



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL COMPOST A PARTIR DE LA GALLINAZA,
CAÑA DE AZÚCAR Y SUELO FRANCO LIMOSO POR CODIGESTIÓN ANAERÓBICA PARA
LA OBTENCIÓN DE ABONO ORGÁNICO A UTILIZARSE EN EL SECTOR AGRÍCOLA**

Juan Roberto Pierri Palma

Asesorado por el MSc. Ing. Nicolás de Jesús Guzmán Sáenz

Guatemala, junio de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL COMPOST A PARTIR DE LA GALLINAZA,
CAÑA DE AZÚCAR Y SUELO FRANCO LIMOSO POR CODIGESTIÓN ANAERÓBICA PARA
LA OBTENCIÓN DE ABONO ORGÁNICO A UTILIZARSE EN EL SECTOR AGRÍCOLA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JUAN ROBERTO PIERRI PALMA

ASESORADO POR EL MSC. ING. NICOLÁS DE JESÚS GUZMÁN SÁENZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO AMBIENTAL

GUATEMALA, JUNIO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL I	
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Daunno Walther Chew Dávila
EXAMINADORA	Inga. Casta Petrona Zeceña Zeceña
EXAMINADOR	Ing. Jaime Domingo Carranza González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL COMPOST A PARTIR DE LA GALLINAZA, CAÑA DE AZÚCAR Y SUELO FRANCO LIMOSO POR CODIGESTIÓN ANAERÓBICA PARA LA OBTENCIÓN DE ABONO ORGÁNICO A UTILIZARSE EN EL SECTOR AGRÍCOLA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 23 de marzo de 2015.


Juan Roberto Pierri Palma

Guatemala, abril de 2015

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
Director de la Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Monzón:

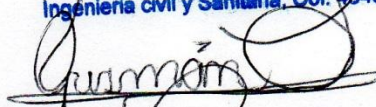
Atentamente me dirijo a usted para informarle que he revisado el informe titulado: **EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL COMPOST A PARTIR DE LA GALLINAZA, CAÑA DE AZÚCAR Y SUELO FRANCO LIMOSO POR CODIGESTIÓN ANAERÓBICA PARA LA OBTENCIÓN DE ABONO ORGÁNICO A UTILIZARSE EN EL SECTOR AGRÍCOLA**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Ambiental **Juan Roberto Pierri Palma**, carné número 200915163.

Por lo cual, después de haber realizado la revisión del respectivo informe final y de haber realizado las correcciones pertinentes, considero que llena los requisitos para su aprobación.

Agradeciendo la atención a la presente,

Atentamente,

MSc. Nicolás Guzmán
Ingeniería civil y Sanitaria, Col. 4540



Nicolás De Jesús Guzmán Sáenz
MSc. Ingeniero Civil, Colegiado No. 4540



Guatemala, 11 de mayo de 2015.
Ref. EIQ.TG-IF.022.2015.

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **057-2014** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Juan Roberto Pierri Palma**.
Identificado con número de carné: **2009-15163**.
Previo a optar al título de **INGENIERO AMBIENTAL**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL COMPOST A PARTIR DE LA GALLINAZA, CAÑA DE AZÚCAR Y SUELO FRANCO LIMOSO POR CODIGESTIÓN ANAERÓBICA PARA LA OBTENCIÓN DE ABONO ORGÁNICO A UTILIZARSE EN EL SECTOR AGRÍCOLA

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Civil: **Nicolás De Jesús Guzmán Sáenz**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

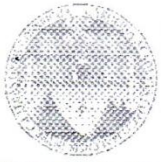
"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Inga. Casta Zeceña Zeceña
COORDINADORA DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.081.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **JUAN ROBERTO PIERRI PALMA** titulado: **"EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL COMPOST A PARTIR DE LA GALLINAZA, CAÑA DE AZÚCAR Y SUELO FRANCO LIMOSO POR CODIGESTIÓN ANAERÓBICA PARA LA OBTENCIÓN DE ABONO ORGÁNICO A UTILIZARSE EN EL SECTOR AGRÍCOLA"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Victor Manuel Monzon

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
 DIRECTOR
 Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, junio 2015

Cc: Archivo
 VMMV/ale





DTG. 284.2015

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL COMPOST A PARTIR DE LA GALLINAZA, CAÑA DE AZÚCAR Y SUELO LIMOSO POR CODIGESTIÓN ANAERÓBICA PARA LA OBTENCIÓN DE ABONO ORGÁNICO A UTILIZARSE EN EL SECTOR AGRÍCOLA**, presentado por el estudiante universitario: **Juan Roberto Pierri Palma**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Angel Roberto Sic García
Decano

Guatemala, 22 de junio de 2015

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Fuente de sabiduría, amor y misericordia, siendo mi guía, mi luz y esperanza desde que nací.
- Mis padres** Roberto Otoniel Pierri Ventura e Ileana Maribel Palma Avalos de Pierri, porque es incontable todo lo que me han dado y espero que esto sea parte de su alegría.
- Mi hermana** Ileana Felicia Pierri Palma, deseando que mi logro sea parte de su inspiración para alcanzar todas sus metas.
- Mis abuelos** Juan Alberto Palma Vásquez, Rosaura Avalos Donado, Juan Arturo Pierri Soria (q. e. p. d.) y Magdalena Ventura Revolorio (q. e. p. d.). Personas que han marcado mi vida de una u otra manera.
- Mis tíos** Elsa Dalila, Vilma Yolanda y Oscar Efraín Palma Avalos y Rosmunda, Juan Arturo y Luis Ernesto Pierri López. Por su cariño y aprecio sincero.

Mis primos

Porque esta meta les sirva como incentivo para luchar por sus sueños.

AGRADECIMIENTOS A:

La vida	Porque es el sueño que cada día se hace realidad.
Mis amigos	Porque han sido mi motor y mi fuente de alegría; por todos los gratos momentos que hemos vivido, gracias.
Mi asesor	Ing. Nicolás de Jesús Guzmán Sáenz, por el apoyo y perseverancia en este trabajo de graduación.
Mis profesores	Por ser guías del conocimiento y experiencia.
Facultad de Ingeniería	Por la adquisición de conocimiento técnico y científico.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Alma máter y segunda casa que me inspiró a culminar esta carrera.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. MARCO CONCEPTUAL	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación	2
1.3. Determinación del problema	3
1.3.1. Definición	3
1.3.2. Alcances y delimitaciones.....	3
1.3.2.1. Alcances	3
1.3.2.2. Delimitaciones.....	4
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Compostaje de la gallinaza en su uso como abono orgánico.....	5
2.1.1. Factores que afectan el proceso de compostaje	6
2.1.1.1. Temperatura	7
2.1.1.2. Humedad	8
2.1.1.3. Potencial de hidrógeno	10
2.1.1.4. Población microbiana.....	10

	2.1.1.5.	Relación del carbono y nitrógeno.....	10
2.2.		Identificación de los impactos ambientales en el sector avícola.....	11
2.3.		Emisiones a la atmósfera.....	13
	2.3.1.	Caracterización de las emisiones a la atmósfera	14
		2.3.1.1. Amoníaco (NH ₃).....	15
		2.3.1.2. Óxido nitroso (N ₂ O).....	17
		2.3.1.3. Metano (CH ₄).....	17
		2.3.1.4. Dióxido de carbono (CO ₂).....	18
		2.3.1.5. Olor	19
		2.3.1.6. Partículas.....	20
2.4.		Impacto ambiental sobre el suelo	21
2.5.		Impacto ambiental sobre el agua	23
	2.5.1.	Escorrentías a las aguas superficiales	24
	2.5.2.	Lixiviaciones a las aguas subterráneas	25
2.6.		Deyecciones	26
	2.6.1.	Niveles de excreción de gallinaza y sus características	26
2.7.		Etapas de la digestión anaeróbica.....	27
	2.7.1.	Etapa de hidrólisis	29
	2.7.2.	Etapa acidogénica	29
	2.7.3.	Etapa acetogénica	30
	2.7.4.	Etapa metanogénica.....	32
	2.7.5.	Conversión de acetato en metano por las archaeas metanogénicas acetoclásticas	33
	2.7.6.	Formación de metano a partir del CO ₂ y H ₂ por las archaeas homoacetogénicas	34
3.		MARCO METODOLÓGICO	37

3.1.	Variables	37
3.1.1.	Variables dependientes	37
3.1.2.	Variables independientes	38
3.2.	Delimitación de campo de estudio	38
3.3.	Recursos humanos disponibles	39
3.4.	Recursos materiales disponibles	39
3.4.1.	Materiales y materia prima	40
3.4.2.	Equipos y cristalería	40
3.4.3.	Reactivos	41
3.5.	Técnica cuantitativa y cualitativa.....	41
3.5.1.	Diseño general	41
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	43
3.6.1.	Cálculo del volumen del digestor	43
3.6.2.	Cálculo del volumen de la cámara de fermentación	44
3.6.3.	Cálculo del volumen de la cúpula	44
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	45
3.8.	Análisis estadístico	46
4.	RESULTADOS.....	49
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	55
	CONCLUSIONES	71
	RECOMENDACIONES.....	73
	BIBLIOGRAFÍA.....	75
	APÉNDICE.....	77
	ANEXOS.....	79

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Etapas del compostaje respecto de la temperatura	7
2.	Variación de la humedad respecto de la temperatura y el tiempo	9
3.	Ciclo del nitrógeno.....	16
4.	Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica de materiales poliméricos	28
5.	Diagrama de flujo del proceso.....	42
6.	Curva del pH respecto del tiempo durante el proceso de compostaje anaerobio	52
7.	Curva de la temperatura respecto del tiempo durante el proceso de compostaje anaerobio	53
8.	Nitrógeno orgánico después de finalizar el tiempo de retención	53

TABLAS

I.	Rangos óptimos de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de un compost de buena calidad para su uso como abono orgánico.....	6
II.	Impacto ambiental en los sistemas de producción de una industria avícola	12
III.	Elementos contaminantes emitidos a la atmósfera durante las diversas etapas del proceso productivo.....	14
IV.	Resultados de los análisis de las muestras del compost a los 7 días de haber finalizado el tiempo de retención	49

V.	Resultados de los análisis de las muestras del compost a los 14 días de haber finalizado el tiempo de retención	50
VI.	Resultados de los análisis de las muestras del compost a los 21 días de haber finalizado el tiempo de retención	50
VII.	Resultados de los análisis de las muestras del compost a los 28 días de haber finalizado el tiempo de retención	51
VIII.	Resultados de los análisis de las muestras del compost a los 35 días de haber finalizado el tiempo de retención	51
IX.	Relación carbono y el nitrógeno total	52
X.	Cantidad de nitrógeno orgánico después de finalizar el tiempo de retención.....	54

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H_2SO_4	Ácido sulfúrico
NH_3	Amoníaco
COV	Compuestos orgánicos volátiles
C_a	Concentración de amonio en la muestra (ppm)
C_{MO}	Contenido de materia orgánica (g)
CO_2	Dióxido de carbono
EC	<i>Escherichia coli</i>
NaOH	Hidróxido de sodio
H	Humedad
μ	Media muestral
CH_4	Metano
N_2O	Monóxido de dinitrógeno
NMP	Número más probable
NO_x	Óxido de nitrógeno con número de valencia x
pH	Potencial de hidrógeno
Se	Selenio
$CuSO_4$	Sulfato de cobre
H_2S	Sulfuro de hidrógeno
K_2SO_4	Sulfato de potasio

GLOSARIO

Anaerobio	Organismo que puede vivir y desarrollarse en ausencia completa o casi completa de oxígeno molecular libre.
Biodigestor	Es una cámara hermética donde se acumulan residuos orgánicos (vegetales o excremento de animales) mediante un proceso natural de bacterias (anaeróbicas) presentes en los excrementos que descomponen el material contenido en metano y en fertilizante.
Biol	Efluente líquido proveniente de la descomposición en condiciones anaeróbicas de la materia orgánica, que se realiza en depósitos cerrados o biodigestores.
Codigestión	Tratamiento conjunto de dos o más residuos; es un proceso fermentativo desarrollado en ausencia de oxígeno en el que la materia orgánica biodegradable se descompone por acción de bacterias desde sus formas más complejas (carbohidratos, proteínas, lípidos), hasta otras formas más sencillas, incluyendo una mezcla de gases conocida como biogás.
Compostaje	Es una tecnología que permite transformar residuos y subproductos orgánicos en materiales biológicamente estables que pueden utilizarse como enmendantes y/o

abonos del suelo y como sustratos para cultivo sin suelo.

Escherichia coli Es una bacteria habitual en el intestino del ser humano y de otros animales de sangre caliente.

Espectrofotómetro Es un instrumento que tiene la capacidad de manejar un haz de radiación electromagnética (REM), comúnmente denominado luz, separándolo para facilitar la identificación, calificación y cuantificación de su energía. Su eficiencia, resolución, sensibilidad y rango espectral, dependerán de las variables de diseño y de la selección de los componentes ópticos que lo conforman.

Gallinaza Excremento o estiércol de las gallinas.

Humus Es la materia formada en el suelo por la descomposición de los residuos que proceden de los animales y plantas, bajo la acción combinada del aire, agua y de los microorganismos del suelo.

Lixiviado En el proceso de transformación de los restos en compost; la materia orgánica se degrada formando un fertilizante líquido orgánico denominado lixiviado. La humedad de la materia orgánica es el principal factor que acelera la generación de lixiviados.

Materia orgánica	Está formada por moléculas fabricadas por los seres vivos. Son moléculas hechas a base de carbono; suelen ser moléculas grandes, complejas y muy diversas, como las proteínas, hidratos de carbono o glúcidos, grasas o ácidos nucleicos.
Método Kjeldahl	Es uno de los análisis químicos más universalmente empleados para la determinación de nitrógeno en muestras sólidas, pues se adapta con facilidad a gran número de muestras, y constituye un método de referencia para determinar el nitrógeno total en materiales biológicos.
Nitrógeno orgánico	Diferencia entre el contenido de nitrógeno de una muestra, deducido de la determinación del nitrógeno Kjeldahl, y el nitrógeno amoniacal total.
Nutrientes	Los nutrientes son elementos necesarios para realizar las funciones vitales de la célula a través de un proceso metabólico. Estos nutrientes son las proteínas, lípidos o grasas, glúcidos, vitaminas y minerales como el potasio, sodio, fósforo etc.
Suelo orgánico	Procede tanto de la descomposición de los seres vivos que mueren sobre ella, como de la actividad biológica de los organismos vivos que contiene: lombrices, insectos de todo tipo, microorganismos, etc. La descomposición de estos restos y residuos metabólicos da origen a lo que se denomina humus.

RESUMEN

En el presente estudio de evaluación de las características del compost a partir de la gallinaza, caña de azúcar y suelo franco limoso por codigestión anaeróbica para la obtención de abono orgánico, a utilizarse en el sector agrícola, se analizaron muestras del compost semanalmente, donde fueron evaluados la materia orgánica, potencial de hidrógeno, temperatura, nitrógeno orgánico total, población microbiana y la humedad, durante cinco semanas después de haber finalizado el tiempo de retención.

Se realizaron pruebas químicas de laboratorio al compost; mediante el método Kjeldahl se calculó la cantidad de nitrógeno orgánico total, donde se colocó la muestra del compost con la solución catalizadora en el digestor Kjeldahl durante dos horas a una temperatura de 370 °C; después se destiló la mezcla; durante esta etapa se procedió a efectuar una reacción de desplazamiento formando amoníaco libre; posteriormente esto provocó un arrastre con vapor para poder recogerlo mediante una solubilización en un medio ácido.

Luego del enfriamiento del tubo salido de la digestión, se diluyó con agua deionizada y se añadió una solución de hidróxido de sodio con el propósito de liberar el ion amonio presente, convirtiéndolo en amoníaco, el que se recogió por burbujeo del vapor de arrastre en una solución ácida (ácido bórico al 2 %) de concentración conocida.

También se realizaron pruebas microbiológicas para determinar la presencia de la bacteria *Escherichia coli*; para ello se realizó la prueba del número más probable.

Se aplicó la técnica de tubos múltiples con diluciones 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} del compost, en una serie de 15 tubos, donde se determinó la presencia de CO_2 en la fase presuntiva; en aquellos en los que el resultado era positivo, se procedió a realizar la prueba confirmativa en el medio de cultivo EC. Con un asa de inoculación se colocó una muestra de un espejo de agua en el medio de cultivo, después se incubó durante 24 horas; la presencia de CO_2 en la campana de Durham dentro de los tubos confirmó la presencia o no de la bacteria.

Mediante los resultados obtenidos de las muestras del compost, a los 28 días de haber finalizado el tiempo de retención, se puede utilizar como abono orgánico.

OBJETIVOS

General

Evaluar las características del compost a partir de la gallinaza, caña de azúcar y suelo franco limoso por codigestión anaeróbica, para la obtención de abono orgánico a utilizarse en el sector agrícola.

Específicos

1. Determinar y evaluar las características fisicoquímicas y microbiológicas del compost, para ser utilizado como abono orgánico.
2. Calcular la cantidad de humedad gravimétrica a las muestras del compost, para ser utilizado como abono orgánico.
3. Analizar la cantidad de materia orgánica a las muestras del compost, para ser utilizado como abono orgánico.
4. Evaluar el pH y temperatura del proceso de codigestión anaeróbica de la gallinaza, caña de azúcar y suelo franco limoso, entre los 20 y 100 días.
5. Establecer el tiempo óptimo, para que el compost sea utilizado como abono orgánico.

INTRODUCCIÓN

La evolución industrial en los últimos años ha generado enormes cantidades de residuos en el planeta, tanto de origen orgánico como inorgánico; asimismo, también la urbanización y el incremento de la población principalmente en las áreas urbanas, lo que demanda una mayor cantidad de recursos naturales, sin tener conciencia al ritmo acelerado del consumo de estos recursos. En la actualidad solo una pequeña cantidad de estos residuos tienen un tratamiento antes de ser confinados en un relleno sanitario, por lo cual se ha visto necesario el aumento de nuevas tecnologías para aplicarles tratamiento, de una manera que se evite el daño al medio ambiente y a la salud humana.

En Guatemala, la gallinaza es un residuo causante de la contaminación; en sistemas intensivos de producción de aves se genera contaminación y sustancias contaminantes. Además, se originan grandes cantidades de estiércol que son depositados en el suelo. Uno de los mayores y principales problemas son los malos olores de los residuos avícolas que se generan. La gallinaza, cuando está fresca, contiene sulfuro de hidrógeno (H_2S) y otros compuestos orgánicos, que causan daños a los humanos que habitan cerca de las avícolas. La sensación de suciedad que acompaña a estos vertimientos, así como la aparición de síntomas evidentes de la degradación ambiental en el entorno, puede ser causantes de enfermedades.

Una de las alternativas más eficientes para el aprovechamiento de los nutrientes de residuos como la gallinaza y la caña de azúcar, es a través de la codigestión anaeróbica para la obtención de un abono orgánico.

El objeto de estudio partió de la obtención de un abono orgánico, a través de la codigestión anaeróbica, utilizando gallinaza, la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y suelo franco limoso. Para ello fue necesario realizar un análisis de laboratorio al compost de la cantidad de nitrógeno orgánico a las diferentes muestras del compost, mediante el método Kjeldahl. También se realizaron pruebas de laboratorio a las muestra de pH, materia orgánica, población microbiana, temperatura y de humedad.

Al examinar los resultados se concluyó que el compost utilizando gallinaza, caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y suelo franco limoso proveniente de la aldea Horcones, Santa Catarina Mita, Jutiapa, se puede utilizar como abono orgánico a los 28 días de haber finalizado su tiempo de retención.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1. Antecedentes

En el 2001, en la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Antioquia se realizó un estudio sobre la *Evaluación de los microorganismos eficaces (EM) en producción de abono orgánico a partir de la gallinaza* en el cual se evaluó el proceso de compostaje de gallinaza de aves de jaula y el efecto de los microorganismos eficaces (EM) sobre la composición física y química del compost.

En el 2003, en la Universidad de San Carlos de Guatemala, en la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia se realizó el trabajo de graduación titulado *Determinación del contenido de materia orgánica en suelos guatemaltecos por medio de la técnica de reflectancia con espectroscopía de infrarrojo cercano*; en el trabajo se expone la cantidad de materia orgánica en diferentes muestras de suelos por dos métodos diferentes, la técnica de reflectancia con espectrometría de infrarrojo cercano y la técnica por el método Walkley-Balck en suelos de Guatemala.

En el 2011, en la Universidad de Bogotá, se realizó un estudio sobre la *Determinación del nitrógeno potencialmente mineralizable y la tasa de mineralización de nitrógeno en materiales orgánicos*; en el cual realizó la caracterización de ocho materiales orgánicos con aplicación potencial para la producción de hortalizas en la sabana de Bogotá, en el que se determinó el perfil nutricional. En cuanto al contenido de nitrógeno, se destacaron, gallinaza con valores entre 1,0 % y 2,0 % de N total con base seca.

Respecto de la relación carbono nitrógeno (C/N), esta fluctuó entre 11 y 15, lo que indica que todos los materiales orgánicos tienen suficiente nitrógeno para satisfacer las necesidades de los microorganismos degradantes.

En el 2012, en la Universidad de San Carlos de Guatemala, en la Facultad de Ciencias Económicas se realizó el trabajo de graduación titulado *Determinación de la rentabilidad de la comercialización del abono orgánico “gallinaza” en una empresa productora de abono orgánico*; dicho trabajo de graduación fue realizado por el licenciado Rodolfo Leal Hernández, en el mismo se evaluó la determinación de la rentabilidad evaluada en los resultados financieros, generados por la producción y comercialización de abono orgánico a partir de la gallinaza en Guatemala.

1.2. Justificación

Durante la producción avícola y azucarera surge una cantidad de necesidades que van más allá de los requerimientos productivos. La generación de desperdicios con alto contenido de nutrientes y material orgánico causa contaminación de suelos y aguas, emisión de olores desagradables y altas concentraciones de gases; además de propiciar la proliferación de vectores y microorganismos patógenos; todo ello impacta negativamente en el ambiente.

Por tal razón, surge la necesidad de proporcionar una forma de aprovechamiento de la gallinaza y caña de azúcar, que son residuos con altos contenidos de nutrientes. Para ello se evaluaron las características del compost obtenido de la codigestión de gallinaza, caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y suelo franco limoso, con el objeto de obtener un abono orgánico para ser utilizado en el sector agrícola.

Se busca determinar la calidad del compost mediante análisis fisicoquímicos y microbiológicos, donde sus propiedades deben estar dentro de un rango óptimo para ser usado como abono orgánico. El resultado del presente trabajo tiene aplicación en la recuperación de suelos degradados mejorando sus características.

1.3. Determinación del problema

A continuación se definen los elementos que permitieron la determinación del problema.

1.3.1. Definición

¿Cómo varían las cantidades en las características microbiológicas y fisicoquímicas en el compost de gallinaza, caña de azúcar y suelo franco limoso, después de haber finalizado el tiempo de retención en el biodigestor, para ser utilizado como abono orgánico?

1.3.2. Alcances y delimitaciones

Las limitantes y los alcances para realizar los experimentos se describen a continuación.

1.3.2.1. Alcances

La presente investigación tomará en cuenta el estudio y análisis de la información referente a los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos producidos en el compost a partir de la gallinaza, caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y suelo franco limoso, para ser utilizada en el sector agrícola como

abono orgánico, tomando en consideración aquellas variables que influyen en el proceso de la codigestión anaeróbica y en la obtención del abono orgánico.

1.3.2.2. Delimitaciones

La producción del abono orgánico por medio de la codigestión anaeróbica abarcará desde la creación del compost mediante un biodigestor anaeróbico, hasta las pruebas de laboratorio de las propiedades microbiológicas y fisicoquímicas del mismo. También incluye la obtención del suelo franco limoso proveniente de la aldea Horcones, Santa Catarina Mita, Jutiapa, a un nivel de 25 cm de profundidad del nivel del suelo, donde permaneció en un recipiente sellado.

El espacio donde se desarrollará la fase experimental utilizando el digestor anaeróbico, debe ser en el campo en un área donde circule la mínima cantidad de aire, esto es con el fin de que la materia orgánica se descomponga en forma anaeróbica, y en un lugar donde el digestor no se vea dañado por la presencia de lluvia de forma que el material de lámina galvanizada no se oxide.

Durante esta fase se tomarán muestras semanalmente del compost cuando se vaya degradando la materia orgánica en el digestor anaeróbico. La fase de análisis de las muestras será en laboratorios de microbiología y química, en los cuales las muestras permanecerán de acuerdo con el método y análisis correspondiente.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Compostaje de la gallinaza en su uso como abono orgánico

El compostaje es un tratamiento adecuado de los estiércoles, a través del compostaje logra convertir un producto maloliente, fitotóxico, de difícil manejo y aspecto desagradable en un producto inodoro, de fácil manejo aspecto atractivo, libre de sustancias tóxicas y apto para el uso agrícola. El proceso de compostaje se considera, generalmente, como el tratamiento más adecuado de los residuos frescos antes de su incorporación al suelo, ya que una materia orgánica en avanzado estado de transformación y estabilización, debe contribuir definitivamente a mejorar la fertilidad y productividad de los suelos agrícolas.

Si se trabaja en condiciones óptimas con todos los parámetros que controlan el proceso, especialmente en el control de los malos olores causados por la producción de compuestos nitrogenados y sulfurados en condiciones anaeróbicas, puede obtenerse un compost de buena calidad en el menor tiempo posible.

Según Paul y Clark (1996) existen rangos óptimos de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de un compost de buena calidad para ser utilizados como abono orgánico, los cuales se incluyen en la siguiente tabla.

Tabla I. **Rangos óptimos de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de un compost de buena calidad para su uso como abono orgánico**

Parámetro	Compost
pH	6,8 – 8,2
Humedad (%)	60 – 90
Cenizas (%)	20 – 30
Potasio (K ₂ O %)	1,0 – 3,0
Materia orgánica (%)	12 – 30
Nitrógeno (%)	0,5 – 3
Carbono orgánico (%)	8 – 25
Relación C/N	10 – 30
Microorganismos u.f.c./ml	1X10 ² – 18X10 ³

Fuente: elaboración propia, a partir de Paul y Clark (1996) y Manual de compostaje por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

2.1.1. Factores que afectan el proceso de compostaje

El proceso de compostaje se basa en la actividad de microorganismos que viven en el entorno, ya que son los responsables de la descomposición de la materia orgánica.

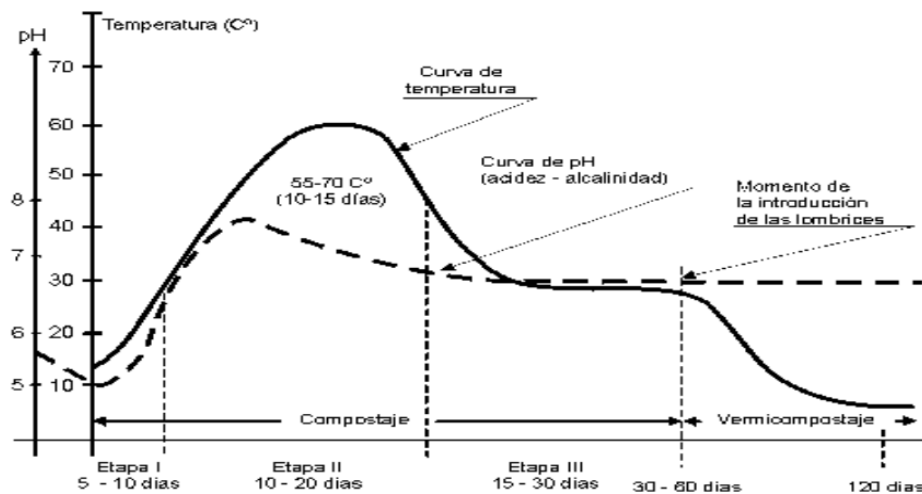
Para que estos microorganismos puedan vivir y desarrollar la actividad descomponedora se necesitan unas condiciones óptimas de temperatura, humedad, etc.

Son muchos y muy complejos los factores que intervienen en el proceso biológico del compostaje, estando a su vez influenciados por las condiciones ambientales, tipo de residuo a tratar y el tipo de técnica de compostaje empleada, los cuales a continuación se describen.

2.1.1.1. Temperatura

La temperatura es una medida del calor o energía térmica de las partículas en una sustancia. Es un factor indicativo de la evolución del proceso de compostaje, los cambios experimentados por este parámetro se utilizan normalmente para conocer la actividad microbiana a lo largo del proceso y determinan la actividad de la materia orgánica.

Figura 1. **Etapas del compostaje respecto de la temperatura**



Fuente: AUBERT, Carlos. *El huerto biológico*. p. 252.

El proceso de compostaje puede dividirse en cuatro períodos, atendiendo a la evolución de la temperatura:

- **Mesolítico:** la masa vegetal está a temperatura ambiente y los microorganismos mesófilos se multiplican rápidamente. Como consecuencia de la actividad metabólica, la temperatura se eleva y se producen ácidos orgánicos que hacen bajar el pH.
- **Termofílico:** cuando se alcanza una temperatura de 40 °C, los microorganismos termófilos actúan transformando el nitrógeno en amoníaco y el pH del medio se hace alcalino. A los 45 °C estos hongos termófilos desaparecen y aparecen las bacterias esporígenas y actinomicetos. Estos microorganismos son los encargados de descomponer las ceras, proteínas y hemicelulosas.
- **De enfriamiento:** cuando la temperatura es menor de 45 °C, reaparecen los hongos termófilos que reinvasen el mantillo y descomponen la celulosa. Al bajar de 40 °C los mesófilos también reinician su actividad y el pH del medio desciende ligeramente.
- **De maduración:** es un período que requiere meses a temperatura ambiente, durante los cuales se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización del humus.

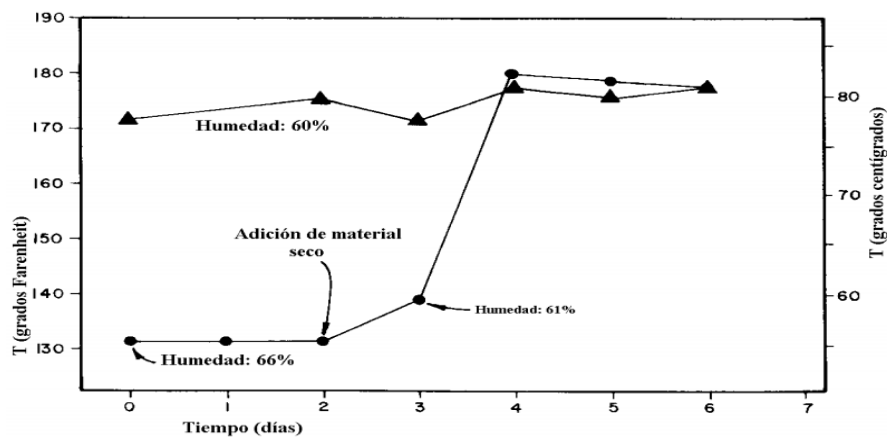
2.1.1.2. Humedad

La humedad ambiental se refiere la presencia de vapor de agua en el aire. El nivel de humedad en un sitio depende de diversos factores, entre los que se encuentran la composición de las masas de aire que llegan a él por

medio del viento, la disponibilidad de cuerpos de agua y masas vegetales, el régimen de precipitaciones, las tasas de evaporación y las temperaturas promedio del aire. Existen diversos parámetros empleados para medir la humedad ambiental, entre los que se encuentran la humedad absoluta, la humedad relativa y la presión de vapor.

En el proceso de compostaje es importante que la humedad alcance unos niveles óptimos del 40 – 45 %. Si el contenido en humedad es mayor, el agua ocupará todos los poros y por lo tanto el proceso se volvería anaeróbico, es decir se produciría una putrefacción de la materia orgánica. Si la humedad es excesivamente baja se disminuye la actividad de los microorganismos y el proceso es más lento. El contenido de humedad dependerá de las materias primas empleadas. Para materiales fibrosos o residuos forestales gruesos la humedad máxima permisible es del 75 – 85 %, mientras que para material vegetal fresco, esta oscila entre 45 – 50 %.

Figura 2. **Variación de la humedad respecto de la temperatura y el tiempo**



Fuente: AUBERT, Carlos. *El huerto biológico*. p. 122.

2.1.1.3. Potencial de hidrógeno

El pH es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. En el compostaje influye en el proceso debido a su acción sobre microorganismos. En general los hongos toleran un margen de pH entre 5 - 8, mientras que las bacterias tienen menor capacidad de tolerancia (pH = 6 - 7,5).

2.1.1.4. Población microbiana

Una población microbiana es definida por dos parámetros que suelen referirse a unidad de volumen de medio: la densidad microbiana o masa celular y la concentración celular o número de células. El aumento de estos dos parámetros constituye el fenómeno del crecimiento.

En el compostaje en un proceso anaeróbico de descomposición de la materia orgánica, llevado a cabo por una amplia gama de poblaciones de bacterias, hongos y actinomicetos, es afectado directamente a través del tiempo en su uso como abono orgánico.

2.1.1.5. Relación del carbono y nitrógeno

La relación C/N describe la relación de peso de carbono orgánico y nitrógeno en un material orgánico. Los microorganismos, como todos los organismos vivos, necesitan carbono y relativamente poco nitrógeno para vivir. Si reciben esos elementos en una relación correcta, se reproducen rápidamente y consecuentemente, la descomposición de la materia orgánica también se acelera. La relación C/N óptima durante el inicio del proceso del compostaje de residuos es de 25 hasta 35.

Si la relación es más alta, la descomposición es más lenta. Si la relación es < 20 durante el compostaje, se podría producir amoníaco gaseoso, lo cual no solamente daña al medio ambiente sino también empeora la calidad del compost. Teniendo materia prima con una relación C/N > 30 se puede añadir nitrógeno (por ejemplo en forma de estiércol líquido, urea, lodo de depuradora) para acelerar la descomposición. El compost maduro debería tener una relación C/N < 20 . El compost es mejor abono cuando lleva más porcentaje de nitrógeno (Aubert, 1998).

2.2. Identificación de los impactos ambientales en el sector avícola

La identificación y contaminación del medio ambiente es la presencia de elementos que perjudican la salud, seguridad y bienestar y que ponen en peligro las condiciones de vida y las características naturales de los ecosistemas. El origen de la contaminación puede ser natural o humano.

Una explotación avícola realiza ciertas acciones que pueden afectar a los distintos medios (suelo, agua, atmósfera, medio biótico y medio social). No obstante, el impacto potencial de dichos riesgos sobre el medio ambiente puede ser muy diferente, pudiéndolos clasificar de acuerdo con su importancia.

El impacto potencial de las explotaciones sobre el medio ambiente dependerá, en primer lugar, del tamaño y del manejo que se realice en la explotación avícola y de las acciones destinadas a la prevención de la contaminación, y en segundo lugar, de la vulnerabilidad del medio donde esté ubicada la granja. En definitiva, los impactos medioambientales reales variarán de una explotación ganadera a otra. De manera general, en la tabla II se identifican los impactos potenciales de la avicultura sobre los distintos medios.

Tabla II. **Impacto ambiental en los sistemas de producción de una industria avícola**

Sistema de Producción	Aspecto ambiental	Impacto ambiental
Granjas	<p>Disposición de la mortalidad</p> <p>Mal uso del agua</p> <p>Mal manejo de la gallinaza</p>	<p>Problemas de bioseguridad, aumento de olores, aumento en poblaciones de animales que pueden transmitir enfermedades (insectos, roedores, aves, perros), contaminación del suelo y agua subterránea (degradación de cadáveres).</p> <p>Disminución del recurso hídrico, generación de aguas residuales que pueden contaminar otras fuentes de agua, aumento de los costos de operación, aumento del consumo de energía.</p> <p>Aumento de olores, propagación de enfermedades, problemas con los vecinos, aumento de insectos.</p>
Plantas de beneficio	Mal manejo de aguas residuales	Contaminación del agua con sangre, sólidos orgánicos, aceites y grasas; aumento de costos en tratamiento de aguas, contaminación del suelo, aumento de los costos de operación, mal uso de descontaminantes (elevados niveles de aceites y grasas).

Continuación de la tabla II.

	Mala disposición de los residuos orgánicos	Riesgos por contaminación de alimentos; degradación del aire, agua y suelo; aumento de aves de rapiña, roedores y moscas.
Incubadoras	Mala disposición de los residuos sólidos y aguas residuales. Malas prácticas de operación	Aumento de problemas sanitarios, degradación del aire, agua y suelo, producción de olores, aumento de aves de rapiña, roedores y moscas, aumento de costos en tratamiento de aguas residuales y disposición de residuos. Aumento de contaminantes sólidos orgánicos al finalizar el proceso; elevados costos de tratamiento y de operación.

Fuente: *Guía ambiental para el subsector avícola*. p. 21.

2.3. Emisiones a la atmósfera

Es la presencia en la atmósfera de materias, sustancias o formas de energía que impliquen molestia grave, riesgo o daño para la seguridad y la salud de las personas, el medio ambiente y demás bienes de cualquier naturaleza. Estas materias y fuentes de energía que pueden hacer peligrar nuestra salud, bienestar o recursos se llaman contaminantes.

Durante la producción avícola se genera una serie de gases contaminantes asociados a las etapas del proceso productivo, tal y como se menciona en la tabla III.

Tabla III. **Elementos contaminantes emitidos a la atmósfera durante las diversas etapas del proceso productivo**

Etapas del proceso	Contaminante emitido
Alojamiento de los animales	NH ₃ , CH ₄ , N ₂ O, CO ₂ , H ₂ S, olor, polvo
Almacenamiento interno de la gallinaza	NH ₃ , CH ₄ , CO ₂ , H ₂ S, COV, N ₂ O, olor, partículas
Almacenamiento externo de gallinaza	NH ₃ , CH ₄ , N ₂ O, CO ₂ , H ₂ S, olor, partículas
Tratamiento de la gallinaza	NH ₃ , N ₂ O, olor, partículas
Esparcimiento de gallinaza	NH ₃ , CH ₄ , N ₂ O, CO ₂ , H ₂ S, olor, partículas
Calefacción de la granja	NO _x , CO ₂ , CO
Producción de pienso	Polvo

Fuente: elaboración propia, a partir de European Commission, 2003.

2.3.1. Caracterización de las emisiones a la atmósfera

Es la presencia en la atmósfera de materias, sustancias o formas de energía que impliquen molestia grave, riesgo o daño para la seguridad y la salud de las personas, el medio ambiente y demás bienes de cualquier naturaleza.

Estas materias y fuentes de energía que pueden hacer peligrar nuestra salud, bienestar o recursos se llaman contaminantes, esta caracterización es fundamental para conocer la calidad del aire. Entre las emisiones de gases emitidos hacia la atmósfera en la producción avícola, se citan los siguientes.

2.3.1.1. Amoníaco (NH₃)

El amoníaco es el contaminante más importante a nivel de emisiones en las avícolas en particular. La producción agraria es el sector que contribuye en mayor medida a las emisiones de amoníaco en Guatemala.

El amoníaco es el contaminante más importante a nivel de emisiones en las avícolas en particular. La producción agraria es el sector que contribuye en mayor medida a las emisiones de amoníaco en Guatemala.

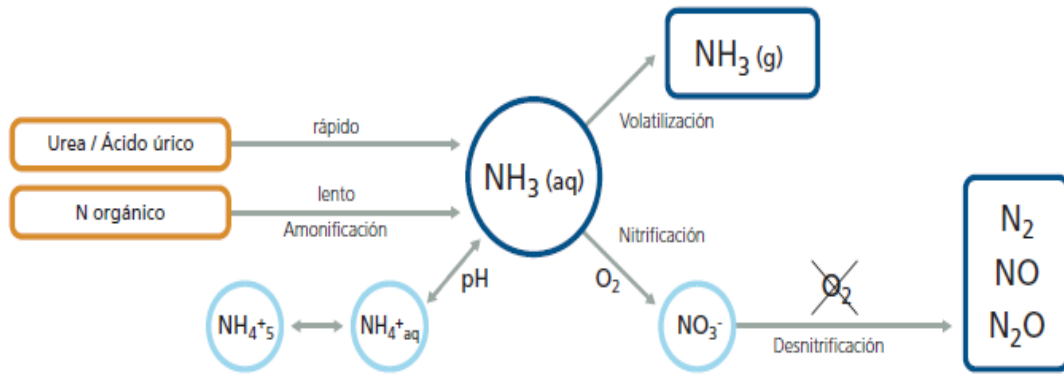
El amoníaco es liberado a través de la descomposición de la materia orgánica contenida en las deyecciones animales. El nitrógeno excretado por los animales es principalmente en forma de urea, en la orina, y en forma de compuestos nitrogenados, en las heces.

En el caso concreto de las aves, la excreción se realiza en forma de ácido úrico mayoritariamente (más del 70 % del nitrógeno total excretado) que se transforma rápidamente en urea. Por la acción de la enzima ureasa, la urea sufre una transformación más o menos rápida, transformándose en amoníaco.

El nitrógeno contenido en las heces sufre una descomposición más lenta que el caso de la urea, transformándose en amoníaco o ion amonio (NH⁺⁴), tras los procesos de amonificación representados en la figura 3.

La mineralización es el proceso global de la transformación de nitrógeno orgánico a inorgánico y da como resultado tanto amoníaco (NH₃) como nitratos (NO₃⁻).

Figura 3. **Ciclo del nitrógeno**



Fuente: ROTZ, Charles. *Manejo para la reducción del nitrógeno en la producción animal*. p. 14.

La volatilización de amoníaco puede originarse en todas las etapas de la gestión de la gallinaza: en el alojamiento, durante el almacenamiento y en la aplicación a campo, cuando se emplea la gallinaza como fertilizante a través de los procesos de mineralización del nitrógeno por la microbiota del suelo.

Los principales efectos negativos sobre el medio ambiente son la acidificación de la atmósfera y la eutrofización de las aguas.

La deposición seca y húmeda del amoníaco y de las sales de amonio que de él se derivan, contaminan suelos y aguas y alteran el equilibrio de los sistemas ecológicos. También es generador de malos olores que afectan principalmente a la población cercana a las explotaciones.

2.3.1.2. Óxido nitroso (N₂O)

El óxido nitroso es un gas volátil, incoloro, con un olor dulce y ligeramente tóxico, que provoca alucinaciones y estado eufórico en la persona, por lo que ha sido comúnmente utilizado como droga en algunos casos. Aproximadamente un tercio de las emisiones de óxido nitroso son de origen antropogénico. De los distintos sectores de actividad que generan emisiones de N₂O en Guatemala, la agricultura es el sector que contribuye en mayor medida. En el sector avícola, el óxido nitroso se produce como compuesto intermedio en los procesos de nitrificación y desnitrificación (figura 3).

En la nitrificación, el amonio (NH⁴⁺) se oxida por la acción microbiana en el suelo a nitrato (NO₃⁻) en condiciones aerobias, mientras que en el proceso de desnitrificación los microorganismos anaerobios transforman los nitratos (NO₃⁻) a nitrógeno molecular N₂. El N₂O es liberado a la atmósfera en forma de gas por difusión.

La desnitrificación tiene lugar fundamentalmente en el suelo al aplicar la gallinaza; pero también se produce, aunque en menor medida, durante el almacenamiento de la misma. Las condiciones anaeróbicas pueden darse si tras la aplicación de la gallinaza a campo, esta se riega o llueve en los días posteriores. Si la gallinaza es enterrada la emisión de N₂O es mucho menor.

2.3.1.3. Metano (CH₄)

El metano (CH₄) es un hidrocarburo alcano no polar que se presenta en forma de gas a temperaturas y presiones ordinarias. Es incoloro e inodoro y apenas soluble en agua en su fase líquida. Constituye el 97 % del gas natural y es muy peligroso, ya que es fácilmente inflamable y explosivo.

En la naturaleza se produce como producto final de la putrefacción anaeróbica de las plantas. Este proceso natural se puede aprovechar para producir biogás. El metano es un gas de efecto invernadero, relativamente potente, que contribuye al calentamiento global del planeta Tierra.

El metano también puede proceder de los procesos anaerobios que tienen lugar durante la fase de almacenamiento de la gallinaza, durante la cual las bacterias metanogénicas descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno, generando metano y dióxido de carbono como productos residuales y materia orgánica estabilizada. La cantidad de metano emitida depende por tanto del sistema de gestión de gallinaza empleado.

Así, la gallinaza húmeda tiende a descomponerse de esta forma, mientras que la gallinaza seca o semiseca tiende a descomponerse aeróbicamente y, por tanto, la producción de metano es mucho menor.

2.3.1.4. Dióxido de carbono (CO₂)

El CO₂ es el principal responsable de la contribución humana al efecto invernadero. El dióxido de carbono en las explotaciones avícolas procede fundamentalmente de la respiración animal y de los subproductos de su metabolismo. También se forma como consecuencia del uso de combustibles fósiles en el transporte de los animales, en la calefacción, etc.

Este gas se forma como resultado de la degradación de compuestos orgánicos en presencia de oxígeno, es decir, de forma aeróbica. La contribución de la gallinaza es, sin embargo, muy pequeña en comparación con otras fuentes de emisión. La mejor forma de reducir las emisiones de este gas es mejorando la eficiencia del uso energético en la explotación avícola.

2.3.1.5. Olor

Los olores producidos en las explotaciones avícolas constituyen un problema local que afecta a los núcleos residenciales próximos a estas, siendo la principal fuente de quejas y molestias junto con las emisiones sonoras.

En efecto, el principal impacto de los malos olores en el medio es el impacto social que genera, aunque no puede afirmarse estrictamente que produzcan impacto sobre el medio ambiente como tal. Los efectos medioambientales están producidos por las sustancias que componen el mal olor, y no tanto por el olor en sí mismo. El impacto económico es otra de las afecciones de los malos olores sobre el entorno, ya que impide la diversificación de la economía local con actividades como el turismo rural.

Existen fuentes fijas de emisión de olor como los estercoleros, las naves de los animales, los depósitos de cadáveres y otras fuentes temporales como las generadas en el esparcimiento de la gallinaza a campo. Los olores derivan de los procesos de degradación biológica de la gallinaza principalmente y del olor propio de los animales. Los olores de los animales no pueden reducirse fácilmente, sin embargo, una adecuada gestión de la gallinaza y un buen manejo reducen significativamente la emisión de olor.

De los más de 150 compuestos olorosos encontrados en los olores ganaderos, las sustancias que contribuyen en mayor medida en la generación de malos olores son el amoníaco, el ácido sulfhídrico y los compuestos orgánicos volátiles, siendo estos últimos generados principalmente en condiciones anaeróbicas. Asimismo, las partículas de polvo influyen en la diseminación del olor, puesto que ejercen de vehículo de transporte para las sustancias odorantes que se adhieren a dichas partículas.

2.3.1.6. Partículas

Son todas las partículas microscópicas sólidas y líquidas, de origen humano o natural, que quedan suspendidas en el aire durante un tiempo determinado. Dichas partículas tienen un tamaño, composición y origen muy variables y muchas de ellas son perjudiciales. Las partículas en suspensión pueden presentarse en forma de cenizas volantes, hollín, polvo, niebla, gas, etc.

Las partículas en las instalaciones avícolas intensivas proceden principalmente de la cama de los animales, del pienso suministrado y de los propios animales.

Las partículas se definen como toda mezcla de partículas sólidas o líquidas. Cuando estas se encuentran suspendidas en el aire, se trata obviamente de partículas en suspensión. Son partículas de naturaleza compleja y muy heterogénea con diferentes características físicas y químicas. Estas diferencias les confieren propiedades muy distintas con potenciales efectos sobre la salud humana y animal.

Generalmente se caracterizan atendiendo a criterios de origen, tamaño y composición. En el ámbito de la ganadería intensiva, las partículas pueden estar formadas de diversos materiales de origen orgánico e inorgánico. La procedencia puede incluir un amplio rango de sustratos y fuentes: microorganismos, fragmentos de sus membranas (endotoxinas), esporas, deyecciones secas, orina, restos de piel, pelo, pienso y materiales de cama.

Aunque los efectos pueden ser variables, los problemas más importantes sobre la salud humana son los causados por las partículas más finas, las cuales pueden penetrar hasta los alveolos pulmonares. Las afecciones sobre la salud

humana más frecuentes son las infecciones del sistema respiratorio y problemas respiratorios como el asma, la irritación de las mucosas, etc.

De forma análoga las partículas afectan negativamente sobre el estado sanitario de los animales, observando problemas respiratorios y pulmonares y disminuyendo la eficiencia productiva.

Además, las partículas de polvo ayudan en la propagación de los malos olores y en la propagación de zoonosis, además de colaborar en el deterioro de la calidad del aire. Por último, las partículas de polvo pueden ser transportadas por el aire largas distancias, afectando a los ecosistemas en los que se depositen influyendo, sobre la vegetación e interviniendo en diversos procesos ecológicos. También afecta negativamente sobre la visibilidad atmosférica y sobre el calentamiento global.

2.4. Impacto ambiental sobre el suelo

Un suelo se puede degradar al acumularse en él sustancias a unos niveles tales que repercuten negativamente en su comportamiento.

Las sustancias, a esos niveles de concentración, se vuelven tóxicas para los organismos del suelo. Se trata pues de una degradación química que provoca la pérdida parcial o total de la productividad del suelo.

La gallinaza aumenta la fertilidad de los suelos como consecuencia del incremento de materia orgánica de los mismos, aumenta la actividad enzimática y la población microbiana, estabiliza los agregados del suelo, reduce la erosión, mejora la estructura, aumenta la capacidad de retención de agua y favorece el drenaje.

Si la dosis de gallinaza es excesiva por encima de la capacidad receptora del suelo, puede ser una importante fuente de contaminación de los suelos. Las principales sustancias contaminantes aportadas al suelo son los compuestos de nitrógeno.

El 40 % del nitrógeno orgánico procedente de gallinaza es mineralizado en menos de dos meses, liberando al suelo elevadas concentraciones de nitratos que superaban las necesidades de los cultivos. Una manera de reducir la tasa de mineralización del nitrógeno es sometiendo a la gallinaza a un proceso de compostaje previamente a su valorización agronómica.

Otro elemento que puede ser perjudicial para las propiedades de los suelos es el contenido en sales disueltas de la gallinaza (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- y SO_4^{2-}), que puede causar un aumento de la salinidad del suelo y de la conductividad eléctrica de este. Los principales efectos de la salinidad son: la variación del pH, la pérdida de estructura de los suelos (especialmente cuando tienen lugar procesos de sodificación), la reducción de la capacidad de infiltración de agua, la compactación del suelo, entre otros, pudiendo llegar a inducir procesos de fitotoxicidad en las plantas.

La aplicación repetitiva de gallinaza al suelo origina un aporte excesivo de materia orgánica, que puede ser perjudicial para las propiedades fisicoquímicas y biológicas de los suelos. Algunos de estos efectos negativos son la saturación de los poros del suelo, la producción de costra superficial, la disminución de la capacidad de infiltración de agua y la reducción de la difusión de oxígeno en el suelo. Esta situación favorece la generación de ambientes anaerobios, con la proliferación de microorganismos que liberan gases tóxicos como metano, óxido nitroso, sulfuro de hidrógeno o ácidos volátiles, que a su vez pueden ser tóxicos

para la microbiota del suelo. Las raíces también pueden verse afectadas, disminuyendo su crecimiento y respiración.

En la gallinaza también se incorporan microorganismos tales como parásitos o bacterias patógenas procedentes de la gallinaza, capaces de desplazar los microorganismos beneficiosos del suelo por competencia por los recursos y pudiendo ser resistentes a antibióticos. Adicionalmente con la gallinaza se pueden agregar al suelo compuestos xenobióticos y productos utilizados para la limpieza y desinfección de las explotaciones avícolas.

2.5. Impacto ambiental sobre el agua

Es la acción y el efecto de introducir materias, o formas de energía, o inducir condiciones en el agua que, de modo directo o indirecto, impliquen una alteración perjudicial de su calidad en relación con los usos posteriores o con su función ecológica.

La contaminación de las aguas por la gallinaza, ya sean superficiales o subterráneas, puede tener su origen en una de estas tres situaciones:

- Arrastre por escorrentía de las sustancias minerales contenidas en la gallinaza desde la superficie del suelo.
- Lixiviación profunda en el perfil del suelo, especialmente de los nitratos.
- Caída accidental de gallinaza cerca de los cursos de agua. El vertido de gallinaza a los cursos de agua es un acto totalmente prohibido y delictivo.

2.5.1. Escorrentías a las aguas superficiales

Se refiere a la acción y efecto de introducir materias o formas de energía, o inducir condiciones en el agua que, de modo directo o indirecto, impliquen una alteración perjudicial de su calidad en relación con los usos posteriores o con su función ecológica.

Entre las posibles causas de contaminación de las aguas superficiales se encuentra el arrastre de la gallinaza por aguas pluviales cuando esta ha sido recientemente aplicada en la superficie del suelo, o bien por no disponer de sistemas de almacenamiento adecuados.

Los principales constituyentes de la gallinaza que pueden afectar a las aguas superficiales son la materia orgánica, los nutrientes (nitrógeno y fósforo principalmente) y los microorganismos fecales.

Tanto el nitrógeno como el fósforo, son los responsables más importantes de la eutrofización de las aguas.

Por último, la población bacteriana de las aguas también se ve afectada cuando esta es contaminada por la gallinaza, aumentando considerablemente.

La población microbiológica de las deyecciones de gallinas está formada por diversos tipos de microorganismos como bacterias, virus, parásitos y hongos, siendo algunos de ellos patogénicos, es decir, pudiendo transmitir enfermedades y parásitos a los humanos. Entre los más importantes se puede destacar los coliformes fecales, Salmonella, Lysteria, Brucella o Campylobacter, los cuales suponen un riesgo para la salud humana, por entrada en la cadena alimenticia y para la salud animal.

2.5.2. Lixiviaciones a las aguas subterráneas

Es el fluido proveniente de la descomposición de los residuos, bien sea por su propia humedad, reacción, arrastre o disolución de un solvente o agua al estar en contacto con ellos. En suelos agrícolas se refiere al "lavado" de nutrientes hacía capas inferiores.

La contaminación de las aguas subterráneas puede estar originada por diversas causas: por la aplicación de dosis excesivas de gallinaza al suelo, por la aplicación de gallinaza en campos que se encuentren en barbecho durante largos períodos de tiempo, por una mala gestión del riego tras la aplicación, o bien cuando tras ella transcurre un tiempo prolongado hasta que se planta el cultivo, favoreciendo la percolación de los nutrientes en el perfil del suelo.

El agua subterránea es susceptible de contaminación por nitratos, sales, pesticidas y microorganismos. El fósforo y el potasio normalmente no constituyen un riesgo para las aguas subterráneas, debido a que sus formas son relativamente insolubles y no son lixiviadas a través del perfil del suelo.

En la aplicación de gallinaza a campo, el nitrógeno se encuentra en forma amoniacal u orgánica; este último mediante la mineralización pasa a forma amoniacal. A su vez, este es rápidamente convertido por las bacterias del suelo en nitratos, principal forma asimilable por las plantas.

Los nitratos son formas muy solubles y por tanto móviles en el perfil del suelo. Por ello, el nitrato que no es absorbido por las plantas, es fuente potencial de contaminación de las aguas subterráneas mediante lixiviación.

Por este motivo es necesario controlar el aporte de gallinaza al suelo, teniendo en cuenta factores como la permeabilidad del suelo, su textura, las condiciones climáticas, el tipo de cultivo y el momento de aplicación de la dosis y la gestión del riego. Concretamente, la textura del suelo juega un papel fundamental. En suelos arenosos la lixiviación de nitratos se produce en mayor medida que en los arcillosos, por lo que la eficacia de utilización de nitrógeno en estos suelos es baja. La salinidad ha sido reconocida como contaminante de las aguas subterráneas como resultado de la percolación de sales aportadas por las deyecciones avícolas.

2.6. Deyecciones

Materia de residuos de alimento que elimina el organismo por el ano tras la digestión.

2.6.1. Niveles de excreción de gallinaza y sus características

La cantidad, estructura y composición de la gallinaza, así como la forma en que se almacena y maneja son los principales factores que afectan a la emisión de sustancias contaminantes procedentes de la avicultura intensiva y estas pueden ser:

- Gallinaza húmeda: su contenido en materia seca oscila entre un 0 y 20 %. Procede principalmente de ponedoras en batería con retirada diaria de la gallinaza.
- Gallinaza semiseca: puede contener hasta un 45 % de materia seca. Puede proceder de los sistemas de alojamiento en bacterias con cintas transportadoras y pre secado de la gallinaza o de explotaciones cuyo

control ambiental permita la pérdida de humedad antes de la recogida de la misma.

- Gallinaza seca: proviene de las explotaciones de pollos de engorde. Presenta un contenido en materia seca muy elevado, que oscila entre un 50 y 80 %.
- El contenido en materia seca de las deyecciones es un aspecto fundamental, ya que a mayor contenido en materia seca, menores son las emisiones a la atmósfera.
- Las deyecciones recién excretadas tienen características muy uniformes, puesto que depende de la fisiología del animal y muy poco de los factores ambientales. El factor más determinante en la producción y composición de la gallinaza es sin duda el tipo de pienso utilizado. El tipo de cama empleado y el sistema de abrevado también afectan a la cantidad y calidad de la gallinaza (USDA, 1997).

2.7. Etapas de la digestión anaeróbica

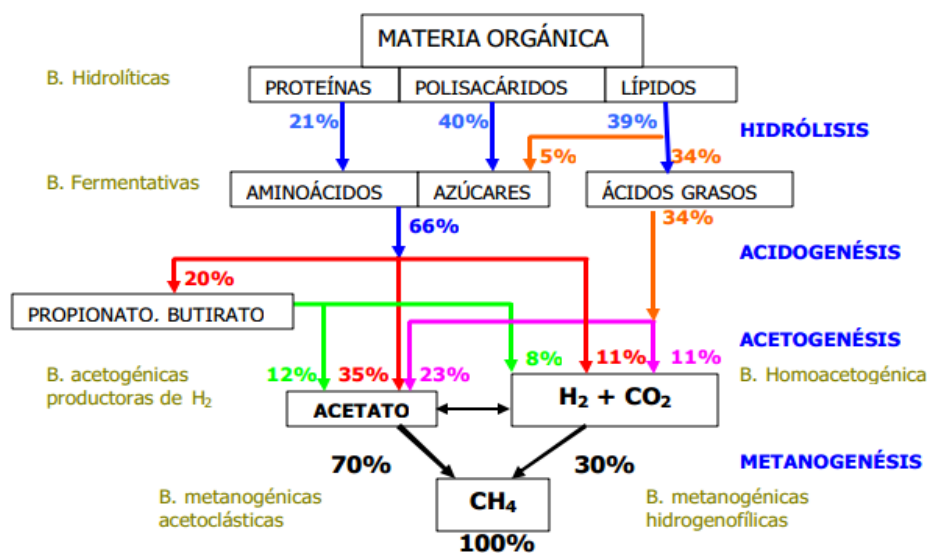
La digestión anaeróbica consiste en la descomposición de material biodegradable en ausencia de oxígeno, para dar como resultado dos productos principales: biogás (compuesto mayoritariamente por metano) y el lodo estabilizado, conocido como digerido. Esta tecnología utiliza reactores (digestores) cerrados donde se controlan los parámetros para favorecer el proceso de fermentación anaeróbica; un proceso muy conocido, ya que también se produce de un modo natural y espontáneo en diversos ámbitos, como en pantanos, yacimientos subterráneos o incluso en el estómago de los animales.

La digestión anaeróbica es un proceso muy complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar, como por la cantidad de grupo de bacterias involucradas en ellas. De hecho, muchas de estas reacciones ocurren de forma simultánea.

El proceso de degradación de la materia orgánica se divide en cuatro etapas:

- Hidrólisis
- Etapa fermentativa o acidogénica
- Etapa acetogénica
- Etapa metanogénica

Figura 4. **Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica de materiales poliméricos**



Fuente: PAVLOSTATHIS y GIRALDO-GÓMEZ. *Digestión anaerobia*. p. 271.

2.7.1. Etapa de hidrólisis

En esta primera fase las moléculas orgánicas complejas y no disueltas se rompen, en una transformación controlada por enzimas extracelulares, en compuestos más simples (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos, alcoholes, CO₂ y H₂) (figura 4).

Los compuestos solubles, básicamente diferentes tipos de oligosacáridos y azúcares, alcoholes, aminoácidos y ácidos grasos, atraviesan la pared celular y constituyen las principales fuentes de carbono y energía para las células de los microorganismos (Fernández y Ollay, 1997). En el interior de la célula estos compuestos se transforman en compuestos más simples como, acetato, propionato, butirato, amoníaco, alcoholes, entre otros.

La fase hidrolítica es decisiva para la biodegradación de RSU, convirtiéndose en la etapa limitante para los residuos con gran cantidad de sólidos, donde la hidrólisis previa es necesaria, ya que los microorganismos solo son capaces de metabolizar la materia orgánica disuelta y, por tanto, han de generar las exoenzimas necesarias para degradar el residuo. Según McCarty (1981), “la velocidad viene limitada, en gran parte, por el grado de trituración o el tamaño de partícula de las sustancias a hidrolizar. Cuanto mayor es la velocidad de solubilización de la materia orgánica, mayor es la velocidad de producción de biogás”.

2.7.2. Etapa acidogénica

La segunda etapa consiste en la transformación de los compuestos formados en la primera fase en compuestos de peso molecular intermedio tales como ácidos grasos volátiles (acetato, propionato, butirato, entre otros.),

alcoholes, y otros subproductos importantes para etapas posteriores (amoníaco, H₂, CO₂, etc.).

Algunos autores consideran difícil establecer una separación entre las bacterias hidrolíticas y las acidogénicas, ya que son muchos los microorganismos capaces de realizar ambos procesos. Así, además de la hidrólisis, en esta etapa también tiene lugar la fermentación de diversos monómeros. Las bacterias formadoras de ácidos o acidogénicas son de crecimiento rápido, en comparación con los otros grupos implicados en la digestión anaeróbica.

Las bacterias implicadas en esta etapa son anaeróbicas obligadas o facultativas, muy abundantes en la naturaleza y bacterias proteolíticas. Se pueden citar bacterias acidogénicas de los géneros *Clostridium*, *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Micrococcus* (Madigan et al., 1998).

2.7.3. Etapa acetogénica

El grupo especializado de bacterias sintróficas denominadas acetogénicas fue descubierto por Mc-Inerney y Bryant (1981), gracias a las limitaciones metabólicas en relación con los otros grupos de bacterias. Son bacterias facultativas que viven en estrecha colaboración con las archaeas metanogénicas. Algunos ejemplos de bacterias productoras de hidrógeno son las anaeróbicas obligadas *Syntrophobacter*, *Syntrophomonas* y *Desulfovibrio*.

Las bacterias acetogénicas no tienen otras posibilidades metabólicas, dependen necesariamente de reacciones de transferencia de hidrógeno entre distintas especies de microorganismos. Así el principal significado de estos

microorganismos en el proceso de digestión anaeróbica es el de donantes de hidrógeno, dióxido de carbono y acetato a las archaeas metanogénicas.

Estos microorganismos son capaces de convertir los productos finales de la microbiota acidogénica en acetato, a partir de dos rutas diferentes:

- Deshidrogenación acetogénica como producto de la fermentación de ácidos grasos volátiles o lactato y alcoholes.
- Hidrogenación acetogénica a partir del hidrógeno y dióxido de carbono; las bacterias homoacetogénicas sintetizan acetato.

Las reacciones de deshidrogenación acetogénica dependen de la concentración de hidrógeno existente (Boone y Xun, 1987); por lo tanto para que la acetogénesis tenga lugar en los digestores anaerobios, es necesario que el hidrógeno generado en la misma sea utilizado y consumido con igual velocidad a la que se produce (bacterias metanogéneas utilizadoras de hidrógeno o bacterias homoacetogénicas) (Schink, 1997).

Cuando la producción de hidrógeno en el gas es muy baja (5-50 ppm), las reacciones que ocurren son termodinámicas favorables, existirá mayor formación de acético y su energía libre será suficiente para permitir la síntesis de ATP y el crecimiento bacteriano. Al contrario, cuando la eliminación de hidrógeno es menos eficiente, aumenta la concentración de hidrógeno y, por lo tanto, la proporción de ácidos grasos de cadena larga, como propiónico, butírico, valérico, isovalérico, heptanoico, entre otros; lo que puede llevar a una acidificación de reactores anaerobios.

Este proceso ocurre porque el hidrógeno bloquea la eliminación de electrones, vía reducción de protones, y las bacterias acidogénicas (fermentativas) deben asumir dichos electrones por otras vías, con el consiguiente aumento de productos reducidos de oxidación tales como propionato y butirato (Archer, 1983).

Algunos autores admiten la existencia de otras bacterias denominadas homoacetogénicas, que pueden crecer autotróficamente con dióxido de carbono e hidrógeno para producir acetato (reacciones de hidrogenación acetogénica) cuando las metanogénicas utilizadoras de H_2 , están inhibidas debido a un pH bajo. Así, se considera que el intercambio de hidrógeno es tan rápido en el digestor que originan diferentes microambientes con diferentes presiones de hidrógeno, donde ambas reacciones (acetogénicas y homoacetogénicas) se da conjuntamente (Chynoweth, 1987).

2.7.4. Etapa metanogénica

La metanogénesis es el último paso del proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica. En esta etapa los microorganismos metanogénicos son los responsables de la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H_2 , CO_2 , formiato, metanol, y algunas metilaminas. Los organismos metanogénicos se clasifican dentro del dominio Archaea, y, morfológicamente pueden ser bacilos cortos y largos, células en forma de placas y metanógenos filamentosos, tanto Gram positivos como Gram negativos (Madigan et al., 1998).

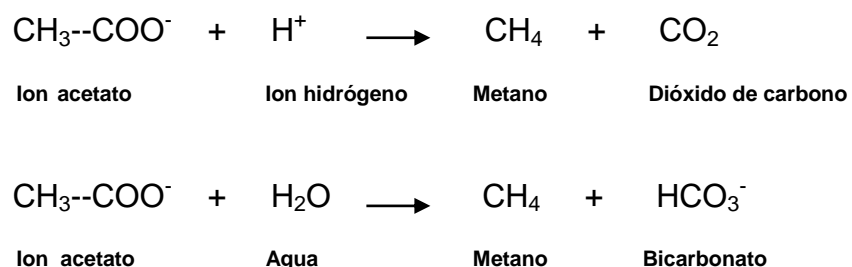
Las archaeas metanogénicas constituyen el único grupo de microorganismos altamente especializado y que son anaeróbicas estrictas,

existiendo dos grupos fundamentales de archaeas metanogénicas: las metanogénicas acetoclásticas y las utilizadoras de hidrógeno (Fernández-Polanco y García-Encina, 2000).

La clasificación de las archaeas metanogénicas utilizadoras de hidrógeno realizada por Stafford (1982) se compone de seis géneros principales: Methanobacterium, Methanosarcina, Methanococcus, Methanobacillus, Methanotrix, Methanospirillum. Las reacciones identificadas en la figura 4 para estos microorganismos se describen a continuación.

2.7.5. Conversión de acetato en metano por las archaeas metanogénicas acetoclásticas

La reacción acetoclástica, cuyos productos finales son metano y dióxido de carbono, es llevada a cabo específicamente por los géneros Methanosarcina y Methanotrix. La molécula de acetato se rompe por descarboxilación y el grupo metilo es reducido a CH₄ y CO₂ sin modificar su estructura y sin afectar a la concentración de H₂ en el gas. Normalmente estos microorganismos controlan el pH del medio por la eliminación del acético y producción de CO₂ que se disuelve formando bicarbonato según la ecuación:



La mayoría de los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el H₂ como aceptor de electrones, mientras que dos géneros son capaces de

utilizar el acetato. A pesar de ello, en ciertos ambientes anaerobios, este es el principal precursor del metano, considerándose que alrededor del 70 % del metano producido en los reactores anaerobios se forma a partir de acetato (Ferguson y Mah, 1987), mientras que el restante 30 % proviene del CO_2 y H_2 .

La degradación metanogénica de cada sustrato depende tanto de la naturaleza del mismo como de la ruta metabólica seleccionada por los microorganismos para su degradación.

En el caso de desequilibrio de las velocidades de generación y consumo de ácidos grasos volátiles se produce un descenso de pH del medio y una acumulación de hidrógeno en el medio. En el primer caso, descenso del pH, los microorganismos desvían la producción de ácidos grasos hacia el ácido butírico, donde se produce un mol de butírico en lugar de dos de acético. Este fenómeno se conoce con el nombre de “sobrecarga de ácido butírico”.

Sin embargo, cuando se produce un aumento del contenido de hidrógeno se fomenta la producción de ácido propiónico, lo que favorece la disminución de la concentración de hidrógeno y permite que las bacterias formadoras de ácidos recuperen el control del potencial redox del medio; no obstante se produce un acusado descenso del pH, por lo que las bacterias acetogénicas y metanogénicas se inhiben fuertemente. Este fenómeno se conoce como “sobrecarga de ácido propiónico” (Romero, 1991).

2.7.6. Formación de metano a partir del CO_2 y H_2 por las archaeas homoacetogénicas

La reacción de formación de metano a partir del dióxido de carbono e hidrógeno, actúa en el control del potencial redox de la fermentación en el

digestor, evitando la pérdida de hidrógeno y CO₂ durante el crecimiento sobre compuestos multicarbonados, lo que implica en una mayor eficiencia termodinámica (Zeikus, 1981).

El papel que desempeñan estos microorganismos en la naturaleza no es bien conocido, aunque la ventaja selectiva de los homoacetogénicos en sistemas anaeróbicos implica una ganancia adicional de ATP sobre especies hidrolíticas que no son capaces de catalizar compuestos de un solo átomo de carbono.

Sin embargo, se ha comprobado la existencia de una compleja relación entre las archaeas metanogénicas y no metanogénicas, a través de delicados equilibrios con los niveles de ácidos e hidrógeno. En la oxidación del hidrógeno, las arqueas metanogénicas eliminan el hidrógeno manteniendo sus concentraciones en niveles lo suficientemente bajos para permitir crecer y metabolizar a las bacterias no metanogénicas. Así, los microorganismos metanogénicos consiguen la energía necesaria a la vez que actúan como sumidero de electrones para las especies sensitivas al hidrógeno.

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Como resultado del estudio y recopilación de artículos de revistas científicas y trabajos de graduación de diferentes facultades y universidades extranjeras, sobre los factores que influyen en las características del compost de gallinaza, caña de azúcar y suelo franco limoso por separado, se determinaron las variables dependientes e independientes:

3.1.1. Variables dependientes

- Humedad (porcentaje): es el contenido de agua que hay en el compostador respecto de toda la materia que hay en el interior. Es mucho más habitual expresarla en porcentaje, ya que indicará cuál es la proporción de agua en relación con toda la masa del compost.
- Temperatura (grados Celsius): magnitud física fundamental que expresa el estado térmico de un sistema; se tomará la medición *in situ*.
- pH: el pH es un valor que indica si un producto o material es ácido (pH inferior a 7), alcalino (pH superior a 7) o neutro (pH igual a 7).
- Nitrógeno orgánico (partes por millón o porcentaje): refleja la cantidad total de nitrógeno en la muestra analizada, suma del nitrógeno orgánico

en sus diversas formas (proteínas y ácidos nucleicos en diversos estados de degradación, urea, aminos, entre otros.) y el ion amonio NH_4^+ .

- Contenido de materia orgánica (porcentaje): comprende la medición de la pérdida de peso de la muestra después de realizar una combustión seca del material orgánico.
- Población microbiana (*Escherichia coli*): el compost, contiene bacterias coliformes totales y la *E. coli*, por lo cual se realiza el análisis del método del número más probable, es para determinar la presencia de la bacteria *Escherichia coli*.
- Contenido de carbono orgánico (porcentaje): determinar la relación C/N.

3.1.2. Variables independientes

- Tiempo: el tiempo es una variable independiente, debido a que los valores de las variables dependientes dependen de ella.

3.2. Delimitación de campo de estudio

- Área: agricultura
- Industria: una industria avícola y azucarera
- Proceso: obtención de un abono orgánico a partir de la gallinaza, caña de azúcar y suelo orgánico, a través de la codigestión anaeróbica, evaluando las características fisicoquímicas y microbiológicas del compost.

- Etapa del proceso: describir las etapas del proceso de codigestión anaeróbica de la caña de azúcar, gallinaza y suelo franco en el tiempo de 20 a 100 días.
- Ubicación: el compost a evaluar, se obtuvo de un biodigestor de material de lámina galvanizada, ubicado en Santa Catarina Mita, Jutiapa, Guatemala; asimismo también la obtención del suelo franco limoso.

Los análisis físicos y microbiológicos de las propiedades del compost se realizaron en el Laboratorio de Microbiología de la Dra. Alba Tabarini, del Departamento de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria de la Universidad de San Carlos de Guatemala. También se realizaron en la Escuela Nacional Central de Agricultura.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Estudiante investigador
- Asesor del trabajo de graduación
- Jefe de laboratorio
- Técnicos químicos
- Revisor del trabajo de graduación
- Coordinador de trabajos de graduación

3.4. Recursos materiales disponibles

En el presente proyecto de investigación se debe hacer uso de las siguientes materias primas, reactivos, cristalería y equipos. Todo con la meta de cumplir los objetivos expuestos.

3.4.1. Materiales y materia prima

- Muestra de gallinaza
- Muestra de suelo franco limoso tamizado
- Caña de azúcar
- Biodigestor de lámina galvanizada
- Geomembrana

3.4.2. Equipos y cristalería

- Balanza analítica
- *Beacker*
- Bureta de 25 ml
- Caja de papel filtro
- Cajas de Petri con medio de cultivo agar
- Digesdahl digestión apparatus
- Digestor Kjeldahl
- Destilador Kjeldahl
- *Earlenmeyers*
- Espectrofotómetro HACH
- Estufa
- Matraz de fondo redondo de 100 ml
- Plancha de calentamiento marca Ohaus
- Potenciómetro
- Probeta de 50 ml
- Termómetro
- Tubos de digestión Kjeldahl de 250 ml
- Tubos de ensayo

3.4.3. Reactivos

- Ácido bórico
- Ácido sulfúrico
- Agua
- Agua destilada
- Fenolftaleína
- Hidróxido de sodio
- Peróxido de hidrógeno
- Selenio
- Sulfato de cobre
- Sulfato de potasio

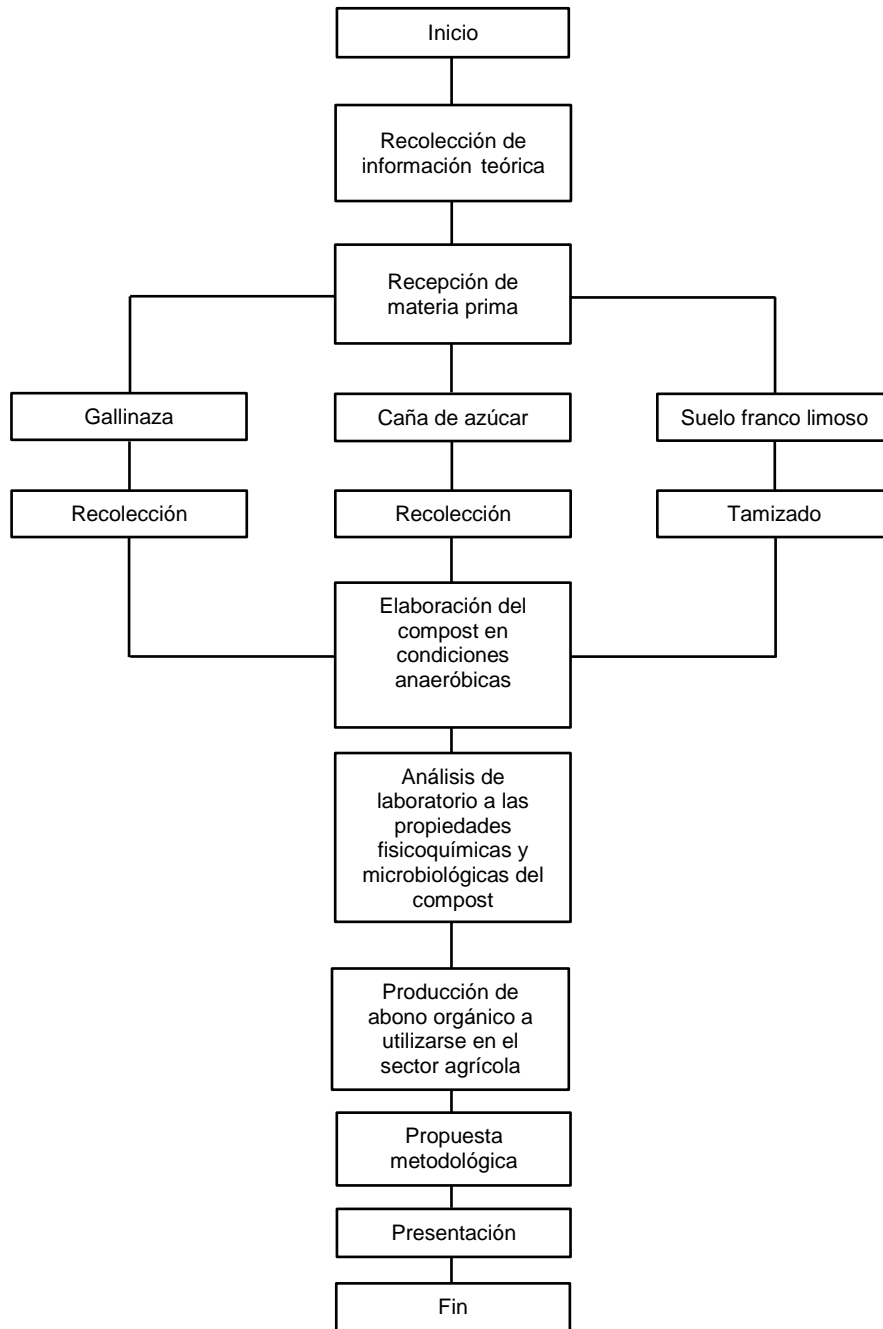
3.5. Técnica cuantitativa y cualitativa

El trabajo de graduación se fundamentó en la técnica cuantitativa, ya que se realizó en la evaluación de las propiedades físicas y químicas del compost, obteniendo valores puntuales de las muestras analizadas. Asimismo se realizó la descripción de la presencia de la bacteria *E. coli*, en las pruebas microbiológicas, también obteniendo valores puntuales *in situ* del pH y temperatura del proceso de codigestión anaeróbica.

3.5.1. Diseño general

En el diseño general del proceso abarcó desde la recopilación de la información teórica por medio de trabajos de investigación y revistas científicas. La recopilación de la materia prima, para que se degrade la materia orgánica en el biodigestor, hasta los análisis de las muestras del compost, para ser utilizado como abono orgánico en el sector agrícola.

Figura 5. Diagrama de flujo del proceso



Fuente: elaboración propia.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

El compost de gallinaza, caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y suelo franco limoso se obtuvo por codigestión en condiciones anaeróbicas, en un biodigestor de lámina galvanizada, que consiste en que la materia orgánica se degrade por bacterias anaeróbicas, produciendo metano y otros gases en el proceso. Este compost puede ser empleado en el sector agrícola, ya que contiene características particulares que se adecuan a los requerimientos de este sector.

Para realizar el compost se utilizó un 33 % de gallinaza, 33 % de caña de azúcar y 33 % de suelo franco limoso. También se utilizó una proporción 1:1 de materia orgánica y de agua, respectivamente. La carga diaria designada fue de 0,5 kg/día durante un tiempo de retención de 45 días en la cúpula de fermentación.

Se siguieron los siguientes lineamientos para el diseño y construcción del biodigestor de cúpula fija:

3.6.1. Cálculo del volumen del digestor

Conociendo la cantidad de materia orgánica que se puede recoger diariamente para alimentar el biodigestor, el volumen del digestor V_d se calcula mediante la ecuación No.1. (Oberg and Jones, 1979).

$$V_d = (Kg_{(excreta)} + Kg_{(agua)}) * T_r \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

Tr: tiempo de retención (tiempo que requieren las bacterias para degradar la materia orgánica)

V_d: volumen del biodigestor

$$V_d = (0,5 + 0,5) * 45 = 45L \sim 0,045 \text{ m}^3$$

3.6.2. Cálculo del volumen de la cámara de fermentación

El volumen de la cámara de fermentación V_{cf} constituye entre un 75 % ~ 80 % del volumen del digestor (Oberg and Jones, 1979), por lo cual:

$$V_{cf} = V_d (0,75 \sim 0,80 \%) \text{ m}^3 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

V_{cf}: volumen de la cámara de fermentación

$$V_{cf} = 0,045 (0,75 \sim 0,80) = (0,0338 \sim 0,0345) \text{ m}^3$$

3.6.3. Cálculo del volumen de la cúpula

La cúpula es un segmento de una esfera y su volumen V_c está en el rango de 20 % ~ 25 % del volumen digestor (Oberg and Jones, 1979), por tanto se tendrá la expresión:

$$V_c = V_d (0,25 \sim 0,20 \%) \text{ m}^3 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

V_c : volumen de la cúpula, m^3

$$V_c = 0,045 (0,25 \sim 0,20) = (0,01125 \sim 0,009) m^3$$

El compost de gallinaza, caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y suelo franco limoso, fue analizado en cinco mezclas durante cinco semanas. Esto se hizo para determinar el tiempo necesario para la obtención de abono orgánico. Las propiedades hasta ahora analizadas y estudiadas para este compost concluyen que se puede utilizar como abono orgánico en el sector agrícola.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Al obtener las muestras del compost a partir de gallinaza, caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y suelo franco limoso, se procedió a identificar cada una de ellas, y trasladarlas al laboratorio en donde se realizaron los análisis microbiológicos y fisicoquímicos.

Posteriormente, se realizó a cada una de las muestras la determinación de humedad gravimétrica, contenido de materia orgánica, de carbono orgánico, de nitrógeno orgánico total y la presencia de la bacteria *Escherichia coli*, realizándolo de acuerdo con los procedimientos internos del laboratorio en donde se llevaron a cabo los análisis.

Después de haber finalizado el tiempo de retención del compost se procedió a anotar la fecha y hora de la toma de las muestras.

Entre los 20 y 100 días del proceso de codigestión anaerobia del compost de gallinaza, caña de azúcar y suelo franco limoso se procedió a anotar el pH y la temperatura *in situ*, con el objeto de saber el comportamiento del proceso de descomposición de la materia orgánica en la codigestión anaeróbica.

3.8. Análisis estadístico

El análisis estadístico es el análisis de datos cuantitativos o cualitativos que surgen del estudio de un grupo de muestras. Las muestras se obtuvieron de un biodigestor de lámina galvanizada, donde el tiempo de retención del compost fue de 45 días, en el cual se tomaron cinco muestras semanales, durante un intervalo de cinco semanas.

El proceso de análisis estadístico que se utilizó fue el descriptivo, este método se enfoca en los métodos de recolección, descripción, visualización y resumen de datos, originados a partir de las variables de estudio.

El procedimiento utilizado para realizar el análisis estadístico de los datos obtenidos es el que se presenta a continuación:

$$\mu = (\sum x)/n \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

- μ : es el valor promedio de la serie de datos
- x : es la suma de toda la serie de datos
- n : número total de datos

$$\sigma = \sqrt{\sum \left(\frac{X_i^2}{N} \right) - \mu^2} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

- μ : es el valor promedio de la serie de datos
- σ : es la desviación estándar
- N : total de la serie de datos
- X_i : es cualquier número de la serie de datos

4. RESULTADOS

- Resultados de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del compost a partir de gallinaza y caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) mezclado con suelo orgánico, semanas después haber finalizado el tiempo de retención:

Tabla IV. **Resultados de los análisis de las muestras del compost a los 7 días de haber finalizado el tiempo de retención**

No.	pH	Temperatura (°C)	Materia orgánica (%)	Humedad gravimétrica (%)	Nitrógeno orgánico total (%)	<i>Escherichia coli</i>	Carbono orgánico (%)
1	6,76	46,00	16,75	116,92	1,13	Presencia de la bacteria NMP > 32,000 u.f.c./100ml	9,74
2	6,76	46,00	16,75	116,16			9,74
3	6,76	46,10	16,75	116,03	1,13		9,74
4	6,76	46,10	16,75	116,63			9,74
5	6,76	46,00	16,16	116,18			9,74
μ	6,76	46,04	16,63	116,38	1,13		9,74
σ	0,00	0,054	0,264	0,3758	0,00		0,00

Fuente: elaboración propia, con base en análisis de laboratorio.

Tabla V. **Resultados de los análisis de las muestras del compost a los 14 días de haber finalizado el tiempo de retención**

No.	pH	Temperatura (°C)	Materia orgánica (%)	Humedad gravimétrica (%)	Nitrógeno orgánico total (%)	<i>Escherichia coli</i>	Carbono orgánico (%)
1	6,91	55,00	18,87	123,99	0,70	Ausencia de la bacteria	10,97
2	6,91	55,10	18,87	123,44			10,97
3	6,92	55,00	18,22	123,44	0,71		10,59
4	6,91	55,00	18,93	123,99			11,01
5	6,91	55,00	18,93	123,88			11,01
μ	6,91	55,02	18,76	123,75	0,71		10,91
σ	0,00	0,044	0,306	0,2847	0,00		0,180

Fuente: elaboración propia, con base en análisis de laboratorio.

Tabla VI. **Resultados de los análisis de las muestras del compost a los 21 días de haber finalizado el tiempo de retención**

No.	pH	Temperatura (°C)	Materia orgánica (%)	Humedad gravimétrica (%)	Nitrógeno orgánico total (%)	<i>Escherichia coli</i>	Carbono orgánico (%)
1	6,97	56,20	10,62	62,16	0,58	Ausencia de la bacteria	6,17
2	6,97	56,10	10,62	62,44			6,17
3	6,96	56,20	10,62	62,50	0,58		6,17
4	6,97	56,20	10,62	62,30			6,17
5	6,97	56,20	10,62	62,18			6,17
μ	6,97	56,18	10,62	62,32	0,58		6,17
σ	0,00	0,044	0,00	0,152	0,00		0,00

Fuente: elaboración propia, con base en análisis de laboratorio.

Tabla VII. **Resultados de los análisis de las muestras del compost a los 28 días de haber finalizado el tiempo de retención**

No.	pH	Temperatura (°C)	Materia orgánica (%)	Humedad gravimétrica (%)	Nitrógeno orgánico total (%)	<i>Escherichia coli</i>	Carbono orgánico (%)
1	7,10	59,10	13,80	89,39	0,68	Ausencia de la bacteria	8,02
2	7,10	59,10	13,80	89,37			8,02
3	7,11	59,10	13,80	89,88	0,68		8,02
4	7,10	59,10	13,80	89,22			8,02
5	7,10	59,10	13,80	89,20			8,02
μ	7,10	59,10	13,80	89,41	0,68		8,02
σ	0,00	0,00	0,00	0,275	0,00		0,00

Fuente: elaboración propia, con base en análisis de laboratorio.

Tabla VIII. **Resultados de los análisis de las muestras del compost a los 35 días de haber finalizado el tiempo de retención**

No.	pH	Temperatura (°C)	Materia orgánica (%)	Humedad gravimétrica (%)	Nitrógeno orgánico total (%)	<i>Escherichia coli</i>	Carbono orgánico (%)
1	7,33	63,20	12,64	86,14	0,62	Ausencia de la bacteria	7,35
2	7,34	63,10	12,64	86,36			7,35
3	7,33	63,20	12,64	86,73	0,62		7,35
4	7,33	63,20	12,64	86,73			7,35
5	7,33	63,20	12,64	86,73			7,35
μ	7,33	63,18	12,64	86,54	0,62		7,35
σ	0,00	0,044	0,00	0,274	0,00		0,00

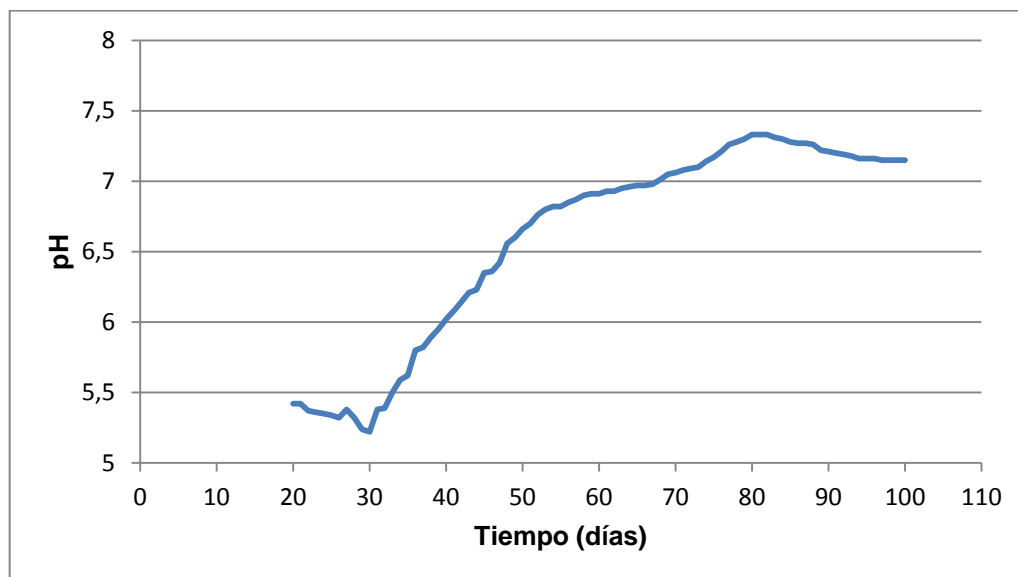
Fuente: elaboración propia, con base en análisis de laboratorio.

Tabla IX. Relación carbono y el nitrógeno total

No.	Días después de haber finalizado su tiempo de retención	Relación C/N
1	7	8,62
2	14	15,37
3	21	10,64
4	28	11,79
5	35	11,85

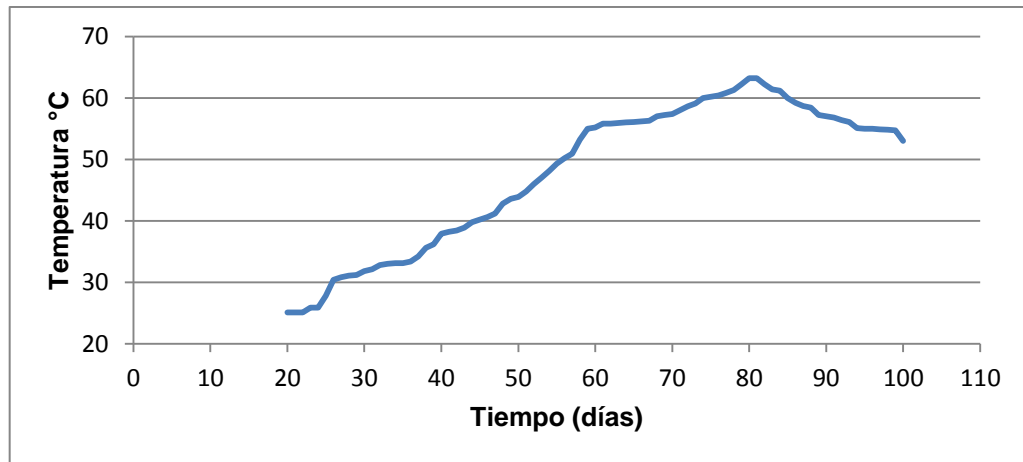
Fuente: elaboración propia, con base en las tablas IV, V, VI, VII y VIII.

Figura 6. Curva del pH respecto del tiempo durante el proceso de compostaje anaerobio



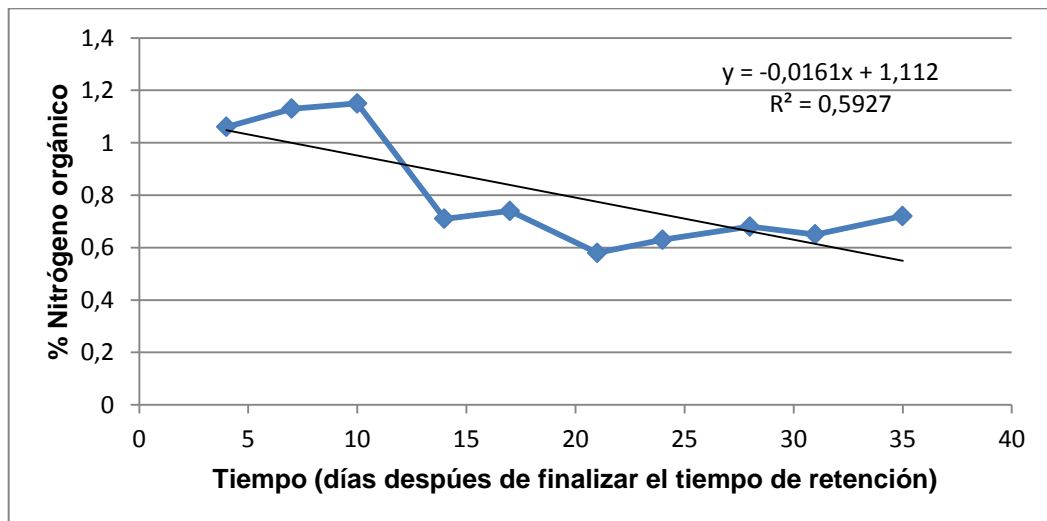
Fuente: elaboración propia, con base en los resultados del anexo 1.

Figura 7. **Curva de la temperatura respecto del tiempo durante el proceso de compostaje anaerobio**



Fuente: elaboración propia, con base en los resultados del anexo 1.

Figura 8. **Nitrógeno orgánico después de finalizar el tiempo de retención**



Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla X.

Tabla X. **Cantidad de nitrógeno orgánico después de finalizar el tiempo de retención**

No.	Días después de haber finalizado su tiempo de retención	Cantidad de nitrógeno orgánico
1	4	1,06
2	7	1,13
3	10	1,15
4	14	0,71
5	17	0,74
6	21	0,58
7	24	0,63
8	28	0,68
9	31	0,65
10	35	0,62

Fuente: elaboración propia, con base en análisis de laboratorio.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se da paso a la interpretación de los resultados obtenidos de los análisis realizados a las muestras del compost a partir de gallinaza, caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y suelo franco limoso después de finalizar el tiempo de retención de 45 días en el biodigestor.

En las figuras 6 y 7, se observó que a partir del día 20, se da una temperatura de 25,1 °C y un pH de 5,42. Esto indica que el proceso de compostaje se encuentra finalizando la etapa psicrófila y está empezando la etapa de hidrólisis de la digestión anaeróbica, donde los compuestos orgánicos complejos como la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), que se compone principalmente de proteínas e hidratos de carbono, “son despolimerizados, por acción de enzimas hidrolíticas, en moléculas solubles y fácilmente degradables, como azúcares (sacarosa) y las bacterias responsables son las hidrolítico-acidogénicas” (Nybroe et al., 1992; Goel et al., 1997; Confer y Logan, 1997 p. 42).

Entre los días 20 y 24 del tiempo de retención, según la figura 6 el pH disminuye; “principalmente esto permite que el proceso de hidrólisis se vuelva lento para un cambio de los grupos hidrolizables de las enzimas (grupos carboxilos y aminos) y despolimerizan los hidratos de carbono de la caña de azúcar en moléculas solubles” (Xavier Elías et al., 2006 p. 14).

A partir del día 26 del tiempo de retención, empieza la etapa mesofílica del proceso de compostaje anaerobio, según las figuras 6 y 7, con una temperatura de 30,4 °C y un pH de 5,32.

Los “compuestos solubles que se obtuvieron en la etapa hidrolítica se transforman en ácidos grasos de cadena corta (ácidos grasos volátiles) principalmente en ácido acético, propiónico y butírico” (Mahmoud et al., 2003 p. 19). Las bacterias encargadas de esta transformación son acidogénicas que incluyen especies como “*Butyrivibrio*, *Propionibacterium*, *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococos*, *Bifidobacterium*, *Lactobacillus*, *Streptococos* y *Enterobacterias*” (Xavier Elías et al., 2006 p. 5).

La etapa mesolítica anaeróbica finaliza el día 44 del tiempo de retención, según las figuras 6 y 7 donde, los resultados son una temperatura de 39,8 °C y un pH de 6,23. Durante este tiempo se observó un aumento de la temperatura y el pH, respectivamente, debido a que con el aumento de rango de temperatura, se aumenta la tasa de hidrólisis, aumenta la velocidad de crecimiento de las bacterias encargadas de la transformación de la materia orgánica, entre los 32 y 37 °C, se estabiliza el proceso.

A partir del día 45 del tiempo de retención empieza la etapa termófila anaeróbica; se da una temperatura de 40,2 °C y un pH de 6,35, según las figuras 6 y 7. En esta fase aparecen bacterias termófilas encargadas de degradar la materia orgánica; también empieza la etapa acetogénica, donde los compuestos intermedios son transformados por las bacterias acetogénicas; se obtiene el ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, lo que puede llevar a una acidificación de reactores anaerobios.

“Este proceso ocurre porque el hidrógeno bloquea la eliminación de electrones, vía reducción de protones, y las bacterias acidogénicas (fermentativas) deben asumir dichos electrones por otras vías, con el consiguiente aumento de productos reducidos de oxidación tales como propionato y butirato” (Archer, 1983 p. 32).

A los 7 días de haber finalizado el tiempo de retención (día 52), según la tabla IV, se tiene como resultado una temperatura de 46 °C y un pH de 6,76. El proceso sigue en la etapa anaeróbica termofílica; todas las sustancias son fácilmente degradables como las proteínas, azúcares y lípidos. El pH tiende a alcalinizarse debido al consumo de los ácidos orgánicos y el aumento de la concentración de amonio por descomposición de proteínas.

El valor de la humedad gravimétrica adquirió un valor de 116,38 % según la tabla IV, lo cual es elevado, porque el agua inicialmente ocupó todos los espacios entre los poros, y el proceso se volvió anaerobio; es decir, se produjo una descomposición de la materia orgánica; también se utilizó una proporción 1:1 de materia orgánica y agua, respectivamente, para proporcionar un medio acuoso a la digestión anaeróbica y mejorar el proceso de hidrólisis.

El resultado de la materia orgánica alcanzó un valor de 16,63 % según la tabla IV, debido a que se inicia la transformación de las moléculas que conforman la materia orgánica, obteniendo compuestos más simples, principalmente de etapas anteriores que fueron la hidrólisis y acidogénesis, los productos obtenidos de las primeras actividades bacterianas sirvieron de sustrato para los microorganismos que se desarrollaron en la siguiente fase, que es donde se produce el metano.

Una de las bacterias presentes en la fase no metanogénica es la *Escherichia coli*, que según la tabla IV, hay presencia en NMP < 32,000 u.f.c./100 ml a los siete días de haber finalizado el tiempo de retención; esta bacteria es un patógeno no deseado en el abono orgánico, el valor también excede el permisible en la tabla I.

Debido a que la gallinaza contiene gran cantidad de nutrientes, también contiene grandes cantidades de coliformes fecales; esta bacteria se puede eliminar controlando la fase termófila anaeróbica en un rango 55 °C a 65 °C.

El resultado del carbono orgánico fue de 9,74 % y de nitrógeno orgánico total fue de 1,13 % según la tabla IV, los niveles de nutrientes deben estar por encima de la concentración óptima para las metanobacterias, ya que ellas se inhiben severamente por falta de nutrientes. El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas; el carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células.

Estas bacterias consumen 20 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango 20:1; dando como resultado una relación C/N de 8,62 a los siete días de haber finalizado el tiempo de retención, lo cual está por debajo del rango permisible en la tabla I, con una relación C/N menor de 9:1 se inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso, principalmente el inicio de la etapa de metanogénesis, donde se considera la etapa limitante del proceso; es necesario mantener el pH del sistema cercano a la neutralidad.

Según la figura 7 se observó que del día 53 al 58 del tiempo del proceso de codigestión anaeróbica, hay un incremento de la temperatura de 47 °C a 53,2 °C, indica que a medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás, en la etapa de metanogénesis.

También se observó un incremento en el pH de 6,8 a 6,9 en el la figura 6, debido a la “solubilidad de los gases generados desciende al aumentar la temperatura, favoreciéndose la transferencia líquido-gas” (Archer, 1983 p. 22). Esto supone un efecto positivo para gases tales como NH_3 , H_2 y H_2S , dada su toxicidad sobre el crecimiento de los microorganismos anaeróbicos. Debido a este período es que el descenso de la solubilidad del CO_2 provoca un aumento del pH.

A los 14 días de haber finalizado el tiempo de retención (día 59), según la tabla V, se tiene como resultado una temperatura de 55 °C y un pH de 6,91. El pH tiende a la alcalinidad para que los microorganismos metanogénicos desarrollen su actividad en condiciones óptimas. La temperatura en esta fase se encuentra en el rango termofílico; debe controlarse que se encuentre en un rango óptimo de 50 °C a 65 °C para conseguir una mayor velocidad del proceso, lo que implica, a la vez, un aumento en la eliminación de organismos patógenos.

A los 14 días de haber finalizado el tiempo de retención se tiene como resultado de la humedad gravimétrica de 123,75 % según la tabla V, lo cual indica que en este tiempo la materia orgánica, sigue degradándose en un medio acuoso; esto permite mejores condiciones en la descomposición anaeróbica; el agua ocupó más espacio entre los poros en comparación con la humedad gravimétrica a los 7 días de finalizar el tiempo de retención, por lo cual permite las condiciones necesarias para la producción de metano y otros gases.

La materia orgánica dio como resultado 18,76 % a los 14 días de haber finalizado el tiempo de retención, según la tabla V, en comparación con el resultado de materia orgánica; a los siete días que finalizó el tiempo de retención, hay un incremento debido a que en las etapas anteriores la

degradación de la materia orgánica es realizada por bacterias acidogénicas, caso contrario que en la fase metanogénica, en la que “compuestos como el acético, hidrógeno y dióxido de carbono son transformados a CH₄ y CO₂; que las bacterias metanogénicas acetoclásticas no degradan todo el ácido acético disponible dando lugar a mayor cantidad de materia orgánica” (Xavier Elías et al., 2006 p. 7).

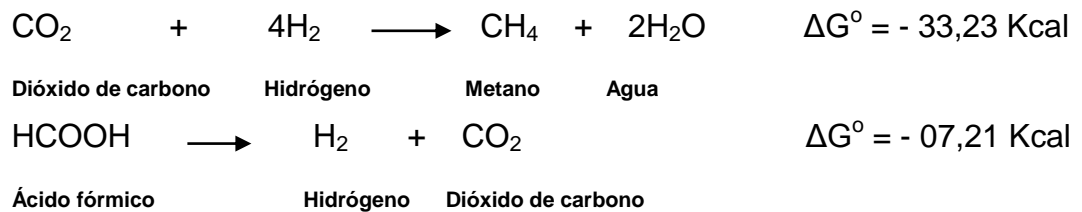
En la tabla V se observó que hay ausencia de la bacteria *Escherichia coli*, debido a que a una temperatura mayor a los 55 °C, los organismos patógenos no sobreviven; la presencia de las coliformes fecales en el compost viene en gran medida por el uso de estiércoles (gallinaza); uno de los métodos para el control de estos es el empleo de temperaturas elevadas, de ahí la importancia en el control del tiempo y temperatura de la fase termofílica anaeróbica.

Los resultados del carbono orgánico fueron de 10,71 % y de nitrógeno orgánico total de 0,71 % según la tabla V; dando como resultado una relación C/N de 15,37; según la tabla IX, los niveles de los nutrientes del carbono se encuentran en un rango óptimo para el desarrollo de las metanobacterias como las “*Methanobacterium, Methanococos, Methanobrevibacter*” (Xavier Elías et al., 2006 p. 8), entre otros.

La cantidad de nitrógeno orgánico disminuyó debido a que la población bacteriana lo utiliza para asimilar el nitrógeno de la gallinaza durante la fermentación, principalmente para su metabolismo y degradar la materia orgánica. La relación C/N a los 14 días de finalizar el tiempo de retención se encuentra en el rango óptimo, dado que estos nutrientes son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas.

Según la figura 7 se observó que del día 60 al 65 del tiempo del proceso de codigestión anaeróbica, hay un incremento de la temperatura de 55,2 °C a 56,1 °C; esto indica que la temperatura siguió incrementándose en un periodo corto de tiempo, debido a que “existen bacterias metanogénicas utilizadoras de hidrógeno; estos son microorganismos que se desarrollan autotróficamente y utilizan el hidrógeno como fuente de energía y el dióxido de carbono, como fuente de carbono” (Gaspar M. Mejía Sánchez, et. al. 2007 p. 22).

“La oxidación del hidrógeno, reduce al dióxido de carbono hasta metano el cual escapa como gas, algunas de estas bacterias utilizan ácido fórmico, el que tiene que ser transformado a hidrógeno y dióxido de carbono previamente” (Gaspar M. Mejía Sánchez et. al. 2007 p. 11).



De las reacciones anteriores se observó que ambas liberan calor en el proceso exotérmico, lo cual va acorde al aumento de temperatura en la fase de metanogénesis.

Según la figura 6 se observó que del día 60 al 82 del tiempo del proceso de codigestión anaeróbica, hay un incremento de pH de 6,91 a 7,33. Esto se debe a que los microorganismos metanogénicos son más susceptibles a las variaciones de pH que los otros microorganismos de la comunidad microbiana anaeróbica.

Debido a que la metanogénesis se considera la etapa limitante del proceso, es necesario mantener el pH del sistema cercano a la neutralidad, para aumentar la actividad de los microorganismos metanogénicos, provocando la disminución de ácido acético y H_2 , y aumentando la producción de metano.

A los 21 días de haber finalizado el tiempo de retención (día 66), según la tabla VI, se tiene como resultado una temperatura de 56,2 °C y un pH de 6,97. El proceso de compostaje, en la digestión anaeróbica continúa en la etapa termofílica anaeróbica, donde hay un aumento en la materia orgánica y en la producción de biogás; el pH tiende a la neutralidad durante esta etapa.

A los 21 días de haber finalizado el tiempo de retención se tiene como resultado la humedad gravimétrica de 62,32 %; según la tabla VI, se observó que disminuyó abruptamente, esto se debió dado que conforme el tiempo avanzó en la etapa de metanogénesis, la humedad de la biomasa (caña de azúcar) compuesta principalmente por polisacáridos, proteínas, lípidos y lignina, se degradaron rápidamente hasta formar en su mayor parte metano. Otra razón es la combinación de las excretas (gallinaza) con agua, más conocido como purín, tiene alto contenido de humedad, pero en la fase termofílica anaeróbica se produce calor, evaporándolo hacia la cámara de gases del biodigestor.

Otra causa fue que en esta etapa se forman lixiviados debido a la descomposición anaeróbica de la materia orgánica, donde son aprovechados como fertilizante orgánico en los suelos, mejorando sus propiedades; estos lixiviados fueron descargados del efluente, reduciendo la humedad en la proporción 1:1 de agua y materia orgánica utilizada inicialmente en la mezcla del compost.

La materia orgánica dio como resultado 10,62 % a los 21 días de haber finalizado el tiempo de retención, según la tabla VI; es más bajo en comparación con los resultados obtenidos a los 7 y 14 días de finalizar el tiempo de retención; debido al incremento de la temperatura durante los días 60 y 66, gran parte de la materia orgánica se transformó en metano por las bacterias metanogénicas, por lo que el contenido en materia orgánica fue menor que los días anteriores.

En la tabla VI se observó que hay ausencia de la bacteria *Escherichia coli*, debido a que el proceso continúa en la fase termofílica superando los 55 °C, donde esta bacteria no puede sobrevivir y tampoco ser inoculada.

El resultado del carbono orgánico fue de 6,17 % y de nitrógeno orgánico total fue de 0,58 % según la tabla VI, dando como resultado una relación C/N de 10,64 según la tabla IX, donde la cantidad de nitrógeno en comparación con resultados anteriores (7 y 14 días de finalizar el tiempo de retención) disminuye, por lo que la deficiencia de nitrógeno incapacitó a las bacterias para metabolizar todo el carbono presente, que con ello se perdió eficacia de degradación.

La relación C/N a los 21 días de finalizar el tiempo de retención se encuentra en el rango óptimo según la tabla I, pero las metanobacterias inhibieron parte de la producción de metano, principalmente por la disminución de los nutrientes; como el nitrógeno, que se volatilizó en forma de amoníaco en la cámara de gases del biodigestor.

Según las figuras 6 y 7 se observó que del día 82 al 94 del tiempo del proceso de codigestión anaeróbica, el pH y la temperatura empiezan a disminuir, debido a que en la etapa de metanogénesis se produce alrededor de un 70 % del biogás, degradando gran parte de la materia orgánica; por lo que

las bacterias metanogénicas metabolizan gran parte de ella en este tiempo; la etapa de metanogénesis está terminando, dando lugar a procesos exotérmicos (libera calor) en el medio donde se desarrolla la descomposición orgánica, dejando un sustrato fermentado que puede ser utilizado como abono orgánico.

El pH tiende a la neutralidad dado que es donde pueden sobrevivir las bacterias metanogénicas acetoclásticas encargadas de la producción de metano y descomposición orgánica restante del sustrato fermentado.

A los 28 días de haber finalizado el tiempo de retención (día 73), según la tabla VII, se tiene como resultado una temperatura de 59,10 °C y un pH de 7,10. El proceso de digestión anaeróbica continúa en la etapa termofílica, donde hay ausencia de organismos patógenos; la temperatura sigue aumentando debido al metabolismo de las bacterias metanogénicas, produciendo metano y calor. El pH está muy cerca de la neutralidad para que principalmente las bacterias utilizadoras de hidrógeno lo oxiden y lo utilicen como fuente de energía, aunque parte del hidrógeno se escapa como gas.

A los 28 días de haber finalizado el tiempo de retención se tiene un resultado de la humedad gravimétrica de 89,41 % según la tabla VII, la cual se encuentra en un rango óptimo según la tabla I; también se observó un aumento respecto del resultado obtenido a los 21 días de finalizar su tiempo de retención; esto se debió a que parte de la materia no se había degradado totalmente, al momento de ser mezclado y homogeneizado para evitar espumas y sedimentación, donde la biomasa aún contenía humedad que no había sido degradada por las bacterias metanogénicas.

La materia orgánica dio como resultado 13,80 % a los 28 días de haber finalizado el tiempo de retención, según la tabla VII; lo cual contiene una

cantidad de materia orgánica óptimo, según la tabla I. Esto se debió principalmente por las bacterias metanogénicas acetoclásticas e hidrogenófilas, que no logran degradar todo el ácido acético, por eso se da mayor presencia de materia orgánica.

En la tabla VII se observó que hay ausencia de la bacteria *Escherichia coli*, donde se registró una temperatura de 59,10 °C; el proceso de codigestión anaeróbica sigue en la etapa termofílica, donde también afecta la alta humedad; en el proceso es uno de los métodos más efectivos para destruir microorganismos, el calor húmedo mata los microorganismos porque coagula sus proteínas, siendo más rápido y efectivo que el calor seco que los destruye al oxidar sus constituyentes químicos.

El resultado del carbono orgánico fue de 8,02 % y del nitrógeno orgánico total fue de 0,68 %, según la tabla VII, dando como resultado una relación C/N de 11,79 según la tabla IX, donde se observó un aumento tanto en la cantidad de carbono como de nitrógeno orgánico, por lo que la relación C/N aumentó. Esto es debido principalmente a que la concentración de amoníaco aumenta cuando el pH y la temperatura aumentan, dando lugar para la recuperación de nitrógeno orgánico libre que sea utilizado para la formación de nuevas células, donde también el carbono es de las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas.

La relación C/N se encuentra dentro del rango permisible de la tabla I, donde los microorganismos metanogénicos no se inhiben en la descomposición de la materia orgánica para obtener metano y el sustrato fermentado sea útil como abono orgánico.

Según las figuras 6 y 7 se observó que del día 95 al 100 del tiempo del proceso de codigestión anaeróbica, el pH y la temperatura empiezan a descender, donde la fase termofílica anaeróbica finaliza y donde se produce la mayor cantidad de metano; a partir de allí, comienza la etapa mesofílica anaeróbica II, donde “aparecen nuevamente bacterias acetogénicas, principales productores de ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono” (Xavier Elías et al., 2006 p. 8).

Debido a que el metabolismo acetogénica es dependiente de las concentraciones de ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, este proceso se vuelve lento debido a la presencia en bajas concentraciones en esta etapa, dando lugar a un descenso en la temperatura y un lento proceso de la degradación de la materia orgánica por parte de las bacterias acetogénicas.

A los 35 días de haber finalizado el tiempo de retención (día 80), según la tabla VIII, se tiene como resultado una temperatura de 63,20 °C y un pH de 7,33. Durante este tiempo se alcanzó la máxima temperatura y pH de todo el proceso de codigestión anaeróbica; en estas condiciones se genera la máxima cantidad de biogás, debido a que se originaron grandes cantidades de ácido acético, bicarbonato y dióxido de carbono, a causa del metabolismo de las bacterias metanogénicas se crearon reacciones exergónicas, es decir que liberan energía en forma de calor.

Debido a la presencia de altas concentraciones de ácido acético el pH comenzó a disminuir, inhibiendo el crecimiento de las bacterias metanogénicas; con esto finaliza la etapa metanogénica y da lugar a “la etapa mesofílica anaeróbica II, crecen las bacterias acetogénicas y hay disminución en la cantidad de hidrógeno que se produce” (Alfaro, et al. 2003 p. 21).

A los 35 días de haber finalizado el tiempo de retención se tiene un resultado de la humedad gravimétrica de 89,41 % según la tabla VIII; se debió principalmente a que el alto contenido de humedad que contiene la caña de azúcar se fue evaporando hacia la cámara de gases por el proceso de descomposición de las bacterias metanogénicas, que liberan calor por el proceso exotérmico de las reacciones.

La materia orgánica dio como resultado 12,64 % a los 35 días de haber finalizado el tiempo de retención, según la tabla VIII, un valor menor que el de la tabla VII, debido a que las bacterias metanogénicas degradaron un mayor porcentaje del ácido acético de la materia orgánica, logrando un porcentaje menor.

El resultado del carbono orgánico fue de 7,35 % y de nitrógeno orgánico total fue de 0,62 % según la tabla VIII; se observó una disminución en el carbono orgánico, dado que la digestión anaeróbica se encuentra en la etapa de metanogénesis, donde el “proceso que realizan microorganismos conocidos como metanógenos (archaeas anaeróbicas estrictas) que usan el carbono (dióxido de carbono) como aceptor final de electrones para producir metano”. (Clesceri, et. al. 1998 p. 17). Hay pérdida de carbono en el entorno, dando como resultado una relación C/N de 11,85, según la tabla IX.

En la tabla VIII se observó que hay ausencia de la bacteria *Escherichia coli*; esto se debió a que se alcanzó una temperatura de 63,20 °C, lo cual causa la muerte de esta bacteria y no permite que se reproduzca, ya que es miembro del grupo de coliformes fecales, “su presencia en las muestras indica por lo tanto la presencia de contaminación de origen fecal y la posible presencia de patógenos” (Clesceri, et. al. 1998 p. 32).

En la figura 8, se observó que a los 4 días después de finalizar el tiempo de retención, el nitrógeno orgánico da como resultado 1,06 % aumentando hasta los 10 días de finalizar el tiempo de retención hasta 1,15 %; la gallinaza contiene grandes cantidades de nitrógeno orgánico, por lo cual era necesario que en la codigestión, el tipo de residuo no inhibiera el metabolismo de las bacterias y aportara un equilibrio de nutrientes, en este caso el nitrógeno orgánico.

La caña de azúcar contiene entre 1 – 3 % de nitrógeno el cual es transformado de forma inorgánica a orgánica, donde según Polprasert (1996), después de la digestión, por lo menos el 50 % del nitrógeno presente en forma de amoníaco puede ser nitrificado para su fácil absorción, por lo tanto la digestión aumenta la disponibilidad de nitrógeno en los residuos orgánicos. Otra razón se debió principalmente a que el proceso de digestión anaeróbica se encuentra en la etapa mesolítica anaeróbica, se produce la muerte o lisis de una parte de los microorganismos acetogénicos y por lo tanto la liberación de una cantidad de nitrógeno que forma parte del tejido celular.

Entre los días 10 y 21, posteriores al tiempo de retención, la cantidad de nitrógeno orgánico empieza a descender hasta 0,58 % según la tabla X; esto se debió a que la caña de azúcar contiene fibras, en menor proporción, agua y nitrógeno que retrasan el tiempo de descomposición, dando lugar a la etapa de hidrólisis en ciertas partes de la digestión anaeróbica. El nitrógeno orgánico durante el proceso anaerobio se hidroliza, produciendo formas amoniacales.

“Aunque el nitrógeno amoniacal es un importante nutriente para el crecimiento de los microorganismos” (Bryant et al., 1971 p. 12). Cuya carencia puede provocar el fracaso en la producción de gas, una concentración excesivamente alta del mismo puede limitar su crecimiento. La cantidad de

nitrógeno orgánico es hidrolizado dando lugar a formas amoniacales, donde se forma el amoníaco libre que inhibe el proceso; este se escapa hacia la cámara de gases, reduciendo la cantidad de nitrógeno orgánico que aporta la caña de azúcar a la composta en condiciones anaeróbicas y convirtiendo el pH entre neutro y alcalino.

Entre los días 24 y 35 posteriores al tiempo de retención, la cantidad de nitrógeno orgánico empieza a nuevamente a descender hasta 0,62 % según la tabla X, debido a la pérdida de nitrógeno de la gallinaza, que se volatiliza en forma de amoníaco a la cámara de gases del biodigestor, el sustrato fermentado de gallinaza y caña de azúcar pierde nutrientes en el proceso de digestión anaeróbica, donde el proceso se encuentra en la etapa de metanogénesis.

Debido a que la caña de azúcar tiene una parte líquida que es la sacarosa y el agua, también tiene una parte sólida que son las fibras y el bagazo que retrasan el tiempo de descomposición de la materia orgánica, donde las bacterias convierten la sacarosa en monómeros más simples; en el proceso se libera cierta cantidad del nitrógeno orgánico de la caña de azúcar, disminuyendo el valor de nitrógeno en la composta en condiciones anaeróbicas.

CONCLUSIONES

1. El compost, a los 7 días de finalizar el tiempo de retención, tiene una relación C/N de 8,62, un pH de 6,76, temperatura de 46,04 °C, materia orgánica de 16,63 %, una humedad gravimétrica 116,38 % nitrógeno orgánico de 1,13 %, carbono orgánico de 9,74 % y debido a la presencia de la bacteria *Escherichia coli*, con NMP 32,000 u.f.c./100 ml, no puede ser utilizado como abono orgánico.
2. El compost, a los 14 días de finalizar el tiempo de retención, tiene una relación C/N de 15,37, un pH de 6,91, temperatura de 55,02 °C, materia orgánica de 18,76 %, nitrógeno orgánico de 0,71 %, ausencia de la bacteria *Escherichia coli*, carbono orgánico de 10,91 % y humedad gravimétrica de 123,75 %, no puede ser utilizado como abono orgánico debido a un alto contenido de humedad, ya que limita el proceso de descomposición de la materia orgánica y causa pérdidas de nitrógeno.
3. El compost, a los 21 días de finalizar el tiempo de retención, tiene una relación C/N de 10,64, un pH de 6,97, temperatura de 56,18 °C, materia orgánica de 10,62 %, nitrógeno orgánico de 0,58 %, ausencia de la bacteria *Escherichia coli*, humedad gravimétrica de 62,32 % y carbono orgánico de 6,17 %, donde el compost no puede utilizarse como abono orgánico por la baja cantidad de carbono.

4. El compost, a los 28 días de haber finalizado el tiempo de retención, puede utilizarse como abono orgánico dando como resultado una relación C/N de 11,79, un pH de 7,10, temperatura de 59,10 °C, materia orgánica 13,80 %, 89,41 % de humedad gravimétrica, 0,68 % de nitrógeno orgánico, la ausencia de la bacteria *Escherichia coli* y 8,02 % de carbono orgánico, se encuentran dentro del rango óptimo, según Paul y Clark (1996) y el Manual de compostaje por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

5. El compost, a los 35 días de haber finalizado el tiempo de retención, no puede utilizarse como abono orgánico, dando como resultado una relación C/N de 11,85, un pH de 7,33, temperatura de 63,18 °C materia orgánica 12,64 %, 86,54 % de humedad gravimétrica, 0,62 % de nitrógeno orgánico, la ausencia de la bacteria *Escherichia coli* y donde el carbono orgánico tiene un valor de 7,35 % que no se encuentra dentro del rango óptimo, según Paul y Clark (1996) y el Manual de compostaje por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

6. La cantidad de nitrógeno orgánico en el compost está influenciada por el tiempo de descomposición, donde se observó una disminución entre los 10 y 21 días, finalizado el tiempo de retención, de 1,15 % a 0,58 % y otra disminución entre los 28 y 35 días, de 0,68 a 0,62% y un aumento entre los días 4 y 10 de 1,06 % a 1,15 % y entre los días 24 y 28 de 0,63 % a 0,68 %.

RECOMENDACIONES

1. La utilización de geomembranas en biodigestores permite capturar y aprovechar el gas metano para generar energía y producir fertilizantes naturales, los cuales resisten altas temperaturas de hasta 70 °C.
2. Realizar un análisis de la cantidad de biogás que se genera durante el proceso de digestión anaeróbica, ya que puede ser utilizado para cocinar los alimentos y como calentamiento de animales, además de la producción de energía eléctrica.
3. Evaluar las propiedades físicas, químicas, microbiológicas y biológicas en el biol que se produce después de la fermentación de la gallinaza, caña de azúcar y suelo franco limoso durante y después de tiempo de retención, para que se pueda utilizar como fertilizante orgánico para las plantas.
4. En el momento del proceso de codigestión anaeróbica, utilizar residuos orgánicos con el propósito de compensar las carencias que tiene el sustrato, controlando la etapa mesofílica y termofílica, que es donde se produce la mayor cantidad de metano.

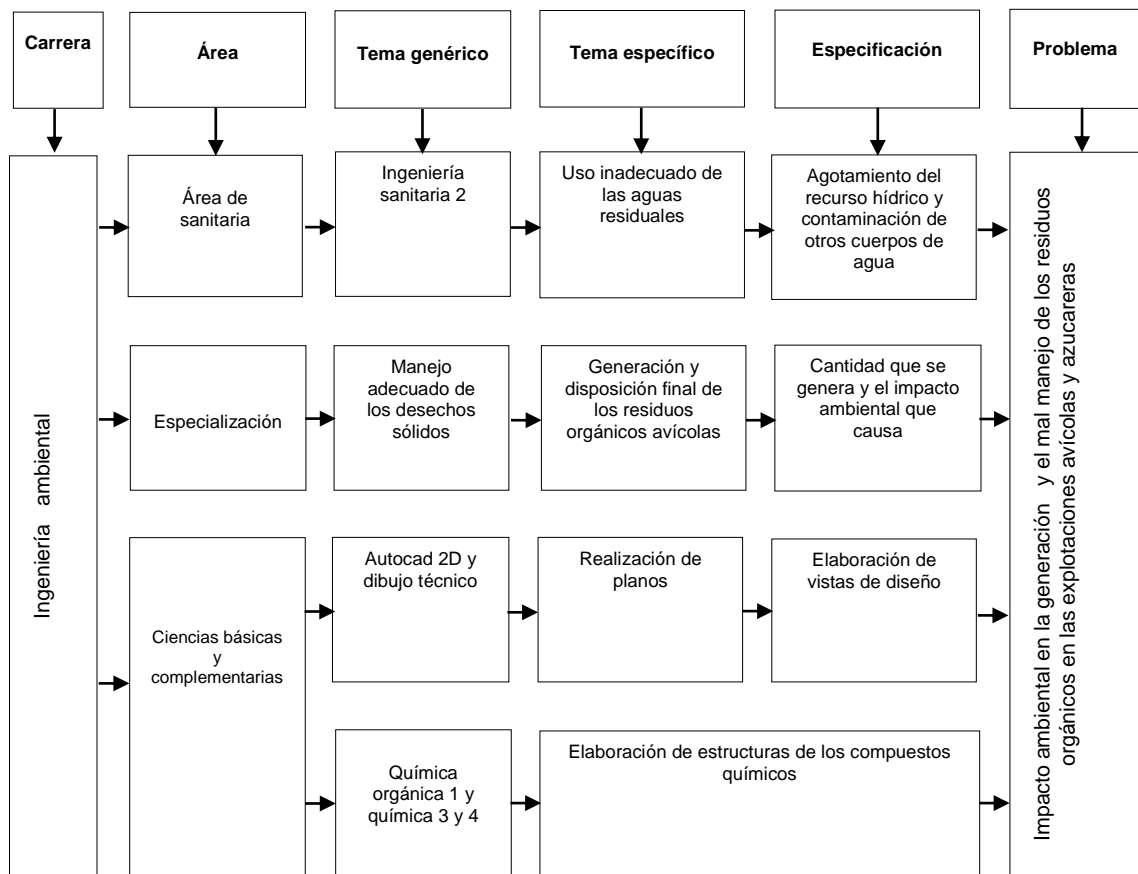
BIBLIOGRAFÍA

1. ALEXANDER, Mario. *Introducción a la microbiología del suelo*. Juan José Peña Cabriales (Trad.). México: AGT, 1980. 491 p.
2. BEDOYA Juana; DUQUE Carlos. *Alternativas para el manejo de residuos orgánicos*. [En línea]. Bogotá, Colombia. <<http://www.fenavi.org/fenavi/tec-manejoresiduos.php?idm=109>>. [Consulta: agosto de 2014].
3. BERNAL, Paul; SÁNCHEZ, Mario; PAREDES, Carlos. *Composting of organic wastes as a strategy for producing high quality organic fertilizers*. 8th Int. Conference of the RAMIRAN Network. FAO European Cooperative. Roma, Italia. 1998. 182 p.
4. BREMMER, John. *Total nitrogen en Black CA. Methods for soil analysis*. Part 2. SSSA. EEUU, 1965. 1179 p.
5. CEGARRA, José. "Compostaje de desechos orgánicos y criterios de calidad del compost". En: VII Congreso colombiano de la Ciencia del Suelo. Bucaramanga: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, octubre de 1994. 32 p.
6. DUBACH, Peter. *The chemistry of soil humic substances. Soil fertilization*. 2a ed. Estados Unidos, 1963. 300 p.

7. FARÍAS, César; BALLESTEROS, Gerardo. *Variación de parámetros fisicoquímicos durante un proceso de compostaje*. Colombia, 1999. 86 p.
8. MADRID, Carlos. *Efecto de activadores sobre la calidad de composts elaborados con cachaza y bagazo de la caña de azúcar*. Venezuela: Omega, 1998. 28 p.
9. PERNALETE, John; SUÁREZ, Mario; FERRER, Ariel. *Fraccionamiento del bagazo de caña de azúcar mediante tratamiento amoniacal efecto de la humedad del bagazo y de la carga de amoníaco*. España: Limusa, 2008. 10 p.
10. RAO, Neil. *Effect of C/N ratio and moisture content on the composting of poplar wood*. *Biotechnol.* España: AMV, 1995. 892 p.
11. SOTO, Gustavo. *Abonos orgánicos: definiciones y procesos*. En Meléndez, G; Soto, G; Uribe, L. eds. *Abonos orgánicos: principios, características e impacto en la agricultura*. Costa Rica, CATIE, UCR. 2003. 140 p.

APÉNDICE

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. **Temperatura y pH durante el tiempo de retención y después de haber finalizado**

No.	Fecha	Tiempo de retención	Temperatura °C	pH
1	25/11/2014	1		
2	26/11/2014	2		
3	27/11/2014	3		
4	28/11/2014	4		
5	29/11/2014	5		
6	30/11/2014	6		
7	01/12/2014	7		
8	02/12/2014	8		
9	03/12/2014	9		
10	04/12/2014	10		
11	05/12/2014	11		
12	06/12/2014	12		
13	07/12/2014	13		
14	08/12/2014	14		
15	09/12/2014	15		
16	10/12/2014	16		
17	11/12/2014	17		
18	12/12/2014	18		
19	13/12/2014	19		
20	14/12/2014	20	25,1	5,42

Continuación del anexo 1.

21	15/12/2014	21	25,1	5,42
22	16/12/2014	22	25,1	5,37
23	17/12/2014	23	25,9	5,36
24	18/12/2014	24	25,9	5,35
25	19/12/2014	25	27,8	5,34
26	20/12/2014	26	30,4	5,32
27	21/12/2014	27	30,8	5,38
28	22/12/2014	28	31,1	5,32
29	23/12/2014	29	31,2	5,24
30	24/12/2014	30	31,8	5,22
31	25/12/2014	31	32,1	5,38
32	26/12/2014	32	32,8	5,39
33	27/12/2014	33	33,0	5,50
34	28/12/2014	34	33,1	5,59
35	29/12/2014	35	33,1	5,62
36	30/12/2014	36	33,4	5,80
37	31/12/2014	37	34,2	5,82
38	01/01/2015	38	35,6	5,89
39	02/01/2015	39	36,2	5,95
40	03/01/2015	40	37,9	6,02
41	04/01/2015	41	38,2	6,08
42	05/01/2015	42	38,4	6,14
43	06/01/2015	43	38,9	6,21
44	07/01/2015	44	39,8	6,23
45	08/01/2015	45	40,2	6,35
46	09/01/2015	46	40,6	6,36

Continuación del anexo 1.

47	10/01/2015	47	41,2	6,42
48	11/01/2015	48	42,8	6,56
49	12/01/2015	49	43,6	6,60
50	13/01/2015	50	43,9	6,66
51	14/01/2015	51	44,8	6,70
52	15/01/2015	52	46,0	6,76
53	16/01/2015	53	47,0	6,80
54	17/01/2015	54	48,1	6,82
55	18/01/2015	55	49,3	6,82
56	19/01/2015	56	50,2	6,85
57	20/01/2015	57	50,9	6,87
58	21/01/2015	58	53,2	6,90
59	22/01/2015	59	55,0	6,91
60	23/01/2015	60	55,2	6,91
61	24/01/2015	61	55,8	6,93
62	25/01/2015	62	55,8	6,93
63	26/01/2015	63	55,9	6,95
64	27/01/2015	64	56,0	6,96
65	28/01/2015	65	56,1	6,97
66	29/01/2015	66	56,2	6,97
67	30/01/2015	67	56,3	6,98
68	31/01/2015	68	57,0	7,01
69	01/02/2015	69	57,2	7,05
70	02/02/2015	70	57,4	7,06
71	03/02/2015	71	58,0	7,08
72	04/02/2015	72	58,6	7,09

Continuación del anexo 1.

73	05/02/2015	73	59,1	7,10
74	06/02/2015	74	60,0	7,14
75	07/02/2015	75	60,2	7,17
76	08/02/2015	76	60,4	7,21
77	09/02/2015	77	60,8	7,26
78	10/02/2015	78	61,3	7,28
79	11/02/2015	79	62,2	7,30
80	12/02/2015	80	63,2	7,33
81	13/02/2015	81	63,2	7,33
82	14/02/2015	82	62,2	7,33
83	15/02/2015	83	61,4	7,31
84	16/02/2015	84	61,2	7,30
85	17/02/2015	85	60,0	7,28
86	18/02/2015	86	59,2	7,27
87	19/02/2015	87	58,7	7,27
88	20/02/2015	88	58,4	7,26
89	21/02/2015	89	57,2	7,22
90	22/02/2015	90	57,0	7,21
91	23/02/2015	91	56,8	7,20
92	24/02/2015	92	56,4	7,19
93	25/02/2015	93	56,1	7,18
94	26/02/2015	94	55,1	7,16
95	27/02/2015	95	55,0	7,16
96	28/02/2015	96	55,0	7,16
97	01/03/2015	97	54,9	7,15
98	02/03/2015	98	54,8	7,15

Continuación del anexo 1.

99	03/03/2015	99	54,7	7,15
100	04/03/2015	100	53,0	7,15

Fuente: laboratorio de Microbiología de la Dra. Alba Tabarini.

Anexo 2. **Procedimiento para la determinación del nitrógeno orgánico mediante el método Kjeldahl**

Equipo utilizado:

- Balanza analítica
- Digesdahl Digestión Apparatus
- Digestor Kjeldahl
- Destilador Kjeldahl
- Espectrofotómetro HACH
- Tubos de digestión Kjeldahl de 250 ml

Equipo de seguridad:

- Guantes de nitrilo
- Lentes de seguridad
- Mascarilla

Descripción:

- Pesar 1 gramo del sustrato fermentado y colocarlo en un matraz de 100 ml.

- Agregar 2 gramos de mezcla catalizadora (K_2SO_4 , $CuSO_4$ y Se, en proporciones 100:10:1 respectivamente) y 5 ml de H_2SO_4 concentrado.
- Colocar la muestra en el digestor durante dos horas, a una temperatura de 370 °C.
- Destilar la muestra hasta que se enfríe.
- Diluir con agua deionizada y se añadir una solución de hidróxido de sodio, con el propósito de liberar el ion amonio presente, convirtiéndolo en amoníaco.
- Recolectar la muestra mediante burbujeo de arrastre en una solución ácida (ácido bórico al 2 %) de concentración conocida.
- Titular la muestra, donde se cuantifica la cantidad de amonio formado, lo que permite conocer la cantidad de nitrógeno orgánico.

Reactivos:

- Ácido bórico
- Ácido sulfúrico
- Hidróxido de sodio
- Selenio
- Sulfato de potasio
- Sulfato de cobre

Anexo 3. **Procedimiento para la determinación de la bacteria *Escherichia coli* mediante la prueba del número más probable**

Equipo utilizado:

- Asa de inoculación
- Incubadora
- Pipeta de 10 ml
- Tubos con agar nutritivo
- Tubos de dilución

Descripción:

- Pesar 10 gramos del sustrato fermentado y colocarlo en un *beacker* de 250 ml.
- Diluir los 10 gramos en un volumen de agua destilada de 200 ml.
- Hacer diluciones con la muestra de 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} y colocar 1 ml en la serie de 15 tubos múltiples con agar nutritivo.
- Incubar los tubos durante 48 horas a una temperatura de 35 °C.
- Con un asa de inoculación tomar una muestra de los tubos que resultaron positivos, en la prueba positiva y colocarlos en tubos con medio de cultivo EC.
- Incubar los tubos con EC durante 24 horas a 25 °C.
- Observar los tubos que resulten positivos y ver la presencia o ausencia de la bacteria.

Anexo 4. **Determinación de la cantidad de materia orgánica por el método de pérdidas por ignición**

Esta técnica comprende la medición de la pérdida de peso de la muestra después de realizar una combustión seca del material orgánico; el procedimiento analítico consiste en tomar muestras del compost en un crisol y calentarla en una estufa, la temperatura es variada. El cálculo es mediante la siguiente ecuación:

$$C_{M.O.} = P_o - P_f \quad \text{(Ecuación 6)}$$

Donde:

- $C_{M.O.}$: contenido de materia orgánica
- P_o : peso inicial de la muestra del compost
- P_f : peso de la muestra después de la calcinación

Anexo 5. **Determinación de humedad**

La determinación de este parámetro se basa en el método de gravimetría que se refiere a la pérdida de peso de la muestra por calentamiento en una estufa a 105 °C hasta peso constante. Para ello se deben utilizar 10 g de la muestra del compost que se colocan en un crisol previamente pesado en una balanza analítica. El cálculo del porcentaje de humedad es mediante la siguiente ecuación:

$$\% H = ((P_{mh}-P_m) / P_{ms}) * 100 \quad \text{(Ecuación 7)}$$

Donde:

- P_{mh} : peso de la muestra húmeda
- P_m : peso de la muestra
- P_{ms} : peso de la muestra seca
- H: humedad

Anexo 6. **Determinación de la cantidad de carbono orgánico**

$$\% \text{ C.O.} = \% \text{ M.O.} / 1,724 \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

- % C.O.: contenido de carbono orgánico
- $C_{M.O.}$: contenido de materia orgánica
- 1,724: constante que se utilizar al conocer el valor de materia orgánica

Anexo 7. **Determinación de la cantidad de nitrógeno orgánico**

Este método consiste en mineralizar el nitrógeno orgánico de la muestra realizando un ataque con ácido sulfúrico concentrado en presencia de un catalizador (Cu-Se), y en valorar el ion amonio.

$$\% \text{ NTK (mg N L}^{-1}\text{)} = ((V_G * N * 14000)) / (V_M) \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

- V_G : volumen de ácido sulfúrico gastado en la valorización de la muestra.
- N: normalidad de la dilución de ácido sulfúrico

- V_M : volumen de la muestra utilizado
- 14,000: constante de equivalencia

Anexo 8. **Datos de los análisis microbiológicos del compost después de haber finalizado el tiempo de retención, utilizando la técnica del NMP en una serie de 15 tubos múltiples con diluciones 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6}**

Días después de haber finalizado el tiempo de retención	Prueba presuntiva (Agar nutritivo)						Prueba confirmativa (Medio de cultivo EC)						Conclusión (Presencia o ausencia de la bacteria <i>E. coli</i>)
	10^{-4} 5 tubos		10^{-5} 5 tubos		10^{-6} 5 tubos		10^{-4} 5 tubos		10^{-5} 5 tubos		10^{-6} 5 tubos		
7	3 ⁺	2 ⁻	5 ⁺	0 ⁻	5 ⁺	0 ⁻	5 ⁺	0 ⁻	5 ⁺	0 ⁻	5 ⁺	0 ⁻	Presencia
14	4 ⁺	1 ⁻	4 ⁺	1 ⁻	4 ⁺	1 ⁻	0 ⁻	0 ⁻	0 ⁻	0 ⁻	0 ⁻	0 ⁻	Ausencia
21	2 ⁺	3 ⁻	2 ⁺	3 ⁻	4 ⁺	1 ⁻	0 ⁻	0 ⁻	0 ⁻	0 ⁻	0 ⁻	0 ⁻	Ausencia
28	1 ⁺	4 ⁻	5 ⁺	0 ⁻	5 ⁺	0 ⁻	0 ⁻	0 ⁻	0 ⁻	0 ⁻	0 ⁻	0 ⁻	Ausencia
35	5 ⁺	0 ⁻	5 ⁺	0 ⁻	1 ⁺	4 ⁻	0 ⁻	0 ⁻	0 ⁻	0 ⁻	0 ⁻	0 ⁻	Ausencia

Fuente: laboratorio de Microbiología de la Dra. Alba Tabarini.

Anexo 9. **Fotografías de los equipos utilizados para los análisis realizados**

Biodigestor



Fuente: aldea Los Horcones, Santa Catarina Mita, Jutiapa.

Muestra de compost diluyéndose en una balanza magnética



Fuente: laboratorio de Microbiología de la Dra. Alba Tabarini.

Serie de tubos múltiples en el método del NMP



Fuente: laboratorio de Microbiología de la Dra. Alba Tabarini.

Equipo armado del digestor y destilador Kjeldahl




Fuente: ALCARAZ, Noé y otros. *Equipo Kjeldahl de laboratorio*. [En línea]. <http://www.plusformacion.com/Recursos/r/UtilizaciondelMetabisulfitoSodiocomopr eservante-camaroneras-Ingeniería-Agroindustrial>. Consulta: 2 de febrero de 2015.

Compost de gallinaza, caña de azúcar y suelo franco limoso a los 28 días de haber finalizado su tiempo de retención



Fuente: aldea Los Horcones, Santa Catarina Mita, Jutiapa.

Anexo 10. **Datos originales de los parámetros fisicoquímicos del compost**

	<p>Escuela Nacional Central de Agricultura Sistema de Gestión en Control y Seguridad</p> <p><u>Formato de Informes</u></p>	<p>For/labenca- SIG-SD-011 Primera Edición Revisión No.: 01 Página 1 de 1</p>
---	--	--

INFORME: DE RESULTADOS

N° 001-0015

Guatemala 16 de enero del 2015

Empresa: Particular
Persona responsable: Juan Pierri
Finca:
Localización: Jutiapa

Estimado Ing.:

El motivo de la presente es para informarle los resultados obtenidos del análisis realizado a una (1) muestra de composta provenientes de Jutiapa obteniendo los siguientes resultados:

MATERIA ORGANICA			
Categoría	Medio	6:1 a 10,9	1,6 a 3,5
N° Laboratorio	Identificación	% M.O	% C.O
01-015 rep.1	Muestra de composta	16.75	9.74
01-015 rep.2		16.75	9.74
01-015 rep.3		16.75	9.74
01-015 rep.4		16.75	9.74
01-015 rep.5		16.16	9.74

La escuela Nacional Central de Agricultura es una entidad estatal, descentralizada y autónoma, con personalidad jurídica, patrimonio propio y duración indefinida, Artículo 79 de la constitución Política.
Fundada en 1921



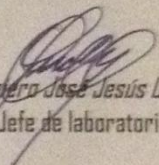
Escuela Nacional Central de
Agricultura
Sistema de Gestión en
Control y Seguridad

Formato de Informes


For/labenca-
SIG-SD-011
Primera Edición
Revisión No.: 01
Página 2 de 1

N° Laboratorio	Identificación	% Humedad Gravimétrica	% Nitrógeno
01-015 rep. 1	Muestra de composta	116.92	1.13
01-015 rep. 2		116.16	
01-015 rep. 3		116.03	
01-015 rep. 4		116.83	
01-015 rep. 5		116.18	

Atentamente,


Ingeniero José Jesús Chonay
Jefe de laboratorio

La escuela Nacional Central de Agricultura es una entidad estatal, descentralizada y autónoma, con personalidad jurídica, patrimonio propio y duración indefinida, Artículo 79 de la constitución Política.
Fundada en 1921

	<p style="text-align: center;">Escuela Nacional Central de Agricultura Sistema de Gestión en Control y Seguridad</p> <p style="text-align: center;"><u>Formato de Informes</u></p>	<p style="text-align: center;">For/labenca- SIG-SD-011 Primera Edición Revisión No.: 01 Página 1 de 1</p>
---	--	--

INFORME: DE RESULTADOS

Nº 003-0015

Guatemala 26 de enero del 2015


Empresa: Particular
Persona responsable: Juan Pierri
Finca:
Localización: Jutiapa

Estimado Ing.:

El motivo de la presente es para informarle los resultados obtenidos del análisis realizado a una (1) muestra de composta provenientes de Jutiapa obteniendo los siguientes resultados:

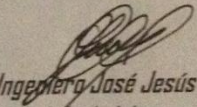
Nº Laboratorio	Identificación	% Humedad Gravimétrica	% Nitrógeno
002-0015 rep. 1	Muestra de composta	123.39	0.7
002-0015- rep. 2		123.44	0.71
002-0015- rep. 3		123.44	
002-0015- rep. 4		123.99	
002-0015- rep. 5		123.38	

La escuela Nacional Central de Agricultura es una entidad estatal, descentralizada y autónoma, con personalidad jurídica, patrimonio propio y duración indefinida, Artículo 79 de la constitución Política.
Fundada en 1921


	<p>Escuela Nacional Central de Agricultura Sistema de Gestión en Control y Seguridad</p> <p><u>Formato de Informes</u></p>	<p>For/labenca- SIG-SD-011 Primera Edición Revisión No.: 01 Página 2 de 1</p>
---	--	--

MATERIA ORGANICA			
Categoría	Medio	6.1 a 10.9	1.6 a 3.5
N° Laboratorio	Identificación	% M.O	% C.O
002-0015 rep.1	Muestra de composta	18.87	10.97
002-0015- rep. 2		18.87	10.97
002-0015- rep.3		18.22	10.59
002-0015-rep.4		18.93	11.01
002-0015- rep. 5		18.93	11.01

Atentamente,


 Ingeniero José Jesús Chanay
 Jefe de laboratorio

La escuela Nacional Central de Agricultura es una entidad estatal, descentralizada y autónoma, con personalidad jurídica, patrimonio propio y duración indefinida, Artículo 79 de la constitución Política.
 Fundada en 1921

	<p style="text-align: center;">Escuela Nacional Central de Agricultura Sistema de Gestión en Control y Seguridad</p> <p style="text-align: center;"><u>Formato de Informes</u></p>	<p style="text-align: center;">For/labencia- SIG-SD-011 Primera Edición Revisión No.: 01 Página 1 de 1</p>
---	---	--

INFORME: DE RESULTADOS

N° 007-0015

Guatemala 06 de febrero del 2015

Empresa: Particular
Persona responsable: Juan Pierri
Finca:
Localización: Jutiapa

Estimado Ing.: Pierri

El motivo de la presente es para informarle los resultados obtenidos del análisis realizado a una (1) muestra de Abono orgánico proveniente de Jutiapa obteniendo los siguientes resultados:

N° Laboratorio	Identificación	% Humedad Gravimetrica	% Nitrogeno
08- rep.1	Abono Organico	62.16	0.58
08- rep.2		62.44	0.58
08- rep.3		62.5	
08- rep.4		62.3	
08- rep.5		62.18	

La escuela Nacional Central de Agricultura es una entidad estatal, descentralizada y autónoma, con personalidad jurídica, patrimonio propio y duración indefinida, Artículo 79 de la constitución Política.
Fundada en 1921



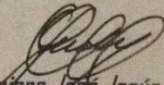
Escuela Nacional Central de
Agricultura
Sistema de Gestión en
Control y Seguridad

Formato de Informes


For/labenca-
SIG-SD-011
Primera Edición
Revisión No.: 01
Página 2 de 1

MATERIA ORGANICA			
Categoría	Medio	6.1 a 10,9	1,6 a 3,5
N° Laboratorio	Identificación	% M.O	% C.O
08- rep. 1	Abono Organico	10.62	6.17
08- rep. 2		10.62	6.17
08- rep. 3		10.62	6.17
08- rep. 4		10.62	6.17
08- rep. 5		10.62	6.17

Atentamente,


Ingeniero José Jesús Chanay
Jefe de laboratorio

La escuela Nacional Central de Agricultura es una entidad estatal, descentralizada y autónoma, con personalidad jurídica, patrimonio propio y duración indefinida, Artículo 79 de la constitución Política.
Fundada en 1921

	<p align="center"> Escuela Nacional Central de Agricultura Sistema de Gestión en Control y Seguridad <u>Formato de Informes</u> </p>	<p align="center"> For/labenca- SIG-SD-011 Primera Edición Revisión No.: 01 Página 1 de 1 </p>
---	---	--

INFORME: DE RESULTADOS

Nº 008-0015

Guatemala 17 de febrero del 2015


Empresa: Particular
Persona responsable: Juan Pierri
Finca:
Localización: Jutiapa

Estimado Ing.: Pierri

El motivo de la presente es para informarle los resultados obtenidos del análisis realizado a una (1) muestra de Abono Orgánico provenientes de Jutiapa obteniendo los siguientes resultados:


MATERIA ORGANICA			
Categoria	Medio	6.1 a 10,9	1,6 a 3,5
Nº Laboratorio	Identificación	% M.O	% C.O
008-0015 rep1	Abono Orgánico	13.8	8.02
008-0015 rep2		13.8	8.02
008-0015 rep3		13.8	8.02
008-0015 rep4		13.8	8.02
008-0015 rep5		13.8	8.02

La escuela Nacional Central de Agricultura es una entidad estatal, descentralizada y autónoma, con personalidad jurídica, patrimonio propio y duración indefinida, Artículo 79 de la constitución Política.
Fundada en 1921

	<p style="text-align: center;">Escuela Nacional Central de Agricultura Sistema de Gestión en Control y Seguridad</p> <p style="text-align: center;"><u>Formato de Informes</u></p>	<p style="text-align: center;">For/labenca- SIG-SD-011 Primera Edición Revisión No.: 01 Página 2 de 1</p>
---	--	--

N° Laboratorio	Identificación	% Humedad Gravimétrica	% Nitrógeno
009-0015 rep1	Abono Orgánico	89.39	0.68
009-0015 rep2		89.37	0.68
009-0015 rep3		89.88	
009-0015 rep4		89.22	
009-0015 rep5		89.2	

Atentamente,


 Ingeniera José Jesús Chanay
 Jefe de laboratorio

La escuela Nacional Central de Agricultura es una entidad estatal, descentralizada y autónoma, con personalidad jurídica, patrimonio propio y duración indefinida, Artículo 79 de la constitución Política.
 Fundada en 1921



Escuela Nacional Central de
Agricultura
Sistema de Gestión en
Control y Seguridad

Formato de Informes

For/labenca-
SIG-SD-011

Primera Edición
Revisión No.: 01
Página 1 de 1

INFORME: DE RESULTADOS

N° 0014-0015

Guatemala 28 de febrero del 2015

Empresa: Particular

Persona responsable: Juan Pierri

Finca:


Localización: Jutiapa

Estimado Ing.: Pierri

El motivo de la presente es para informarle los resultados obtenidos del análisis realizado a una (1) muestra de Abono orgánico proveniente de Jutiapa obteniendo los siguientes resultados:

MATERIA ORGANICA			
Categoría	Medio	6.1 a 10.9	1.6 a 3.5
N° Laboratorio	Identificación	% M.O	% C.O
017-rep.1	Abono Orgánico	12.64	7.35
017-rep.2		12.64	7.35
017-rep.3		12.64	7.35
017-rep.4		12.64	7.35
017-rep.5		12.64	7.35

La escuela Nacional Central de Agricultura es una entidad estatal, descentralizada y autónoma, con personalidad jurídica, patrimonio propio y duración indefinida, Artículo 79 de la constitución Política.
Fundada en 1921

	<p style="text-align: center;">Escuela Nacional Central de Agricultura Sistema de Gestión en Control y Seguridad</p> <p style="text-align: center;"><u>Formato de Informes</u></p>	<p style="text-align: center;">For/labenca- SIG-SD-011 Primera Edición Revisión No.: 01 Página 2 de 1</p>
---	--	--

Nº Laboratorio	Identificación	% Humedad Gravimétrica	% Nitrógeno
0017-0015 rep1	Abono Orgánico	86.14	0.62
0017-15 rep2		86.36	0.62
0017-0015 rep3		86.73	
0017-0015 rep4		86.73	
0017-0015 rep5		86.73	

Atentamente,


 Ingeniero José Jesús Chomay
 Encargado Laboratorio
 Firma 

La escuela Nacional Central de Agricultura es una entidad estatal, descentralizada y autónoma, con personalidad jurídica, patrimonio propio y duración indefinida, Artículo 79 de la constitución Política.
 Fundada en 1921

Fuente: laboratorio Escuela Nacional Central de Agricultura.

