solamente una vez, es decir, sólo una corrida de ella.

2. Selección de Mezcla Optima

La mezcla que presentó mejores resultados expresados en términos de rendimiento de producción de biogás, es decir, m^3 biogás/día/kg S. V. Gastados fue identificada como la MEZCLA OPTIMA.

Con las tres mezclas realizadas, se procedió a realizar una evaluación técnica y de criterio; para deducir cuál sería la mezcla óptima.

Con las corridas realizadas de cada una de las mezclas, se efectuó un análisis estadístico, comprobándose que no se podría obtener un análisis experimental estricto, debido a que para realizarlo se tendría que haber efectuado igual número de corridas (tres corridas de cada mezcla) de las mezclas A, B, Co y C_f; sin embargo, la mezcla Co y C_f, fueron realizadas sólo una vez cada una; por lo que se opta en el planteamiento de un análisis comparativo, es decir; efectuar una serie de análisis comparando una variable de control y obteniendo cuál es la mezcla que reporta mejores resultados de la variable de control que se analice en un determinado instante.

Todo ello se realiza para poder obtener conclusiones y emitir recomendaciones para otros trabajos de investigación.

8 ANALISIS DE RESULTADOS

8.1. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE ANÁLISIS

Esta etapa del presente trabajo, ha sido planteada en base a un método, debido a que por carecer de suficiente información no se puede realizar un análisis estadístico estricto. Si se realizaron análisis estadísticos sencillos como son: Cálculo de media aritmética, desviación típica, % coeficiente de variabilidad, para los casos en que se tenía la información adecuada.

Por lo que se decidió realizar un método de planteamiento del análisis de resultados, en el que se emita en general el contenido de cada análisis. Este método se desglosa así:

- Breve comentario del tema
- Auxilio de Cuadros y Figuras
- Evaluación de comparación en base a información técnica de la revisión bibliográfica.

Con estas tres herramientas se dará paso a la obtención de una evaluación de resultados que sustenten los mejores criterios para obtener la mejor mezcla, con los cuales poder emitir posteriormente las conclusiones y recomendaciones adecuadas.

8.2 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ANÁLISIS

Explicada con anterioridad, cual será la metodología del análisis de resultados se ha desglosado, ésta en una serie de análisis que comprenden:

-Análisis de Carga

a) Análisis de sustratos de origen vegetal como mezcla de lechuga y repollo.

1. Análisis Físicos (%H, %S.T., %S.V., %CENIZAS).

2. Análisis de Macroelementos (%N, %P, %K).

b) Análisis de sustratos de origen humano como mezclas de heces y orina humana.

1. Análisis Físicos (%H, %S.T., %S.V., %CENIZAS)

2. Análisis de Macroelementos (%N, %P, %K).

c) Análisis de mezclas afluentes A, B y C.

1. Análisis físicos (%H, %S.T., %S.V., %CENIZAS).

2. Análisis de macro y microelementos

-Análisis del proceso de Fermentación Anaeróbica

-Análisis del biogás

-Análisis del bioabono

-Análisis comparativo entre mezclas A, B y C de entrada y salida.

Por lo que se dará inicio al desarrollo de cada uno de ellos.

-Análisis de Carga

a) Análisis de Sustratos de Origen Vegetal, los cuales conforman una mezcla de lechuga y repollo, que en el proceso de fermentación anaeróbica, se hace presente (en proporciones definidas, ver Cuadro 20), en la mezcla A, B y C.

1. Análisis Físicos de Sustratos de Origen Vegetal como mezcla de lechuga y repollo.

La lechuga y el repollo son vegetales que se encuentran en el medio en cantidades más o menos considerables como desecho vegetal en los mercados municipales; son hortalizas mucilaginosas y nitrogenadas respectivamente con un alto contenido hídrico.

El Cuadro 24 fue construido en base a los cuadros 16 y 18 del presente trabajo, en el cual se pueden observar los análisis físico químicos para hortalizas mucilaginosas y nitrogenadas como la lechuga y el repollo respectivamente; las cuales reportan datos de humedad y cenizas, como porcentaje peso.

CUADRO 24

DETERMINACION DE ANALISIS FISICOS PARA LOS SUSTRATOS DE LECHUGA
Y REPOLLO POR SEPARADO

DETERMINACION	CONTENIDO	
	LECHUGA	REPOLLO
HUMEDAD (% P/P)	94.33	90.11
S.T. (% P/P)	5.67	9.89
S.V. (% P/P)	98.97	98.82
CENIZAS (% P/P)	1.03	1.19

Ref. (16), (17), (22)

Se observa en el Cuadro 24, que en la composición de % P/P de lechuga y repollo (por separado) hay un acercamiento bastante aceptable a los datos experimentales o reales obtenidos; (Cuadro 25), haciendo la aclaración que el sustrato trabajado realmente se desarrolló como mezcla guardando una relación volumétrica 1:1.

El manejo desarrollado en los análisis probablemente no fue el adecuado por los traslados de un lugar a otro, pero se considera que observando los datos teóricos de la lechuga y el repollo individuales en comparación con los datos experimentales de la mezcla de estos sustratos de origen vegetal la variabilidad de los análisis es ínfima.

El contenido de humedad en las mezclas afluentes A, B y C_f en los desechos vegetales de la lechuga y repollo se pueden observar en el Cuadro 25; la humedad entre las mezclas A y B es más o menos similar, al igual que los sólidos totales. Para la mezcla C_f se observa una variabilidad en todo aspecto, debido a que esta mezcla es la que posee menor cantidad en volumen de desechos vegetales, guardando siempre una relación de 1:1.

Los sólidos volátiles son materiales orgánicos solubles ingeridos por las células de los microbios que son catabolizados para formar ácidos grasos volátiles por la acción de una variedad de endoenzimas. Es por ello que con relación a los análisis de sólidos volátiles y cenizas entre las mezclas A y B es probable que la variabilidad haya sido a causa de la evaluación en base a los sólidos totales y cabe mencionar que entre las mezclas B y C_f se da una variación pero no extremadamente grande como se puede observar entre las mezclas A y C_f, (Ver Cuadro 25).

CUADRO 25

ANÁLISIS FÍSICOS DE ORIGEN VEGETAL DE MEZCLA DE LECHUGA Y REPOLLO
(AFLUENTE) PRESENTADO COMO PROMEDIO DE PROMEDIOS DE LAS
MEZCLAS B y C_F

DETERMINACION	CONTENIDO		
	MEZCLA A AFLUENTE	MEZCLA B AFLUENTE	MEZCLA C _F AFLUENTE
HUMEDAD (% P/P)	92.8595	92.2896	90.9099
S.T (% P/P)	7.1405	7.7105	9.0911
S.V (% P/P)	99.1098	94.8011	96.2279
CENIZAS (% P/P)	0.8209	5.1981	7.7721

En síntesis se puede decir que los tres tipos de mezclas son favorables para que se lleve a cabo un fenómeno de fermentación anaeróbica comparando los datos reales y teóricos tabulados en los Cuadros 25 y 24, respectivamente; sin embargo, al realizar las mezclas con los otros sustratos de origen humano, que conforman la carga total de entrada al digestor, las manifestaciones de la fermentación anaeróbica pueden variar y no reportar buenos resultados.

2. Análisis de Macroelementos de Sustratos de Origen Vegetal como Mezcla de Lechuga y Repollo.

Los macroelementos son aquellos nutrientes que se encuen-

tran presentes en mayor proporción en un sustrato determinado.

Estos constituyentes químicos son los que le dan el valor nutritivo, tanto para la alimentación, como para saber en qué tipo de suelo deben ser sembrados estos vegetales.

La mezcla de lechuga y repollo, ha sido realizada, en proporciones similares o equivalentes en cada una de las mezclas. Los dos tipos de hortalizas, presentan un alto contenido de proteínas, así también de otros macronutrientes, como se observa en el Cuadro 26.

CUADRO 26

CONTENIDO PORCENTUAL DE NUTRIENTES DE LAS HORTALIZAS

HORTALIZAS	% PROTEINA	% NITROGENO	% FOSFORO	% CALCIO	% HIERRO
Lechuga Arrepollada	1.41	0.2256	0.034	0.043	0.0013
Repollo	2.48	0.3968	0.035	0.043	0.00087

Ref. (16), (22)

La lechuga y el repollo presentan una característica, que se observa en el Cuadro 26, la cuál es el alto porcentaje de nitrógeno con relación a los otros nutrientes. Este porcentaje va decreciendo a medida la planta va envejeciendo.

Para este trabajo, la edad de la planta con la cual se ha trabajado, cabría decir, que las hojas, han llegado a una alta madurez, debido a dos factores:

- Cortada de la mata, cuando llegó a su madurez
- Que llevada a su comercialización; sus materiales más maduros fueron desechados, los cuales se han tomado para efectuar el proceso de fermentación.

Por lo tanto, el contenido de nitrógeno ha bajado, a valores menores de los reportados teóricamente.

También los contenidos de potasio y fósforo, son altos, lo que indica que son hortalizas ricas en estos nutrientes encontrándose también presentes en forma perceptible el calcio y el hierro.

Según los análisis químicos realizados a cada mezcla por triplicado de los desechos vegetales, se han encontrado los % P/P de nitrógeno en forma de nitrógeno total, % P, en forma de P_2O_5 y % K, en forma de K_2O .

CUADRO 27

MACRO ELEMENTOS Y MICRO ELEMENTOS EN DESECHOS VEGETALES
(MEZCLAS DE LECHUGA Y REPOLLO) UTILIZADOS EN LA FERMENTACION
ANAEROBICA PARA LA PRODUCCION DE BIOGAS

MEZCLA	% P/P				ppm	
	POTASIO	PROTEINA	NITROGENO	FOSFORO	CALCIO	HIERRO
A	0.049	1.6375	0.262	0.03	1.9235	0.87
B	0.051	1.4313	0.229	0.037	1.7356	0.77
C _f	0.043	1.519	0.243	0.031	1.702	0.69

En el Cuadro 27 se puede observar que la mezcla B, es la que reporta el menor porcentaje de nitrógeno y la que reporta un mayor porcentaje es la A.

Los macro y micronutrientes pueden ser en un momento dado, inhibidores o promotores para la producción de biogás; sin embargo, se puede observar según Cuadro 9, Ref. (1), (9) que ninguno de éstos es en el presente estudio un inhibidor del proceso de fermentación anaeróbico. También se puede deducir en forma generalizada, que se promueve el reciclaje y el porcentaje de nitrógeno con el cual se lleva a cabo el proceso de fermentación es de 0.6% y si se deseara trabajar con esta mezcla vegetal por sí solo sin mayor interferencia de otros sus

trato, el porcentaje de nitrógeno de cada una de estas mezclas A, B y C, es tan bajo, que cabría decir, que no se podrá realizar una producción y generación de biogás, debido a que los valores de porcentaje de nitrógeno se encuentran en el rango de 0.229 - 0.262, (Ver Cuadro 27), el cual es inferior al valor definido (9). Este valor de nutrientes ha sido obtenido bastante cercano uno con relación a otro, debido a que las proporciones en las cuales han sido involucradas ambas hortalizas se mantienen constantes y fijas, en cada una de las mezclas, la cual es en volumen 1:1, por lo que en peso también se mantiene esta relación fija, aunque no igual a uno. Esto también conlleva a manifestar que a pesar de que el contenido de porcentaje de nitrógeno es alto, la relación C/N es baja, por lo que también, se puede decir que es menor a la relación C/N recomendada (la cual es 20-30:1) para una producción de biogás satisfactoria.

b) Análisis de sustratos de Origen Humano los cuales conforman una mezcla de heces y orina, que en el proceso de Fermentación Anaeróbica, se hace presente (en proporciones definidas, ver Cuadro 20) en la mezcla A, B y C.

1. -Análisis Físicos de Sustratos de Origen Humano como Mezcla de Heces y Orina:

Las heces y la orina son desechos que se encuentran en nues

tró medio como material contaminante; por tal motivo se ha realizado el presente estudio; y así poder minimizar ese problema dándole un tratamiento a los desechos por medio de una digestión metanogénica (anaeróbica) para destruir el material orgánico contaminante y aprovechar el sustrato agotado como abono orgánico.

El Cuadro 29 fue construido en base al Cuadro 28 en el cual se dan a conocer los análisis físicos químicos de heces y orina individuales y como mezcla, los cuales reportan datos teóricos de humedad, sólidos volátiles y cenizas como una composición en peso.

CUADRO 28

ANALISIS FISICO QUIMICOS DE ORINA, HECES Y DE AMBOS, DE UNA PERSONA
DE 150 LIBRAS EN PESO

	PORCION	CANTIDAD	%S.T	ST/DIA	%S.V	SV/DIA
HUMANO (150 lb)	ORINA	1 litro	6	0.13	75	0.10
		2.2 lb				
	HECES	0.5 lb	27	0.14	92	0.13
	MEZCLA	2.6 lb	11	0.3	84	0.25

Ref. (18)

CUADRO 29

RESULTADOS DE ANALISIS FISICOS PARA LOS SUSTRATOS DE HECES, ORINA
Y MEZCLA DE AMBOS

DETERMINACION	CONTENIDO		
	HECES	ORINA	MEZCLA
HUMEDAD (% P/P)	73	94	89
S.T (% P/P)	27	6	11
S.V (% P/P)	92	75	84
CENIZAS (% P/P)	8	25	16

Ref. (1)

Se observa en el Cuadro 29 las composiciones en peso teóricas y se comparan con las mezclas A, B y C (en relación a la mezcla Heces y Orina) del Cuadro 30, la que más se acerca a los datos teóricos es la mezcla C_f porque los sólidos totales teóricos de aceptabilidad se encuentran en un rango de cinco a diez por ciento, para que se dé una metanogénesis aceptable (1). La solución viable para obtener rango adecuado es bajar o subir la concentración de los sólidos totales en relación proporcional a la de las heces, de tal manera que se pueda llegar al rango deseado para que se lleve a cabo la producción adecuada de biogás.

La humedad de las mezclas afluentes A, B y C_f en los sustratos de mezcla de heces y orina se observa en el Cuadro 30. La humedad entre las mezclas A y B son más o menos similares de igual manera los sólidos totales; en la mezcla C_f se observa una marcada diferencia debido a que ésta posee una mayor cantidad de heces y orina.

La relación volumétrica entre heces y orina se mantuvo constante en las tres mezclas A, B y C_f de 18:1, variando solamente el porcentaje en el contenido de carga total, debido a las variaciones también de los desechos vegetales (Ver Cuadro 20).

Los resultados obtenidos en los S.V. y Cenizas entre los digestores A y B, se observa que se mantuvieron más o menos constantes (Ver Cuadro 30), a pesar de que se han obtenido en base a los S.T. experimentales calculados. Para la mezcla C_f por consiguiente se observa que existe diferencia entre A y B y siempre se mantienen mayores los resultados de ésta, con relación a las otras; por poseer una mayor cantidad de heces y orina siendo directamente proporcional a la cantidad de sólidos volátiles orgánicos contenidos en la mezcla C_f .

CUADRO 30

RESULTADOS DE ANALISIS FISICO QUIMICOS, DE MEZCLAS DE HECES Y ORINA
DE ORIGEN HUMANO EN LAS MEZCLAS A, B Y C_f

DETERMINACION	C O N T E N I D O		
	MEZCEA "A" AFLUENTE	MEZCLA "B" AFLUENTE	MEZCLA "C _f " AFLUENTE
HUMEDAD (% P/P)	79.5998	79.1155	81.0479
S.T (% P/P)	20.4602	20.8846	18.9521
S.V (% P/P)	83.0435	83.7019	86.7987
CENIZAS (% P/P)	16.9565	16.2982	13.2013

Ref. (18)

2 -Análisis de Macroelementos de Desechos Humanos

Los macroelementos y microelementos son los nutrientes que se encuentran presentes en el sustrato humano.

Las heces y orina humana, son dos materiales ricos en nutrientes (N, P, K), así también las mezclas propuestas de ellos, como lo demuestra el Cuadro 31.

CUADRO 31

COMPOSICION PORCENTUAL DE MACRONUTRIENTES DE DESECHOS HUMANOS

SUSTRATOS	% P/P				C/N
	PROTEINA	NITROGENO	FOSFORO	POTASIO	
HECES	37.5	6	4.2	1.8	8.0
ORINA	106.25	17	3.7	3.7	0.8
AMBOS	34.38-40.63	5.5-6.5	4.08	2.25	6-10

Ref. (1), (18)

El Cuadro 31 muestra que los desechos humanos, reportan un alto contenido de proteína, por lo tanto son sustratos que presentan relación C/N abajo de la recomendada para obtener una producción de biogás adecuada, la cual es 20-30:1 siendo la óptima 25:1; sin embargo, presentan también un alto contenido de nutrientes en forma de fósforo y potasio.

Estos sustratos debido a que el contenido de nitrógeno es muy alto, no generan producción de biogás, sino que deben ser mezclados con otro material rico en carbono, para que suba la relación C/N y llegue a la deseada como óptima.

En el presente trabajo, se realizaron tres mezclas, en las cuales se incorporaron heces y orina, en una misma proporción volumétrica (18/1), la cual genera por ende una relación gravimé

trica constante, por lo que el porcentaje de nutrientes debe ser aproximadamente similar; sin embargo, debido a que el contenido volumétrico, ya en cada mezcla cambia, se dan ciertas variaciones, como se demuestra en el Cuadro 32.

CUADRO 32

RESULTADOS DE MACROELEMENTOS DEL COMPONENTE DE ORIGEN HUMANO
(HECES Y ORINA) DE LAS MEZCLAS A, B Y C_f (% P/P)

MEZCLA.	% PROTEINA	% NITROGENO	% FOSFORO	% POTASIO
A	38.00	6.08	4.67	1.875
B	40.13	6.42	4.04	1.89
C _f	40.63	6.5	4.03	1.88

El mayor porcentaje de nitrógeno es el proporcionado por la mezcla C_f, de la mezcla de heces y orina humana; esto es debido a que es la mezcla que presenta un porcentaje mayor de heces humanas, así como de orina humana; sin embargo, las mezclas A y B, presentan aproximadamente una misma tendencia en cuanto a contenido de especies ricas en nitrógeno, así lo demuestran los % P/P, de heces y orina, presentes en las mezclas A y B, en el Cuadro 32, observándose que son poco menores a la mezcla C_f.

En el Cuadro 20, el contenido en % V/V, de desechos vegetales

en la mezcla Co, es superior, por lo que cabría decir, que el material rico en carbono es superior, lo que influye en mejorar la relación C/N, sin embargo, se debe efectuar una evaluación y proposición de un nuevo diseño experimental porque con el actual no fue posible obtener resultados satisfactorios, debido a que se estallaron con dicha carga o mezcla Co.

Con referencia al % fósforo de la mezcla de heces y orina, el valor teórico, dado del Cuadro 31 es de 4.08; y comparado con las mezclas A, B y C, es un valor similar el de las mezclas B y C, que son un poco más bajos, que la mezcla A; sin embargo, es la mezcla C_f la más baja, pudiéndose denotar que nuevamente este contenido de fósforo es el más bajo de las tres mezclas. Por lo que se puede deducir una correlación a mayor % V/V heces humana, menor % fósforo, en la mezcla de heces más orina humana.

Con referencia al % K, el contenido de este nutriente, no cambia prácticamente en ninguna de las mezclas, fluctuando dicho valor en 1.88 ± 0.015 concluyéndose que el valor no cambia en cada mezcla A, B y C_f de heces y orina, debido a que las relaciones volumétrica y gravimétrica se mantienen constantes en cada una de las mezclas.

c. ANALISIS DE MEZCLAS A, B Y C, AFLUENTES (CARGA)

- 1) Análisis Físicos Comparativos entre las Mezclas A, B y C_f de Afluente.

Las mezclas preparadas antes de la fermentación metanogénica, se realizaron con la finalidad de poder comprobar que una de ellas (para el caso la "B" recomendada por ICAITI) diera buenos resultados y, para poder efectuar una comparación se propusieron dos mezclas más, con variaciones no muy significativas entre A y B y una diferencia bastante considerable entre A y C_f y B y C_f con respecto a los sustratos de origen humano, de igual manera hubo una disminución de desechos vegetales para la mezcla C_f como puede observarse en el Cuadro 33.

Analizando el Cuadro 33 para mezclar afluentes de A, B y C_f se observa que la humedad entre A y B es mayor para la mezcla B, posiblemente por poseer una mayor cantidad de desechos vegetales o sea que el contenido hídrico es elevado debido a los desechos vegetales; para la mezcla C_f se observa una diferencia bien marcada debido a que tiene una mayor cantidad de materia orgánica humana a pesar de que su contenido hídrico vegetal es bajo.

Ahora con relación a los S.V. de las mezclas de afluentes, la

que reporta un mayor porcentaje es la mezcla B, debido a que la materia orgánica vegetal es elevada y según la teoría los sustratos orgánicos vegetales poseen un alto grado de sólidos volátiles dispuestos a convertirse por medio de una fermentación anaeróbica; en segundo lugar se encuentra la mezcla A y en tercer lugar la mezcla C_F y es secuencial porque su contenido vegetal desciende en el mismo orden. (Ver Cuadro 20).

CUADRO 33

ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DE MEZCLAS TOTALES QUE ENTAN A DIGESTORES A, B Y C_F RESPECTIVAMENTE

DETERMINACION	CONTENIDO		
	MEZCLA A	MEZCLA B	MEZCLA C _F
HUMEDAD (% P/P)	81.7356	87.2645	92.3071
S.T (% P/P)	18.2644	12.7355	7.6929
S.V (% P/P)	63.5288	85.3629	38.0253
CENIZAS (% P/P)	36.4713	14.6371	61.9747

2 -Análisis de Macro y Microelementos de Mezclas A, B y C de Afluentes (Carga).

Los macro y micronutrientes de las mezclas propuestas para

análisis, no tienen datos teóricos que puedan servir de comparación, con los datos obtenidos en la etapa experimental, por lo que se deduce que son unas mezclas complejas en las que predomina siempre el contenido de nitrógeno.

Debido a que se ha efectuado una mezcla de desechos humanos (que son fuente nitrogenada) con desechos vegetales (que son fuente de carbono), se puede deducir que habrá producción de biogás; sin embargo, el contenido de los nutrientes de las mezclas; así como las proporciones en las cuales estén combinados los dos tipos de desechos anteriores, es el que determinará en base a la experimentación, si será o no un biogás combustible o no, lo que significa también si dicha mezcla cumple con los requerimientos nutricionales que exige la bacteria metanogénica. De los requerimientos nutricionales, la bacteria exige una relación $C/N = (20-30)/1$; esto significa que puede contener el material o sustrato (utilizado por ella) de veinte a treinta unidades de peso de carbono por una unidad de peso de nitrógeno, para que pueda crecer y reproducirse dicha bacteria.

La bacteria metanogénica, se ve influenciada por otros factores además de los nutrientes del sustrato utilizados por ella, para su alimentación. Estos factores son:



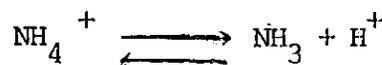
pH, T, concentración de los sólidos totales en la mezcla total, así como de una adecuada agitación, etc.

CUADRO 34

MACROELEMENTOS Y MICROELEMENTOS DE MEZCLAS TOTALES A, B Y C_F, QUE ENTRAN A LOS DIGESTORES PARA EFECTUAR EL PROCESO DE FERMENTACION ANAEROBICA

% P/P			MEZCLA	ppm			
% N	% P	% K		Ca	Mg	Fe	Mn
2.7	1.62	0.293	A	1.57	0.63	0.05	2.05
2.43	1.53	0.666	B	1.42	0.58	0.04	1.35
2.9	1.859	0.843	C _F	1.60	0.98	0.06	2.52

Al realizar un análisis en forma horizontal del Cuadro 34, se puede deducir que los porcentajes de nitrógeno, son los más elevados en cada mezcla, le siguen los porcentajes de fósforo y por último se encuentran los porcentajes de potasio. El contenido alto de nitrógeno, es debido a que el pH del sustrato o mezcla se desarrolla regularmente ácido entre 6.5-6.8, en todas las mezclas, por lo que se puede deducir que la reacción de comportamiento del nitrógeno es la siguiente:



en la que la reacción tiende hacia el Ión amonio, y por lo tanto a un medio ácido, esto es ocasionado porque ha existido un DESEQUILIBRIO DEL SISTEMA, generado por la alta concentración de determinado sustrato que ocasiona una elevación de determinado nutriente, lo cual conlleva a una baja producción de biogás y por ende de Metano, o gas combustible. Lo que se reafirma con el comentario de Ref.9 (Pág. 87), del presente trabajo, que indica que con 0.6% de nitrógeno se desarrolla el proceso de fermentación anaeróbica en forma satisfactoria, concluyéndose que cada una de estas mezclas presentan valores superiores al indicado según la Ref.(9), y por lo tanto, el proceso de fermentación anaeróbica se verá afectado, en cada una de ellas.

Al efectuar un análisis de comparación del Cuadro 34, con el Cuadro 20, de % V/V, se observa lo siguiente:

A medida aumenta el porcentaje N en la mezcla aumenta el %V/V de los desechos humanos y disminuye el % V/V de los desechos vegetales, esto indica que el proceso se inhibe más a medida que aumenta el contenido de desechos humanos y por consiguiente disminuye los desechos vegetales.

Al realizar un análisis en forma vertical, se obtiene que la mezcla C_f , es la que reporta los más altos nutrientes, conti-

nuando con la A y siguiendo la B, por lo que la mezcla C_f , es la mezcla que producirá mayor inhibición y por ende la que producirá menor cantidad de Metano.

Con referencia a los otros nutrientes, se observa que la tendencia también se manifiesta igual que con el nitrógeno.

-Análisis del Proceso de Fermentación Anaeróbica

En este análisis, se involucran todas aquellas variables de control del proceso a saber: pH, temperatura y tiempo de retención.

a) Análisis de pH

El potencial del hidrógeno es uno de los parámetros importantes en los procesos biológicos y bacteriológicos, el cual mide la alcalinidad o acidez de una sustancia. El pH en los procesos vivientes es muy susceptible, por lo que su medición periódica es recomendada en una digestión metanogénica; el rango permisible para una digestión anaeróbica es de 6.6 a 8.6 siendo el óptimo de 6.5 a 7.5 (1), (9), (18). Las lecturas de pH se obtuvieron mediante papel indicador en forma directa, tanto en el inicio (montaje), proceso y etapa final.

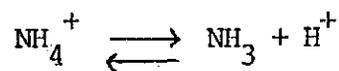
Para los digestores A en el proceso se mantuvo un poten-

cial de hidrógeno aceptable dentro del rango permisible de 6.6 a 8.6.

El rango de pH en el experimento se reporta de 6.5 a 6.9, el cual se mantuvo constante en toda la experiencia.

En el Cuadro del Apéndice H, se observa que la mezcla A, la cual se inicia con el pH de 6.8 con un decremento al noveno día de 6.7 para que luego, al séptimo día a partir de este último bajara a 6.5.

El pH se ve influenciado por diversas sustancias que pueden ser en un momento promotoras o inhibidoras del proceso de fermentación anaeróbico, como es el caso en esta experiencia en la que el nitrógeno ejerce una acción inhibidora. Así para el caso del análisis de pH de la mezcla A, en el cambio de éste el equilibrio se desplaza hacia el ión amonio (NH_4^+), debido a la disminución de alcalinidad y para el caso contrario, si se tuviera un pH incrementado (más alcalino) el equilibrio se desplazaría hacia el amoníaco disuelto (NH_3).



Similar comportamiento se obtuvo para las mezclas B y C_f

con la diferencia de que la fluctuación en la reacción de equilibrio fue más frecuente hacia la izquierda y en algunos casos hacia la derecha. El potencial de hidrógeno se encontró siempre en el rango permisible (Ver Apéndice H); sin embargo, el proceso de fermentación finalizó debido a que hubo producción de biogás a pesar de que se obtuvo una menor cantidad que la esperada.

b) Análisis de Temperatura

La temperatura es uno de los parámetros más importantes para la digestión metanogénica porque conserva una relación de proporción directa con la velocidad del crecimiento microbiano. Para el caso en particular en todas las mezclas A, B y C_F, se mantuvo constante la temperatura dentro de un rango mesofílico con una mayor tendencia a la temperatura ambiental debido a que los digestores se encontraban a la intemperie, el rango de trabajo fue de 24 a 30°C (Ver Apéndice H).

Se observa también en la Figura 14 de la página 70 que la temperatura del sistema está relacionada con los rendimientos y para este caso como las excretas humanas son las mayores productoras de biogás, en el rango mesofílico se tiene un rendimiento de 0.43 m³/Kg S.T. en temperaturas de 35°C y la ambiental de 8 a 25°C obteniéndose un rendi-

miento a esta temperatura de 0.25 a 0.30 m³/kg S.T. (1), (9), (18).

En este caso como se trabajó a temperatura ambiente, el rendimiento obtenido es menor al expresado en la Figura 14, probablemente se deba a muchos factores (posibles fugas de biogás, cambios climatológicos, etc.), que pudieron intervenir en la consecución de este efecto.

c) Análisis de tiempo de retención.

El tiempo de retención es el período mediante el cual una cantidad de materia prima permanece dentro de un digestor en condiciones anaeróbicas, desde el momento que entra hasta que sale agotado.

El tiempo requerido de retención fluctúa de acuerdo a la temperatura, se puede decir que para temperaturas elevadas los tiempos de retención son cortos, caso contrario de temperaturas bajas, los tiempos de retención son largos.

Para el caso el tiempo de retención en los digestores A fue variado debido a que los montajes no fueron simultáneos entre sí. Para el digestor 1A se contabilizó un tiempo de retención de treinta y ocho días, para el 2A, treinta y cuatro días y el 3A, treinta y un días. Analizando es-

tos datos en la Figura 15. Tiempo de retención vrs. temperatura de Digestión, se puede observar que las temperaturas de Digestión fueron bastante bajas, que oscilan entre 15 y 20°C, las cuales inicialmente (al ser colocado cada digestor), fueron medidas en 29°C, por lo que se observan fluctuaciones de ésta, las cuales fueron motivadas por encontrarse los digestores a la intemperie y no enterrados.

El tiempo de retención para los digestores B y C fueron diferentes comparados con los digestores A, aclarando que el montaje de estos últimos fueron en forma simultánea reportándose sesenta y dos días de tiempo de retención. Esta variación tan palpable entre la mezcla A con relación a las mezclas B y C, son debidas a la estación climática en que fueron colocadas, debido a que la primera fue colocada en la época de invierno, en cambio las segundas en la estación de verano, siendo la variación de temperatura más pronunciada en la época de invierno y no en el verano.

-Análisis de Biogás

Este grupo de análisis, conlleva el planteamiento de diversas variables que fueron evaluadas en el biogás para dar una mayor información de éste al respecto.

Estas variables son:

- a) Composición del biogás en mezclas B y C_f
- b) Densidad del biogás en mezclas B y C_f
- c) Volumen acumulado de biogás en mezclas A, B y C_f
- d) Descenso de sólidos volátiles en mezclas A, B y C_f
- e) Rendimiento (m³ biogás/día/kg S.V. gastados) de las mezclas A, B y C_f
- f) Balance de nitrógeno de mezclas B y C_f, obtenido después de realizado el proceso de digestión anaeróbico.

a) Análisis de Composición de Biogás en Mezclas B y C_f

La composición promedio del biogás combustible de diferentes sustratos obtenida en las zonas rurales de Shanghai, son las que se encuentran en el Cuadro 16.

El cuadro 16 presente, rangos de cada gas, esto es debido a que el biogás producido, dependerá de la composición de la mezcla o sustrato utilizado para realizar la experiencia de fermentación anaeróbica. (La composición de la mezcla o sustrato utilizado para realizar la experiencia de fermentación anaeróbica). La composición de las mezclas A, B y C_f en cuanto al % V/V, es bastante parecida una con otra, involucrando un mayor porcentaje de heces humanas y orina humana en la mezcla C_f y menor % V/V de material celulósico, como desechos vegetales. Esto se ve evidenciado en la composición del biogás producido en el proceso de

fermentación. En el cuadro 35, se muestran las mezclas B y C_f, las cuales fueron analizadas por medio del cromatógrafo de gases.

CUADRO 35

RESULTADOS OBTENIDOS EN EL CENTRO DE INVESTIGACIONES GEOTERMICAS (C.I.G.), DEL ANALISIS DE COMPONENTES GASEOSOS QUE CONFORMAN EL BIOGAS PRODUCIDO EN LA FERMENTACION ANAEROBICA CON LAS MEZCLAS B Y C_f (% mol).

COMPONENTE GASEOSO	B.	C _f
N ₂	53.66	65.05
O ₂	0.88	1.66
CH ₄	7.61	4.71
SH ₂	0.39	0.75
CO ₂	37.46	27.83

Ref. (C.I.G.)

En el Cuadro 35 se observa que la composición de biogás es diferente para cada mezcla, esto es evidente debido a la variación en la proporción de los sustratos utilizados que forman las mezclas A, B y C_f. También se identifica que en cada mezcla gaseosa del Cuadro 35, el porcentaje de nitrógeno gaseoso es alto, pudiéndose observar que el porcenta-

je de Metano gaseoso, también es por contraparte bajo; por lo que la mezcla gaseosa que reporta un mejor contenido de Metano es la mezcla B, continuando la mezcla C_f .

A la mezcla A, no se le realizó análisis de gases, por problemas técnicos.

Realizando un análisis comparativo de las muestras gaseosas de las mezclas B y C_f , se observa que:

A medida que el porcentaje de Metano es menor, la cantidad de nitrógeno gaseoso es mayor, esto se debe a que el proceso ha tenido un sustrato que ha sido colocado en exceso y por lo cual se ha DESEQUILIBRADO EL SISTEMA. Sin embargo en referencia con el rendimiento m^3 biogás/día/kg S.V. gastados, (Ver Cuadro 40) esto se contradice, porque se ha logrado obtener un mejor rendimiento de la mezcla más baja en Metano; es decir de la C_f , por lo que cabría realizar una mayor investigación de esta mezcla para observar su tendencia, la cual permita confirmar lo anteriormente expuesto.

También se observa otra relación de comparación entre la mezcla B y C_f , que el contenido de sulfuro de hidrógeno ha aumentado a medida que el contenido de Metano ha disminu-

do, pudiéndose justificar dicho incremento a la presencia de mayor material humano, que reacciona rápidamente, creando la presencia del nitrógeno gaseoso y que continúa su reacción de degradación conjunta con el desarrollo vegetal, para motivar una mayor presencia de sulfuro de hidrógeno generado éste por el incremento de humedad en la mezcla C_f .

La mezcla que responde a un mayor contenido de Metano, es la mezcla B, la cual tiene una menor presencia de desechos humanos y un mayor contenido de desechos vegetales, comparado con las mezclas A y C_f .

Si se hubiera muestreado la mezcla A, y hubiese seguido la tendencia de las dos mezclas (B y C_f) anteriores, se tendría una muestra gaseosa, en la que el porcentaje de Metano, se encuentre entre los valores de 4.7 - 7.6, ya que es una mezcla intermedia (con referencia a la composición de sustratos) entre B y C_f .

b) Análisis de Densidad del Biogás en Mezclas B y C_f .

La densidad del biogás, depende de la composición o porcentajes en que se encuentren los gases que conforman el biogás, los cuales son una función de la concentración de sustratos que componen la mezcla que participa en el proceso

de fermentación anaeróbica.

La densidad promedio del biogás, de una serie de sustratos en los cuales el Metano se encuentra presente con un alto porcentaje, se puede considerar (asumiendo sólo presencia de Metano), así: Tomada del Cuadro 18, propiedades físicas y químicas del Metano; se obtiene que la densidad del metano es: 0.000706 g/cm^3 a 16°C y 1 atm de presión, lo que viene a significar que: es un gas cuya densidad es mucho menor que la del aire, así como del agua, ya que la densidad del aire a 29°C y 1 Atm de presión es: 0.00116 g/cm^3 ; por lo que el metano tiende a volatilizarse con facilidad, y logra vencer inmediatamente la presión ejercida por el aire, cuando se pone en contacto con él. Lo mismo sucede en las zonas de los bosques salados donde hay pantanos, de los cuales emerge rápidamente o espontáneamente de ellos.

CUADRO 36

DENSIDAD DEL BIOGAS PRESENTE EN LAS MEZCLAS B Y C_F,
 PRODUCIDO POR FERMENTACION ANAEROBICA A 25°C y
 1 Atm de presión

NUMERO CORRIDAS	MEZCLA	DENSIDAD DE BIOGAS (g /ml)
2	B	0.00139
1	C _F	0.00129

Para obtener el Cuadro 36, se ha tenido que utilizar el volumen de biogás producido de cada mezcla, que ha participado en la fermentación anaeróbica. Cada mezcla ha sido repetida, con el interés de brindar resultados más confiables y precisos, por lo que: la mezcla A, se repitió tres veces, la mezcla B, dos veces y la mezcla C_F, una sola vez.

También se utilizaron los datos de análisis de gases del cromatógrafo de gases de las mezclas, las cuales se realizaron así:

Cero veces la mezcla A, dos veces la mezcla B y una vez la mezcla C_F, con las cuales se pudo calcular el peso molecular promedio de la mezcla de biogás, como se muestra en el Apéndice

ce B.

CUADRO 37

PESO MOLECULAR PROMEDIO DE BIOGAS

PESO MOLECULAR PROMEDIO TEORICO BIOGAS	MEZCLA	PESO MOLECULAR PROMEDIO (g /g mol)
23.692	B	32.6952
	C	32.0000

La densidad de la mezcla de biogás, es mayor que la del aire, pero también bastante parecida a la de él, pareciera que la densidad del biogás obtenida experimentalmente fuera la del aire, a las condiciones ambientales mencionadas anteriormente. La densidad del Metano es bastante baja, en comparación con la de la mezcla de biogás, esto es de esperarse, debido a que el metano es un componente del biogás.

Con referencia a la densidad de mezcla de biogás, se puede observar, que ésta, no cambia mucho para las mezclas B y C_F, aunque las composiciones de los sustratos que componen la mezcla sean diferentes, por lo que en relación a ella (Densidad del Biogás), obtenida experimentalmente, no se puede decir que se observe una gran variación de cada una de las mezclas

B y C_f , por lo que para los rangos trabajados los procesos de fermentación, la densidad no se evalúa como una variable.

c) Volumen Acumulado de Biogás en Mezclas A, B y C_f .

El volumen acumulado de biogás en un biodigestor se divide en tres partes:

- Volumen del gasómetro
- Volumen de Tubería
- Volumen de Espacio vacío del Digestor

Volumen de Gasómetro

El gasómetro es un componente del diseño experimental a escala de laboratorio que está conectado directamente con el digestor y consiste en un medidor que reporta datos en ml diarios de biogás desalojados por medio de la presión del gas ejercida en el proceso (Fig.19, Pág.135), observando en el Cuadro 38 el volumen de agua acumulada, en el recolector de agua por el biogás producido (gasómetro), la mezcla que produjo mejores resultados fue la mezcla A, obteniéndose aproximadamente tres litros de biogás; le sigue la mezcla B con una producción total entre los duplicados de 0.8 litros de biogás ubicándose en último lugar la mezcla C_f que a pesar de que fue una sola corrida se obtuvo un promedio de 0.775 litros de biogás.

Observando las Figuras 1 y 2, Apéndice H, donde se grafican los días de fermentación vrs. producción diaria de biogás, se observa que las mejores productoras de biogás son las mezclas A, reportándose una producción promedio aproximada de 3.08 litros por día de biogás (Gasómetro), 0.75 L/día de biogás para la mezcla B (Gasómetro) y 0.8 L/día de biogás para la mezcla C_f (Gasómetro) obteniéndose estos datos en forma global en el Cuadro 38.

CUADRO 38

VOLUMENES (ml) DE BIOGAS, DE LAS MEZCLAS A, B Y C_f, DEPOSITADOS EN EL RECOLECTOR DE AGUA (GASOMETRO), ASI COMO EL TOTAL DE BIOGAS PRODUCIDO POR LAS MEZCLAS A, B y C_f (ml) EN EL ESPACIO LIBRE DEL DIGESTOR, TUBERIA DEL SISTEMA Y EN EL RECOLECTOR DE AGUA (GASOMETRO) (ml).

DIGESTORES	VOLUMEN DE BIOGAS EN EL RECOLECTOR DE AGUA	V TOTAL
A	3075.0 ml	3936.62 ml
B	775.0 ml	1679.69 ml
C	800.0 ml	1741.53 ml

Donde: Vr = Volumen de líquido depositado en el recolector de agua

Vt = Volumen de biogás en la tubería del sistema

Ve. l. Volumen de biogás en el Espacio Libre del
Digestor.

Vtotal = Volumen acumulado de biogás en las mezclas -
A, B y C_f

$$V_{total} = V_{e. l} + V_t + V_r \quad (1)$$

Volumen de Tubería del Sistema y Espacio Libre

En este caso como la tubería utilizada se asemeja a la forma geométrica de un cilindro donde la variable altura es la longitud de la tubería. Se evalúa el volumen del biogás encerrado en la tubería por medio de la fórmula de un cilindro considerando el diámetro interno de la misma. Esta evaluación se lleva a cabo en cada promedio de mezclas A, B y C_f, tanto al inicio (entrada), como al final (salida) del proceso de fermentación anaeróbica.

De igual forma se evaluó el volumen de biogás acumulado en el espacio libre del digestor, tomando el dato de la altura del espacio libre y midiendo el diámetro interno de cada digestor A, B y C_f, (Ver ejemplos de cálculo en el Apéndice A), al finalizar el proceso de fermentación anaeróbica.

Luego estos volúmenes acumulados de gas se sumaron algebraicamente con el volumen de gasómetro reportándose éstos en el cuadro 38, como volumen total de biogás, observándose una -

producción máxima con las mezclas A, continuando la mezcla C_f y por último la mezcla B.

d) Análisis de sólidos volátiles, transformados en las mezclas A, B, y C_f , realizado el proceso de fermentación anaeróbica.

Los sólidos volátiles en masa (kg) obtenidos en cada una de las corridas A, B y C_f darán una herramienta más de peso de cual mezcla reporta una mayor cantidad de sólidos volátiles contaminantes destruidos en el proceso de digestión metanogénica. Se puede observar en el Cuadro 39 que entre las mezclas A, B y C_f , la mejor diferencia de S.V. en kg, la obtiene la mezcla A y es lógico porque fue la que contabilizó una mayor cantidad en volumen de biogás producido, por lo tanto hubo una mayor cantidad de materia orgánica contaminante destruida y en segundo y tercer plano se encuentran las mezclas B y C_f respectivamente.

CUADRO 39

SOLIDOS VOLATILES TRANSFORMADOS EN EL PROCESO DE FERMENTACION ANAEROBICA DE LAS MEZCLAS A, B Y C_f

MEZCLAS	DIFERENCIA S.V. (kg)
A	0.2327
B	0.2068
C_f	0.0454

e) Análisis del Rendimiento (m^3 /día/kg S.V.) de las mezclas A, B y C_F:

Los rendimientos de un gas están íntimamente relacionados con la materia prima utilizada, en general las materias primas ricas en carbono dan una mejor producción de gas, comparadas con las ricas en nitrógeno, es decir los residuos vegetales de origen agrícola que es más elevado que el de los excrementos según Cuadros 3,4). Para el caso particular la tasa de generación de biogás en m^3 /día/kg S.V. destruidos entre las mezclas A, B y C_F, el mejor rendimiento lo reporta la mezcla C_F por poseer una buena cantidad de heces en el material de carga (Ver Cuadro 40), quedando en segundo y tercer plano las mezclas A y B respectivamente.

Comparando el Cuadro 5 de velocidad de generación de biogás (a partir de materiales de uso común), con los datos obtenidos realmente existe un distanciamiento bien marcado; primero, el sustrato o material de uso común tabulado en el Cuadro 5, sólo es excreta humana, con una tasa de generación global de $0.478 m^3$ /kg S.T., probablemente uno de los motivos de esta diferencia, es que los sustratos de origen humano se trabajaron como mezcla de heces + orina y desechos vegetales, donde la orina, la lechuga y el repollo, inclu-

so la cantidad de agua utilizada (que fue constante esta última en las tres experiencias), actúan como inhibidores bloqueando de esta forma la generación óptima o cercana a la teórica, dando evidencia de que el uso de estos sustratos debe realizarse por separado, para tener datos reales que sirvan como variables comparativas antes de diseñar un digestor que trabaje con mezclas de esta naturaleza tan variada.

CUADRO 40

RENDIMIENTOS EN BASE A LOS m^3 /día OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE
CON RESPECTO A LOS Kg DE SÓLIDOS VOLÁTILES PARA LAS MEZCLAS
A, B Y C_f

MEZCLA	m^3 Biogás/Día	Kg S.V.	RENDIMIENTO m^3 /día/kg S.V.
A	1.28×10^{-4}	0.2327	5.5×10^{-4}
B	2.70×10^{-5}	0.2068	1.3×10^{-4}
C_f	2.80×10^{-5}	0.0454	6.2×10^{-4}

f) Análisis de Balance de Nitrógeno de Mezclas B y C_f Obtenido después de Realizado el Proceso de Fermentación Anaeróbica.

El nitrógeno presente en condiciones adecuadas, en una mez

cla que será expuesta a un proceso de degradación anaeróbica, sirve como promotor de éste, puesto que es uno de los nutrientes (así como el fósforo y potasio), que utiliza la bacteria metanogénica para reproducirse; sin embargo, los requerimientos de este nutriente son (como los menciona la referencia (9)), de 0.6% nitrógeno, para que se desarrolle satisfactoriamente la bacteria; pero cuando excede este valor se vuelve un inhibidor del proceso de fermentación, produciéndose (según el pH del sistema) la especie química (NH_4^+), cuando el pH se vuelve abajo de 6.5, con propiedades físicas y químicas diferentes a las que tiene el (NH_3) disuelto cuando el pH se vuelve alcalino (arriba de 8).

CUADRO 41

BALANCE DE NITROGENO TOTAL PARA LAS MEZCLAS B Y C_f

MEZCLA	ENTRADA (g)		SALIDA (g)	
	W _{go}	W _{Lo}	W _{gf}	W _{Lf}
B	1.058	69.018	2.4212	53.520
C _f	1.1529	82,595	0.873	61.698

En el Cuadro 41, se observa que W_{go} (peso de nitrógeno elemental en la fase gaseosa de entrada), con relación al W_{gf} (peso de nitrógeno elemental en la fase gaseosa de sa-

lida) es más bajo, tanto en la mezcla B como en la C_f , ya que a la salida se duplica prácticamente el nitrógeno elemental. Esto es significativo, debido a que en el cromatógrafo también se observa un gran porcentaje de nitrógeno gaseoso, presente en la mezcla de biogás, lo que viene a confirmar la alta presencia de este elemento como un inhibidor del proceso de fermentación. Con relación a la fase líquida también se observa que existe una gran cantidad de nitrógeno elemental en la mezcla líquida, tanto en el afluente (entrada) como en el efluente (salida). Observándose el descenso también en relación de la entrada con la salida, por lo que se puede expresar, que el nitrógeno disminuye o se transforma en el proceso de fermentación anaeróbica y se difunde a la fase gaseosa.

Con referencia a la mezcla B y C_f , se observa un mayor contenido de nitrógeno en la mezcla C_f , observándose que descendiendo también el contenido de éste, cuando se da el proceso de fermentación anaeróbica.

También se puede observar que el descenso en el contenido de nitrógeno elemental con relación a la entrada y salida de la fase líquida es mayor en C_f , esto se observa en los S.V. gastados, los cuales también fueron los más bajos los de C_f , lo que descendería en nitrógeno sería un valor me-

nor, que se refleja en forma de un valor más alto, en el descenso de nitrógeno (ΔW), (Cuadro 42) lo cual concuerda con la cantidad de nitrógeno colocado en la mezcla por parte de las heces humanas.

CUADRO 42

DESCENSO DE NITROGENO EN LA FASE LIQUIDA DE LAS MEZCLAS

B Y C_F

MEZCLA	W _{LO} (g)	W _{LF} (g)	ΔW (g)
B	69.018	53.520	15.498
C _F	82.595	61.698	20.897

-Análisis de Efluente o Bioabono

Se realizará una evaluación de las siguientes variables del bioabono:

- a) Análisis Físicos del bioabono de Mezclas A, B y C_F
- b) Análisis de Macro y Microelementos del bioabono de las Mezclas A, B y C_F
- c) Análisis del Contenido de Ascaris lumbricoides para las Mezclas A, B y C_F.
- d) Análisis comparativo entre la utilización de un Fertilizante químico y el bioabono, en un cultivo.

a) Análisis Físicos del Bioabono de Mezclas A, B y C_F

El bioabono se ha considerado como un subproducto de la digestión metanogénica, el cual debe poseer cualidades específicas de cantidad y calidad de nutrientes, lo que le da la característica de fertilizante del suelo.

Se puede observar que en las mezclas A, B y C_F de los Cuadros 43,44 y 45, el contenido hídrico ha sido incrementado con respecto al de los afluentes, verificándose una condensación mediante la conversión de materia orgánica a biogás y se detecta un contenido de humedad mayor en la mezcla A, convertido en el proceso y pasa a formar parte del sustrato y la otra porción busca una salida debido a la presión del sistema para el caso la presión atmosférica. Luego le siguen los digestores B y C_F, siempre haciendo énfasis al contenido hídrico originado durante la digestión metanogénica.

En los sólidos volátiles de las mezclas A, B y C_F se puede ver que existe una diferencia entre ellos observándose un grado de conversión más elevado en las mezclas B, le sigue las A y luego la C_F, por tener un mayor porcentaje de S.V. destruido.

CUADRO 43

DATOS COMPARATIVOS DE ANALISIS FISICOS DE LA MEZCLA "A",
COMO PROMEDIO DE PROMEDIOS DE AFLUENTES Y EFLUENTES.

MEZCLA A		
DETERMINACION.	CONTENIDO	
	AFLUENTE	EFLUENTE
HUMEDAD (%P/P)	81.7356	93.2250
S.T (%P/P)	18.2644	6.7750
S.V. (%P/P)	63.5288	62.7380
CENIZAS (%P/P)	36.4713	37.2620

CUADRO 44

DATOS COMPARATIVOS DE ANALISIS FISICOS DE LA MEZCLA "B",
COMO PROMEDIO DE PROMEDIOS DE AFLUENTES Y EFLUENTES.

MEZCLA B		
DETERMINACION	CONTENIDO	
	AFLUENTE	EFLUENTE
HUMEDAD (%P/P)	87.2645	94.2321
S.T (%P/P)	12.7355	5.7679
S.V (%P/P)	85.3629	79.2596
CENIZAS (%P/P)	14.6371	20.7404

CUADRO 45.
 DATOS COMPARATIVOS DE ANALISIS FISICOS DE LA MEZCLA "C",
 COMO PROMEDIO DE AFLUENTES Y EFLUENTES

M E Z C L A C		
DETERMINACION	CONTENIDO	
	AFLUENTE	EFLUENTE
HUMEDAD (% P/P)	92.3071	95.2545
S.T (% P/P)	7.6929	4.7455
S.V (% P/P)	38.0253	35.3673
CENIZAS (% P/P)	61.9747	64.6327

b) Análisis de Macro y Microelementos de Bioabono de las Mezclas A, B y C_f.

Los nutrientes son aquellos compuestos químicos que poseen un sustrato o material en un instante determinado. En el caso de la mezcla efluente, la cual es aquella que ha concluido el proceso de fermentación anaeróbica, se encuentran también presentes estos nutrientes, los cuales han descendido por la degradación de la materia orgánica y han llegado a reportarse (estos nutrientes) como material que puede ser apto para incorporarlo al suelo, en forma de lodo, el cual servirá como abono orgánico. Existen abonos llamados también fertilizantes de dos tipos y clasificados

según su procedencia:

Los abonos o fertilizantes están compuestos por nutrientes (N, P, K), que se encuentran en proporciones variadas. Los abonos se clasifican en dos tipos: Abono Orgánico y Abono Sintético.

El abono orgánico difiere del abono sintético, en cuanto a su fuente de producción, es decir que el primero es llamado así, porque proviene de desechos de materiales orgánicos que se encuentran en la naturaleza; sin embargo, los segundos provienen de la mezcla de varios compuestos químicos, cuya preparación es llevada a cabo mediante un proceso, en el cual intervienen variables de control como Temperatura, pH y concentración. Tomando en cuenta esta diferencia tan marcada se puede decir, que el abono orgánico puede llegar a ser un sustituto total o parcial de un abono sintético, dependiendo esto de la cantidad de macro y micronutrientes que tenga presentes el primero, lo cual vendría a beneficiar financieramente en un momento determinado al agricultor.

Algunos fertilizantes sintéticos más comunes reportan porcentajes de macronutrientes (N, P, K), como los presentados en el Cuadro 46.

CUADRO 46

PORCENTAJES DE NITROGENO, FOSFORO Y POTASIO, PRESENTES
EN ALGUNOS FERTILIZANTES SINTETICOS (%P/P)

% N	% P	% K
15	15	15
16	20	0
12	24	12
10	5	20

Ref. (23)

Los cuales son aplicados, según sea el tipo de suelo, así como de cultivo.

A cada mezcla A, B y C_f, respectivamente se les ha realizado un análisis físico químico, para obtener macro y micronutrientes, cuando ha concluido la fermentación anaeróbica, cuyos resultados se presentan en el Cuadro 47.

CUADRO 47

PROMEDIO DE MACRO Y MICROELEMENTOS DE LAS MEZCLAS EFLUENTES
A, B Y C_f (BIOABONO)

MEZCLA	% N	% P	% K	ppm			
				Ca	Mg	Fe	Mn
A	2.25	0.46	0.493	0.86	0.35	0.03	1.47
B	2.4	0.5	0.62	1.03	0.47	0.04	1.20
C _f	2.73	1.793		1.4	0.72	0.06	2.03

En el Cuadro 47, se puede observar que en su generalidad todos los promedios de mezclas A, B y C_f, tienen un alto porcentaje de nitrógeno, al igual que %P y %K, y en relación con los microelementos, (a pesar de que se encuentran expresados en ppm), el porcentaje de cada uno de ellos es bastante bajo, por lo que se les puede considerar como promotores del proceso de fermentación anaeróbica. Al observar el Cuadro 9, donde se encuentran inhibidores comunes del proceso de digestión, Ref. (1), (9).

También se puede hacer referencia, a que cada una de las mezclas presenta un alto contenido de nitrógeno, como se observa en el Cuadro 47, encontrándose que la mezcla más baja es la mezcla A, y la más alta es la C_f, coincidiendo esto con los

S.V. gastados de cada mezcla, ya que la mezcla A, es la mezcla que ha presentado un mayor %S.V. gastados, continuando la B y por último la C_f.

La mezcla C_f es la más alta en nitrógeno, lo cual se manifiesta con el alto %V/V en el Cuadro 20, para las heces humanas.

La mezcla que responde a los %N, %P, %K más bajos es la A, la cual presenta a su vez la mayor producción de biogás de las tres mezclas; sin embargo, la mezcla que reporta el mayor porcentaje de %N, %P, %K, es la C_f, la cual sería a su vez la mezcla que pudiera ser mejor utilizada como abono orgánico, por su alto contenido de nitrógeno, fósforo y potasio. Por lo que el haber trabajado con los tres tipos de mezclas A, B y C_f, reúne más información, la cual se resume de la siguiente manera: La mezcla A, es la mezcla que presenta el más bajo contenido de nitrógeno, fósforo y potasio y a su vez es la mezcla que ha producido más biogás, también se pueden concluir (en base a un estimado del Cuadro 35, donde se encuentran las composiciones de biogás), que contiene un % CH₄, mayor que el de la mezcla C_f, la cual contiene un porcentaje de CH₄ de 4.71.

La mezcla C_f es la mezcla que presenta el más alto contenido de nitrógeno, fósforo y potasio, y a su vez es la mezcla que ha producido menos biogás, también se puede concluir en base

al Cuadro 35, donde se encuentran las composiciones de biogás que contiene un % CH_4 , menor que el de las mezclas A y B.

Sin embargo, de ambas mezclas pueden utilizarse sus lodos como abono orgánico, únicamente con la salvedad de que falta deducir el potencial contaminante de éstas, por medio de análisis microbiológicos completos, así también realizar una evaluación técnico-agrícola para observar las consecuencias de utilizar materiales agotados, que provengan de desechos humanos, y así poder emitir un mejor juicio, sustentado en una evaluación, tanto experimental como estadísticas.

c) Análisis del Contenido de Ascaris lumbricoides para las Mezclas A, B y C_f, tanto a la entrada como salida del proceso de fermentación anaeróbica.

Los microbios catalogados como: virus, bacterias, protozoarios y helmínticos, se encuentran presentes en toda materia orgánica, principalmente en los estiércoles animales y humanos. Estos microorganismos, se desarrollan según: temperatura, pH, concentración de sustrato, ausencia o presencia de aire; por lo que también existen variedades de microorganismos que pueden vivir en un estado de latencia en de-

terminadas condiciones y reproducirse descomunemente bajo otras condiciones.

Los microorganismos presentes en los estiércoles que se encuentran como desechos en acantilados, fosas públicas, ríos son altos contaminantes, porque a través de lagos y mares se diseminan y producen enfermedades que tenían años de haberse erradicado de un determinado país, ahora han vuelto, creando altas mortandades. Así se observa en el Cuadro 48 algunos organismos causantes de graves enfermedades.

CUADRO 48

ORGANISMOS CAUSANTES DE ALGUNAS ENFERMEDADES ORIGINADAS POR EL MANIPULO DE EXCRETAS HUMANAS

CATEGORIA	ENFERMEDADES	ORGANISMOS (CAUSANTES)
VIRUS	HEPATITIS INFECCIOSA GASTROENTERITIS ENFERMEDADES RESPIRATORIAS POLIOMIELITIS	ADENO VIRUS REOVIRUS ENTERO VIRUS (POLIO VIRUS)
BACTERIA	FIEBRE TIFOIDEA SALMONELLOSIS	SALMONELLA TYPHOSA SALMONELLA S PP. (EX. S. PRATYPHI, S. SCHOTIMUELLERY)
	DISENTERIA COLERA TUBERCULOS	SHIGELIA SPP. VIBRIO CHOLERAE MYCO BACTERIUM TUBERCULOSIS
PROTOZOARIOS	AMIBIASIS (Amiba disentérica) Ascariasis	Entamoeba Histolytica Ascaris lumbricoides
HELMINTHIC	Oxiuros Tenia	Oxyaris Vermicularis Trichurus Trichiura Tenia Saginate

CUADRO 49

ALGUNOS MICROORGANISMOS PRESENTES EN LAS EXCRETAS HUMANAS SOMETIDOS
AL PROCESO DE DIGESTION ANAEROBICO

ORGANISMOS	TEMPERATURA (°C)	TIEMPO DE RESI- DENCIA (días)	% MORTALIDAD
POLIOVIRUS	35	2	98.5
SALMONELLA SSP	22-37	6-20	82-96
SALMONELLA TY- PHOSA	22-37	6	99
MYCO BACTERIUM TUBERCULOSIS	30	NO HAY REPORTE	100
ASCARIS	29	15	90
PARASITE CYSTS	30	10	100*

*No incluye Ascaris Lumbricoides.

Ref. (18)

Los cuadros 48 y 49 indican la diversidad de microorganismos que se encuentran presentes en las excretas humanas, además en el Cuadro 49 se reportan los tiempos de residencia y mortalidad o destrucción, a que son sujetos los microorganismos, cuando son sometidos a un proceso de digestión anaeróbica.

Se tiene del Cuadro 49, que uno de los microorganismos más difíciles de erradicar de una mezcla de excretas humanas, por medio de la digestión anaeróbica, es el Ascaris lumbricoide, el cual puede sobrevivir hasta después de catorce días de la fermentación anaeróbica, a una temperatura de digestión de 35°C. También otros estudios reportan que en el rango termofílico de temperaturas; es decir superiores a 35°C, la destrucción de huevos de ascaris es completa. Sin embargo, en el rango mesofílico, se requieren tiempos adicionales de residencia así también de secado por cerca de seis meses para destruir completamente los huevos de Ascaris lumbricoides (18).

Del Cuadro 49, se observa que los Ascaris lumbricoides, presentes en las excretas humanas, (las cuales son digeridas anaeróbicamente, a una temperatura de 29°C, y con tiempo de residencia de quince días) la tasa de mortalidad o destrucción es del 90%.

En el presente trabajo, no se tienen sólo excretas humanas sino orina humana y desechos vegetales de los mercados, los cuales todos juntos forman las mezclas A, B y C_f, que difieren una con otra en la participación de cada uno de los sustratos antes mencionados. Estas mezclas presentan un alto contenido de nitrógeno, tanto a la entrada como a la sa

lida, disminuyendo éste en el proceso de fermentación; sin embargo, este nutriente no se puede considerar como el principal destructor de los microorganismos vivientes; pero sí influye en bastante medida en la destrucción de ellos; especialmente en las bacterias metanogénicas, ya que éstas necesitan para vivir y reproducirse 0.6% de nitrógeno, el cual es mayor, tanto a la entrada como a la salida en las mezclas A, B y C_f por lo que la generación de Metano es baja.

Los análisis de Ascaris lumbricoides realizados a las mezclas A, B y C_f, tanto a la entrada como a la salida se reportan en el Cuadro 50.

CUADRO 50

CONTENIDO DE ASCARIS LUMBRICOIDES DE HECEAS HUMANAS,
RECOLECTADAS EN ZONAS RURALES (COMUNIDAD SANTA EDUVIGES, EN
CARRETERA A TURICENTRO "LOS CHORROS")

MEZCLA	ENTRADA		SALIDA		DESCENSO
	CANTIDAD DE HUEVOS	%	CANTIDAD DE HUEVOS	%	%
A	5	100	1	20	80
B	4	100	1	25	75
C _f	4	100	2	50	50

El Cuadro 50, indica que la mezcla A, es la que reportó el mayor descenso en porcentaje de Ascaris lumbricoides, esto es razonable y guarda una relación directa con los sólidos volátiles gastados en el proceso de fermentación anaeróbica, debido a que fue la mezcla que se destruyó en mayor cantidad.

En relación con la mezcla B, se puede decir que también ha sufrido un alto descenso del porcentaje de Ascaris lumbricoides, el cual es de 75%, observándose que en las mezclas A y B, las cantidades de excretas humanas son bastante parecidas.

Con referencia a la mezcla C_F se puede observar que es la que experimenta el más bajo descenso, concluyéndose que a pesar de que tuvo más tiempo de residencia, las condiciones climatológicas fueron diferentes, las cuales pudieran influir negativamente en la mortandad de Ascaris lumbricoides.

El porcentaje de mortandad de un microorganismo cualquiera, se ve influenciado por diversos factores, los cuales ya han sido mencionados anteriormente, observándose que el factor predominante para esta investigación ha sido el descenso de los S.V. gastados, el cual es proporcional

al porcentaje de mortandad; es decir a mayor S.V. gastados mayor será el número de Ascaris lumbricoides muertos.

Un análisis microbiológico completo, ha faltado realizarse para poder tener más elementos de juicio y tomar una mejor decisión, de cuál mezcla es la más apta, para ser bioabono.

Unicamente se ha efectuado el análisis de uno de los microorganismos más difíciles de destruir, por fermentación anaeróbica, (Ascaris lumbricoides).

d) Análisis Comparativo entre la Utilización de un Fertilizante Químico y el Bioabono en el Cultivo del Maíz.

Ya anteriormente se mencionó que existe una diferencia muy marcada entre un fertilizante químico y un abono orgánico; sin embargo, las más relevantes son: La procedencia u origen, el grado contaminante que posean y el valor económico vrs. utilidad percibida por el agricultor.

1. La Procedencia

Esto significa que un fertilizante químico es obtenido (de la mezcla de varios productos químicos), como el producto principal de un proceso, en el cual intervienen muchas va

riables de control, entre ellas: pH, temperatura, concentración determinada del soluto; sin embargo, un abono orgánico es obtenido como un sub-producto de un proceso de fermentación, el cual se presenta como un lodo agotado, que tiene un potencial de nutrientes específicos, los cuales dependen del sustrato con el cual se parta para dar inicio al proceso metanogénico, así como también de las variables de control antes mencionadas.

2. El Grado Contaminante que Posean.

El grado contaminante, conlleva dos tipos de situaciones:

- a) Contaminantes químicos
- b) Contaminantes microbiológicos

a) Contaminantes Químicos

Es en referencia a la interferencia de sustancias tóxicas que puedan dañar, tanto al suelo como a un cultivo en particular.

Un fertilizante químico, nunca posee un grado de pureza de un cien por ciento, sin embargo, el grado de pureza puede tener un rango de tolerancia de un 90-95%; por lo que el grado contaminante de él es ínfimo; en relación a un abono orgánico, el cual (debido a su procedencia), es

obtenido directamente del proceso, y se ve influenciado por compuestos químicos generados en el proceso metanogénico, los cuales no pueden ser eliminados directamente de él, por lo que el grado contaminante puede ser en un momento dado alto.

b) Contaminantes Microbiológicos

Se refiere a la cantidad de microorganismos (en forma de hongos, bacterias, parásitos, etc.) presentes en el material en particular.

Con relación a un fertilizante químico, ya que es obtenido como producto principal de un proceso químico, el grado de contaminantes microbiológicos también presenta un límite ya previsto en el proceso, por lo que, conserva un valor aceptable, el cual debe ser el valor límite aceptable, de contaminación microbiológica, siendo éste un valor generalizado de 1%. Es decir, los requerimientos de pureza microbiológica son altos, por lo que el grado contaminante de éstos es ínfimo o bajo.

Con relación a un abono orgánico, debido a su procedencia éste puede poseer en un momento determinado una alta cantidad de microorganismos, la cual dependerá del tipo de sustrato utilizado para llevar a cabo el proceso metanogénico,

así como del tiempo de residencia, pH y temperatura, por lo que no se puede preveer, cuál debe ser el rango de aceptabilidad; sin embargo, la experiencia en investigaciones anteriores, da una idea; así como los Cuadros 49 y 50 (del análisis microbiológico de mezclas efluentes A, B y C_f) del porcentaje de mortandad que presentan algunos microorganismos después de cesado el proceso de fermentación anaeróbica, especificándose que son datos obtenidos únicamente con la utilización de excretas humanas, los cuales para la investigación son una guía porque también las mezclas A, B y C_f, experimentales conllevan como sustrato principal este mismo sustrato (excretas humanas).

Con estos cuadros y estudios realizados por otros investigadores, se puede decir que un abono orgánico presenta cantidades de microorganismos bajas, por lo que el porcentaje de mortandad que se da concluido el proceso metanogénico, es alto, presentando un rango de 82 - 100%, a un rango de temperaturas de 22-35°C, en un rango de tiempo de residencia de 2 - 20 días. Estos datos han sido obtenidos, cuando la producción de biogás ha sido con un % CH₄, de 60 - 70%, por lo que el biogás producido ha sido combustible.

3. Valor Económico vrs. Utilidad Percibida por el Agricultor

El valor económico de un fertilizante químico en referen-

cia a un abono orgánico es alto, esto se debe a la forma que ha sido producido y el grado de pureza (químico y microbiológico) que esté presente.

La utilidad percibida por el agricultor, es la ganancia en moneda nacional, que puede percibir un agricultor al utilizar un fertilizante químico o un abono orgánico, o efectuar una combinación de éstos.

Se da una relación de proporción indirecta entre valor económico vrs. utilidad, debido a que a mayor valor del fertilizante, menor ganancia obtenida por el agricultor.

Por todo ello, se debe hacer una verdadera investigación, tanto a nivel de procedencia del abono orgánico, así como del grado contaminante; también realizar una evaluación técnica agronómica de incorporación del bioabono o abono orgánico, al suelo y observar su comportamiento para poder obtener una verdadera calidad del bioabono, obteniéndose de esta forma criterios que fundamenten y den solidez a una investigación, para poder aplicar con ciertos límites de tolerancia y de confianza el bioabono de interés.

A continuación se presenta un breve análisis nutricional de las cantidades de nutrientes que necesitaría el rubro de maíz,

al utilizar el bioabono obtenido en el presente trabajo. Este análisis no está indicando todavía su valor de aceptabilidad, únicamente se plantea, para aportar criterios primarios que den sustentación a otras investigaciones.

ANALISIS COMPARATIVO ENTRE LA UTILIZACION DE UN FERTILIZANTE QUIMICO Y EL BIOABONO EN EL CULTIVO DEL MAIZ.

Para realizar este análisis, se partirá del supuesto siguiente:

El cultivo de maíz, será realizado en un tipo de suelo franco arcilloso. Este tipo de suelo presenta cantidades nutrimentales de N, P, K, relativamente aptas para poder incorporar el cultivo del maíz y utilizar un fertilizante (químico o abono orgánico) en especial, para obtener una cierta producción de éste al final de la cosecha.

Por lo que, para una hectárea de cultivo de maíz, los requerimientos nutricionales son: 80-100 Kg N/hectárea, 35-50 Kg P/hectárea y 0-25 Kg K/hectárea.

Reportándose los nutrientes como: N en forma de nitrógeno total; P en forma de P_2O_5 y K en forma de K_2O .

Utilizando un fertilizante químico, por ejemplo: Triple 15; es decir % N, % P Y % K, es de 15,15,15 respectivamente.

Se obtienen los siguientes requerimientos nutricionales:

$$\frac{100 \text{ kilogramos N/hectárea}}{0.15} = 666.66 \text{ Kg Nitrógeno x hectárea}^{-1}$$

$$\frac{50 \text{ kilogramos P/hectárea}}{0.15} = 333.33 \text{ Kg Fósforo x hectárea}^{-1}$$

$$\frac{25 \text{ kilogramos K/hectárea}}{0.15} = 166.66 \text{ Kg Potasio x hectárea}^{-1}$$

Utilizando el bioabono obtenido en el presente trabajo, para el caso, el de la mezcla C_f, la cual contiene el mayor porcentaje de nutrientes: 2.73% N; 1.793 %P; y 0.793 %K.

Se obtienen los siguientes requerimientos nutricionales:

$$\frac{100}{0.0273} = 3663.00 \text{ Kg Nitrógeno x hectárea}^{-1}$$

$$\frac{50}{0.0179} = 2793.296 \text{ Kg Fósforo x Hectárea}^{-1}$$

$$\frac{25}{0.0793} = 315.259 \text{ Kg Potasio x Hectárea}^{-1}$$

Con los cuales se construye el Cuadro 51.

CUADRO 51

COMPARACION DE REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES DEL MAIZ UTILIZANDO UN FERTILIZANTE QUIMICO Y EL BIOABONO OBTENIDO DE LA MEZCLA C_F

KILOGRAMOS DE NUTRIENTES	FERTILIZANTE QUIMICO 15 - 15 - 15	BIOABONO
		2.73 - 1.793 - 0.793
Kilogramo N/Ha.	666.66	3663.00
Kilogramo P/Ha.	333.33	2793.296
Kilogramo K/Ha.	166.66	315.259

El Cuadro 51, manifiesta una situación bastante negativa; sin embargo, se pueden realizar mezclas apropiadas, de fertilizantes químico-bioabono, para obtener resultados más congruentes y que manifiesten el grado de aceptabilidad, tanto financiera como favorable para la disminución en la contaminación ambiental, incorporando el bioabono. Se puede seguir asumiendo una mezcla cualquier de estos dos fertilizantes y obtener así una proporción que satisfaga tanto al agricultor como a la contaminación, con la salvedad, que deben de continuarse los es-

tudios de la mezcla C_f , propuesta en el presente trabajo para poder obtener el grado de confiabilidad y aceptabilidad del producto de interés (bioabono). A manera de exponer algunos beneficios que se pueden obtener por una combinación de un fertilizante químico y el bioabono se propone una mezcla en peso, conformada así: 50% de fertilizante químico (Triple 15) y 50% de Bioabono (mezcla C_f), con la cual se obtienen los requerimientos nutricionales presentados en el Cuadro 52.

CUADRO 52

MICRONUTRIENTES NECESARIOS (Kg) DE UNA MEZCLA DE FERTILIZANTE QUIMICO (TRIPLE 15) Y BIOABONO (MEZCLA C_f), PARA LA PRODUCCION DE MAIZ

NUTRIENTES KILOGRAMOS/ HECTAREA	MEZCLA (50% FERT. QUIMICO + 50% BIOABONO)
Kilogramos de N/Hectárea	2164.83
Kilogramos de P/Hectárea	1563.31
Kilogramos de K/Hectárea	240.96

Así como ésta, puede ser propuesta otra, obteniéndose ventajas en cuanto a la utilidad percibida por el agricultor y en cuanto a la disminución del costo de Inversión, el cual, es alto al utilizar únicamente fertilizante químico. También se puede observar que la propuesta de una mezcla, dependerá

de la cantidad de bioabono obtenido de un proceso de fermentación anaeróbica.

-Análisis Comparativo entre Mezclas A, B y C_f , de Entrada y Salida.

a) Análisis Físicos comparativos entre mezclas A, B y C_f de Entrada y Salida.

b) Análisis de macro y microelementos de mezclas A, B y C_f , de Entrada y Salida.

a) Análisis Físicos Comparativos entre Mezclas A, B y C_f de Entrada y Salida.

De los sustratos de entrada y salida como mezcla de heces y orina humana con desechos vegetales de lechuga y repollo no hay información pertinente al respecto, ya que en el presente trabajo se ha realizado un estudio preliminar (pionero). Por tal motivo los informes vertidos en este documento darán la base para futuros estudios.

El contenido hídrico de las mezclas A, B y C_f entre afluentes y efluentes incrementó en los efluentes como puede observarse en los Cuadros 43, 44 y 45, respectiva

mente debido a que en el proceso de fermentación metanogénica se forma un condensado que enriquece más al sustrato total, de humedad.

Luego con relación a los sólidos totales hubo un descenso entre entrada y salida debido a la destrucción de material orgánico total. Una parte se convirtió en agua y la otra pasó a convertirse en biogás.

b) Análisis de micro y macroelementos comparativo de mezclas A, B y C_f de entrada y salida.

Los macro y microelementos en el proceso de digestión anaeróbica, descienden para una mezcla en particular, esto se debe a que se dan una serie de transformaciones bioquímicas en el proceso. La forma más perceptible de lograr observar este descenso es:

1. En la producción de biogás, en la cual se obtienen una serie de productos químicos, que se difunden a la fase gaseosa.
2. En los sólidos volátiles gastados, los cuales reflejan un descenso positivo, lo que demuestra que se ha dado una degradación o biotransformación de los compuestos orgánicos.

Al realizar los análisis químicos, e incorporar un ácido fuerte a la materia orgánica, ésta se destruye, quedando netamente la fase inorgánica; del mismo modo pero en menor grado, se puede observar que dependiendo del pH, así como de la temperatura y otras variables (tanto exógenas como endógenas dentro del proceso) se puede percibir la destrucción de una mezcla que está sometida al proceso de digestión anaeróbica. Lo que se observa en el Cuadro 53

CUADRO 53

MACRONUTRIENTES Y MICRONUTRIENTES DE MEZCLAS A, B Y C_f DE ENTRADA Y SALIDA DE LOS DIGESTORES EN LA FERMENTACION ANAEROBICA

MEZCLA	MACRONUTRIENTES (%)			MICRONUTRIENTES (ppm)			
	E N T R A D A						
	%N	%P	%K	Ca	Mg	Fe	Mn
A	2.7	1.62	0.293	1.57	0.63	0.05	2.05
B	2.47	1.53	0.666	1.42	0.58	0.04	1.35
C	2.9	1.859	0.843	1.60	0.98	0.06	2.52
S A L I D A							
MEZCLA	%N	%P	%K	Ca	Mg	Fe	Mn
A	2.25	0.462	0.493	0.86	0.35	0.03	1.47
B	2.40	0.5	0.62	1.03	0.47	0.04	1.2
C	2.73	1.793	0.793	1.4	0.72	0.06	2.03

Se manifiesta que la mezcla que presenta un mayor descenso es la mezcla A, continuando la C_f, y de último la B, por lo que se puede decir que la mezcla A, es la que se ha agotado más en un tiempo más corto; sin embargo, la mezcla C_f se ha agotado en un menor tiempo de retención, manifestando también un descenso apreciable.

En todo ello, no se puede anticipar cuál de estas mezclas es la que reporta buenos resultados en cuanto a la producción de biogás, debido a que el porcentaje de descenso de nutrientes es prácticamente imperceptible, lo que no indica una mezcla preferencial; sí se puede indicar que todas las mezclas en el análisis de composición del biogás, excepto la mezcla A, reportaron bajos porcentajes de Metano y un alto porcentaje de nitrógeno gaseoso, observándose una mejoría de porcentaje de Metano en la mezcla B, pudiéndose dar un breve comentario de que el efecto de un pequeño cambio en el descenso de porcentajes de nutrientes, especialmente en el % nitrógeno (2.43-2.4), mejora la cantidad en porcentaje de Metano.

También se puede decir que el proceso de fermentación anaeróbica, fue desarrollado hasta su última fase, sin embargo, debido a factores incontrolados por los investigadores, se obtuvieron mezclas altas en el porcentaje de ni

trógeno gaseoso, lo cual generó una baja producción de Metano, concluyéndose que el biogás obtenido, no es combus-
tible, por lo que dichas mezclas de sustratos deben ser evaluadas en trabajos posteriores realizando otras mezclas de los mismos sustratos en diferentes proporciones para observar verdaderamente su comportamiento y su potencial como una fuente alterna de energía.

CONCLUSIONES

- Las mezclas A, (37.90% heces), B (35.5% heces) y C (42.34% heces) presentan un bajo rendimiento. (m^3/kg S.V/día). Esto se debe a que el proceso de fermentación anaeróbica, fue realizado en un digestor discontinuo, sin realizar inoculaciones de entrada, por lo que las bacterias metanogénicas no pudieron adaptarse con facilidad.
- Los digestores discontinuos fueron la mejor opción para partir de cero, en la investigación, debido a que es en él donde se pueden estudiar muchas variables, por ejemplo: tiempo de residencia, etc.
- El pH de salida de cada uno de los digestores, se ha vuelto relativamente ácido, por lo que el proceso de fermentación se ha visto afectado, obteniéndose bajos rendimientos y por lo tanto, un bajo porcentaje de Metano.
- Los macro y micronutrientes disminuyen en el proceso de fermentación anaeróbica en la fase líquida. Esto se observa en los porcentajes de sólidos totales de entrada y salida, en los que se ve el importe de la degradación anaeróbica.
- La mezcla efluente que reporta una menor proporción de nitrógeno elemental es la mezcla B, coincidiendo con que es la que contiene el menor porcentaje de heces humana (35.53%).

-El porcentaje de cada macro o microelemento, varía, debido a que la proporción en que se encuentren los sustratos de diferente origen cambia, por lo que la composición de cada mezcla definirá porcentajes diferentes.

-Las mezclas A (37.90% heces), B (35.53% heces), y C (Co, 33.13 % heces, Cf 42.64% heces), han sido formadas con los mismos tipos de sustratos; sin embargo, es en relación a la proporción en que se encuentren combinados éstos, que se realizó la comparación experimental, obteniéndose que la mezcla más baja en el porcentaje de heces humanas (mezcla B), es la que produce un mayor porcentaje de metano (7.61%).

-Al comparar la mezcla A (37.90% heces) y B (35.53% heces) la que ha producido un mayor rendimiento es la A; sin embargo, la B es la mezcla que ha definido el menor importe inhibitor, causado por el nitrógeno concedido por la relación (Heces y Orina)/(Lechuga y Repollo).

-El mayor volumen acumulado o generado como biogás fue producido por la mezcla A, la cual presenta cantidades intermedias, tanto de heces (37.90%) como de desechos vegetales (10% vegetales).

-La temperatura del proceso de digestión anaeróbica, varía según la estación del año, en un digestor que trabaja a temperatura ambiente, este cambio se observa así:

- a) Si la temperatura es baja así como en el invierno, la producción de biogás será lenta y su tiempo de retención será moderado.
- b) Si la temperatura es alta así como en el verano, la producción de biogás será alta y su tiempo de retención será corto.

Estos dos criterios están sustentados, considerando que la mezcla se encuentra en el rango de trabajo permisible, para la producción de biogás, por lo que se cumplirían a cabalidad en países donde las estaciones climatológicas se encuentran bien definidas; sin embargo, en El Salvador no sucede así; pero sí se han tomado de base estos criterios para dar fundamento al presente trabajo.

-El digester discontinuo como premisa fue el mejor instrumento con el cual se cuantificó el proceso de fermentación a escala de laboratorio.

-Los desechos vegetales, fueron trabajados en dos formas: sólo cortados; cortados y molidos.

Obteniéndose una producción espontánea con los desechos bien molidos.

La molécula, se encuentra más dividida y las bacterias metanogénicas y acidogénicas se proliferan en mayor proporción, realizando hidrólisis ínfimas y por lo tanto, un menor gasto de energía, por parte de ellas.

-El período de latencia de las bacterias metanogénicas se ve influido por las variables de control del proceso, así como de la composición

de la mezcla utilizada para hacer proliferar a dichas bacterias.

-El material efluente o subproducto, que se obtiene de la degradación a anaeróbica, reporta buenos porcentajes de macronutrientes N, P, K, a la salida, por lo que puede ser utilizado como un abono orgánico parcial, en los cultivos, y combinarse con el abono químico, para disminuir los costos por hectárea que son tan elevados. Cuando se fertilizan los suelos totalmente con abono sintético o químico; sin embargo, faltaría realizar una evaluación técnico-agrícola, para obtener una fuente más precisa de la incorporación de éste, el cual contribuya al mejoramiento del ecosistema y no se convierta en un contaminante más.

-La mezcla A (37.90% heces), es la que reporta el mayor descenso de sólidos volátiles, esto indica que el proceso de degradación anaeróbico es el más completo. Por lo tanto, será a la vez la que genera una buena producción de biogás, obteniéndose por lo tanto el mejor rendimiento.

-La mezcla Cf (con 42.64% de heces) comparada con la mezcla A (que contiene 37.90% heces), produjo un bajo porcentaje de sólidos volátiles; sin embargo, no se puede hacer una apreciación generalizada, debido a que se necesita realizar más corridas de ella para poder obtener una conclusión y resultados representativos que lleven a una tendencia específica.

-Entre las mezclas A (37.90% heces) y B (35.53% heces), la mejor mezcla

fue la A, que contiene mayor cantidad de heces, debido a que la concentración de nitrógeno transformado fue más baja, por lo tanto, el proceso de inhibición fue menor, así también fue la que reportó un mejor rendimiento ($4.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{día/Kg S.V.}$).

-Entre las mezclas B (35.53% heces) y Cf (42.64% heces), analizadas en el cromatógrafo de gases, la que reporta mejores resultados es la mezcla de menor cantidad de heces, con un valor de 7.61% de metano, lo que indica que mejora la relación carbono-nitrógeno, en la mezcla B.

-El mejor proceso de degradación fue obtenido del digestor A, luego le sigue el B y por último el Cf, con un 37.90%, 35.53% y 42.64% de heces respectivamente.

-Con referencia al rendimiento (m^3 de biogás/día), se obtuvieron mejores resultados en el digestor A, en segundo lugar está el B y en tercer lugar el Cf, los cuales presentan un 37.90%, 35.53% y 42.64% de heces respectivamente.

-La mezcla Cf de entrada y salida, es la que reporta el más alto contenido de nitrógeno, de igual manera se mantienen altos los macronutrientes.

-Los macronutrientes analizados del sustrato de origen vegetal (lechuga y repollo), reportan que el más alto de ellos, fue el nitrógeno, en ca-

da una de las proporciones realizadas en la etapa experimental (que son las que conforman las mezclas A, B y C).

-El nitrógeno obtenido en mayor cantidad, fue encontrado en la mezcla de entrada que tiene cantidades intermedias de heces, es decir (37.90%) la mezcla A.

-Así también la mezcla de entrada que reporta el mayor porcentaje de fósforo es aquella que tiene la menor cantidad de heces, es decir la B, (35.53% heces).

-Con relación a las mezclas de salida, la mejor mezcla que pudiera servir como abono orgánico, se ha seleccionado la que presenta un mayor porcentaje de N, P, K, por lo que la mejor es la Cf (42.64% heces), que contiene mayor cantidad de heces, con relación a las otras; sin embargo, no se puede decir que sea representativa porque sólo fue realizada una corrida experimental.

-El proceso de fermentación anaeróbico; se vio dañado por un alto contenido de nitrógeno en la fase gaseosa de salida, en todas las mezclas. Por lo que se necesita implementar otro tipo de proceso, ya sea semicontinuo o continuo para efectuar una comparación entre ellos y el utilizado en el presente trabajo para descartar o comprobar que es el proceso o sistema el que influye en el alto contenido de nitrógeno gaseoso.

-El biogás obtenido, no es combustible, por lo que a nivel energético no se observan mayores beneficios.

-La mezcla óptima no se obtuvo debido a que para definirla era necesario el efectuar por triplicado cada una de las mezclas, y la mezcla Cf (42.64% heces), únicamente fue realizada una vez, por lo que sólo se podrá encontrar comparaciones entre las mezclas, obteniéndose de esa comparación la mejor.

-Se mantuvo un pH adecuado en todas las experiencias, de aproximadamente 6.8 encontrándose dentro del rango permisible e inclusive en el óptimo.

-La mejor producción de biogás como volumen acumulado (gasómetro) lo obtuvieron los digestores A, cuyo porcentaje de Heces es de 37.90%.

-Hubo mayor producción de biogás en los digestores A (37.90% heces), de igual manera se detectó una mayor cantidad de sólidos volátiles destruidos como materia orgánica en el proceso de fermentación metanogénica.

-El volumen acumulado de biogás está relacionado directamente con la temperatura, pudiéndose evaluar volúmenes aproximados utilizando la temperatura a la cual se desea trabajar.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar el estudio de la fermentación anaeróbica, con las mismas composiciones de mezcla pero utilizando otro tipo de desechos vegetales que tengan cantidades despreciables de nitrógeno para que no interfiera como un inhibidor en el proceso de digestión.

- Realizar este trabajo con un sistema de digestor continuo, en el cual se pueda obtener cantidades apreciables y significativas de biogás, para que se pueda definir una curva, de producción de biogás.

- Realizar la continuación del presente trabajo, con otro sustrato vegetal, que reporte un mejor rendimiento y por lo tanto una buena cantidad de biogás.

- Se recomienda trabajar con aguas negras y los mismos sustratos vegetales escogidos en el presente trabajo, utilizando las aguas negras en la proporción en que se encuentran los sustratos de origen humano.

- Se recomienda abrir centros de investigación de procesos de reciclaje, partiendo de una diversidad de sustratos, para poder contar con una base fuerte, tanto en el campo técnico como experimental, el cual fundamente el desarrollo a escala industrial.

-Se recomienda trabajar con una mezcla que contenga mayor porcentaje de sustrato vegetal del tipo (lechuga y repollo) del presente trabajo, debido a que la mezcla B que contiene mayor porcentaje de desechos vegetales (12.5%), es la que produjo un porcentaje de metano mayor (7.61%); por lo que al incrementar la parte vegetal, se incrementaría el material celulósico rico en carbono y por lo tanto, la relación C/N mejoraría, obteniéndose mejores resultados, que los reportados en el presente trabajo.

-Se recomienda que continúe el estudio de la mezcla Cf (42.64% de heces), debido a que sólo se realizó una corrida por lo que no se tiene una tendencia representativa que permita concluir.

-Se recomienda diseñar un programa bien estructurado, para poder encontrar la mezcla óptima, que satisfaga las condiciones de trabajo, de un proceso de producción anaeróbico generalizado.

-También se recomienda realizar una serie de análisis microbiológicos, (en el presente trabajo sólo se efectuó análisis de *Ascaris lumbricoides*, que den mayor confiabilidad a la incorporación del bioabono al suelo, y contribuir así, con mayor certeza a la disminución de la contaminación.

-El bioabono obtenido de la mezcla Cf (42.64% heces), es el más rico en nutrientes, sin embargo, puede o debe ser incorporado parcialmente con

un fertilizante químico, para disminuir el costo de inversión para la realización de un cultivo en determinado suelo; pero se debe realizar análisis microbiológicos de este efluente, para que se pueda incorporar al suelo con criterios más precisos.

-También se recomienda para futuras investigaciones, mantener la cantidad de desechos humanos, agregando más vegetales de otra índole para obtener criterios amplios de la variación de la relación C/N, de la mezcla propuesta anteriormente.

REFERENCIAS

1. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (1984), "Reciclaje de Materias Orgánicas y Biogás". Primer Curso de Capacitación. Chendu China, República Popular China.
2. Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial, (ICAITI), (1983), "Manual de Construcción y Operación, Planta Económica de Biogás". Informe Técnico, Guatemala.
3. Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial, (ICAITI), (1987), "Digestor para Biogás Construcción Convencional", Informe Técnico, Guatemala.
4. Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial, (ICAITI), (1987), "Aprovechamiento de Efluentes de Biodigestores", Informe Técnico, Guatemala.
5. Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial, (ICAITI), (1984), "Interciencia". Informe Técnico, Guatemala.
6. Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial, (ICAITI), (1987), "Técnicas de Laboratorio para Manejo de Microorganismos Anaeróbicos", Informe Técnico, Guatemala.

7. Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial, (ICAITI), (1987), "Digestor para Biogás, Construcción de Bajo Costo", Informe Técnico, Guatemala.
8. Entrevista personal con el Licenciado Ricardo Meneses, Asesor Administrativo de la Empresa "FERTILIZANTES DE CENTRO AMERICA" (FERTICA), mayo de 1992.
9. Blandón Tévez, J.R., (1983), "Selección de Sustratos no Convencionales con Potencial para la Producción de Biogás". Trabajo de Graduación presentado para optar al Título de Ingeniero Químico. Universidad Centroamericana José Siméon Cañas, San Salvador, El Salvador.
10. Aguilera, J.A. (1979), "Ecología", Monte Avila Editores, Caracas, Venezuela.
11. Biagi, F., (1985), "Diagnóstico Macroscópico de las Enfermedades Tropicales", Universidad Nacional Autónoma de México, México.
12. Segura, V.M., (1986), "Diseño Experimental Aplicado a Ingeniería Química y Alimentos", Universidad de El Salvador, El Salvador.
13. Ganon W., (1976), "Manual de Fisiología Médica". 5a. Edición, Editorial Limusa, México.

14. Jawets, E., (1983), "Microbiología Médica". 10a. Edición, Editorial Interamericana, México.
15. Díaz Robledo, S., (1982), "Atlas de las Frutas y Hortalizas". 3a. Edición, Editorial Monte Avila Editores, Caracas, Venezuela.
16. National Technical Information Service, (1977); "Methane Generation from Human, Animal, and Agricultural Waster". National Academy of Sciences, Washington D.C., U.S.A.
17. Aguilar Cuestas, J.R. (1982), "Evaluación del Potencial del Biogás Fuente Energética en El Salvador", Trabajo de Graduación presentado para optar al título de Ingeniero Químico. Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, San Salvador, El Salvador.
18. Tepperman, Joy (1975), "Fisiología Metabólica y Endocrina", 3a. Edición, Editorial Interamericana, México.
19. Asociación Salvadoreña de Ingenieros y Arquitectos (ASIA); Asociación Salvadoreña de Ingenieros Mecánicos e Industriales (ASIMEI); Asociación Salvadoreña de Ingenieros Químicos y Químicos Industriales (ASINQUI); Sociedad de Ingenieros Agrónomos de El Salvador (SIADES), (1989). "Memoria del VI Congreso Nacional de Ingeniería", Volumen I, San Salvador, El Salvador.

20. Instituto de Nutrición de Centroamérica y Panamá, INCAP, (1987) "Valor Nutritivo de los Alimentos para Centroamérica y Panamá", Investigaciones Dietéticas, Guatemala.

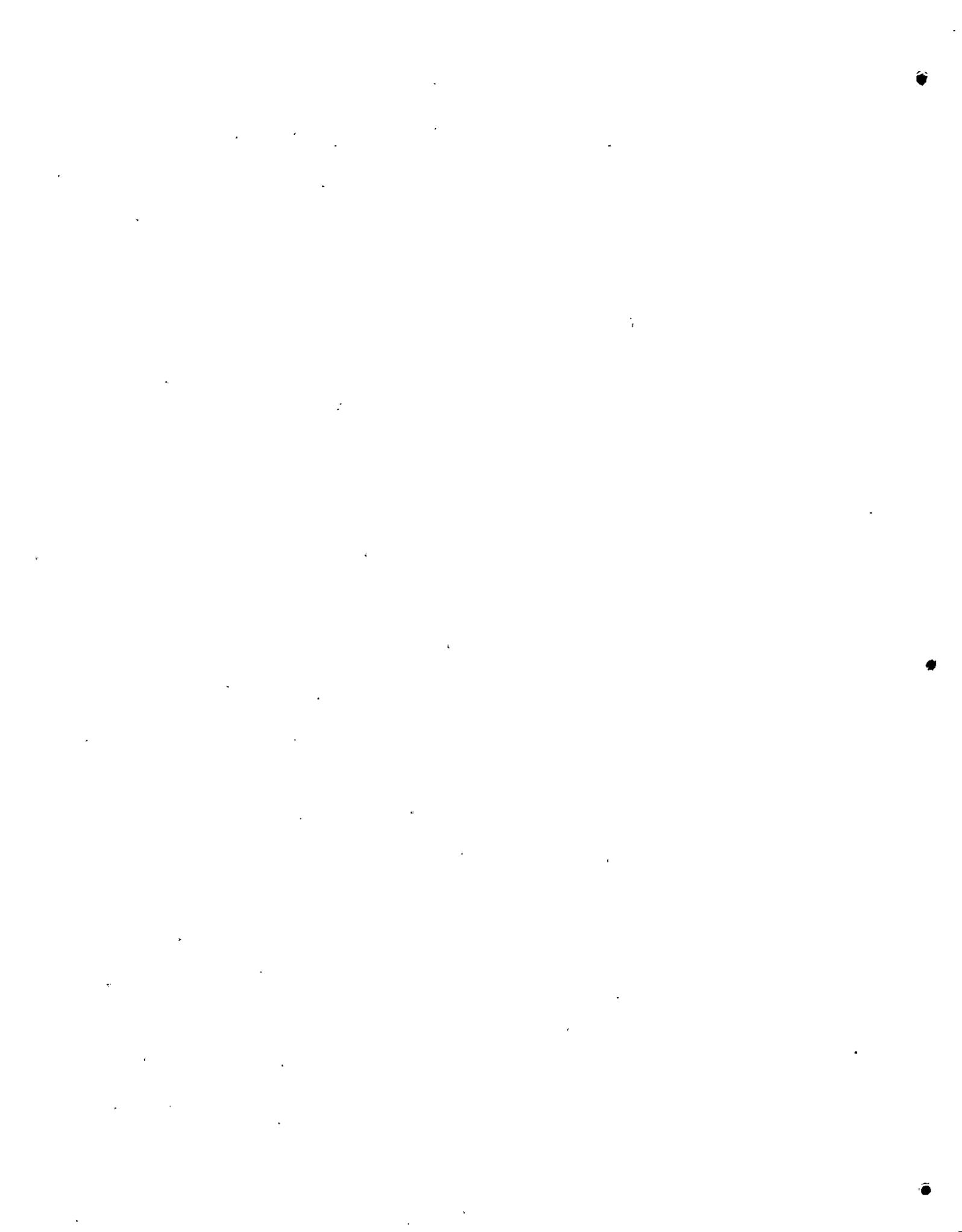
APENDICE A

GLOSARIO

1. Fermentación anaeróbica : Es el fenómeno en el cual en ausencia total de oxígeno existen microorganismos que descomponen la materia prima orgánica a compuestos orgánicos más simples y posteriormente a Dióxido de Carbono y Metano.
2. BIOGAS : Es una mezcla gaseosa de Metano y otros componentes gaseosos, obtenida en la fermentación anaeróbica.
3. METANO : Es un gas incoloro e inodoro que presenta propiedades como : Ausencia de toxicidad y un rápido escape del ambiente anaeróbico; asegurándose de esta manera un ciclo continuo de la biodescomposición de materia orgánica. Su combustión produce una llama azul.
4. BIOABONO : Es el material de desecho o un sub-producto obtenido de la fermentación anaeróbica, el cual posee cualidades específicas de gran cantidad de nutrientes, lo que le da la calidad de fertilizante del suelo.
5. DIGESTOR : Recipiente en el que se lleva a cabo la fermentación anaeróbica.
6. CARGA : Material que se colocará en el digestor, el cual será trans

formado por el proceso de fermentación anaeróbica a bioabono.

7. ECOLOGIA : Es una parte de la biología, definida como el estudio de las relaciones que existen entre el medio ambiente y los organismos que en él habitan. Etimológicamente la palabra Ecología se deriva de los términos griegos EIKOS : casa y LOGOS : tratado.
8. HABITAT : Se refiere al tipo de comunidad donde vive el organismo y en que estrato o parte de ella se encuentre.
9. ASCARIS LUMBRICOIDES : Los huevos producidos por larvas adultos se eliminan con la materia fecal. Están protegidos por una cubierta resistente y se dice que permanecen infectantes por varios meses en el suelo. Cuando los huevos son ingeridos, las larvas salen del cascarón en el intestino delgado, atraviesan la pared intestinal y se introducen en los vasos sanguíneos; pasan por el hígado y continúan su migración como las larvas de uncinarias.
10. RECICLAJE : Es el proceso físico-químico-microbiológico, que se obtiene cuando un desecho es utilizado como sustrato, para la producción de un componente principal, con nuevas finalidades.
11. MONOSACARIDOS : Son aldehidos o cetonas que tienen un grupo carboxílico que se destruye en la hidrólisis.
12. OLIGOSACARIDOS : Son aquellos que contienen de dos a seis monosacáridos después de la condensación.



13. POLISACARIDOS : Son aquellos aldehidos o cetonas que contienen muchos polisacáridos.

14. CELULOSA : Es un polisacárido que se compone de unidades de glucosa unida con cadena glucosídica del tipo B-D-1.4. La gran mayoría de toda la celulosa natural existe en la forma de una larga cade-na sin ramificaciones y su peso molecular puede llegar a cientos de miles de millones. Un gran número de moléculas de celulosa se integran en heces que se llaman MICROFIBRILLAS. Gracias a la ac-ción de las enzimas, la celulosa se hidroliza en glucosa.

15. HEMICELULOSA : Es una mezcla de pentosas y hexosas policondensa-das. En condición anaeróbica se pueden hidrolizar y convertirse en pentosas y hexosas más sencillas.

16. Gel de Pectina : Es un tipo de pentosas policondensadas que repre-sentan escasa proporción de los recursos de fermentación metanogé-nica.

En conclusión la fermentación anaeróbica puede convertirlas en pen-tosas y hexosas.

17. ALMIDON : Es un compuesto de alto peso molecular formado por unio-nes 1.4 - glucosídicas, en condiciones anaeróbicas pueden hidroli-zarse y convertirse en pentosas y hexosas.

18. LIGNINA : Es un tipo de compuesto amorfo, de polímeros cíclicos que suele existir en combinación con la celulosa, hemicelulosa y productos parecidos que son complejos compuestos difíciles de

degradar por los microbios.

19. LIPIDOS : Constituyen un gran grupo que incluye las grasas y los aceites; las ceras, los fosfolípidos, los glicolípidos y los esteroides que son insolubles en agua y solubles en solventes de eter y clorofomo.

20. PROTEINAS : En la fermentación anaeróbica, las proteínas se hidrolizan y se convierten en péptidos o aminoácidos.

APENDICE B

DENSIDAD DEL BIOGAS

La densidad del biogás se evaluó únicamente en los digestores B y C. En el digestor A, no se pudo evaluar debido a que el proceso de fermentación anaeróbica, ya había concluido para ella.

La densidad de biogás, fue evaluada, utilizando los análisis de cromatografía de gases.

Expresiones que se utilizaron :

$$M \text{ mezcla} = n \text{ mezcla} \times \overline{PM} \text{ mezcla} \quad (1)$$

$$\overline{PM} \text{ mezcla} = (\% X/X)_1 \overline{PM}_1 + (\% X/X)_2 \overline{PM}_2 + (\% X/X)_3 \overline{PM}_3 \dots \quad (2)$$

$$PV_m = n_m RT \quad (3)$$

$$Q \text{ mezcla} = M \text{ mezcla} / V \quad (4)$$

En donde : % X/X = fracción mol de componente gaseoso

$\overline{PM} \text{ mezcla}$ = peso molecular promedio de mezcla gaseosa

M mezcla = peso de mezcla gaseosa

V = volumen de mezcla gaseosa

$\overline{PM}_1, \overline{PM}_2, \overline{PM}_3 \dots$ = Pesos moleculares de gases individuales

T = Temperatura del sistema en escala absoluta (°K)

P = Presión del sistema a la salida (atm)

n_m = Moles de mezcla gaseosa

R = Constante de los gases ideales = $0.082 \frac{\text{L} \cdot \text{atm}}{\text{gmol} \cdot ^\circ\text{K}}$

Q mezcla = Densidad de mezcla gaseosa (gr/ml)

DIGESTOR B:

V mezcla = 1679.69 ml de mezcla de biogás

$$R = 0.082 \frac{\text{L} \cdot \text{Atm}}{\text{gmol} \cdot ^\circ\text{K}}$$

$$T = 302^\circ\text{K}$$

$$P = 14.7 \text{ lbf/pulg}^2 = 1 \text{ atm}$$

$$PM_{\text{N}_2} = 28$$

$$PM_{\text{O}_2} = 32$$

$$PM_{\text{SH}_2} = 34$$

$$PM_{\text{CO}_2} = 44$$

$$PM_{\text{H}_2\text{O}} = 18$$

Los gases a la salida se supone que se encuentran saturados de agua; por lo que a 302°K y $0.5776 \text{ lbf/pulg}^2$ (Presión de Saturación) se puede calcular la nueva fracción molar que presentan los gases o la salida, al ser incorporado el vapor de agua. Las expresiones que se utilizaron fueron las siguientes:

$$\frac{P^*}{P-P^*} = \frac{\text{moles de vapor de agua}}{\text{moles de mezcla gaseosa libre de agua}} \quad (5)$$

En donde:

$$P^* = \text{Presión de Saturación a } 302^\circ\text{K} = 0.5776 \text{ lbf/pulg}^2$$

$$P = \text{Presión del sistema} = 14.7 \text{ lbf/pulg}^2$$

$$\frac{0.5776}{14.7-0.5776} = \frac{0.0408 \text{ moles de vapor de agua}}{\text{moles de mezcla gaseosa libre de agua}}$$

con la cual al reordenarla, se obtiene la ecuación de moles totales:

$$n_t = P^* + (P - P^*) \quad (6)$$

$$n_t = 0.5776 + (14.7 - 0.5776) = 1.0408 \text{ moles totales}$$

con la cual se pueden calcular las nuevas fracciones molares, utilizando la siguiente expresión:

$$\%X/X = \frac{n_s}{n_t} \times 100 \quad (7), \text{ en donde}$$

n_s = moles de componente

n_t = moles totales de mezcla gaseosa

En donde, como ejemplo para calcular la fracción molar del vapor de agua, se procede así:

$$n_s = 0.0408 \text{ moles de vapor de agua}$$

$$n_t = 1.0408 \text{ moles totales}$$

tanto que:

$$\% X/X = \frac{0.0408}{1.0408} \times 100 = 3.92\%$$

Cálculo de nuevas fracciones molares de la mezcla de biogás del Cuadro B-1, tomando en cuenta la fracción mol del vapor de agua.

Ejemplo:

Cálculo de fracción Mol de nitrógeno gaseoso de la mezcla B, de Cuadro B-1 se tiene que la fracción mol del nitrógeno gaseoso anterior es $\% (X/X)_{N_2} = 53.66$, también el valor de los moles totales es de 1.0408 moles, por lo que la fracción molar de nitrógeno gaseoso se

$$\text{r\AA \% (X/X)}_{\text{N}_2} = \frac{53.66}{1.0408} = 51.56$$

Por lo que las fracciones molares anteriores, son transformadas y presentadas en el Cuadro B-1.

CUADRO B 1

PROMEDIO DE MEZCLA B, DE COMPOSICION DE BIOGAS, ANTES Y DESPUES DE
INCORPORAR EL VAPOR DE AGUA EN LA FASE GASEOSA

GAS	ANTES % (X/X) CROMATOGRAFO	DESPUES % (X/X)
N ₂	53.66	51.56
O ₂	0.88	0.85
CH ₄	7.61	7.31
SH ₂	0.39	0.37
CO ₂	37.46	35.99
H ₂ O		3.92
TOTAL	100	100

Con los nuevos valores de las fracciones molares y la ecuación (2), se obtiene el $\overline{\text{PM}}$ mezcla, así:

$$\begin{aligned} \overline{\text{PM}} \text{ mezcla} &= \frac{x(28)}{100} + \frac{0.85x(32)}{100} + \frac{7.31x(16)}{100} + \frac{0.37(34)}{100} \\ &\quad + \frac{35.99x(44)}{100} + \frac{3.92x(18)}{100} \\ &= 14.44 + 0.272 + 1.24 + 0.126 + 15.836 + 0.706 \end{aligned}$$

$$\overline{\text{PM}} \text{ mezcla} = 32.62 \text{ g/g mol}$$

Cálculo de n mezcla: en la ecuación (3)

$$n \text{ mezcla} = \frac{(P)}{(R)} \frac{(V)}{(T)} = \frac{(1 \text{ atm}) (1.679 \text{ L})}{(0.082 \frac{\text{L-atm}}{\text{gmol}^\circ\text{K}}) 302^\circ\text{K}} = 0.0677 \text{ moles de mezcla}$$

$$n \text{ mezcla} = 0.0677 \text{ moles de mezcla}$$

Cálculo de Masa de mezcla

$$(n \text{ mezcla}) (\overline{PM} \text{ mezcla}) = M \text{ mezcla}$$

$$M \text{ mezcla} = (0.0677) (32.62)$$

$$M \text{ mezcla} = 2.208 \text{ gramos de mezcla}$$

Cálculo de la densidad de la mezcla:

$$\rho \text{ mezcla} = \frac{M \text{ mezcla}}{V \text{ mezcla}} = \frac{2.208 \text{ g}}{1679.69 \text{ ml}}$$

$$= 0.0013 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

APENDICE C

"VOLUMENES INICIALES DE AIRE PARA LOS DIGESTORES DE LAS MEZCLAS A, B Y C, DEL ESPACIO LIBRE Y TUBERIA DEL SISTEMA"

El volumen de aire antes de la fermentación, se evaluó utilizando la fórmula general de un cilindro, tanto para el espacio libre del digestor como de la tubería del sistema.

Los volúmenes totales iniciales de aire, en los digestores de las mezclas A, B y C, se calculan como la sumatoria de volúmenes de aire del espacio libre en el digestor y el volumen de aire de la tubería del sistema al inicio del proceso.

FORMULAS UTILIZADAS

$$V_{EL} = \pi r^2 h \quad (8)$$

$$V_T = \pi r_T^2 L \quad (9)$$

$$V = V_{EL} + V_T \quad (10), \text{ donde:}$$

V_{EL} : Volumen del cilindro del espacio libre en el digestor.

V_T : Volumen de tubería

L : Longitud de tubería

r_T : Radio de la Tubería

π : 3.1416

r : Radio del cilindro del espacio libre en el digestor

h : Altura del cilindro del espacio libre en el digestor

V : Volumen total

Ejemplo de Cálculo, MEZCLA "B"

$$h = 4\text{cm} ; r = 6.75 \text{ cm}$$

$$V_{EL} = (r)^2 (h) = (6.75)^2 (4) \quad (4)$$

$$V_{EL} = 572.56 \text{ cm}^3$$

$$V_T = r_T^2 (L) = (0.10)^2 (93) = V_T = 2.92 \text{ cm}^3$$

$$V = 572.56 \text{ cm}^3 + 2.92 \text{ cm}^3 = 575.48 \text{ cm}^3$$

CUADRO C1

VOLUMENES TOTALES INICIALES DE AIRE EN LOS DIGESTORES A, B Y C (ml)

MEZCLA	V_{EL} (ml)	V_T (ml)	V. TOTAL INICIAL (ml)
A	572.55	2.79	575.35
B	572.56	2.92	575.480
C	572.55	54.07	626.62

"VOLUMEN FINAL DE BIOGAS PARA LOS DIGESTORES DE LAS MEZCLAS A, B y C DEL ESPACIO LIBRE Y TUBERIA DEL SISTEMA".

El volumen del biogás después de la fermentación se evalúa utilizando la fórmula de un cilindro, tanto para el espacio libre como de la tubería del sistema.

FORMULAS UTILIZADAS

$$V_{EL} = \pi r^2 h \quad (8) ;$$

$$V_T = \pi r_T^2 L \quad (9)$$

$$V = V_{EL} + V_T \quad (10)$$

Las cuales ya fueron definidas anteriormente.

CUADRO C 2 . . .

RADIOS, ALTURAS Y LONGITUDES FINALES DE LOS DIGESTORES UTILIZADOS EN EL PROCESO DE FERMENTACION ANAEROBICA, PARA LAS MEZCLAS A, B Y C_F

DIGESTORES	RADIO DIGESTOR. (cm)	h DIGESTOR. (cm)	r TUBERIA. (cm)	L TUBERIA (cm)
A	6.75	6.0	0.10	89
B	6.75	6.3	0.10	93
C _F	6.75	6.2	0.45	85

Ejemplo de cálculo DIGESTOR "A"

$$V_{EL} = \pi r^2 h = \pi (6.75)^2 6.0; \quad V_T = \pi r^2 L = \pi (0.10)^2 \quad (89)$$

$$V_{EL} = 858.83 \text{ ml} ; \quad V_T = 2.79 \text{ ml}$$

$$V = 858.83 \text{ ml} + 2.79 \text{ ml} = 861.62 \text{ ml}$$

En el Cuadro C 3 se presentan los volúmenes finales de biogás para los digestores de las mezclas A, B y C_F.

CUADRO C 3

VOLUMEN FINAL DE BIOGAS EN LOS DIGESTORES PARA LAS MEZCLAS A, B y C_F (ml)

MEZCLA	V _{EL} (ml)	V _T (ml)	V TOTAL FINAL (ml)
A	858.83	2.79	861.62
B	901.77	2.92	904.69
C _F	887.46	54.07	941.53

APENDICE D

BALANCE DE NITROGENO

Balance de nitrógeno, es obtenido únicamente para los Digestores B y C, debido a que para realizarlo se requieren los % N₂ de mezcla de gases a la salida, los cuales para la mezcla A, no fueron obtenidos, por haber concluido el proceso de fermentación anaeróbica.

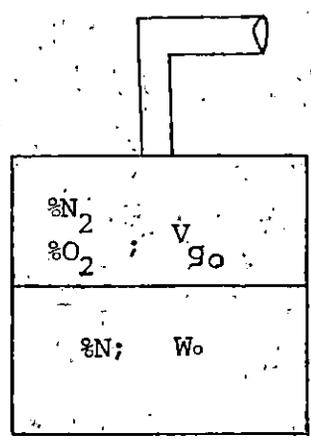
El balance se plantea así :

Condiciones :

- Estado estable; entrada = salida
- Idealidad ; $W_{go} + W_{lo} = W_{gt} + W_{lf}$ (11)

1ª Entrada W_{go} = peso de nitrógeno de fase gaseosa

Esquema Generalizado : W_{lo} = Peso de nitrógeno de fase líquida a la entrada.



W_{gf} = Peso de nitrógeno de fase gaseosa a la salida.

W_{cf} = Peso de nitrógeno de fase líquida a la salida.

Fase Gaseosa

$t = 0$ segundos
 V_{go} = volumen de mezcla a la entrada, antes del proceso de fermentación anaeróbica.

%N₂ = Porcentaje de nitrógeno

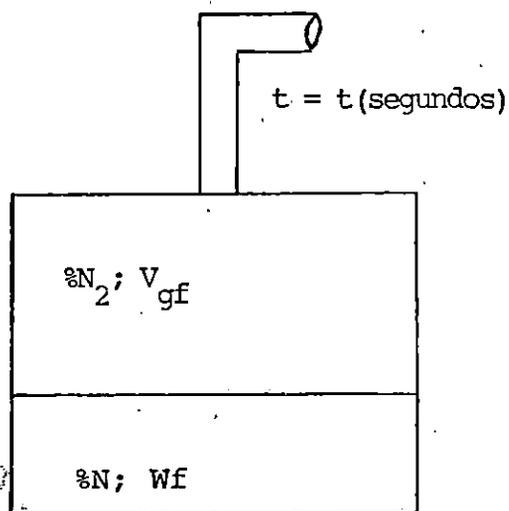
mezcla gaseosa a la entrada.

Fase Líquida

W_o = Peso de afluente en g

%N = Porcentaje de nitrógeno en la mezcla de entrada.

2º Salida



Fase Gaseosa

V_{gf} = Volumen de biogás

$\%N_2$ = Porcentaje obtenido por cromatografía.

Fase Líquida

W_f = Peso de afluente en g

%N = Porcentaje de nitrógeno a la salida de la mezcla.

DIGESTORES B :

Balance General de Nitrógeno

Entrada = salida

$$W_{go} + W_{lo} = W_{gf} + W_{lf} \quad (11)$$

1º Entrada

a) Fase gaseosa

$$V_{go} = 575.345 \text{ ml} = 0.575 \text{ litros}$$

$$\%N_2 = 79\%$$

$$\%O_2 = 21\%$$

$$T = 29^\circ\text{C} + 273^\circ\text{K} = 302^\circ\text{K}$$

$$\overline{PM} \text{ mezcla} = 28.84 \text{ g mezcla/g mol mezcla}$$

Condiciones

-Idealidad

$$P = 1 \text{ atm}$$

$$R = 0.082 \frac{\text{L} \cdot \text{atm}}{\text{gmol} \cdot ^\circ\text{K}}$$

Cálculo de la masa de mezcla (M_{mezcla})

$$M_{\text{mezcla}} = \frac{(28.84) (0.575345) (1)}{(0.082) (302)} = 0.6700 \text{ g de mezcla}$$

$$M_{\text{mezcla}} = 0.6700 \text{ g mezcla}$$

Cálculo de M_{N_2} :

$$M_{N_2} = \frac{M_{\text{mezcla}} \%N_2}{100} = \frac{(0.67) (79)}{100} = \text{g de nitrógeno} \quad (12)$$

$$M_{N_2} = 0.5293 \text{ g de nitrógeno}$$

Cálculo de W_{go} :

$$W_{go} = (2) (M_{N_2}) = 1.058 \text{ g nitrógeno puro} \quad (13)$$

$$W_{go} = 1.058 \text{ g nitrógeno puro}$$

B) Fase Líquida

W_{10} = Peso de nitrógeno en fase líquida

$$W_{10} = \frac{W_0 \quad \% N}{100} \quad (14)$$

DATOS :

$W_0 = 2840.26$ gramos de afluente

$\% N = 2.43$

Cálculo de W_{10} :

$$W_{10} = \frac{(2840.26)(2.43)}{100} = 69.018 \text{ g de nitrógeno}$$

$W_{10} = 69.018 \text{ g de nitrógeno}$

2º Salida

a) Fase Gaseosa

Datos :

$W_{gf} = 1.679$ litros de biogás

$\% N_2 = 57.88$

$$R = 0.082 \frac{\text{L} \cdot \text{atm}}{\text{g mol } ^\circ\text{K}}$$

$P = 1 \text{ atm}$

$P_{\text{sat}} = 0.5776 \text{ lbf/pulg}^2 \text{ (a } 29^\circ\text{C)}$

\overline{PM} mezcla = 32.6952 g /g mol mezcla

Cálculo :

$$M \text{ mezcla} = \frac{(32.0020) (1.679) (1)}{(0.082) (302)}$$

M mezcla = 2.1772 g . mezcla

Cálculo M_{N_2} :

$$M_{N_2} = \frac{M \text{ mezcla} \% N_2}{100} = \frac{(2.1779) (55.61)}{100} = 1.2106 \quad (12)$$

$M_{N_2} = 1.2106$ g de nitrógeno gaseoso

Cálculo W_{gf} :

$$W_{gf} = M_{N_2} (2) = 1.2106 (2) = 2.4212 \text{ g de nitrógeno puro} \quad (15)$$

$W_{gf} = 2.4212$ g de nitrógeno puro

B) Fase Líquida

$$W_{1f} = \frac{W_f \% N}{100} = \frac{(2230) (2.4)}{100} = 53.57g \quad (16)$$

$W_f = 2230$ g de efluente ; $W_{1f} = 53.52$ g de nitrógeno

% N = 2.4

Balance Total de nitrógeno en el proceso de fermentación anaeróbica, de la MEZCLA B.

$$W_{go} + W_{lo} = W_{gf} + W_{lf} \quad (11)$$

$$1.058 + 69.018 = 2.4212 + 53.52$$

$$70.076 = 55.9412$$

Al realizar el balance total de nitrógeno de la MEZCLA B, se observa una variación (en los datos de entrada con relación a la salida), la cual indica que existió alguna falla técnica en la medición de éste.

APENDICE E

MARCHA ANALITICA DEL LABORATORIO

ANALISIS PARA LA DETERMINACION DE % H, % S.T., % S.V
Y % CENIZAS.

% HUMEDAD Y % SOLIDOS TOTALES

- a) Se procedió a recolectar en cápsulas de porcelana previamente taradas, muestras tanto de afluente como de efluente de mezcla; luego se llevó inmediatamente cada muestra a una balanza analítica para tomar el dato de humedad inicial.
- b) Se dejaron secar al ambiente previamente, antes de llevarlas a una estufa a sequedad constante a una temperatura de 130 °C por una hora hasta llegar a un peso constante, en ese momento se tomó el dato final de sequedad.
- c) Luego con esta información se evaluó el % de humedad y el de % de sólidos totales por la fórmula detallada a continuación :

$$\% \text{ SOLIDOS TOTALES} = 100 - \% \text{ HUMEDAD} \quad (13)$$

% DE SOLIDOS VOLATILES Y % DE CENIZAS

- a) De la muestra seca obtenida anteriormente, se procedió a trasladar la muestra a un crisol previamen-

te tarado, tomándose el peso inicial para luego llevarlo a una mufla a 550° por 6 (seis) horas.

- b) Luego se dejó enfriar la muestra de ceniza en un desecador, y se procedió a pesarlo obteniendo el dato final de la muestra seca.
- c) Después, teniendo los datos de entrada y de salida de la muestra seca y de ceniza se calculó el % de sólidos volátiles y el % de cenizas por la fórmula detallada a continuación en base seca:

$$\% \text{ S.V.} = \left(\frac{\text{Muestra seca} - \text{Muestra ceniza}}{\text{Muestra seca}} \right) 100 \quad (14)$$

$$\% \text{ S.V. tabulado} = \left(\frac{\% \text{ S.V.}}{\% \text{ S.T.}} \right) 100 \quad (15)$$

ANALISIS DE LABORATORIO PARA EL % DE NITROGENO

DIGESTION

- a) Se tomó una muestra de 0.1 gramos de mezcla previamente seca en una estufa a 60°C por una hora, y luego se trasladó a un balón de 30 ml.
- b) Luego se agregó 0.1 gramos de catalizador (Kel-Pack).
- c) Después se agregó 2 ml de H_2SO_4 al 95-97%
- d) Se destruyó la muestra por un periodo de dos a tres días aproximadamente.

aproximadamente.

DESTILACION

- a) Se coloca la muestra en el destilador dándole de 3 a 4 lavadas al balón que contiene la muestra.
- b) Luego se le agrega a la muestra a destilar 10 ml. de Na(OH) 50% V/V.
- c) Después se procede a calentar la muestra a una temperatura de 80°C.
- d) El destilado se recibe en un erlenmeyer de 125 ml conteniendo éste 8 ml de H_3BO_3 al 4% y 4 gotas de indicador, recibiendo 50 ml de destilado.

TITULACION

- a) Después de recibir el destilado, se procede a titular con H_2SO_4 0.025 N ó 0.1 N, dependiendo del contenido de nitrógeno./proteína, que la muestra posea.

ANALISIS PARA LA DETERMINACION DE MACRO Y MICRO NUTRIENTES COMO ELEMENTOS.

PREPARACION DE MUESTRAS

- a) De las cenizas recolectadas en los análisis anteriores; se pesó 0.01 gramos de muestra.

- b) Luego se digiere con 2.5 ml de HCL concentrado hasta llevarlo a sequedad.
- c) Se digiere nuevamente con 6.5 ml de solución, los cuales fueron 3 ml de HCL concentrado más 10 ml de agua hasta llegar a humo blanco.
- d) Se procede a filtrar con agua caliente, para la preparación de la solución madre en un volumétrico de 50ml y se afora en frío.
- e) Se hace la primera dilución para efectuar lecturas de macro y micro elementos.
- f) Se toma una alícuota de 2 ml de solución madre y,
- g) Luego se afora en un volumétrico de 50 ml con La_2O_3 en solución.

ANALISIS DE FOSFORO (P)

Para preparar por medio de dilución la determinación de fósforo; se realizó de la siguiente manera :

- a) Se toma una alícuota de 5 ml de solución madre y, luego se agregan 2 ml de una solución de metavanato de molibdato de amonio en una relación de 1:1.
- b) Para leer los resultados de fósforo (P) se llevó a cabo en un espectronic-20, cuya longitud de onda de trabajo es 420 cm y cuyos estándares a diferentes concentra

ciones se muestra en el CUADRO E1

CUADRO E1

ESTANDARES PARA DETERMINACION DE FOSFORO

CONCENTRACION	ABSORBANCIA (Å)
4 ppm	0.15
8 ppm	0.30
12 ppm	0.45
16 ppm	0.60
20 ppm	0.75

LECTURAS DE MACRO Y MICRO ELEMENTOS

- a) Para estos análisis se utilizó el Espectrofotómetro de absorción atómica.
- b) Luego se colocó en una absorbancia definida para cada elemento con la concentración en ppm, con la cual se calibra el espectrofotómetro para cada elemento.
- c) Se procede a continuación a colocar los estándares para tabular la curva.
- d) Se realizaron las tomas de lecturas correspondientes a cada muestra.

ANALISIS MICROBIOLOGICO

MARCHA ANALITICA PARA ASCARIS LUMBRICOIDE

- a) Se coloca, en un porta objeto, una muestra de estiércol de más o menos 0.1 gramo.

- b) Se agrega solución salina al 4%
- c) Se le coloca el cubreobjeto
- d) Se procede a observar al microscópio, con lente 10 X

APENDICE F

CUADRO F-1

SUSTRATOS DE ORIGEN VEGETAL COMO MEZCLA DE LECHUGA MAS
REPOLLO DE AFLUENTE PARA LOS DIGESTORES A, B Y C.

MEZCLA A, B Y C (LECHUGA + REPOLLO)						
DETERMINACION	CONTENIDO					
	DIG. 1A	DIG. 2A	DIG. 3A	DIG. 1B	DIG. 2B	DIG. 1C
HUMEDAD (% P/P)	92.8468	92.8704	92.8614	92.5818	91.9973	90.9099
S.T (% P/P)	7.1532	7.1296	7.1386	7.4182	8.0027	9.0911
S.V (% P/P)	99.1277	99.0897	99.1119	94.3477	95.2545	96.2279
CENIZAS (% P/P)	0.8723	0.9103	0.8881	5.6523	4.7455	3.7721

CUADRO F 2

SUSTRATOS DE ORIGEN HUMANO COMO MEZCLA DE HECES MAS ORINA
DE AFLUENTE PARA LOS DIGESTORES A, B Y C.

MEZCLA A, B Y C (HECES + ORINA)						
DETERMINACION	CONTENIDO					
	DIG. 1A	DIG. 2A	DIG. 3A	DIG. 1B	DIG. 2B	DIG. 1C
HUMEDAD (% P/P)	79.5413	79.5341	79.5441	79.2405	78.9904	81.0479
S.T (% P/P)	20.4587	20.4659	20.4559	20.7595	21.0096	18.9521
S.V (% P/P)	82.9170	83.1368	83.0768	84.1061	83.2976	86.7987
CENIZAS (% P/P)	17.0830	16.8632	16.9232	15.7929	16.7024	13.2013

APÉNDICE G

DENSIDAD DE MEZCLA

PROCEDIMIENTO

La determinación de la densidad de mezcla se realizó por medio de una jeringa descartable para extraer la muestra del sustrato, el desglose de los pasos desarrollados fueron los siguientes :

- a) Se utilizó una probeta graduada , la cual se taró y se pesó previamente antes de usarla para fines de medición, luego se anotó su peso inicial.
- b) Después se procedió a mezclar el sustrato para homogenizarlo y así obtener muestras representativas; a continuación, con una pequeña jeringa plástica descartable se succionó el sustrato (mezcla) del digestor, aproximadamente 10 ml.
- c) A continuación esta muestra recolectada se llevó a la balanza granataria y se anotó el peso de la muestra más la probeta y, se tomó su peso total.
- d) Luego por diferencia de pesos se encontró la masa de la muestra.
- e) Por último, conociendo la masa y el volumen se realizó el cálculo de llevar a cabo la relación entre esas dos variables, para poder encontrar la densidad de mezcla en unidades de (g /ml o g /cc).
- f) Las fórmulas y nomenclatura utilizadas fueron las siguientes :

$M = \text{Masa (g)}; V = \text{Volumen (ml)}; D = \text{Densidad (g/ml)}$

$\bar{D} = \text{Densidad Promedio } \bar{\bar{D}} = \text{Densidad Promedio de Promedios}$

$D = m/V$; Densidad es la relación de la masa con respecto al volumen, ecuación (16).

DIGESTORES "A" PRIMER CORRIDA PARA AFLUENTE

CUADRO G 1

DENSIDADES PARA LOS DIGESTORES "A", CON REFERENCIA A LA MEZCLA "A"

DIGESTORES	MASA (g)	VOL (ml)	DENSIDAD (g/ml)
1 "A"	8.7	9	0.9667
2 "A"	7.2	7.3	0.9863
3 "A"	9.7	9.9	0.9798
		PROMEDIO	0.9776

DIGESTORES "B" PRIMER CORRIDA PARA AFLUENTE

CUADRO G 2

DENSIDADES PARA LOS DIGESTORES "B", CON REFERENCIA A LA MEZCLA "B"

DIGESTORES	MASA (g)	VOL (ml)	DENSIDAD (g/ml)
1 "B"	9.8	10	0.9800
2 "B"	8.8	9	0.9795
3 "B"	6.8	7	0.9787
		PROMEDIO	0.9794



DIGESTORES "B" SEGUNDA CORRIDA PARA AFLUENTE
 Y DIGESTOR "C" PARA SU UNICA CORRIDA DE AFLUENTE

CUADRO G'3

DENSIDADES PARA LOS DIGESTORES " B " Y " C "; CON
 REFERENCIA A LAS MEZCLAS B Y C, RESPECTIVAMENTE.

DIGESTORES	MASA (g)	VOL (mL)	DENSIDAD (g /ml)
1 "B"	7.3	7.5	0.9733
2 "B"	7.4	7.6	0.9808
3 "C"	5.5	5.6	0.9821
		PROMEDIO	0.9787

DATO DE DENSIDAD PROMEDIO DE PROMEDIOS (\bar{D})

$$\bar{D} = 0.9786 \text{ aproximadamente} = 0.98 \text{ g /ml}$$

APENDICE H

VARIABLES DE CONTROL DEL PROCESO: pH Y TEMPERATURA (°C)

El pH, temperatura y el volumen acumulado de Biogás, fueron calculados al inicio, así como en el proceso y al final de la fermentación anaeróbica.

REPORTE DE VARIABLES DE CONTROL DEL PROCESO (T, pH Y VOLUMEN INICIAL Y FINAL DE BIOGAS) PARA LOS DIGESTORES "A", "B" Y "C"

MEZCLA "A"

a) MONTAJE DE DIGESTORES 1 "A", 2 "A" y 3 "A"

CUADRO H1

VARIABLE DE CONTROL DE LA MEZCLA "A", AL INICIO DEL PROCESO
DE FERMENTACION ANAEROBICA

DIA	T INICIAL (°C)	pH INICIAL	VOLUMEN ACUMULADO DE BIOGAS EN EL GASOMETRO		
			1 "A"	2 "A"	3 "A"
9/8/91	29.5	6.8	0 ml	-	-
12/8/91	29.5	6.8	0 ml	0 ml	-
15/8/91	29.5	6.8	0 ml	0 ml	0 ml

b) PROCESO DE DIGESTORES 1 "A", 2 "A", y 3 "A", se llevó a cabo como lo muestra el Cuadro H2.

CUADRO H 2
 VOLUMENES ACUMULADOS DE BIOGAS EN EL
 GASOMETRO, MEZCLA " A " (ml).

DIA	T PROCESO (°C).	pH PROCESO	VOLUMEN AGUA DEPOSITADA EN RECOLECTOR- DE LIQUIDO (ml).		
			1 "A"	2 "A"	3 "A"
10/8/91	29.5	6.8	0	-	-
11/8/91	"	"	0	-	-
12/8/91	"	"	0	0	-
13/8/91	"	"	280	0	-
14/8/91	"	"	300	300	-
15/8/91	"	"	400	450	-
16/8/91	"	"	500	460	-
17/8/91	"	"	525	470	-
18/8/91	"	"	540	550	350
19/8/91	29.4	6.7	555	552	490
20/8/91	"	"	600	555	495
21/8/91	29.3	"	750	-	870
22/8/91	"	"	1800	610	1300
23/8/91	"	"	2000	755	1800
24/8/91	"	"	2300	1700	2350
25/8/91	"	"	2650	1950	2350
26/8/91	"	6.5	2900	2350	2800
27/8/91	"	"	3025	2500	2800
28/8/91	"	"	3025	2755	2800
29/8/91	"	"	3025	3125	2800
2/9/91	"	6.8	3025	3125	2800
4/9/91	"	6.9	3025	3150	2900
6/9/91	"	"	3025	3150	2900
9/9/91	"	6.8	3025	3150	2900
10/9/91	"	6.9	3025	3150	3000
11/9/91	"	6.8	3050	3150	3000
14/9/91	"	"	3050	3175	3000
17/9/91	"	6.9	3050	3175	3000

c) ETAPA FINAL DE LA DIGESTION ANAEROBICA DE LA MEZCLA "A"

CUADRO H 3
 VARIABLES DE CONTROL DE LA MEZCLA "A", AL FINAL DEL PROCESO
 DE FERMENTACION ANAEROBICA

DIA	T AMBIENTE	pH FINAL	VOLUMEN AGUA DEPOSITADO EN EL RECOLECTOR DE LIQUIDO (ml).		
			DIGESTOR		
			1 "A"	2 "A"	3 "A"
11/9/91	29.3	6.8	3050	-	-
10/9/91	"	6.9	-	-	3000
17/9/91	"	"	'	3175	-

- MEZCLAS " B " y " C "

a) MONTAJE DIGESTORES 1 "B", 2 "B" y 1 "C"

CUADRO H 4
 VARIABLES DE CONTROL DE LAS MEZCLAS "B" Y "C" AL INICIO DEL PROCESO
 DE FERMENTACION ANAEROBICA.

DIA	T INICIAL	pH INICIAL	VOLUMEN AGUA DEPOSITADO EN EL RECOLECTOR DE LIQUIDO (ml).		
			DIGESTOR		
			1 "B"	2 "B"	1 "C"
31/10/91	28	6.5	0	0	0

b) PROCESO DE DIGESTORES 1 "B", 2 "B" y 1 "C", se llevó a cabo como lo demuestra el CUADRO H5

CUADRO H5
 VOLUMENES ACUMULADOS DE BIOGAS EN EL GASOMETRO
 MEZCLAS B Y C

DIA	T PROCESO (°C)	pH PROCESO	VOLUMEN LIQUIDO DEPOSITADO EN EL RECOLECTOR DE LIQUIDO VACIO (ml).		
			1 "B"	2 "B"	1 "C"
4/11/91	30	6.9	0	0	0
7/11/91	29	"	0	0	0
11/11/91	30	7.0	0	0	0
15/11/91	28	6.9	0	0	0
18/11/91	30	6.8	0	0	0
21/11/91	29	7.0	0	0	0
25/11/91	27	6.9	0	0	0
28/11/91	30	6.8	30	55	80
2/12/91	29	6.9	45	65	100
7/12/91	"	"	75	90	150
11/12/91	28	6.7	100	125	175
16/12/91	"	6.6	400	400	390
19/12/91	29	6.5	450	425	450
22/12/91	30	6.6	500	550	550
24/12/91	"	6.7	600	600	650
28/12/91	29	6.6	650	625	675
30/12/91	30	6.5	765	650	700
5/01/92	30	6.7	800	750	800

c) ETAPA FINAL DE LA DIGESTION ANAEROBICA DE LAS MEZCLAS B Y C

CUADRO H6
 VARIABLES DE CONTROL DE MEZCLAS "B" Y "C" AL FINAL DEL PROCESO DE FERMENTACION
 ANAEROBICA

DIA	T AMBIENTE	pH FINAL	VOLUMEN LIQUIDO DEPOSITADO EN EL RECO LECTOR DE LIQUIDO VACIO (ml)		
			1 "B"	2 "B"	1 "C"
15/01/92	30	6.8	800	750	800

VOLUMEN DE BIOGAS, RECOLECTADO EN EL GASOMETRO DURANTE LA FERMENTACION ANAEROBICA DE LA MEZCLA "A" (ml)

DIA	VOLUMEN DE BIOGAS EN GASOMETRO		
	MEZCLA 1 "A"	MEZCLA 2 "A"	MEZCLA 3 "A"
0	0	-	-
1	0	-	-
2	0	-	-
3	0	0	-
4	280	0	-
5	300	300	-
6	400	450	0
7	500	460	0
8	525	470	350
9	540	550	375
10	555	552	490
11	600	555	495
12	750	-	870
13	1800	610	1300
14	2000	755	1800
15	2300	1700	2350
16	2650	1950	2350
17	2900	2350	2800
18	3025	2500	2800
19	3025	2755	2800
20	3025	3125	2800
23	3025	3125	2900
25	3025	3150	2900
27	3025	3150	2900
31	3050	3150	3000
34	2800	2700	3000
36	1600	2700	2800
39	1600	2700	2800
40	200	600	400

CUADRO H8

VOLUMEN DE BIOGAS, RECOLECTADO EN EL GASOMETRO DURANTE LA FERMENTACION ANAEROBICA DE LAS MEZCLAS "B" Y "C" (ml)

DIA	VOLUMEN DE BIOGAS EN EL GASOMETRO		
	MEZCLA 1 "A"	MEZCLA 2 "A"	MEZCLA "C"
0	0	0	0
4	0	0	0
7	0	0	0
11	0	0	0
15	0	0	0
18	0	0	0
21	0	0	0
25	0	0	0
28	30	55	80
32	45	65	100
37	75	90	150
41	100	125	175
46	400	400	390
49	450	425	450
52	500	550	550
54	600	600	650
58	650	625	675
60	675	650	700
66	800	750	800
68	800	750	800
69	800	750	-
70	800	-	-
72	-	-	640
74	730	-	-
76	730	540	-
78	730	-	-
80	440	400	240

CUADRO H 9

RENDIMIENTO (L/Día/Kg S.T. INICIALES) DE MEZCLA "A" DURANTE

LA FERMENTACION ANAEROBICA

RENDIMIENTO (L/Día/Kg S.T. INICIALES)		LA FERMENTACION ANAEROBICA	
DIA	MEZCLA 1 "A"	MEZCLA 2 "A"	MEZCLA 3 "A"
0	0	-	-
1	0	-	-
2	0	-	-
3	0	0	-
4-+	1.11	0	-
5	1.19	1.19	-
6-+	1.59	1.79	0
7	1.99	1.83	0
8	2.08	1.83	1.39
9	2.14	2.18	1.49
10	2.20	2.19	1.95
11	2.38	2.20	1.97
12	2.98	-	3.46
13	7.16	2.46	5.17
14	7.96	3.00	7.16
15	9.15	6.76	9.35
16	10.54	7.76	-0.35
17	11.54	9.31	11.10
18	11.94	10.96	11.10
19	11.94	12.44	11.10
20	11.94	12.44	11.10
23	11.94	12.53	11.10
25	11.94	12.53	11.54
27	11.94	12.53	11.54
32	11.94	12.53	11.54
33	11.94	12.53	11.94
34	11.94	12.63	11.94
37	11.94	12.63	11.94
40	11.94	12.63	11.94

NOTA : + Significa inicio del montaje del digestor como cero día.

CUADRO H-10

RENDIMIENTO (L/Día/Kg S.T. INICIALES) DE MEZCLAS "B" Y "C" DURANTE LA
FERMENTACION ANAEROBICA

DIA	RENDIMIENTO (L/Día/ Kg. S.T. INICIALES)		
	MEZCLA 1 "B"	MEZCLA 2 "B"	MEZCLA 1 "C"
0	0	0	0
4	0	0	0
7	0	0	0
11	0	0	0
15	0	0	0
18	0	0	0
21	0	0	0
25	0	0	0
28	0.16	0.31	0.74
32	0.25	0.36	0.92
37	0.42	0.50	1.39
41	0.56	0.70	1.62
46	2.25	2.25	3.62
46	2.53	2.39	4.17
49	2.81	3.10	5.10
52	3.38	3.38	6.03
54	3.66	3.52	6.26
58	3.80	3.66	6.49
60	4.50	4.22	7.42
66			

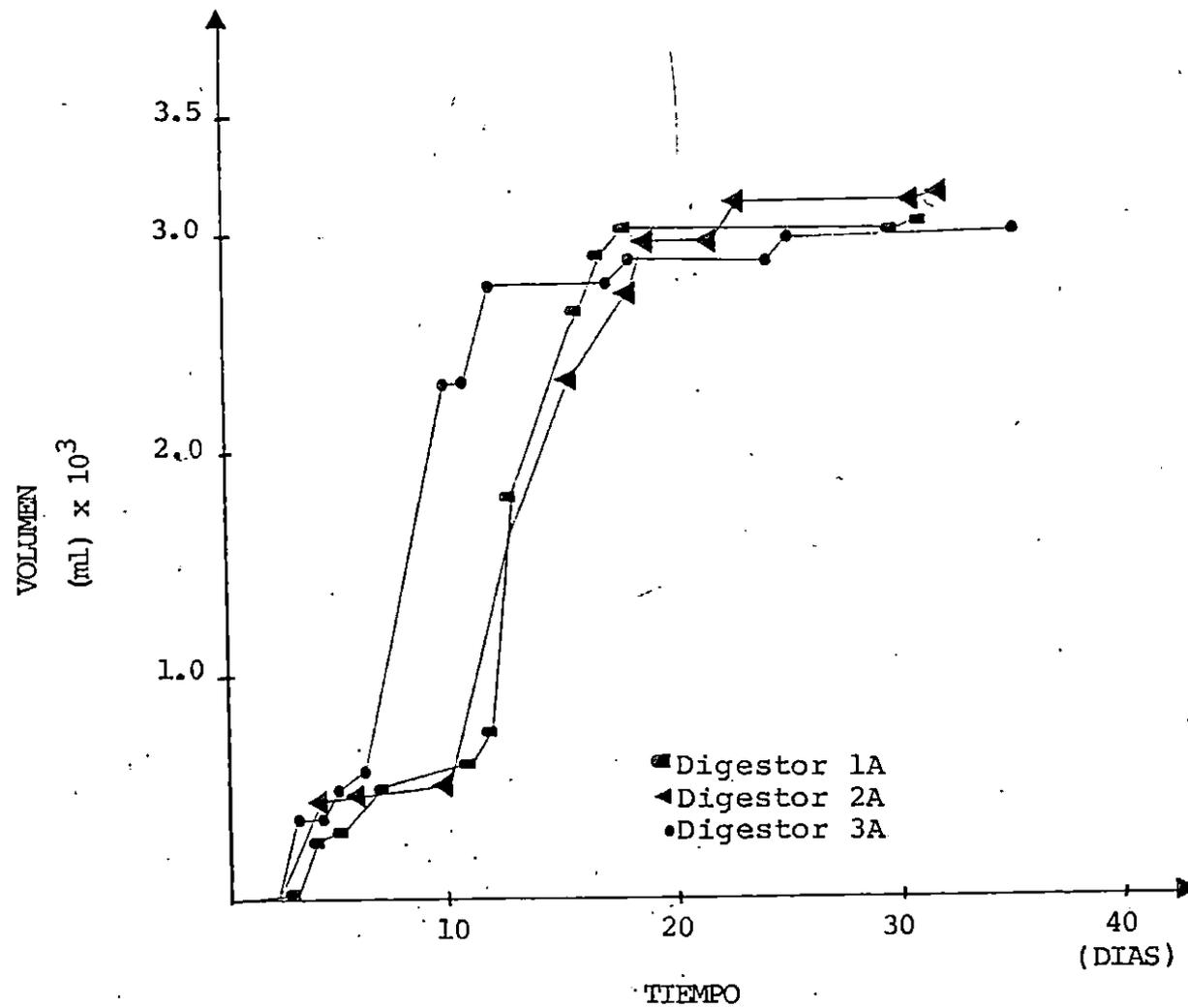


FIG.H.1 CURVA DE VOLUMEN DE BIOGAS ACUMULADO EN EL TRANCURSO DE LA OPERACION DE FERMENTACION ANAEROBICA (PARA EL DIGESTOR "A").

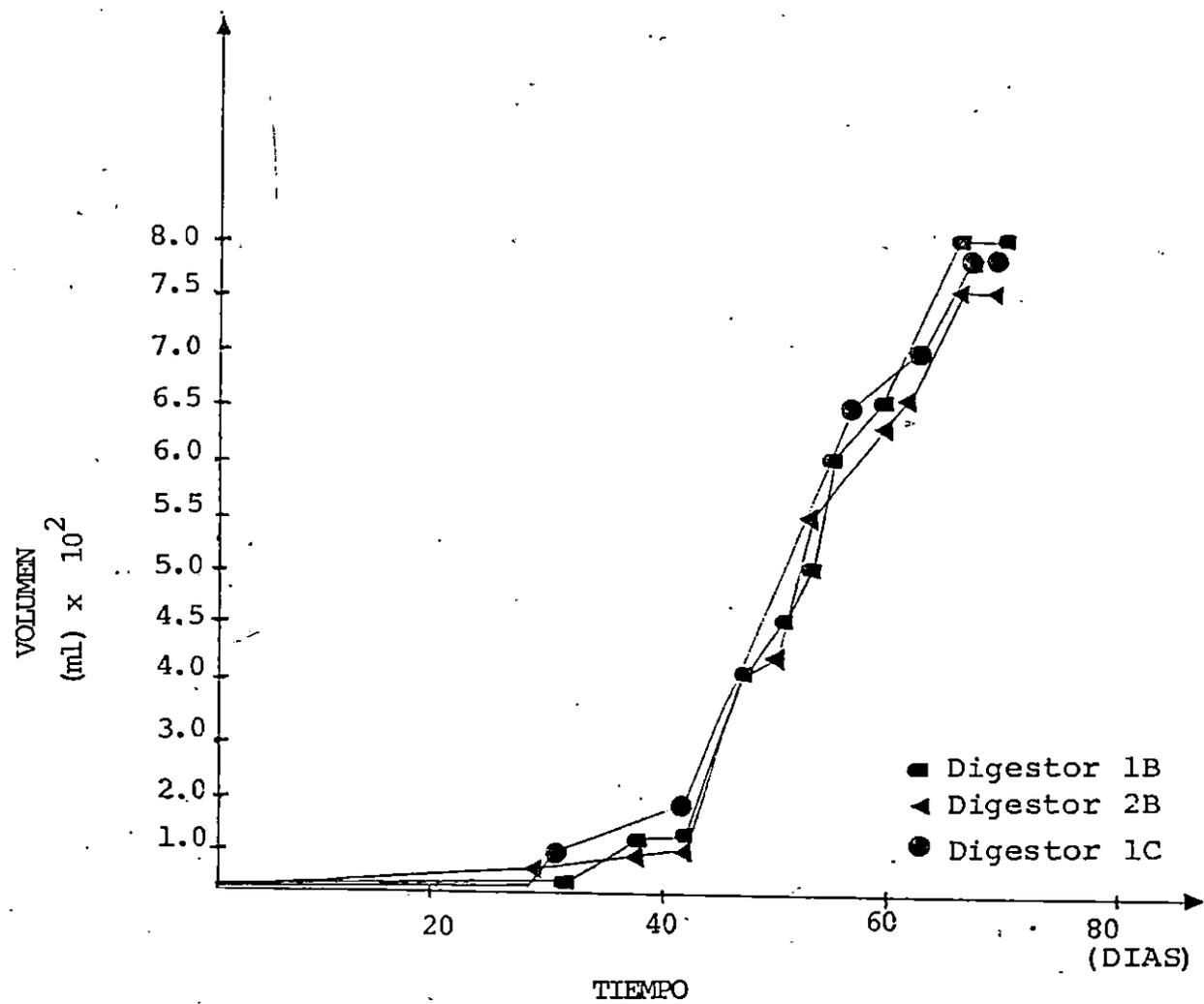


FIG.H 2 CURVAS DE VOLUMEN DE BIOGAS ACUMULADO EN EL TRANCURSO DE LA ÓPERACION DE FERMENTACION ANAEROBICA (PARA DIGESTORES "B" Y "C").

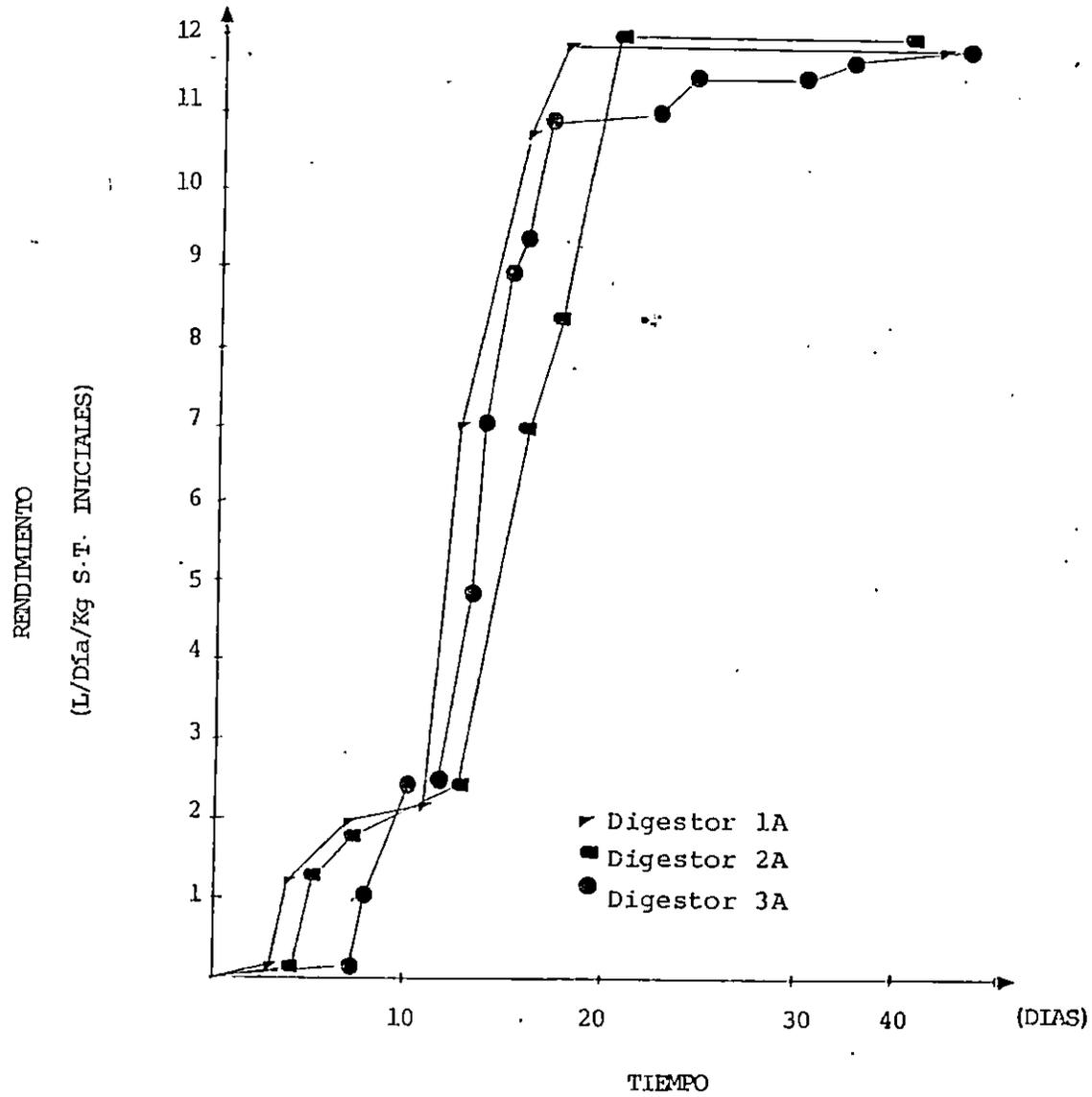


FIG. H3. CURVA DE RENDIMIENTO DE BIOGAS DURANTE LA OPERACION DE FERMENTACION ANAEROBICA (PARA DIGESTOR "A")

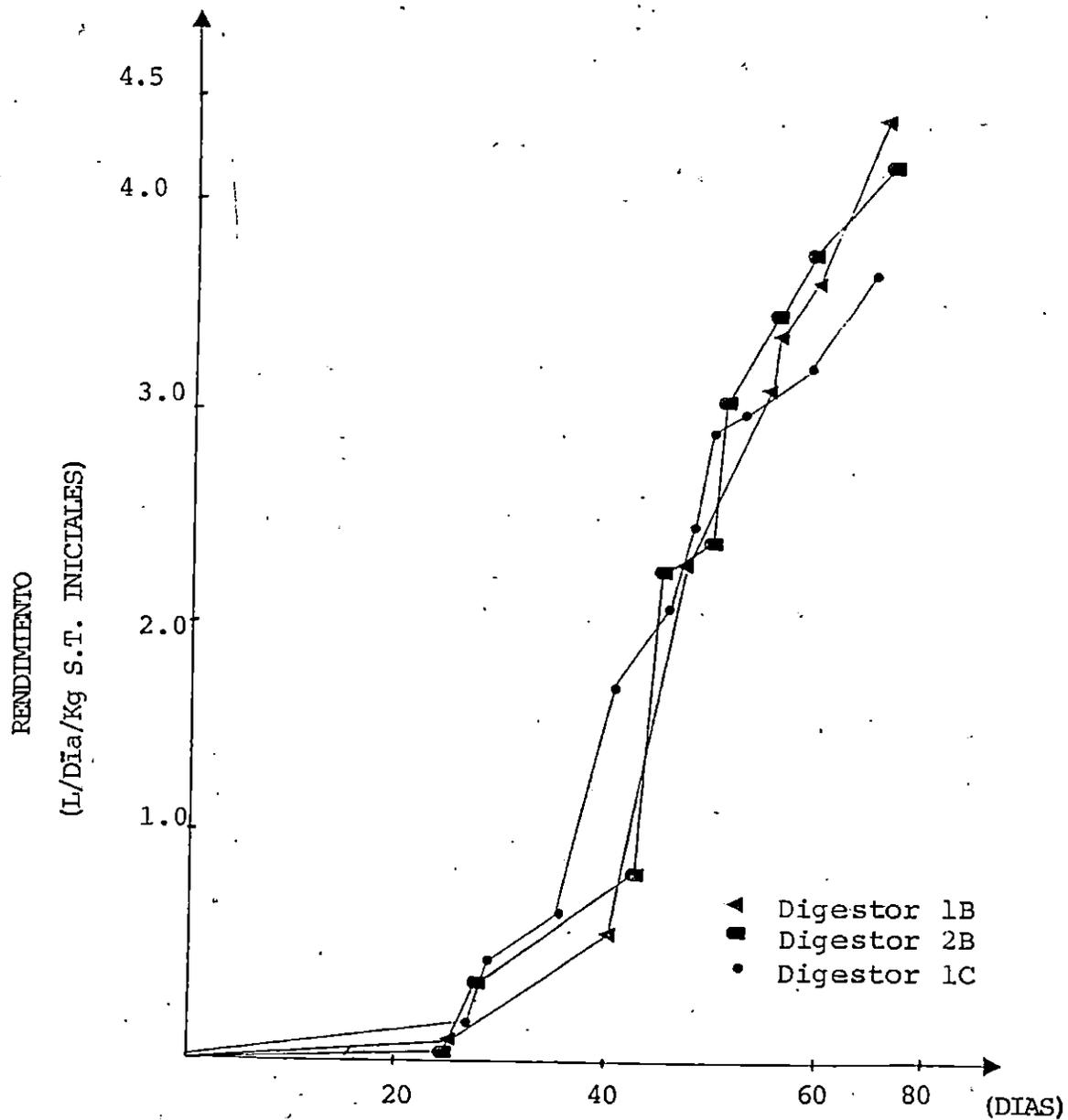


FIGURA H4. CURVA DE RENDIMIENTO DE BIOGAS, DURANTE LA OPERACION DE FERMENTACION ANAEROBICA (PARA DIGESTORES "B" Y "C")

A P E N D I C E I

ANALISIS ESTADISTICO DE %H, %S.T., %S.V., %CENIZAS DE LAS MEZCLAS A,B,y C

Los análisis estadísticos de %H, %S.T. %S.V. y % CENIZAS,son presentados en los Cuadros I1,I2,I3,I4 é I5 para las mezclas A,B y C a la entrada y salida del proceso de fermentación anaeróbica; éstos presentan: media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación.

CUADRO I-1

ANALISIS ESTADISTICO DE %H, %S.T., %S.V. Y % CENIZAS PARA LA MEZCLA "A"
(AFLUENTE)

REPETICIONES	DIGESTORES (% H)			ESTADISTICA
	1 "A"	2 "A"	3 "A"	
1	81.4585	81.2516	82.2496	$\bar{X} = 81.7541$
2	82.7595	81.2611	81.8976	$\sigma = 0.5049$
3	81.6398	81.3720	81.8976	C.V = 0.6176
	DIGESTORES (% S.T)			ESTADISTICA
	1 "A"	2 "A"	3 "A"	
1	18.5415	18.7484	17.7504	$\bar{X} = 18.2244$
2	17.2405	18.3789	18.2693	$\sigma = 0.4730$
3	18.3602	18.6280	18.1024	C.V = 0.5955
	DIGESTORES (% S.V)			ESTADISTICA
	1 "A"	2 "A"	3 "A"	
1	63.7997	62.5797	63.2771	$\bar{X} = 63.5288$
2	63.9983	63.7161	63.6517	$\sigma = 0.4419$
3	63.3170	63.4419	63.9776	C.V = 0.6955
	DIGESTORES (% CENIZAS)			ESTADISTICA
	1 "A"	2 "A"	3 "A"	
1	36.2002	37.4203	36.7229	$\bar{X} = 36.4712$
2	36.0017	36.2839	36.3483	$\sigma = 0.4419$
3	36.6830	36.5581	36.0224	C.V = 1.2116

CUADRO I 2

ANALISIS ESTADISTICO DE %H, %S.T., %S.V. Y % CENIZAS PARA LA MEZCLA "A"
(EFLUENTE)

REPETICIONES	DIGESTORES (% H)			ESTADISTICA
	1 "A"	2 "A"	3 "A"	
1	92.2050	93.6797	93.7600	$\bar{X} = 93.1139$
2	92.9910	92.2016	93.2307	$\sigma = 0.4543$
3	93.0179	92.9819	92.9572	%C.V.= 0.4879
	DIGESTORES (% S.T.)			ESTADISTICA
	1 "A"	2 "A"	3 "A"	
1	6.7950	6.3203	6.2400	$\bar{X} = 6.7750$
2	7.0090	6.7984	6.7693	$\sigma = 0.3005$
3	6.9821	7.0181	7.0428	%C.V.= 4.4354
	DIGESTORES (% S.V.)			ESTADISTICA
	1 "A"	2 "A"	3 "A"	
1	62.8813	62.2813	62.6822	$\bar{X} = 62.7380$
2	62.7823	62.6803	62.9720	$\sigma = 0.3916$
3	62.0642	62.8823	63.4161	%C.V.= 0.6242
	DIGESTORES (% CENIZAS)			ESTADISTICA
	1 "A"	2 "A"	3 "A"	
1	37.1187	37.7187	37.3178	$\bar{X} = 37.2620$
2	37.2177	37.3197	37.0280	$\sigma = 0.3916$
3	37.9358	37.1177	36.5839	%C.V.= 1.0510

CUADRO I 3

ANALISIS ESTADISTICO DE %H, %S.T., %S.V., Y % CENIZAS, PARA LA MEZCLA "B"
(AFLUENTE)

REPETICIONES	(% H) DIGESTORES		ESTADISTICA
	1 "B"	2 "B"	
1	87.3779	88.0783	$\bar{X} = 87.2645$
2	87.6770	87.1412	$\sigma = 0.5367$
3	86.2414	87.4363	%C.V= 0.6150
4	87.1621	87.0020	
	(% S.T.) DIGESTORES		ESTADISTICA
	1 "B"	2 "B"	
1	12.6221	11.9217	$\bar{X} = 12.7355$
2	12.3230	12.8588	$\sigma = 0.5367$
3	13.7586	12.5637	%C.V= 4.2140
4	12.8379	12.9980	
	(% S.V.) DIGESTORES		ESTADISTICA
	1 "B"	2 "B"	
1	85.4010	86.0249	$\bar{X} = 85.3629$
2	85.0565	85.3416	$\sigma = 0.2950$
3	85.3016	85.3030	%C.V= 0.3455
4	85.3716	85.1030	
	(% CENIZAS) DIGESTORES		ESTADISTICA
	1 "B"	2 "B"	
1	14.5990	13.9751	$\bar{X} = 14.6371$
2	14.9435	14.6584	$\sigma = 0.2950$
3	14.6984	14.6970	%C.V= 2.0151
4	14.6284	14.8970	

CUADRO I 4

ANALISIS ESTADISTICO DE %H, %S.T., %S.V. Y % CENIZAS PARA LA MEZCLA "B"
(EFLUENTE)

REPETICIONES	DIGESTORES (% H)		ESTADISTICA
	1 "B"	2 "B"	
1	93.9910	94.3060	$\bar{X} = 94.2321$ $= 0.2754$ %C.V.= 0.2922
2	94.8570	93.9992	
3	94.2060	94.1221	
4	94.1338	94.2417	
	DIGESTORES (% S.T.)		ESTADISTICA
	1 "B"	2 "B"	
1	6.0090	5.6940	$\bar{X} = 5.7679$ $= 0.2754$ %C.V.= 4.7745
2	5.1430	6.0008	
3	5.7940	5.8779	
4	5.8662	5.7583	
	DIGESTORES (% S.V.)		ESTADISTICA
	1 "B"	2 "B"	
1	79.3030	79.1571	$\bar{X} = 79.2596$ $= 0.1238$ %C.V.= 0.1562
2	79.3868	79.2560	
3	79.1097	79.4080	
4	79.1012	79.3550	
	DIGESTORES (% CENIZAS)		ESTADISTICA
	1 "B"	2 "B"	
1	20.6970	20.8429	$\bar{X} = 20.7404$ $= 0.1238$ %C.V.= 0.5969
2	20.6132	20.7440	
3	20.8903	20.5920	
4	20.8988	20.6450	

CUADRO I 5
ANALISIS ESTADISTICO DE %H, %S.T., %S.V. Y % CENIZAS, PARA LA MEZCLA "C"
(AFLUENTE Y EFLUENTE)

DIGESTOR "C" AFLUENTE				
REPLICAS	% H.	% S.T.	% S.V.	% CENIZAS
1	92.3968	7.6032	38.0641	61.9359
2	92.3828	7.6372	37.5885	62.4115
3	92.1617	7.8383	38.4233	64.5767
\bar{X}	92.3071	7.6929	38.0253	61.9747
Error Típico Standar	0.1271	0.1271	0.4188	0.4187
Precisión % C.V.	0.1377	1.6517	1.1012	0.6757
DIGESTOR "C" EFLUENTE				
REPLICAS	% H	% S.T.	% S.V.	% CENIZAS
1	95.3040	4.6960	35.4060	64.5940
2	95.1043	4.8959	35.3507	64.6493
3	95.3552	4.6448	35.3452	64.6548
\bar{X}	95.2545	4.7455	35.3673	64.6327
Error Típico Stándar	0.1326	0.1327	0.0336	0.0336
Precisión % C.V.	0.1392	2.7960	0.0951	0.0520

