

**ELABORACIÓN DE ABONOS ORGÁNICOS A PARTIR DEL COMPOSTAJE DE  
RESIDUOS AGRÍCOLAS EN EL MUNICIPIO DE FUSAGASUGÁ**

**Wilson Acosta Carrión**

**Milton Ivan Peralta Franco**

**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS  
PROGRAMA DE ZOOTECNIA  
FUSAGASUGÁ, COLOMBIA  
2015**

**ELABORACIÓN DE ABONOS ORGÁNICOS A PARTIR DEL COMPOSTAJE DE  
RESIDUOS AGRÍCOLAS EN EL MUNICIPIO DE FUSAGASUGÁ**

**Wilson Acosta Carrión**  
**Milton Ivan Peralta Franco**

**Trabajo de Grado**

**Directora:**  
**Natalia Escobar Escobar**  
**B. Sc., PhD(c), MSc., Esp.**

**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**  
**PROGRAMA DE ZOOTECNIA**  
**FUSAGASUGÁ**

**2015**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los resultados de este proyecto, están dedicados a todas aquellas personas que, de alguna forma, son parte de su culminación. Nuestros sinceros agradecimientos están dirigidos hacia nuestra directora Natalia Escobar quien confió en nosotros y nos animó para emprender y culminar este trabajo. A nuestros compañeros, los que permanecen y los que partieron por hacer nuestros días en la Universidad mucho más felices e inolvidables. A nuestras familias por siempre brindarnos su apoyo, consejos, comprensión, y ayuda en los momentos difíciles.

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	12
2. JUSTIFICACIÓN .....	14
3. ANTECEDENTES .....	16
3.1 ESTADO DEL ARTE.....	17
4. MARCO LEGISLATIVO.....	21
5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	23
6. OBJETIVOS .....	24
6.1 Objetivo general .....	24
6.2 Objetivos Específicos.....	24
7. MARCO TEÓRICO.....	25
7.1 Residuos.....	25
7.1.1 Clasificación de los residuos.....	25
7.1.2 La actividad agropecuaria como fuente de residuos orgánicos .....	26
7.1.3 Alternativas de tratamiento de los residuos orgánicos.....	27
7.1.4 Los residuos como fuente de alimento animal.....	27
7.1.5 Los Residuos como fuente de Energía.....	27
7.1.6 Los residuos orgánicos como materia prima para la producción de abonos orgánicos .....	28
7.2 El compostaje como alternativa para la producción de abonos orgánicos a partir de residuos agropecuarios.....	29
7.3 Materias primas para el proceso de compostaje.....	30
7.4 El Compostaje.....	30
7.4.1 Fases del compostaje .....	32
7.4.2 Microorganismos del proceso de compostaje .....	34
7.4.3 Variación microbiana durante el proceso del compostaje .....	34
7.4.4 Variables físicas y químicas durante el proceso del compostaje .....	35
7.5 Variables relacionadas a la naturaleza del sustrato .....	37
7.6 Calidad del compostaje .....	38

7.7 Indicadores de la evolución del Compostaje .....	39
7.7.1 Indicadores Físicos de los compost .....	41
7.7.2 Indicadores Químicos de los compost .....	42
7.7.3 Indicadores Biológicas del compost.....	44
7.8 Parámetros para los productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo, según la norma técnica colombiana 5167 (NTC 5167) .....	45
7.9 Efecto de la aplicación del compost sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.....	47
7.9.1 Efectos físicos.....	48
7.9.2 Efectos químicos.....	49
7.9.3 Efectos biológicos .....	51
8. MATERIALES Y METODOS .....	52
8.1 Área de estudio .....	52
8.2 Fase de campo .....	53
8.2.1 Recolección de materia prima.....	53
8.2.2 Adecuación de materia prima e insumos .....	54
8.2.3 Preparación del abono.....	55
8.2.4 Seguimiento y control .....	56
8.2.5 Medición de variables físicas .....	57
8.3 Fase de Laboratorio: .....	58
8.3.1 Toma de muestras de microcomposteras.....	58
8.3.2 Medición de variables Microbiológicas.....	58
8.3.3 Esterilización.....	58
8.3.4 Preparación de Medios de Cultivo .....	59
8.3.5 Servido y almacenamiento.....	59
8.3.6 Preparación de diluciones.....	60
8.3.7 Diluciones seriadas.....	60
8.3.8 Siembra .....	61
8.3.9 Lectura de cajas.....	62
8.4 Caracterización Microbiológica .....	63

8.4.1 Bacterias.....	63
8.4.2 Hongos .....	64
8.5 Determinación de indicadores químicos .....	65
8.6 Bioensayo de Germinación .....	66
8.7 Métodos Estadísticos .....	68
9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	69
9.1 Diversidad microbiana del proceso de compostaje .....	69
9.1.1 Bacterias.....	69
9.1.2 Hongos .....	71
9.2 TEMPERATURA .....	74
9.3 pH .....	76
9.4 HUMEDAD .....	78
9.5 CORRELACIÓN DE VARIABLES (pH, TEMPERATURA Y HUMEDAD) SOBRE LA CONCENTRACIÓN UFC/g DE MICROORGANISMOS .....	80
9.5.1 Correlación en Bacterias.....	80
9.6 INDICADORES FÍSICOS.....	83
9.6.1 Olor.....	83
9.6.2 Color .....	83
9.7 INDICADORES QUÍMICOS .....	84
9.8 MICROORGANISMOS IDENTIFICADOS AL FINAL DEL PROCESO DE COMPOSTAJE .....	91
9.8.1 Bacterias.....	92
9.8.2 Hogos .....	95
9.9 BIOENSAYO DE GERMINACIÓN .....	98
9.9.1 Alfalfa ( <i>Medicago sativa</i> ).....	99
9.9.2 Pasto Braquiaria ( <i>Brachiaria decumbens</i> ) .....	102
10. CONCLUSIONES.....	106
11. RECOMENDACIONES .....	107
12. BIBLIOGRAFÍA .....	108

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.</b> FASES DEL PROCESO DE COMPOSTAJE.....	32
<b>FIGURA 2.</b> LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	52
<b>FIGURA 3.</b> FIGURA 3. ELABORACIÓN DE ESTRUCTURA.....	53
<b>FIGURA 4.</b> RECOLECCIÓN DE MATERIA PRIMA..	54
<b>FIGURA 5.</b> REDUCCIÓN DEL TAMAÑO DE LOS SUSTRATOS Y PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS. .....	54
<b>FIGURA 6.</b> TUBOS UTILIZADOS PARA LA AIREACIÓN DE LAS MEZCLAS Y DISPOSICIÓN FINAL DE LAS MICROCOMPOSTERAS.....	56
<b>FIGURA 7.</b> REALIZACIÓN DEL VOLTEO DE LAS MEZCLAS.....	57
<b>FIGURA 8.</b> TOMA DE MEDICIÓN DE VARIABLES FÍSICAS (TEMPERATURA Y PH). .....	57
<b>FIGURA 9.</b> PROCEDIMIENTO PARA SERVIR LOS MEDIOS DE CULTIVO .....	59
<b>FIGURA 10.</b> PROCESO PARA LA PREPARACIÓN DE DILUCIONES .....	61
<b>FIGURA 11.</b> SIEMBRA DE MUESTRAS .....	62
<b>FIGURA 12.</b> CONTEO DE UFC/ML DE LOS TRATAMIENTOS EVALUADOS.....	62
<b>FIGURA 13.</b> IDENTIFICACIÓN DE COLONIAS DE BACTERIAS.....	64
<b>FIGURA 14.</b> PREPARACIÓN DE EXTRACTOS Y SIEMBRA DE SEMILLAS PARA EL BIOENSAYO DE GERMINACIÓN .....	66
<b>FIGURA 15.</b> GERMINACIÓN DE SEMILLAS EN LOS EXTRACTOS DE CADA MEZCLA Y TESTIGO (AGUA DESTILADA) AL DÍA CINCO DEL BIOENSAYO.....	105

## LISTA DE GRÁFICAS

<b>GRÁFICA 1.</b> CONTEO DE UFC/G PARA BACTERIAS EN FACTOR DE DILUCIÓN $10^4$ .	69
<b>GRÁFICA 2.</b> CONTEO DE UFC/G PARA BACTERIAS EN FACTOR DE DILUCIÓN $10^5$ .	70
<b>GRÁFICA 3.</b> CONTEO DE UFC/G PARA BACTERIAS EN FACTOR DE DILUCIÓN $10^6$ .	71
<b>GRÁFICA 4.</b> CONTEO DE UFC/G PARA HONGOS EN FACTOR DE DILUCIÓN $10^4$ .	72
<b>GRÁFICA 5.</b> CONTEO DE UFC/G PARA HONGOS EN FACTOR DE DILUCIÓN $10^5$ .	73
<b>GRÁFICA 6.</b> CONTEO DE UFC/G PARA HONGOS EN FACTOR DE DILUCIÓN $10^6$ .	74
<b>GRÁFICA 7.</b> TEMPERATURA PROMEDIO PARA CADA UNA DE LAS MEZCLAS..	75
<b>GRÁFICA 8.</b> PH PROMEDIO PARA CADA UNA DE LAS MEZCLAS.....	77
<b>GRÁFICA 9.</b> HUMEDAD PROMEDIO PARA CADA UNA DE LAS MEZCLAS .....	79
<b>GRÁFICA 11.</b> UFC/G 106 MEZCLA 6 Vs TEMPERATURA.....	80
<b>GRÁFICA 10.</b> UFC/G $10^5$ MEZCLA 6 Vs TEMPERATURA. ....	80
<b>GRÁFICA 12.</b> UFC/G $10^4$ MEZCLA 2 Vs HUMEDAD. ....	82
<b>GRÁFICA 13.</b> UFC/G $10^4$ MEZCLA 4 Vs PH.....	82
<b>GRÁFICA 14.</b> UFC/G $10^6$ MEZCLA 5 Vs TEMPERATURA. ....	82
<b>GRÁFICA 15.</b> UFC/G $10^6$ MEZCLA 5 Vs PH. ....	82
<b>GRÁFICA 16.</b> RELACIÓN C/N .....	85
<b>GRÁFICA 17.</b> PH DE LAS MEZCLAS AL DÍA 75 .....	85
<b>GRÁFICA 18.</b> CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA (%) .....	86
<b>GRÁFICA 19.</b> CAPACIDAD DE C.I.C (MEQ. 100G-1) .....	86
<b>GRÁFICA 20.</b> CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO (%). ....	87
<b>GRÁFICA 21.</b> CONTENIDO DE NITRÓGENO (%). ....	87
<b>GRÁFICA 22.</b> CONTENIDO DE SODIO (MG/KG).....	88
<b>GRÁFICA 23.</b> CONTENIDO DE POTASIO (%).....	88
<b>GRÁFICA 24.</b> CONTENIDO DE CALCIO (%).....	88
<b>GRÁFICA 25.</b> CONTENIDO DE MAGNESIO (%) .....	88
<b>GRÁFICA 26.</b> CONTENIDO DE COBRE (MG/KG).....	89
<b>GRÁFICA 27.</b> CONTENIDO DE FÓSFORO (%) .....	89
<b>GRÁFICA 28.</b> CONTENIDO DE HIERRO (MG/KG) .....	90
<b>GRÁFICA 29.</b> CONTENIDO DE ZINC (MG/KG) .....	90
<b>GRÁFICA 30.</b> CONTENIDO DE BORO (MG/KG) .....	90
<b>GRÁFICA 31.</b> CONTENIDO DE MANGANESO (MG/KG) .....	90
<b>GRÁFICA 32.</b> CONTENIDO DE AZUFRE (%). ....	91
<b>GRÁFICA 33.</b> FRECUENCIA RELATIVA DE LAS BACTERIAS IDENTIFICADAS EN LAS SEIS MEZCLAS.....	94
<b>GRÁFICA 34.</b> PORCENTAJE DE BACTERIAS IDENTIFICADAS EN CADA UNA DE LAS MEZCLAS AL FINAL DEL PROCESO DE COMPOSTAJE.....	95



<b>GRÁFICA 35.</b> FRECUENCIA RELATIVA DE LOS HONGOS IDENTIFICADOS EN LAS SEIS MEZCLAS. .....	97
<b>GRÁFICA 36.</b> PORCENTAJE DE HONGOS IDENTIFICADOS EN CADA UNA DE LAS MEZCLAS AL FINAL DEL PROCESO DE COMPOSTAJE.....	98
<b>GRÁFICA 37.</b> ÍNDICE DE GERMINACIÓN % (IG) DE LAS SEMILLAS DE ALFALFA EN CADA UNO DE LOS EXTRACTOS.....	101
<b>GRÁFICA 38.</b> ÍNDICE DE GERMINACIÓN % (IG) DE LAS SEMILLAS DE BRACHIARIA PARA CADA UNO DE LOS EXTRACTOS.....	103

## LISTA DE TABLAS

<b>TABLA 1.</b> INDICADORES DE LA EVOLUCIÓN DEL COMPOSTAJE .....	39
<b>TABLA 2.</b> PARÁMETROS A CARACTERIZAR PARA PRODUCTO SÓLIDO OBTENIDO A PARTIR DE LA ESTABILIZACIÓN DE RESIDUOS DE ANIMALES, VEGETALES O RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (SEPARADOS EN LA FUENTE) O MEZCLA DE LOS ANTERIORES.....	45
<b>TABLA 3.</b> LÍMITES MÁXIMOS EN MG/KG (PPM) DE LOS METALES PESADOS.....	46
<b>TABLA 4.</b> LÍMITES MÁXIMOS PERMITIDOS PARA MACRO CONTAMINANTES PRESENTES EN PRODUCTOS SÓLIDOS.....	46
<b>TABLA 5.</b> MATERIALES UTILIZADOS PARA ELABORAR CADA UNA DE LAS MEZCLAS.....	55
<b>TABLA 6.</b> INDICADORES QUÍMICOS PARA EVALUAR CALIDAD DEL COMPOSTAJE.....	65
<b>TABLA 7.</b> INTERPRETACIÓN DE LOS VALORES DE TOXICIDAD PARA LOS ÍNDICES IGN E IER. 68	
<b>TABLA 8.</b> GÉNEROS DE BACTERIAS IDENTIFICADAS EN CADA UNA DE LAS MEZCLAS AL FINAL DEL PROCESO (DÍA 75).....	93
<b>TABLA 9.</b> GÉNEROS DE HONGOS IDENTIFICADOS EN CADA UNA DE LAS MEZCLAS AL FINAL DEL PROCESO (DÍA 75).....	96
<b>TABLA 10.</b> RESULTADOS DE LOS ÍNDICES EVALUADOS EN CADA MEZCLA PARA LAS SEMILLAS DE ALFALFA.....	100
<b>TABLA 11.</b> RESULTADOS DE LOS ÍNDICES EVALUADOS EN CADA MEZCLA PARA LAS SEMILLAS DE BRACHIARIA.....	103

## RESUMEN

**Palabras clave:** Agroecología, microbiología, calidad.

En el municipio de Fusagasugá los principales generadores de contaminación de las fuentes hídricas y del suelo son la agricultura con el alto uso de agroquímicos e inadecuado manejo de abonos orgánicos y las actividades pecuarias por el lavado de porquerizas, galpones y establos, disposición de mortalidades, neonatos y residuos de mataderos. El compostaje es una alternativa agroecológica que permite la degradación de materia orgánica a través de grupos funcionales de microorganismos particularmente bacterias y hongos, e incentiva el uso de los mismos al reducir dosis de fertilizantes químicos. En este proyecto se realizó la evaluación de seis mezclas con los residuos orgánicos más representativos del municipio, con el objetivo de elaborar abonos orgánicos por medio del proceso de compostaje que cumplan con los parámetros de calidad establecidos y puedan ser utilizados en cultivos con potencial forrajero. El estudio se llevó a cabo en la Granja la Esperanza de la Universidad de Cundinamarca, ubicada en la vereda Guavio Bajo. Se elaboraron 6 mezclas por medio de microcomposteras en lonas de 0.80 x 1.20m, las cuales se llenaron con aproximadamente 45 kg de material orgánico y se dispusieron en bloques completamente al azar y por triplicado. Se realizó seguimiento a las variables físicas: temperatura, humedad, y químicas: pH, cada 3 días, y cuantificación microbiológica de bacterias y hongos cada 15 días durante los 75 días del procesos de compostaje. Se hizo un análisis físico químico de cada muestra al día 75, así como una caracterización microbiológica para determinar los géneros más representativos de hongos y bacterias. Por último se realizó un bioensayo con los extractos de cada mezcla, utilizando semillas de una gramínea Pasto Braquiaria (*Brachiaria decumbens*) y una leguminosa Alfalfa (*Medicago sativa*) para determinar el índice de fitotoxicidad de los abonos. La información obtenida se analizó mediante el paquete estadístico InfoStat versión 2014 con alfa de 0,05. Se identificaron varios géneros de bacterias de gran importancia en la descomposición de residuos como *Streptomyces*, *Arthrobacter* y *Pseudomonas*, y géneros de hongos como *Penicillium* y *Aspergillus*. Los resultados del bioensayo indican que la mayoría de las mezclas no presentan una alta fitotoxicidad cuando son utilizadas en semillas de Alfalfa, mientras que para las semillas de Brachiaria, un bajo porcentaje de estas germinaron, esto se debió posiblemente a un efecto físico de las semillas, ya que las pocas que germinaron presentaron una longitud mayor de la radícula que las germinadas en el testigo (agua destilada), lo que puede indicar que las mezclas tienen un efecto fitoestimulantes en las semillas de Brachiaria. En general los resultados indican que la mezcla 6 presento los valores más altos en cuanto a indicadores de calidad como químicos (C/N, Nitrógeno, Potasio, Sodio, Calcio, Fósforo, Boro y azufre), físicos (Color y Olor) y mayor concentración final de microorganismos. Es importante tener en cuenta estas variables que están asociadas en la elaboración de los abonos, pues a pesar de ser una práctica de fácil aplicación, es vital el manejo del tamaño de partícula, la relación C/N, así como los tiempos de maduración, pues los indicadores de calidad determinaran su adopción y permitirán ir remplazando los modelos agrícolas convencionales.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los Sistemas agrícolas son un conjunto de interacciones entre las personas, los recursos naturales y la producción de alimentos dentro de un predio o un campo específico; estos sistemas agrícolas presentan una gran modificación con relación al sistema natural cuando el hombre actúa sobre el ecosistema alterándolo completamente y volviéndolo artificial en función de la producción. Los sistemas que requieren más recursos e intervención generalmente dependientes de altos insumos de energía y recursos para mantener un nivel de producción deseado, están usualmente asociados con un mayor desgaste de recursos y con mayores impactos sociales negativos (Restrepo et al., 2000).

Las actividades agrarias generan grandes cantidades de residuos orgánicos, que se transforman en contaminantes del ambiente al provocar una serie de daños al ecosistema. A pesar de estos efectos negativos, dichos residuos también pueden ser reutilizados como fuente de nutrientes para las plantas en la agricultura si se les da un tratamiento adecuado, como el compostaje (Hernández et al., 2013).

El enfoque Agroecológico considera a los ecosistemas agrícolas como las unidades fundamentales analizadas como un todo permitiendo desarrollar un entendimiento más profundo de la ecología de los sistemas agrarios, a los sistemas agroecológicos le interesa no sólo la maximización de la producción, sino la optimización del agroecosistema total con el fin de favorecer un manejo adecuadas de sistemas productivos en busca de una agricultura verdaderamente sustentable (Altieri y Nicholls, 2000).

La creciente demanda de alimentos ha establecido como alternativa un manejo sustentable de los sistemas de producción, promoviendo prácticas que preserven los recursos naturales y permitan hacer un uso eficiente y adecuado de los residuos que se derivan directa o indirectamente del sector agropecuario. Dichos residuos pueden ser reutilizados si se les da un tratamiento sostenible. El compostaje es un método biológico que permite la transformación de residuos orgánicos en un producto relativamente estable. Para el compostaje, el estiércol y los demás residuos deben ser mezclados en proporciones tales que la relación carbono/nitrógeno (C/N), la humedad y la aireación sean adecuadas para que estimulen una actividad microbiana intensiva, que modifique la estructura química y física de los materiales, cambiando la especiación química para que los nutrimentos sean disponibles. (Hernández et al., 2013).

Durante la evolución de la biodegradación la participación de microorganismos mesófilos y termófilos y su respectiva actividad metabólica es muy importante ya que generan una termo-actividad biológica que es la responsable de la descomposición de la materia orgánica y su mineralización, que se reflejará en la calidad del mismo (Sztern, 2008).

El compostaje no debe ser visto simplemente como un sistema de tratamiento de residuos agrícolas a pesar de utilizar como materia prima residuos, sino como un proceso basado en la actividad de microorganismos vivos quienes son los responsables de la descomposición de la materia orgánica (Morales y Aristizabal, 2007). Este proceso debe realizarse con los cuidados necesarios para lograr unas condiciones óptimas de temperatura, humedad y oxigenación, donde se establezcan tomas de muestras y controles a lo largo del mismo para seguir su funcionamiento con el fin de obtener un producto de calidad (Torrentó, 2011).

La calidad de los compostajes se determina a través de las propiedades físicas, químicas y biológicas, así como de su contenido nutricional y de su capacidad de proveer nutrientes a un cultivo (Santamaria, 2001). Además con la producción de abono orgánico se puede generar ingresos económicos al ser comercializados, si llegasen a ser de interés al productor, también se disminuye el uso de agroquímicos que contribuyen a disminuir la toxicidad, residualidad y degradación de los suelos (Ramírez, 2013).

Una de las principales fortalezas que presenta el compostaje es su amplia capacidad de aplicación y utilización en todo tipo de suelo con potencial agrícola, incluyendo los suelos de zonas áridas y semiáridas, y en general a todos los que presentan pobreza de fertilidad; esto es debido a que proporciona los nutrimentos y las propiedades físico- químicas que son alteradas por las labores culturales propias de la agricultura (Nieto et al., 2002).

La ventaja de la utilización de abonos orgánicos es que nos ayudan a preservar, recuperar y mejorar las características de los suelos para garantizar su productividad en el tiempo, también incorporar el equilibrio biológico, físico, químico y ecológico del suelo y repone la diversidad de la flora microbiana benéfica, restableciendo los nutrimentos esenciales demandados por los cultivos que el suelo no puede suplir, de esta manera permite mantener el nivel óptimo de los suelos y preservar los ecosistemas en el tiempo. La agricultura orgánica mejora la composición del suelo, la fertilidad y la fauna del suelo que en el largo plazo tiene un efecto beneficioso en la producción de cultivos (Matheus, 2007).

## 2. JUSTIFICACIÓN

La agricultura convencional aumentó la productividad con el uso de grandes dosis de fertilizantes inorgánicos que han causado contaminación química de la tierra y el agua. Este modelo también ha traído consigo una deficiencia cada vez mayor de micronutrientes en el suelo y un descenso preocupante en el contenido de materia orgánica en los suelos, debido al uso intensivo de fertilizantes sintéticos, este descenso de los rendimientos y el aumento del costo de los insumos son factores que llevan a buscar un nuevo enfoque de los sistemas agrícolas más ligado al medio ambiente y a la sostenibilidad ecológica del sistema de producción (Restrepo et al., 2000).

La agroecología presenta una nueva estrategia de desarrollo agropecuario que pretenden desarrollar modelos de producción donde haya un aprovechamiento sostenible de los ecosistemas productivos y los ciclos vitales de la naturaleza donde todos sus componentes se conserven. Este modelo se basa en la idea que un campo de cultivo es un ecosistema dentro del cual hay procesos y relaciones, entonces los sistemas agroecosistemas son una interacción compleja entre procesos sociales externos e internos y entre procesos biológicos y ambientales, en busca de cualidades de sustentabilidad, estabilidad biológica, conservación de recursos y una mayor productividad (Restrepo et al., 2000).

La agricultura orgánica es una alternativa favorable para sanear los efectos negativos ya que nos permite desarrollar un entendimiento más profundo de la ecología de los sistemas agrícolas. El Mantener e incrementar la fertilización del terreno es uno de los ideales de la agricultura ecológica, este concepto se logra a partir de la incorporación de materia orgánica al suelo, que puede provenir de distintas prácticas como los abonos verdes, la incorporación de estiércoles y la utilización de compost (López y Llorente, 2010).

En el sector agropecuario, los residuos orgánicos se han vuelto un problema para las producciones por el alto nivel de contaminación, siendo los más importantes los de ganadería y los desechos de cultivo, también el uso excesivo de agroquímicos y su sobre-explotación trae la pérdida de la materia orgánica, pérdida de la fertilidad y la contaminación de los suelos (Nieto, 2002). La cantidad de Residuos Sólidos generados diariamente en Colombia es de aproximadamente 30.886 toneladas, de los cuales el 52,3% es orgánico (16.153 toneladas) (Valderrama, 2013).

El municipio de Fusagasugá tiene una actividad agrícola del 67,3%, y pecuaria del 81,8%. El uso agropecuario tradicional en el municipio está distribuido en las veredas La Aguadita, Bermejál, Usatama, Tierra Negra, Piamonte, Jordán, Pekín, La Palma, Bethel, Sauces, Mosqueral, Sardinias, Mesitas, Bóchica, Guavio, Batán y El Carmen. La producción agrícola se caracteriza, por el alto uso de pesticidas y agroquímicos, así como las deficientes técnicas de laboreo del suelo agrícola. Sus principales productos agrícolas son las explotaciones de frutas de clima frío (lulo, tomate de árbol, mora), hortalizas (tomate, habichuela, pepino cohombro, frijol) el café y el plátano. Este último ocupa un renglón significativo de producción. En la explotación pecuaria el renglón principal es la avicultura, seguido por la porcicultura y los bovinos doble propósito (Plan de desarrollo municipal Fusagasugá, 2012).

El uso de abonos orgánicos es atractivo por su menor costo en producción y aplicación, además por el valor agregado que representan. El compostaje es una alternativa a la problemática de contaminación de los desechos orgánicos que se generan en las actividades agropecuarias. El éxito de un proceso de compostaje, dependerá de aplicar los conocimientos de microbiología, manejando la pila de compost como un medio de cultivo, también factores como tipo de sustrato (residuos orgánicos) y los que manipula el hombre (aireación, humedad, pH, temperatura), además varían en su composición química de acuerdo al proceso de elaboración, duración del proceso, actividad biológica y tipos de materiales que se utilicen, por tanto el conocimiento y la valoración de los procesos microbianos nos demuestra su efecto sobre el grado de maduración del compost. La medición de la evolución de los principales parámetros químicos y biológicos permite monitorear el grado de estabilidad alcanzado por los residuos orgánicos (Sánchez, 2009).

### 3. ANTECEDENTES

Los principios de la agroecología son tan antiguos como la práctica de la agricultura misma; el crédito en gran parte del desarrollo inicial de la agricultura ecológica le pertenece a Klages en 1928, quien sugirió que se tomaran en cuenta los factores que influían en la distribución y adaptación de especies específicas de cultivos, para comprender la compleja relación existente entre una planta cultivada y su medio ambiente. La ecología agrícola fue aún más desarrollada por el ecologista y zoólogo alemán Tischler en 1965 con el primer libro titulado agroecología. A principios de la década del 70 emerge un primer enfoque hacia una óptica ecosistémica, en esta década, la literatura ecológica se expandió hacia un concepto agroecológico brindando un nuevo enfoque para el desarrollo agrícola, más sensible a las complejidades de los ecosistemas. Sus objetivos y criterios agrícolas permiten la sustentabilidad, la seguridad alimentaria, la estabilidad biológica, la conservación de los recursos naturales y la equidad, junto al objetivo de búsqueda de mayor producción (Ochoa y Lemus, 2008).

La agricultura alternativa surge en respuestas a la degradación ambiental causada por la agricultura industrializada en la década de 1970 a 1980, la conciencia ambiental constituyó un hecho social que permeó a Latinoamérica y que en Colombia dio lugar a la conformación del movimiento ambiental ecológico, orientados a la producción agrícola ecológica, proponiendo la integración de saberes tradicionales con conocimientos científicos y métodos de la ecología, con el objetivo de potenciar la agricultura tradicional hacia modelos más eficientes y que al mismo tiempo fueran compatibles con los conceptos y métodos de la ecología. Tales agriculturas alternativas proponen manejos de los recursos naturales que van desde el sistema orgánico que no utiliza insumos químicos sintéticos, hasta aquellos que los aceptan para controlar ciertas plagas y enfermedades (Rivera y León, 2013).

El uso y aprovechamiento de los residuos agropecuarios como fuente de materia orgánica en la agricultura se viene practicando desde hace mucho tiempo, siendo difícil atribuir a una persona, sociedad o época en específico los inicios del compostaje, es claro que desde la invención de la agricultura los campesinos aseguraron la fertilidad de sus campos mediante materiales orgánicos descompuestos. Los agricultores han utilizado este método para aprovechar los residuos vegetales desde comienzos del siglo XIX, el desarrollo de la técnica del compostaje se produjo en el inicio del siglo XX (Puerta, 2004).



En la actualidad se emplean cada vez más criterios verdes en la toma de decisiones en respuesta a la creciente preocupación de la sociedad en materia ambiental. La generación de nuevas prácticas que mejoren la forma de manejar los residuos agropecuarios ha puesto al compostaje como una forma práctica de aprovechar dichos residuos, lo que incrementa la experimentación e investigación de dicho proceso; pero también en este ámbito se han repetido errores por el poco aprovechamiento de la información acumulada. Probablemente halla poco por descubrir sobre los fundamentos biológicos del proceso y la interacción con las condiciones fisicoquímicas, pero queda mucho por investigar respecto al rendimiento, beneficio y efectos del uso de abonos orgánicos sobre el suelo. Además la manera correcta de reciclar determinados residuos (Oviedo et al., 2012).

### **3.1 ESTADO DEL ARTE**

Los sistemas de producción agropecuaria han sido ampliamente estudiados, con el fin de generar producciones más acordes al medio ambiente. En muchos países se presentan adelantos sobre el compostaje con una gran variedad de investigaciones con diferentes enfoques, realizadas desde la academia, organizaciones no gubernamentales, centros de investigación, etc. A continuación se citan algunos avances en la capacidad de compostaje que ofrecen diferentes tipos de residuos urbanos, ganaderos, agrícolas e industriales y estrategias de actuación y optimización del proceso para la obtención de compost de calidad, investigaciones que contribuyen y soportan el presente estudio.

Un trabajo realizado en Paraná Brasil en el 2014 por Mónica Silva de Mendonça et al., estudiaron si el compostaje de una producción ovina podría mejorar la calidad agronómica del compost producido al mezclarse con estiércol del ganado vacuno, mezclándolos en proporciones variables, evaluaron varios parámetros del proceso de compostaje y del compost final. La inclusión de estiércol de ganado a la cama de las ovejas en un 50% resultó en un abono orgánico más estable, con alto contenido de nutrientes.

En Francia los investigadores Rene Guenon y Raphael Gros en el 2014; indagaron sobre el nivel de recuperación que genera la adición del compost a ecosistemas maltratados por incendios y sequias, además analizaron el efecto de la madurez del compost con los efectos generados en el ecosistema. La adición de compost en suelos quemados aumento el contenido de recurso en el suelo después de 10

meses, siendo dependiendo de la edad del abono pero independientemente del tiempo transcurrido desde la quema.

En otro trabajo realizado por Thuy Thu Doan et al., en el 2013 evaluaron la influencia de los abonos orgánicos (estiércol de búfalo, compost o humus de lombriz) y las enmiendas orgánicas en las propiedades bacterianas y virales en el suelo y el agua, donde se comprobó que las propiedades del suelo como pH, contenido de N y H<sub>2</sub>O se mejoraron al igual que en los mesocosmos acuáticos con la fertilización orgánica, además aumento la abundancia bacteriana y viral del suelo y agua.

Para el 2012 en Portugal, María Silva et al.; evaluaron la viabilidad de utilizar compost con baja calidad para obtener fertilizantes líquidos ricos en sustancias húmicas, las propiedades del compost, los índices de germinación, contenido de Cr y Cu fueron los parámetros que se correlacionaron más con la composición química de las sustancias húmicas. Los bajos niveles de metales y ausencia de fitotoxicidad en todos los extractos HS analizadas indican que compost con baja calidad pueden ser utilizados para producir fertilizantes orgánicos líquidos.

En el caso de Etiopia donde la fertilidad del suelo es baja debido a la poca entrada de nutrientes es una limitante para la agricultura sostenible en los sistemas agrícolas de los pequeños agricultores, se realizó un estudio en la villa de Beseku, en Arsi Negele en las tierras altas el sur-centro de Etiopia en el año 2014 por Workneh Bedada et al.; donde compararon la acumulación de materia orgánica y la productividad de los cultivos y el suelo, en terrenos que recibieron fertilización de compost, aplicado ya sea solo o en combinación con fertilizantes. Los experimentos tuvieron cuatro tratamientos: dosis completa de abono orgánico (C), la dosis completa de fertilizantes (F), la mitad de compost y fertilizantes medio (CF), y el control sin fertilizar (control). La adición de cualquiera de compost solo, o en combinación con fertilizantes minerales, mejora la productividad del suelo y de los cultivos en comparación con un suelo sin fertilizar y uno fertilizado únicamente.

Un estudio similar en Irlanda realizado por Sean Storey et al., en el 2014; compara la sucesión bacteriana en el compost de residuos verdes modificado con fertilizantes inorgánicos y los lodos de depuradora de aguas residuales donde se tomaron el nitrato de amonio cálcico y lodos de residuos lácteos como se fuentes de N. Los resultados indicaron que la sustitución del nitrato de amonio cálcico con lodos de residuos lácteos es una opción viable para los sistemas de compostaje a escala comercial. El uso de una alternativa Nitrógeno indujo cambios significativos en la estructura de la comunidad bacteriana, pero esto no afecta a la calidad del producto final. Aunque este estudio proporciona información útil sobre las bacterias asociadas

con el compostaje, la información sobre su función en sistemas de compostaje sigue siendo limitada. Además este enfoque proporciona una ruta ambiental para la eliminación de un producto de desecho significativo.

El estudio hecho en Inglaterra por Suzanne Donn et al., en el 2014; sobre la mejora de la fertilidad del suelo, el uso del compost incrementó el crecimiento de raíces y el refuerzo de la superficie del suelo en pendientes, demuestra que el uso de compost verde en zonas de pendiente dará lugar a un refuerzo significativo de estas laderas del suelo en profundidad alcanzada por las raíces de las plantas. Esto ocurre por varias razones. En primer lugar, la fertilidad del suelo se mejora, con aumento de las concentraciones de nutrientes esenciales, incluyendo N, P, K y Mg. lo más significativo es la mejora de establecimiento de la vegetación y de ahí el desarrollo de las raíces de la planta, que refuerza la pendiente.

En un estudio realizado en Estados Unidos por Xia Barker, Timothy Doane y William Horwarth en 2014, este grupo de investigadores analizaron el papel del compostaje de residuos verdes en la producción de  $N_2O$  en suelos agrícolas. Además establecieron las complejas relaciones entre el compostaje de estos residuos y la desnitrificación heterótrofa con la actividad de oxidación de amoníaco en suelos de uso agrícola.

El trabajo realizado en España por M. Illera Vives et al., en el 2015; brinda una alternativa para el tratamiento de los desechos de pescado y de la deriva de algas marinas para recuperar recursos de la materia y los nutrientes orgánicos y la producción de fertilizantes para la agricultura orgánica. En este se encontró que el compost aplicado a una velocidad de  $66 \text{ t ha}^{-1}$  aumentó significativamente el rendimiento del tomate y se asoció con un aumento de peso de la fruta y de mayor diámetro fruto en comparación con los cultivos que reciben la fertilización mineral o ninguna fertilización. El efecto residual de compost fue significativo y contribuyó a mayores rendimientos comerciales de lechuga en comparación con los tratamientos de control y de los fertilizantes minerales.

El potencial de los tres compost de residuos agrícolas, estiércol de granja, desechos de plátano y lodos se puso a prueba en un experimento en macetas de maíz en crecimiento realizado en el 2012 en Pakistán por Memon, et al.; los resultados del experimento mostraron aumento altamente significativo en altura de la planta, rendimiento de materia seca y el contenido de NPK con la aplicación de fertilizantes. El crecimiento del maíz, los rendimientos de materia seca y el contenido de NPK mejoraron significativamente cuando se añadieron abono sin tratar o tratados

compost, pero todavía estaba por debajo de los tratamientos de fertilización. Este estudio muestra claramente el papel beneficioso de materiales compostados.

En el estudio realizado en Canadá por Price, et al., en el 2013; evaluaron la eficacia de la combinación de residuos agrícolas o de un compost final (paja de trigo, estiércol de caballo y cama, estiércol de oveja, y el trigo de la paja) como materias primas de compost con los desechos de los mataderos de ganado en una escala de campo. Todos los tratamientos de compost consiguen temperaturas termófilas poco después de la mezcla inicial que se mantuvieron 20 a 42 días. Los tratamientos de la cama y el estiércol de caballo mostraron mejores características. La reducción en volumen de biomasa de los residuos los tratados en el compost estaba en el rango de 45%-55%. La relación C: N de los tratamientos fueron por debajo de 25: 1, con contenidos de nitrógeno total de cerca de 2%, lo que sugiere los compost de residuos de matadero haría suelos aceptables. Los resultados demuestran que los residuos agrícolas, como el estiércol de caballo y residuos de la cama, estiércol de oveja, son buenos como materia prima de bajo costo para el compostaje.

En Colombia se realizó una caracterización nutricional, fisicoquímica y microbiológica de tres abonos orgánicos para uso en agroecosistemas de pasturas en la subregión Sabanas del departamento de Sucre en el 2010 por Ricardo Pérez, Alexander Pérez y Melba Vertel. Los resultados mostraron que la composta de pollinaza presenta una mayor contribución nutricional, mayor retención de humedad y una alta volatilización, mientras la composta de pollinaza y el lombricompost mostraron la más baja densidad física. Los tres abonos tienen concentraciones de Cd, Cr, Hg, Ni y Pb por debajo de los niveles máximos permisibles por la NTC 5167 de 2004. Con relación a la diversidad de comunidades microbiológicas, la composta de bovinaza presentó mayor diversidad poblacional de hongos y bacterias.

El estudio más cercano a nuestra investigación es el desarrollado Escobar et al., 2012, desarrollado en los municipios de Líbano, Fresno e Icononzo (Tolima), y la provincia del Sumapaz, el cual identifico poblaciones microbianas en el compost de residuos orgánicos de fincas cafeteras de Cundinamarca, la gallinaza, fue el tratamiento, que más altos valores obtuvo, con respecto abundancia y diversidad microbiológica. Los microorganismos de mayor importancia, encontrados, tanto en sustratos simples, como en sus mezclas, fueron para el caso de las bacterias, los géneros *Pseudomonas* y *Bacillus*; para actinomicetos, los pertenecientes al género *Streptomyces* y para los hongos, los géneros *Aspergillus* y *Penicillium*. Lo cual pone de manifiesto, la importancia de realizar mezclas, a partir de sustratos simples para obtener mejores resultados y optimizar, el uso de residuos orgánicos.

#### 4. MARCO LEGISLATIVO

En Colombia, se inició la legitimación de la agricultura alternativa a través de la Resolución 544 de 1995, al reconocer la categoría de ecológicos para todos los productos “orgánicos”, “biológicos” y “ecológicos”, caracterizados por ser productos agrícolas elaborados sin utilizar sustancias químicas de síntesis. En esta resolución la agricultura ecológica es tratada como tema exclusivo de exportaciones, es decir que lo que se busca privilegiar es una agricultura apta para un mercado “verde” internacional. Ésta resolución fue reemplazada en 2002 por la 0074 en la que se establecen los requisitos para obtener productos sin residuos de compuestos de síntesis química y sin producir desequilibrios en el ecosistema; reglamento para la producción primaria, procesamiento, empaçado, etiquetado, almacenamiento, certificación, importación y comercialización de productos agropecuarios ecológicos. El prefijo BIO únicamente puede ser utilizado en acondicionadores orgánicos registrados para agricultura ecológica, que involucren microorganismos en su composición (Rivera y León, 2013).

Resolución ICA 00150 del 2003 por el cual se adopta el reglamento técnico de fertilización y acondicionadores de suelos para Colombia, por el cual se adopta el Reglamento Técnico de fertilizantes y acondicionadores de suelos para Colombia como un sistema de registro y control adoptado con base en estándares internacionales para contribuir a mejorar las condiciones de su producción, comercialización, utilización y su disposición final, elevando los niveles de calidad, de eficacia y de seguridad para la salud humana y el ambiente. Norma técnica colombiana NTC 5167 del 2003: Productos para la industria agrícola, materiales orgánicos utilizados como fertilizantes o acondicionadores de suelos, donde se reglamentan los limitantes actuales para el uso de materiales orgánicos, los parámetros físico – químicos de los análisis de las muestras de materia orgánica, los límites máximos de metales pesados y enuncia algunos parámetros para los análisis microbiológicos (Puerta, 2004).

El término ecológico es ratificado por la Resolución 0187 de 2006, del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, que define el “sistema de producción ecológica”, y asume los términos ecológico, orgánico o biológico, como sinónimos. En estos se incluyen todos los sistemas agrícolas que promueven la producción agropecuaria de manera sana y segura, desde el punto de vista ambiental, social y económico. Con los principios generales de respeto por la biodiversidad, enfoque y reconocimiento de

la diversidad agroecosistémica. Como se observa, la agroecología en Colombia se encuentra en proceso de expansión y crecimiento, que viene de la mano de las distintas formas de practicar las agriculturas alternativas y que se van expresando de manera lenta y no completamente formalizado ni aceptado en consenso. Desde el punto de vista institucional el gobierno colombiano creó en 1995 el grupo de Sostenibilidad Agropecuaria y Gestión Ambiental (Rivera y León, 2013).

## 5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La producción actual de los sistemas agropecuarios genera cantidades considerables de residuos orgánicos que ocasiona efectos ambientales negativos como la generación gases efecto invernadero por la descomposición de dichos residuos, que adicionalmente generan lixiviados desfavorables principalmente por su inadecuada gestión, esto crea la necesidad de buscar alternativas y opciones de tratamiento que puedan ofrecer ventajas sobre la eliminación de los residuos (Angulo et al., 2012). Los principales generadores de contaminación de las fuentes hídricas son las actividades agrícolas, pecuarias y humanas. La agricultura con alto uso de pesticidas y agroquímicos, sumada a técnicas de cultivo altamente erosivas y el inadecuado manejo de abonos orgánicos son factores de contaminación en los recursos naturales. Se consideran principales factores de contaminación pecuaria el manejo inadecuado de residuos de explotaciones pecuarias, lavado de porquerizas, galpones y establos, disposición de mortalidades, neonatos y residuos de mataderos (Plan de desarrollo municipal Fusagasugá, 2012).

En el proceso del compostaje participa una amplia gama de microorganismos que son los encargados de la degradación de residuos orgánicos, los cuales utilizan los desechos orgánicos como sustrato para satisfacer sus requerimientos energéticos, generando como productos elementos nutritivos en formas asimilables para las plantas; razón por la cual es necesario conocer su papel en el proceso de maduración del compost (Puerta, 2004).

El manejo de los abonos orgánicos ha sido tradicionalmente utilizado por los agricultores de pequeñas extensiones de tierra, incorporando directamente materiales orgánicos al agrosistema, generando una mala fertilización y desequilibrio del suelo. El compost es rico en nutrientes como nitrógeno, fósforo y bacterias y puede ser aplicado nuevamente a los cultivos para la recuperación de suelos. Sin embargo, este proceso puede resultar perjudicial para el ambiente sino se desarrolla un proceso adecuado (Nieto, 2002).

De acuerdo al planteamiento del problema el presente proyecto pretende responder la siguiente pregunta de investigación ¿Cómo los microorganismos (bacterias y hongos) asociados a variables físico-químicas en el proceso de compostaje se pueden establecer como indicadores de calidad en abonos orgánicos?

## 6. OBJETIVOS

### 6.1 Objetivo general

Elaborar abonos orgánicos a partir del compostaje de residuos agrícolas en el municipio de Fusagasugá

### 6.2 Objetivos Específicos

- Cuantificar las poblaciones de bacterias y hongos atendiendo periódicamente sus relaciones con temperatura, humedad y pH.
- Determinar indicadores físicos (color, olor), químicos (relación C/N, CIC, MO, micro y macroelementos) en sustratos orgánicos elaborados.
- Caracterizar las poblaciones microbianas finales mediante técnicas de macro, microscopia y utilización de Kits para identificación bacteriana.
- Evaluar en un bioensayo el efecto de las mezclas sobre la germinación de semillas de cultivos con potencial forrajero como indicador de madurez del compost.



## **7. MARCO TEÓRICO**

### **7.1 Residuos**

Se define como residuo o desecho a todo material, o resto de material generadas en las actividades de producción y consumo, que no tiene uso alguno. En función de los recursos disponibles, los “desechos”, son materiales fuera de lugar y desde el punto de vista económico son el producto del uso ineficiente de los recursos en la producción de bienes y servicios; residuo es cualquier sustancia u objeto del cual se desprenda su poseedor, en el caso específico de los residuos agrícolas se define como todo aquel material sobrante o desperdiciable generado en un establecimiento agropecuario, a menudo son reutilizables y se pueden considerar como un recurso al ser considerados como materia prima para algún proceso, rápidamente adopta un valor en el mercado. Para definir si determinados residuos tienen potencial de reaprovechamiento, es necesario conocer su naturaleza u origen (Valderrama, 2013).

#### **7.1.1 Clasificación de los residuos**

La clasificación de los residuos, permite varios enfoques y la consideración de distintos parámetros. Para la clasificación, se consideran entre otros parámetros: origen o actividad emisora, toxicidad y peligrosidad, tamaño, naturaleza química de los materiales emisores, parámetros físico – químicos en general (INTEC, 1999).

Según su origen se clasifican en doméstico, comercial, institucional, construcción y demolición, servicios municipales, zonas de plantas de tratamiento, industriales y agrícolas. Según su grado de descomposición se denominan en biodegradables: Los microorganismos descomponedores de la naturaleza los transforman en micro nutrientes, están formados por recursos naturales renovables, y los no biodegradables: Los microorganismos descomponedores no los pueden transformar porque están formados de recursos naturales no renovables, como los plásticos (derivados del petróleo), latas y chatarras (derivados de metales) y vidrio. También se pueden clasificar por su uso y disposición final en esta categoría de distinguen los residuos reciclables: Se pueden volver a transformar en materia prima para nuevos productos como el papel, cartón, vidrio, plástico y objetos metálicos. Los residuos orgánicos: Pueden ser transformados en abono orgánico por el proceso de compostaje o lombricultura como los residuos de alimentos, estiércol de animales, residuos de jardinería, y los desechos: No pueden volver a usarse, debido a que ya no tienen vida útil por su deterioro o contaminación (Puerta, 2004).

Según la naturaleza del residuo se puede establecer dos categorías de residuos: residuos inorgánicos y residuos orgánicos. Un Residuo inorgánico incluye todos aquellos residuos de origen mineral y sustancias o compuestos sintetizados por el hombre. Dentro de esta categoría se incluyen habitualmente metales, plásticos, vidrios, etc. Desechos provenientes de agrotóxicos, agroquímicos, fitosanitarios y agroveterinarios, son en su mayoría de origen sintético y con un gran efecto residual. Un Residuo orgánico se refiere a todos aquellos que tienen su origen en los seres vivos, animales o vegetales. Incluye una gran diversidad de residuos que se originan naturalmente durante el “ciclo vital”, como consecuencia de las funciones fisiológicas de mantenimiento y perpetuación o son producto de la explotación por el hombre de los recursos bióticos (Sztern, 2008).

### **7.1.2 La actividad agropecuaria como fuente de residuos orgánicos**

La actividad agropecuaria genera una gran variedad de residuos de origen vegetal y animal. Los residuos vegetales están conformados por restos de cosechas y cultivos (tallos, fibras, cáscaras, bagazos, rastrojos, restos de podas, frutas, etc., procedentes de diversas especies cultivadas. El contenido de humedad de estos residuos es relativo y depende de varios factores, la humedad varía de un pequeño porcentaje, como en el caso de residuos de cosechas, hasta un 90% en el caso de lodos, aguas negras y otros desechos líquidos. El contenido en humedad, puede llegar a condicionar, las alternativas de tratamiento siendo un parámetro importante a considerar en los residuos orgánicos. En los residuos animales, se incluyen excrementos sólidos y semisólidos y líquidos purines, desechos de faena, cadáveres, sobrantes de suero y leche, etc. Es la categoría de los semisólidos se encuentran los estiércoles y purines; El estiércol es descrito generalmente como cualquier mezcla de heces, orines y desperdicios tales como material vegetal como paja, heno o material de cama de los animales. La composición físico-química del estiércol varía de una producción agropecuaria a otra. El estiércol es rico en nitrógeno, fósforo y potasio, dependiendo entre otros factores del tipo de ganado, de la dieta, y de las condiciones bajo las cuales se produce. Los purines a diferencia de los estiércoles tienen un alto contenido de agua y son manejados como líquidos. Estos residuos son los que presentan mayor interés por la concentración espacial que generan en las producciones y por el impacto ambiental negativo que producen en la mayoría de los casos (Sztern, 2008).

Los principios agroecológicos que permiten la sustentabilidad biológica y la viabilidad económica de las fincas agropecuarias son: Diversificación espacial y temporal,

integración de la producción animal y vegetal, mantenimiento de altas tasas de reciclaje de los desechos animales y vegetales y optimización del uso del espacio (Altieri y Nicholls, 2000).

### **7.1.3 Alternativas de tratamiento de los residuos orgánicos**

La recuperación, reutilización y/o transformación de los residuos en insumos útiles a los sectores productivos es una opción con posibilidades, las alternativas existentes para el tratamiento y uso de los residuos orgánicos son principalmente procesos biológicos y térmicos. Los procesos biológicos permiten la producción de biogás y compostaje (Valderrama, 2013).

Las alternativas que se han manejado con mayor resultado para la reutilización y/o reconversión han sido los residuos como: fuente de alimento animal, fuente de energía y como materia prima para la producción de abonos orgánicos (Sztern, 2008).

### **7.1.4 Los residuos como fuente de alimento animal**

Muchos desechos de la industria frigorífica e industria del pescado, son la materia prima para la producción de componentes de raciones para la alimentación de los animales, en otros casos como la melaza se emplea para la preparación de ensilados y algunos residuos como frutas, legumbres, cereales, etc. pueden ser utilizados en forma directa como alimento animal. La actividad agroindustrial genera residuos susceptibles de ser transformados en forrajes y piensos para animales. La utilización de los residuos orgánicos de la actividad agropecuaria como fuente de alimento animal, así como la aplicación directa en el suelo de los mismos como abonos, son quizás las alternativas de reutilización de mayor data histórica (Sztern, 2008).

### **7.1.5 Los Residuos como fuente de Energía**

Los restos de origen natural presentan una composición que se caracteriza por el predominio de macromoléculas orgánicas con un alto potencial energético almacenado como energía química de enlace, a los recursos que les es posible liberar la energía química de enlaces se les denomina Biomasa (masa de material biológico que es soporte de energía). En la biomasa como fuente de energía se establecen dos categorías: fuentes primarias y secundarias. La primaria no es residuo de alguna actividad agroindustrial o utilización humana; es aquella biomasa

cuya utilidad es la producción energética. La fuente secundaria es un subproducto de una primera utilización que es susceptible de ser sometida a una conversión energética. La extracción de la energía de enlace químico contenida en la biomasa se puede realizar por diversos procedimientos técnicos: procedimientos por vía seca y por vía húmeda. Los procedimientos por vía seca son procesos físico-químicos basados en la transformación de los materiales a altas temperaturas como: combustión directa, carbonización, pirólisis, gasificación. Los procedimientos por vía húmeda son procesos bioquímicos en medio acuoso mediados por microorganismos, destacándose la biodigestión anaeróbica y la fermentación alcohólica (Sztern, 2008).

La biodigestión anaerobia: se define como un proceso mesófilo, de degradación anaerobia de la materia orgánica con la obtención final de una mezcla gaseosa conocida como biogás. Este contiene aproximadamente entre un 50 a 60% de gas metano y un 30% de dióxido de carbono. Además se obtiene un lodo residual con valor de fertilizante enriquecido y un sobrenadante rico en nutrientes. La fermentación alcohólica: es un proceso bioquímico mediado por levaduras que degradan los azúcares fermentables. El producto final de la fermentación es el etanol, que es extraído por destilación fraccionada. El etanol como combustible, puede utilizarse como sustituto de la gasolina o en mezclas de alcohol-nafta (hasta un 20% de alcohol) (Sztern, 2008).

#### **7.1.6 Los residuos orgánicos como materia prima para la producción de abonos orgánicos**

Conocemos por abonos todas aquellas sustancias o compuestos de origen biológico o de síntesis química que presentan alguna propiedad positiva para los suelos y cultivos. También entendemos por abonos minerales a las sustancias o compuestos químicos que pueden pertenecer al campo de la química inorgánica u orgánica. Por contraposición, los abonos orgánicos o bioabonos, son aquellas sustancias o compuestos de origen vegetal o animal que pertenecen al campo de la química orgánica, y que son en general incorporados directamente al suelo sin tratamientos previos. El abono orgánico hace referencia a todo material orgánico empleado para el mejoramiento de la estructura del suelo y fertilización de cultivos. Se considera un abono orgánico todo material de origen animal o vegetal que se utilice principalmente para mejorar las características del suelo, como fuente de vida y nutrientes al suelo (Valderrama, 2013).

Los abonos orgánicos generalmente son de dos tipos: sólidos y líquidos. Los sólidos son llamados compost y los líquidos son los caldos Trofobióticos, actualmente en

Colombia dado el interés y crecimiento del consumo de productos ecológicos, el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, expidió la resolución N° 0074 del 4 de abril de 2002, por medio de la cual establece el reglamento para la producción primaria, procesamiento, empaquetado, etiquetado, almacenamiento, certificación, importación y comercialización de productos agropecuarios ecológicos. En el Artículo 5 del Capítulo III de dicha resolución indica que los sistemas de producción agropecuaria ecológica utilizan insumos que aumentan la actividad biológica del suelo y balancean el equilibrio biológico natural (Valderrama, 2013).

La aplicación de estiércoles y purines es una práctica tradicional de abonado orgánico, el abono orgánico abarca los abonos elaborados con estiércol de ganado, compost rurales y urbanos, otros desechos de origen animal y residuos de cultivos. En esta categoría se puede incluir los abonos verdes. Para aprovechar el potencial que tienen los desechos orgánicos como abonos, estos deben pasar por un proceso previo antes de su integración al suelo, de forma tal que, el material que definitivamente se aporte, haya transcurrido por los procesos más energéticos de la mineralización y presente formas lo más estable posible, con los macro y micro nutrientes en las formas más asimilables posibles. Una de las técnicas que permite esta biodegradación controlada de la materia orgánica previa a su integración al suelo es el Compostaje y el producto final es conocido como Compost (Sztern, 2008).

Existen diferentes alternativas y métodos para el aprovechamiento de los residuos sólidos agropecuarios, dentro de las cuales se destacan la producción de abono Tipo Bocashi, Caldos Trofobióticos y compostaje (Valderrama, 2013).

## **7.2 El compostaje como alternativa para la producción de abonos orgánicos a partir de residuos agropecuarios**

El compostaje es una descomposición aeróbica biológica de los materiales orgánicos, es decir es un proceso mediante el cual diversos sustratos orgánicos se descomponen y estabilizan debido a la acción de una población mixta de microorganismos, este se constituye principalmente de estiércol de los animales de granja (aves, caballos, vacas, ovejas o cerdos), residuos de cosechas y desperdicios orgánicos domésticos. Durante el proceso de compostaje se produce una disminución en peso de los residuos orgánicos tratados, y en cada una de las etapas se producen cambios en numerosas propiedades químicas, físicas y biológicas de los materiales orgánicos. Un porcentaje de aproximadamente 50 % del material

original se pierde durante la fermentación por causa de la evaporización y digestión microbiana (Valderrama, 2013).

### **7.3 Materias primas para el proceso de compostaje**

La gran mayoría de los materiales orgánicos son compostables. Restos de plantas y cosechas, (ramas trituradas, podas, hojas caídas de árboles, cáscaras de frutos secos, heno y césped o pasto); los estiércoles de porcino, vacuno, caprino y ovino, y sus camas de corral; restos orgánicos de cocina en general (frutas y hortalizas, alimentos estropeados, cáscaras de huevo, cáscaras de frutos secos, cáscaras de naranja, cítricos o piña); aceites y grasas comestibles (muy esparcidas y en pequeña cantidad); virutas de aserrín (en capas finas); y servilletas, pañuelos de papel, papel y cartón (no impresos ni coloreados) (INTEC, 1999).

Materias que no deben compostarse: Restos de plantas enfermas, los residuos de carne y cualquier elemento que tenga altos contenidos de grasa, materiales inertes, tóxicos o nocivos (residuos químicos-sintéticos, pegamentos, solventes, gasolina, petróleo, aceite de vehículos, pinturas, materiales no degradables, vidrio, metales, plásticos) (Román et al., 2013).

La separación en origen es fundamental para el proceso del compostaje. Existen dos componentes de la materia orgánica fundamentales en el compostaje: el carbono y el nitrógeno. La proporción C/N en la materia orgánica suficiente para ayudar al proceso de la descomposición es de aproximadamente 30 partes de carbono por 1 de nitrógeno (30:1) en peso. El proceso del compostaje se retarda si no hay suficiente nitrógeno, y demasiado nitrógeno puede causar la generación de amoníaco que puede crear olores desagradables. Una regla para recordar es que el material seco es alto en carbono y la materia húmeda es alta en nitrógeno. Así pues, se debe combinar 3 porciones secas con 1 porción húmeda (Sztern, 2008). Los residuos orgánicos posibles de utilizar en un proceso de compostaje son:

- Residuos procedentes de recogida doméstica.
- Desechos de corte y limpieza de parques y jardines.
- Desechos horto-frutícolas y subproductos de industrias alimentarias.
- Restos de cosechas de invernaderos y cultivos hortícolas.

### **7.4 El Compostaje**

El compostaje es la transformación de residuos orgánicos (estiércol animal, hojas, verduras, residuos de alimentos, frutas, etc.), por acción controlada de los microorganismos descomponedores que dan como resultado un producto totalmente orgánico, estable e higienizado aprovechable por el suelo y por las plantas. En principio, toda materia orgánica tales como desechos vegetales y animales, y restos de alimentos, entre otros, pueden ser utilizados como materia prima para el compostaje (Puerta, 2004).

El compostaje puede definirse como un proceso biológico aeróbico (biooxidativo) controlado, en el que intervienen numerosos microorganismos quienes alteran la estructura molecular de los compuestos orgánicos, que incluye un sustrato orgánico heterogéneo en estado sólido, que evoluciona pasando a través de diferentes fases las cuales ocasiona cambios de temperatura y pH durante el proceso, dando lugar a la producción de materia orgánica estable, libre de patógenos y disponible para ser utilizada en la agricultura como abono acondicionador de suelos (Penagos et al., 2011).

### 7.4.1 Fases del compostaje

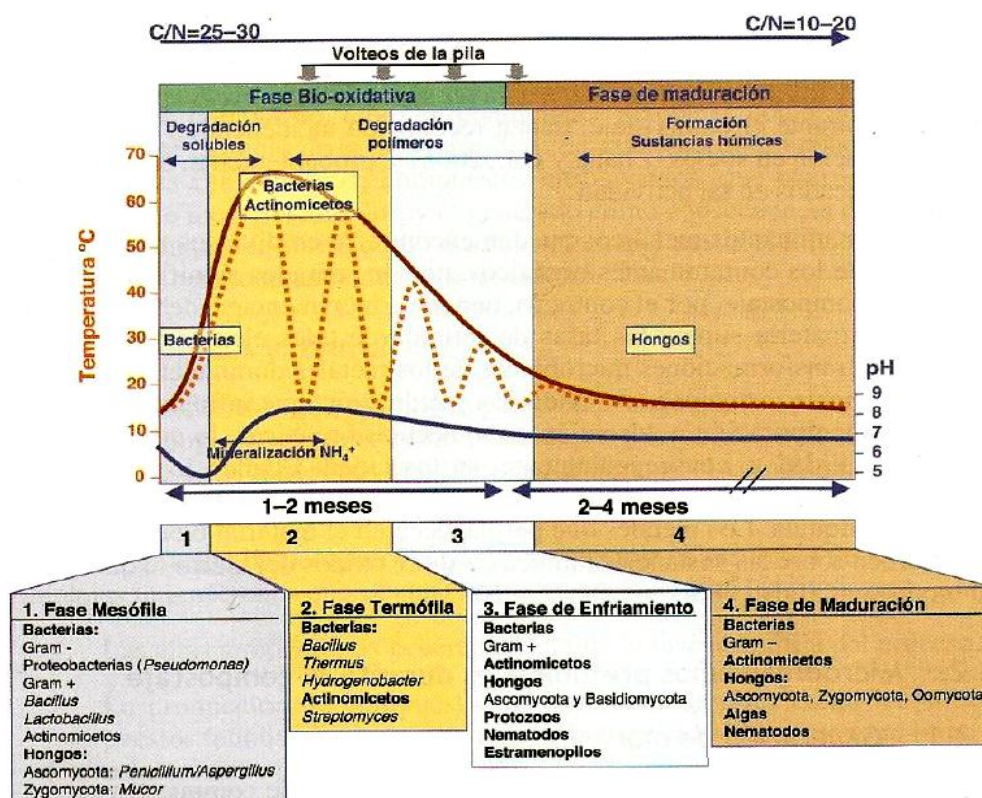


Figura 1. Fases del proceso de compostaje (Fuente: Moreno y Moral, 2008).

El proceso de descomposición aerobia de los residuos orgánicos se inicia en una fase mesófila caracterizada por la presencia de bacterias y hongos quienes son los que dan inicio al proceso; ellos se multiplican y consumen los carbohidratos más fácilmente degradables ocasionando una disminución del pH por la producción de ácidos orgánicos, produciendo un aumento en la temperatura hasta unos 40°C (Valderrama, 2013).

En este inicio del proceso mesófilico hay abundancia de amoníaco (N. NH<sub>4</sub>), que prima sobre el nitratos (N - NO<sub>3</sub>); dominan las bacterias y los hongos mesófilos. También hay liberación de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, lo cual reduce el contenido de carbono (C) del compost y el porcentaje de la fracción mineral tiende a aumentar (Román, 2013).

En la fase Termófila, la temperatura sube de 40°C a 70°C. Esta fase se caracteriza por la presencia de bacterias y hongos termófilos que son los responsables de la



degradación de las moléculas más difíciles de descomponer, aquellas que se degradan a tasas más lentas como la holocelulosa (celulosa más hemicelulosa) y lignina, así como ceras, grasas, aceites y resinas. Como la actividad metabólica es máxima, se alcanzan temperaturas altas y masiva liberación de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, lo cual reduce el contenido de Carbono y hace más elevado el porcentaje de minerales (Román, 2013).

En la etapa termofílica sigue predominando el amoníaco sobre el nitrato, pero, menos marcado que en la fase mesófila, además hay lugar a la formación de fitotoxinas, importantes para la eliminación de patógenos (Román, 2013).

En la etapa de enfriamiento la temperatura disminuye, desde la más alta alcanzada hasta llegar a la del ambiente, generada por la reducción de la población microbiana y su actividad metabólica, la cual se ve afectada por no encuentra suficiente sustrato alimenticio. Además la población de microorganismos es dominada por bacterias mesofílicas y los hongos que actúan sobre la lignina y la celulosa, y la biomasa bacteriana (Cruz, 2009).

También en esta fase se desarrolla la formación de nitratos dominantes sobre las formas amoniacales y se reduce más el contenido de C de la materia en compostaje. Los nitratos y otras sales, así como la abundancia de K en solución, aumenta la salinidad (Sztern, 2008).

Por último, en la fase de maduración el proceso de humificación continúa, aparecen otros organismos como protozoos, nematodos, miriápodos, etc. Al final de esta fase se debe obtener un material caracterizado por unos niveles aceptables de humedad, un alto nivel de estabilidad, con un bajo o nulo grado de fitotoxicidad. Puede considerarse esta etapa como el complemento final de las fases del proceso de fermentación, disminuyendo la actividad metabólica (Román, 2013).

En esta fase, los cambios son menores día a día, pero, con aumento en el porcentaje de la fracción mineral y los nitratos y la disminución en el porcentaje de carbono, liberación de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), y amoníaco (NH<sub>3</sub>); también se eleva la cantidad de actinomicetos, responsables del típico olor a tierra orgánica fresca (Canet, 2007).

#### 7.4.2 Microorganismos del proceso de compostaje

El compostaje constituye un ecosistema de diversas poblaciones de bacterias, hongos y actinomicetos, donde la predominancia de estos depende de las condiciones ambientales y nutricionales del mismo. Las variaciones térmicas durante el compostaje permiten la sucesión de poblaciones microbianas, contribuyendo a eliminar microorganismos patógenos, y a modificar las propiedades fisicoquímicas de los sustratos. Los microorganismos descomponedores de la materia orgánica los podemos clasificar de acuerdo a la forma de alimentarse (autótrofos, fotosintetizadores y heterótrofos), a la temperatura óptima de crecimiento (psicrófilos –entre 0 y 20 °C-, mesófilos – entre 20 y 45 °C-, y termófilos entre 45 y 80 °C.), al pH óptimo de desarrollo (acidófilos, neutrófilos y basófilos), al contacto y consumo del oxígeno (anaerobios, facultativos y aerobios) (Moreno y Moral, 2008).

Durante el proceso se produce una selección de microorganismos regida por la disponibilidad de los nutrientes y la temperatura, evolucionando desde el predominio inicial de las bacterias capaces de metabolizar compuestos orgánicos simples, hasta los que degradan compuestos complejos como hongos y actinomicetos. En cada una de las etapas la temperatura determina la población específica de acuerdo a su tolerancia a dichos factores, es decir la biodiversidad decrece al aumentarla la temperatura (Cruz, 2009).

#### 7.4.3 Variación microbiana durante el proceso del compostaje

En el compostaje se desarrollan una gran variedad de microorganismos aeróbicos mesófilos, termo tolerantes y termófilos que incluyen bacterias, actinomicetos, hongos y levaduras. Las bacterias alcanzan los mayores niveles en las fases mesófila y termófila inicial, aunque se detectan en todas las fases, decreciendo en la fase de maduración, los géneros bacterianos frecuentes en la mayoría de los procesos de compostaje son *Bacillus*, *Pseudomonas* y el actinomiceto *streptomyces*. Los actinomicetos (bacterias filamentosas) se desarrollan más lentamente y tienen mayor capacidad para degradar compuestos orgánicos complejos. Los actinomicetos junto a los hongos toman relevancia en el proceso cuando los nutrientes asimilables se han agotado, estos predominan en las fases de enfriamiento y maduración. Los hongos y levaduras más encontrados durante el proceso pertenecen a las clases Ascomyces, Zygomycetes, Basidiomycetes,

Saccharomycetes y Ureidiomycetes. Los generos fúngicos más detectados son *Aspergillus* y *Penicillium*, seguidos por *Mucor* y *Chaetomium*. Las levaduras detectadas en compostajes corresponden a los generos *Candida*, *Rhodotorula*, *Kluyveromyces*, *Pichia*, *Torulopsis* y *Trichosporon* (Moreno y Moral, 2008).

En la fase mesófila hay presencia de bacterias y hongos mesófilos y termo tolerantes, las bacterias con metabolismo oxidativo y fermentativo, son las que alcanzan mayores niveles en esta fase, principalmente bacterias Gram-negativas y productoras de ácido láctico. La actividad metabólica aumenta rápido la temperatura 42-45°C, iniciando la transición de microbiota mesófila a termófila. En esta termófila proliferan los microorganismos termo tolerantes y termófilos tales como actinomicetos (*Thermoactinomyces* sp.), diversos *Bacillus* spp. y bacterias Gram negativas como *Thermus* e *Hydrogenobacter*. Los hongos y las levaduras son reducidos desde el inicio de la fase, y son eliminados completamente a partir de los 60°C. Las bacterias que más abundan a temperaturas de 45°C a 50°C son las esporuladas como *Bacillus* spp. y los actinomicetos termo resistentes. Las bacterias no esporuladas *Hydrogenobacter* spp y *Thermus* spp. Y algunas esporuladas del genero *Bacillus* predominan a temperaturas de 70 a 82°C. La transición a la tercera fase inicia cuando la temperatura es elevada y la fuente de carbono disponible comienza a ser factor limitante (Hernández, 2009).

Las fases de enfriamiento y maduración están caracterizadas por el crecimiento de una nueva comunidad en la que predominan los hongos y actinomicetos capaces de degradar compuestos complejos. Conforme avanza la maduración la comunidad se hace más estable y compleja, apareciendo microorganismos típicos como *Arthrobacter*. A la actividad de hongos y bacterias se les unen otros organismos como los protozoos, nematodos y miriápodos, que contribuyen a la degradación y estabilización final de la materia orgánica (Hernández, 2009).

#### **7.4.4 Variables físicas y químicas durante el proceso del compostaje**

En el proceso de compostaje, los microorganismos son los responsables de la transformación del sustrato; por lo tanto, todos aquellos factores que puedan inhibir su crecimiento y desarrollo, tendrán también su efecto sobre el proceso.

Para que el compostaje se desarrolle adecuadamente es imprescindible un buen control de los parámetros determinantes, que son los siguientes:

- Humedad: es uno de los principales parámetros a controlar, ya que cuando ésta es muy alta, el agua desplazaría al aire contenido en los espacios intersticiales dando lugar a reacciones de anaerobiosis, lo que además de reducir la velocidad del

proceso, suele generar malos olores y pérdidas de nutrientes por lixiviación. Si la humedad es muy baja, disminuye la actividad microbiana, especialmente de las bacterias ya que los hongos pueden permanecer activos biológicamente (Sztern, 2008).

Se consideran niveles óptimos de humedad del 40% al 60% y éstos dependen de los tipos de materiales a utilizar; La gestión biológica de los microorganismos requiere de agua para la formación de biomasa; se necesita una humedad alta al comienzo del proceso, al final la humedad deseada está alrededor del 35%. El contenido de agua, la actividad microbiana, el nivel de oxígeno y la temperatura son factores directamente relacionados con la humedad global del compostaje (INTEC, 1999).

- Temperatura: es uno de los factores que influye de forma crítica sobre la velocidad de descomposición de la materia orgánica durante el compostaje. Esta varía ampliamente a lo largo del compostaje, y resulta importante para el control de las poblaciones microbianas predominantes en las distintas fases del proceso. Un requisito importante es que en la fase termofílica se alcancen temperaturas altas (60 – 70 °C), capaces de reducir la población de microorganismos patógenos (higienización). Se evita superar los 70°C, porque se inhibe el desarrollo de gran parte de los microorganismos o provoca la eliminación, con lo que se reduce la tasa de descomposición microbiana (Valderrama, 2013).

- Aireación: dado que el compostaje es un proceso de oxidación, resulta imprescindible la presencia de un nivel adecuado de aire y por tanto de oxígeno, para lo cual se recurre al volteo periódico o a la ventilación forzada de las pilas. Los microorganismos deben disponer de oxígeno suficiente para la realización del proceso aerobio, si se garantiza el oxígeno necesario, se puede obtener un compost rápido y de buena calidad, evitándose problemas de malos olores (INTEC, 1999).

Cuando la aireación es insuficiente la fracción orgánica se descompone lentamente y de forma anaerobia, originando malos olores, menores temperaturas y un material de mala calidad. El consumo de Oxígeno está en relación directa con la actividad microbiana, por lo que la aireación debe incrementarse cuando la temperatura de la masa aumenta. El mayor consumo de Oxígeno coincide con temperaturas comprendidas entre 28 y 55°C (Moreno y Moral, 2008).

- pH: este parámetro afecta a las reacciones enzimáticas, de ahí que sea también un indicador importante de la evolución del compostaje. Generalmente, el pH decrece al principio del proceso por la actividad de las bacterias acidificantes y lentamente va incrementándose. Las reacciones que más influyen en el pH son las de liberación de CO<sub>2</sub>, de ácidos orgánicos y de iones alcalinos. Las bacterias prefieren valores de pH

entre 6 y 7.5, mientras que los hongos toleran un rango más amplio entre 5.5 y 8. Si el pH desciende de 6, la descomposición microbiana se detiene, valores cercanos o superiores a 9, favorecen la formación de amonio, afectando negativamente al crecimiento y actividad de los microorganismos (Valderrama, 2013).

### **7.5 Variables relacionadas a la naturaleza del sustrato**

- Relación C/N: para un correcto compostaje donde se aprovechen la mayor parte del C y del N, la relación debe ser adecuada. Los microorganismos utilizan 30 partes de C generalmente por cada una de N, se precisa que en la mezcla inicial este parámetro presente un valor entre 25 y 30 (INTEC, 1999).

Esta relación influye en la velocidad del proceso y en la pérdida de amonio durante el compostaje; si la relación C/N es mayor a 40 la actividad biológica disminuye, donde el exceso de carbono debe ser oxidado, si los productos a compostar tienen una relación C/N baja, el compostaje se lleva a cabo con mayor rapidez, pero el exceso de nitrógeno se desprende en forma amoniacal, lo que supone una pérdida de N que es el nutriente fundamental para los cultivos (Sztern, 2008).

- Tamaño de partícula: dado que la actividad microbiana se desarrolla principalmente en la superficie de las partículas, cuanto mayor es la superficie del sustrato mayor será la rapidez del ataque microbiano. No obstante, el tamaño de las partículas no debe ser ni muy fina ni muy gruesa; un tamaño muy fino de partícula no es conveniente debido a los riesgos de compactación del sustrato, lo que dificultaría una aireación adecuada. Si las partículas son muy grandes, mayores de 3 cms, la fermentación aeróbica tendrá lugar solamente en la superficie. Ambos casos se producirían fermentaciones anaerobias con malos olores. Los tamaños de partículas considerados óptimos oscilan entre 1 y 3 cm (INTEC, 1999).

Otro factor a tomar en cuenta es la naturaleza química del sustrato y su nivel nutricional: la naturaleza de los compuestos estructurales influyen en la velocidad del proceso de degradación. Cuando predominan los compuestos complejos (lignina, celulosa, grasas, etc.) la degradación de los residuos es mucho más lenta que cuando predominan los compuestos orgánicos de bajo peso molecular. Algunos de los nutrientes necesarios en mayor cantidad son el C, N, P y K. el carbono es utilizado como fuente de energía y junto al nitrógeno contribuyen en la síntesis de proteínas y al crecimiento microbiano. El fósforo y potasio son esenciales a nivel metabólico (Román et al., 2013).

## 7.6 Calidad del compostaje

La calidad del compost viene determinada por la suma de las distintas propiedades y características. Para su evaluación debe tenerse en cuenta: posible destino del producto, protección del entorno y requerimientos del mercado. Dentro de los niveles de calidad deberán establecerse distintas exigencias según el mercado al que vaya destinado, pero siempre habrá unos mínimos a cumplir para cualquier aplicación. Es necesario definir una calidad general del compost (de acuerdo con los representantes de los potenciales usuarios) y además establecer unos parámetros diferenciados para usos diversos, sin querer significar esta afirmación que los máximos permitidos de contaminantes se puedan sobrepasar según el destino. Los requerimientos de calidad deberán ir dirigidos a conseguir: aspecto y olores aceptables, higienización correcta, muy bajo nivel de impurezas y contaminantes, nivel bueno de componentes agrónomicamente útiles y una cierta constancia de características, por tanto debe hablarse de:

\* Calidad física: granulometría, densidad aparente, porosidad, capacidad de retención de agua, humedad, presencia de partículas extrañas, olor, coloración.

\* Calidad química, en la que aparecen tres vertientes: contenido y estabilidad de la materia orgánica, contenido y velocidad de mineralización de los nutrientes vegetales que contenga y presencia de contaminantes inorgánicos u orgánicos.

\*Calidad biológica: presencia de semillas de malas hierbas, patógenos primarios y secundarios. El control del rendimiento tiene relación con el desarrollo del proceso y permite valorar los costes y el interés de haber aplicado el tratamiento (Torrentó, 2011).

La evaluación de la calidad del compost se manifiesta a través de mediciones de indicadores específicos en momentos bien establecidos del proceso. La determinación del mayor número de indicadores (físicos, químicos, y biológicos) nos lleva a definir mejor la calidad del producto (INTEC, 1999).

La calidad del compostaje parte de las características que resultan de aplicar un tratamiento respetuoso y acorde con una gestión racional de los residuos, que tiene como objetivo fabricar un producto de aplicación agrícola. Para que el compostaje llegue a ser una alternativa económicamente viable y poder alcanzar el beneficio

ambiental, el compost deberá tener una calidad adecuada a su uso y unas características constantes en el tiempo. De los múltiples aspectos que afectan a la calidad del compost podemos destacar:

1. El material inicial. La calidad inicial de los materiales utilizados nos determina la calidad del material final.
2. el proceso de compostaje. Para conseguir una higienización del compost se requiere que el material a descomponer haya pasado por temperaturas mayores a 60°C durante cierto tiempo, de lo contrario encontraremos agentes patógenos en el producto final.
3. El almacenamiento del producto final. En ocasiones el compostaje continúa el proceso luego de ser almacenado. La inestabilidad o inmadurez genera los malos olores producidos en el almacenamiento, ya que éstos compost inmaduros continúan el proceso de descomposición pero si no hay un adecuado suministro de aire, las condiciones anaerobias llevan a la producción de metano (Soto, 2003).

## 7.7 Indicadores de la evolución del Compostaje

Tabla 1. Indicadores de la evolución del compostaje. (Fuente: Román et al., 2013).

Indicador	Rango ideal al comienzo (2-5 días)	Rango ideal en fase termófila II (2-5 semanas)	Rango ideal de compost maduro (3-6 meses)
C:N	25:1 – 35:1	15/20	10:1 – 15:1
Humedad	50% - 60%	45%-55%	30% - 40%
Concentración de oxígeno	~10%	~10%	~10%
Tamaño de partícula	<25 cm	~15 cm	<1,6 cm
pH	6,5 – 8,0	6,0-8,5	6,5 – 8,5
Temperatura	45 – 60°C	45°C-T° ambiente	T° ambiente
Densidad	250-400 kg/m <sup>3</sup>	<700 kg/m <sup>3</sup>	<700 kg/m <sup>3</sup>
Materia orgánica (Base seca)	50%-70%	>20%	>20%
Nitrógeno Total (Base seca)	2,5-3%	1-2%	~1%

La evolución del proceso del compostaje se puede realizar a través de mediciones de indicadores establecidos (INTEC, 1999), como:

- a.** Contenido de Humedad: La medición se debe realizar al iniciar el proceso y periódicamente de 1 a 2 semanas, o cada vez que se realice el volteo de la pila. El nivel de humedad de las pilas debe oscilar entre 40 a 60% y se puede controlar fácilmente apretando una muestra de compost en las manos; no debe caer agua a lo más 1 o 2 gotas.
- b.** Carbono Total, Nitrógeno Total y la Relación C/N: Para poder establecer la relación C/N es necesario primero analizar separadamente la magnitud presente de cada elemento en una muestra. La medición de este parámetro debe efectuarse al inicio del proceso y al producto terminado. La relación que deberían reflejarse al final del proceso es de 19:1.
- c.** pH: Este parámetro debe ser medido con pH-metro durante todo el proceso. Los valores normales al final del proceso deben fluctuar entre 7 a 8.
- d.** Contenido de Metales Pesados: La toxicidad por metales pesados es el factor limitante en el uso agrícola por sus efectos negativos a largo plazo. Los metales pesados más comunes son el Cobre, Zinc (necesarios como micronutrientes en las plantas), Cadmio, Plomo, Cromo, Níquel, Mercurio y Cobalto. La medición debe realizarse al producto final.
- e.** Presencia de Organismos patógenos: Esta valoración debe realizarse al producto final para comprobar que puede ser aplicado sin riesgo en procesos agrícolas. La presencia de organismos patógenos se presenta en el compost de mala calidad como consecuencia de una excesiva aireación lo que conduce a reducir la temperatura. Los microorganismos que indican la presencia de patógenos son las bacterias coliformes.
- f.** Contenido de Macronutrientes: Verificar el contenido de macronutrientes  $N_2$ ,  $P_2O_5$  y KOH al final del proceso, sobre todo cuando el destino final del producto es para uso agrícola. Se realiza un estudio bromatológico del producto, el cual nos brinda el contenido de nutrientes presentes en el compost.
- g.** Temperaturas en el proceso: Las mediciones de este variable se hace desde el inicio y durante el tiempo de compostaje especialmente al momento de los volteos o, por lo menos una vez por semana. La temperatura durante el proceso debería fluctuar entre 55° a 70° C durante el proceso.
- h.** Nitrógeno, Fósforo y Potasio Disponible: Se deben realizar mediciones en laboratorio de estos elementos, sobre todo si el producto está destinado como fertilizante en actividades de tipo agrícolas.



## **7.7.1 Indicadores Físicos de los compost**

### **Humedad**

El contenido de humedad es función de su naturaleza, del proceso y de las condiciones de almacenamiento. La humedad debe oscilar entre 35 - 45%, los compost con humedad por debajo de 35% pueden haber quedado inestables, y aquellos con menos del 30% de humedad se pulverizan y son de manejo desagradable (Torrento, 2011).

### **Densidad aparente**

La mayoría de los compost presentan una relación entre el peso del material y el volumen de 400 a 700 Kg por metro cúbico. La densidad se ve afectada por la humedad del producto, por el tamaño de partícula, el contenido en materia orgánica y su grado de descomposición. La densidad aumenta con el tiempo de compostaje (Moreno y Moral, 2008).

### **Granulometría y porosidad**

La granulometría o distribución porcentual del tamaño de las partículas es de utilidad para conocer el grado de descomposición del material y determinar sus posibles usos. Un nivel adecuado de porosidad se presenta cuando la textura del sustrato es media a gruesa, equivalente a una distribución de partícula entre 0,25 y 2,5 mm, lo que implica una retención suficiente de agua y un adecuado contenido de aire. La porosidad o el espacio poroso total es el volumen total del material no ocupado por partículas orgánicas. Un nivel adecuado de porosidad es el que está por encima del 80% (INTEC, 1999).

### **Olor**

Es una medida subjetiva pero a pesar de esto la presencia de olores desagradables puede indicar que el proceso está en fase inicial donde hay malos olores por la descomposición de ácidos orgánicos, o que ha sufrido procesos anaerobios que producen amoníaco y ácido sulfhídrico ocasionando los malos olores (Moreno y Moral, 2008).

### **Color**

El color está relacionado con el grado de descomposición de los materiales a compostar, el producto final tiene un color marrón oscuro, casi negro. El color final depende del material inicial, si es procedente de materiales verdes tiene un color negro oscuro, pero si procede de estiércoles son generalmente marrones (Moreno y Moral, 2008).

## 7.7.2 Indicadores Químicos de los compost

### pH

Considerado como indicador de la evolución del compostaje. Durante el proceso el pH desciende inicialmente como consecuencia de la formación de ácidos orgánicos, a medida que el proceso avanza el valor del pH aumenta hasta valores entre 6,5 y 8,5. El pH tiene influencia directa sobre la disposición de los nutrientes, y además influye en el valor de la capacidad de intercambio catiónico y la actividad biológica. Los valores adecuados de pH deben estar próximos a la neutralidad o ligeramente ácidos (Cruz, 2009).

### Conductividad eléctrica (CE) y elementos solubles

La conductividad eléctrica es un indicador de la presencia de sales solubles en el compost, los altos niveles de sales pueden repercutir sobre la germinación de semillas y en el desarrollo general del cultivo, dependiendo de la tolerancia de los cultivos y del tipo de suelo hacer fertilizado. Para el caso de sustratos para cultivos debe manejarse un nivel de salinidad bajo (Moreno y Moral, 2008).

### Contenido de carbono orgánico total y relación C/N

La concentración de carbono orgánico total es un indicador de su concentración en materia orgánica y por tanto un índice de calidad. La relación C/N se usa tradicionalmente como indicador de la madurez y estabilidad de la materia orgánica. Una mala relación repercute sobre la movilidad del nitrógeno y la baja disponibilidad de oxígeno (Torrentó, 2011).

### Capacidad de intercambio catiónico

El valor de la (CIC), se define como la suma de cationes que pueden ser absorbidos por unidad de peso del compost, refleja los cationes que están disponibles para las plantas y que no son lixiviados. Estas cargas variables dependen del pH, por ende cuando aumenta el pH aumenta la capacidad de intercambio catiónico. La CIC aumenta generalmente con el paso del proceso de compostaje, debido no solo a la acumulación de materiales de carga negativa, sino también por el aumento de grupos fenólicos y carboxílicos (Moreno y Moral, 2008).

### Nitrógeno total

El contenido total de N es función directa de los materiales a compostar, del proceso y de las condiciones de maduración y almacenaje. El N es esencial para la planta, y como es un elemento con un gran número de formas con impacto ambiental, es necesario conocer su contenido para poder realizar una correcta dosificación. Varias

de ellas son gaseosas y su emisión colabora al efecto invernadero y a la formación de lluvias ácidas. Otras especies son iones móviles que afectan directamente a la calidad del suelo. La forma y calidad del N presente en formas inorgánicas puede ser buenos indicadores de la madurez de un compost (Torrento, 2011).

### **Elementos tóxicos**

Son aquellos elementos químicos, metales y metaloides, que diversas actividades han incorporado al ambiente. Algunos son esenciales para diversas especies, pero también tóxicos cuando se hallan en concentraciones elevadas; otras siempre presentan toxicidad. La presencia de metales pesados en el compost es totalmente inerte a los residuos empleados para la elaboración. La mayoría de los contaminantes orgánicos intervienen en procesos bioquímicos y fisiológicos comunes a una serie de organismos. De esta manera se convierten en contaminantes de alto riesgo incluso a bajas temperaturas (Sztern, 2008).

Si un compost contiene metales pesados, aunque una buena parte no sea asimilable por la planta rápidamente, quedarán en el suelo acumulados y cuando varíen las condiciones (pH, presencia de sustancias complejantes, CIC,...) pueden pasar a disposición de las plantas o y contaminar los acuíferos. Estas sustancias, en elevadas concentraciones, pueden generar efectos perjudiciales en el desarrollo de las plantas, inhibiendo la germinación de semillas o el crecimiento de raíces por lo que es altamente riesgosa su utilización en cultivos. Por estos motivos se considera necesario conocer el contenido total de metales que puede determinarse a partir de la disolución ácida de las cenizas del compost o por digestión húmeda (medio ácido y oxidante) de la muestra (Torrento, 2011).

### **Pruebas biológicas**

Los efectos fitotóxicos de un material orgánico inmaduro se deben a diversos factores, entre los cuales destacan los contenidos de amonio, de ácidos volátiles orgánicos, de metales pesados y de sales. Es siempre aconsejable realizar pruebas biológicas, lo más sencillas posible, que den indicaciones más concretas del comportamiento en el suelo. Se pueden realizar distintos tipos de pruebas: pruebas de germinación, de crecimiento e incubaciones para comprobar estabilidad y mineralización de nutrientes (Torrento, 2011).

Las pruebas de germinación son las más utilizadas por su simplicidad, y además son relativamente fáciles de interpretar. Los bioensayos con semillas para determinar el

porcentaje de germinación y crecimiento radicular de los extractos de compost con relación a un testigo con agua destilada. Diversas metodologías han sido puestas a punto con este objetivo; entre ellas, la de mayor alcance corresponde a la determinación del índice de germinación utilizando extractos de compost propuesta por Zucconi et al. En 1981. Esta metodología de determinación del índice de germinación (IG), integrando el porcentaje relativo de germinación y el crecimiento relativo de raíces permite establecer tres niveles de fitotoxicidad: severa, moderada y baja o nula (Varnero et al., 2007).

### **7.7.3 Indicadores Biológicas del compost**

#### **Actividad microbiológica**

La determinación de la actividad microbiológica de los compost esta en relación con la calidad del mismo. En la actividad microbiana se distinguen procesos generales como: determinación de C y N de la biomasa microbiana, mineralización del nitrógeno, determinación del ATP, respiración del suelo, o actividades oxidorreductasas como deshidrogenasa y catalasa, otros procesos considerados específicos como: la actividad enzimática del tipo hidrolasas que corresponden a reacciones concretas y dependen de sustratos específicos. Su utilidad está en la calidad biológica y bioquímica de aquellos suelos donde se aplique el compost (Valderrama, 2013).

#### **Madurez y estabilidad**

Un compost maduro de calidad debería cumplir con todas las condiciones del término del proceso, en cuanto a sus características químicas, físicas y biológicas. La madurez del compostaje ha sido considerada como el factor más importante al momento de la utilización de agrícola, el grado de madurez se expresa como el estado de degradación, transformación y síntesis microbiana en que se encuentra el material compostado. La inmadurez del compost es la responsable de los efectos depresivos que se producen sobre las cosechas como la disminución de la concentración de oxígeno a nivel radicular; la inmovilización del nitrógeno, generando una competencia por este elemento entre los microorganismos y la planta; el también causa el aumento de la temperatura del suelo que disminuye el desarrollo vegetal. Madurez significa que los materiales que contienen nutrientes y energía se han combinado formando una masa orgánica estable. La calidad refleja madurez pero también refleja el contenido químico del sustrato de compost (Puerta, 2004).

La estabilidad del producto está determinada por el grado de descomposición de la materia orgánica. Es función directa del nivel de actividad microbiana y también por

el O<sub>2</sub> consumido, el CO<sub>2</sub> desprendido o el calor producido durante el proceso. La inestabilidad se presente cuando el producto contiene una elevada cantidad de materia orgánica fácilmente biodegradable, el compost estable permanecen frío al almacenarse (Torrento, 2011).

### 7.8 Parámetros para los productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo, según la norma técnica colombiana 5167 (NTC 5167)

Esta norma establece los requisitos que deben cumplir los productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y como enmiendas de suelo (Tabla 2).

**Requisitos generales:** Los productos deben presentarse en forma sólida como granulados, polvos o agregados o líquida como concentrados solubles, suspensiones o dispersiones. Todo producto cuyo origen sea materia orgánica fresca debe ser sometido a procesos de transformación que aseguren su estabilización agronómica tales como: compostaje o fermentación. Deberá declararse el origen (clase y procedencia) de las materias primas y los procesos de transformación empleados (Puerta, 2004).

**Requisitos específicos:** Los productos orgánicos empleados como fertilizantes o abonos y enmiendas del suelo, deben cumplir con los requisitos establecidos. Los parámetros físico-químicos del Producto sólido obtenido a partir de la estabilización de residuos de animales, vegetales o residuos sólidos urbanos (separados en la fuente) o mezcla de los anteriores, que contiene porcentajes mínimos de materia orgánica expresada como carbono orgánico oxidable total (Puerta, 2004).

**Tabla 2. Parámetros a caracterizar para producto sólido obtenido a partir de la estabilización de residuos de animales, vegetales o residuos sólidos urbanos (separados en la fuente) o mezcla de los anteriores. Fuente: NTC 5167 (2004).**

<b>Fertilizantes o abonos orgánicos.</b>	
<b>Parámetros a caracterizar</b>	<b>Parámetros a garantizar (en base húmeda)</b>
Pérdidas por volatilización %	Contenido de carbono orgánico oxidable total (%C)
Contenido de cenizas máximo 60%	Humedad máxima (%)
Contenido de humedad:	

materiales origen animal, máximo 20% materiales origen vegetal, máximo 35%  Contenido de carbono orgánico oxidable total mínimo 15%.  N1P2O5 Y K2O totales (declararlos si cada uno es mayor de 1%) Relación C/N  Capacidad de intercambio catiónico, mínimo 30 cmol(+) Kg (meq/100g)  Capacidad de retención de humedad, mínimo su propio peso.  pH mayor de 4 y menor de 9  Densidad máximo 0,6 g/cm3	Contenido de Cenizas (%)  Capacidad de intercambio catiónico (cmol(+)Kg-1) (meq/100g)  Capacidad de Retención de Humedad (%) pH  Contenido de Nitrógeno Total (%N)  Densidad (g/cm3)
---	--

Tabla 3. Límites máximos en mg/Kg (ppm) de los metales pesados. Fuente: NTC 5167 (2004).

Límites máximos de metales pesados	mg/Kg (ppm)
Arsénico (As)	41
Cadmio (Cd)	39
Cromo (Cr)	1 200
Mercurio (Hg)	17
Níquel (Ni)	420
Plomo (Pb)	300

Tabla 4. Límites máximos permitidos para macro contaminantes presentes en productos sólidos. Fuente: NTC 5167 (2004).

Macro contaminantes	Límite (% en ms)
Plástico, metal, caucho > 2mm	< 0,2
Vidrio > 2mm	< 0,02
Piedras > 5mm	< 2
Vidrio > 16mm detección (si/no) no	no

#### Niveles máximos de patógenos

Los fertilizantes y acondicionadores orgánicos, deberán acreditar demostrar que no superan los siguientes niveles máximos de microorganismos patógenos:

- Salmonella sp: ausente en 25 g de producto final
- Enterobacterias totales: menos de 1000 UFC/g de producto final

Además si alguna de las materias primas es de origen vegetal, deberán estar exentos de fitopatógenos de los géneros: *Fusarium spp*; *Botrytis sp*; *Rhizoctonia sp*; *Phytophthora sp*. Y de *nemátodos fitopatógenos*. De igual manera deberá garantizar la sanidad del material, en relación con fitopatógenos específicos que pudieren estar presentes por el origen de las materias primas; por ejemplo: Los subproductos de rechazo de la industria bananera deben estar libres de *Pseudomonas solanacearum* Cepa II y *Micosphaerella fijiensis* (Puerta, 2004).

Carga microbiana: Si el producto presenta contenidos de microorganismos benéficos, debe declararse el recuento de microorganismos mesófilos aerobios, mohos y levaduras (Puerta, 2004).

### **7.9 Efecto de la aplicación del compost sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo**

El compost orgánico brinda beneficios ya que es un acondicionador de suelos con características húmicas, libre de patógenos y malezas, que no atrae insectos ni vectores, el cual puede ser manejado y almacenado sin riesgo y benéfico al crecimiento de las plantas. Se han identificado tres funciones fundamentales del compost al aplicarse en suelos. Primera el compost puede servir como fuente de materia orgánica para mantener o ayudar a la formación del humus del suelo. Segunda el compost puede mejorar el crecimiento de cultivos en la agricultura comercial y usos domésticos. Además, reduce los patógenos que atacan a las plantas y aumentan la resistencia a las enfermedades, y tercero el compost contiene valores apreciables de nutrientes como Nitrógeno, Fósforo y una variedad de elementos traza esenciales (Valderrama, 2013).

El suelo es la parte más superficial de la corteza terrestre, en donde los reinos vegetal y animal establecen una relación con el reino mineral. Los residuos de animales y vegetales vuelven al suelo, constituyendo su materia orgánica, que se descompone por la acción de microorganismos en un proceso continuo de humidificación y mineralización. La unión de partículas minerales y organismos resultantes de los procesos de alternación y disgregación de los materiales originales y de transformación de la materia orgánica, da lugar a una organización estructural jerarquizada de las partículas individuales en agregados en la cual las características físicas del suelo son modificadas (Cruz, 2009).

### **7.9.1 Efectos físicos**

La adición de enmiendas orgánicas puede considerarse como una buena práctica de manejo para el mantenimiento o recuperación de la fertilidad del suelo, algunos de estos beneficios son:

#### **Efectos sobre la compactación del suelo**

La compactación es un proceso de degradación de la estructura del suelo, que está ligada al manejo del suelo. La capacidad de soportar cargas estáticas o dinámicas, está relacionado con la estructura del suelo, la textura, la mineralización, de su contenido en materia orgánica, del volumen de agua almacenado y de su velocidad de drenaje. Debe considerarse a la erosión de las precipitaciones un causante de la compactación del suelo. La materia orgánica se considera como un regulador de la elasticidad de los suelos a través de su efecto amortiguador de cargas y de su acción estabilizante de la estructura del suelo. La densidad aparente del suelo es un parámetro físico que sirve para evaluar el grado de compactación de un suelo, ya que mide la masa de partículas por unidad de volumen. La adición de enmiendas orgánicas en el suelo reduce la densidad aparente del suelo y mejora la porosidad. En cuanto a la distribución por tamaños de los poros, la adición continua da lugar a un incremento de la macroporosidad de los suelos (Román et al., 2013).

#### **Efectos sobre la estabilidad de los agregados del suelo**

El efecto sobre la estabilidad depende del método de incorporación y de la dinámica de descomposición, ya que lo condiciona el perfil del suelo y la mayor o menor asociación con las partículas minerales del suelo. Los cambios en la estabilidad de los agregados del suelo gracias a la adición de enmienda orgánica son: los cambios en los contenidos de materia orgánica particulada, en los polisacáridos y en los lípidos, que son materiales lábiles y de actividad transitoria. La descomposición de los materiales orgánicos añadidos al suelo en condiciones de alta temperatura y bajo contenidos de agua en el suelo, puede producirse un incremento del contenido compuestos alifáticos de cadena larga asociados a grasas y lípidos, que al originar cambios físicos y biológicos debido a la hidrofobicidad de estos productos al unirse a metales polivalentes, contribuirán a un aumento relativo de la estabilidad (Torrento, 2011).



## **Efectos sobre la retención y almacenamiento de agua del suelo**

La adición de enmiendas orgánicas provoca un aumento tanto de la capacidad de retención como del tiempo que el agua infiltrada en el suelo se mantiene en niveles útiles para el consumo de las plantas. Estos cambios están sujetos a la manera como los agregados del suelo conforman una estructura con un reparto equilibrado de sus poros entre macro, meso y microporos y a como dichos cambios se mantienen estables frente a los procesos de degradación. Debido a los cambios estructurales provocados a largo plazo por la adición de enmiendas, se obtiene una nueva distribución de la porosidad, con poros más largos y de mayor diámetro, con o sin interconexión que ocasiona un aumento de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (Moreno y Moral, 2008).

## **Efectos sobre la infiltración, escorrentía y erosión hídrica del suelo**

Las acciones para atenuar la escorrentía superficial deben dirigirse a control los parámetros que influyen sobre sus mecanismos de generación, estos son:

- El sellamiento de la superficie del suelo.
- El almacenamiento de agua en el suelo.
- La capacidad de retención del agua en el suelo.

La aplicación de abonos orgánicos sobre la superficie del suelo ejerce un efecto de acolchonamiento que hará que disminuyan tanto los efectos de sellamiento del suelo debido al impacto de las gotas de lluvia, como las pérdidas de agua por evaporación directa desde la superficie, y de almacenamiento del agua en el suelo (Cruz, 2009).

### **7.9.2 Efectos químicos**

Con la utilización del suelo como fuente de alimentos, se ha reconocido la importancia de la materia orgánica como factor crucial en la productividad y en la fertilidad natural del suelo con el paso el tiempo este uso intenso del suelo, se produce una alteración de los ciclos biogeoquímicos naturales vegetación- suelo, que incide en la no restitución de una gran parte de la biomasa producida. Otro efecto importante es el impacto de las labores culturales, que al aumentar la aireación y la actividad biológica, aumentan la tasa de mineralización de los compuestos orgánicos del suelo (Cruz, 2009).

### **Efectos sobre la capacidad de intercambio catiónico**

Los coloides electronegativos del suelo, así formados, retiene alrededor de sus moléculas una cantidad variable de cationes que estarán más fuertemente adheridos al complejo cuanto más cerca estén de él. Entre la superficie del complejo y las soluciones del suelo se establece un equilibrio dinámico en el que continuamente se producen intercambios iónicos. La CIC depende de la cantidad y calidad de la materia orgánica y también de la cantidad y tipo de arcillas, la mayor capacidad de intercambio corresponde a los montmorillonitas, las ilitas son intermedias y las caolinitas son las de menor capacidad, en algunos casos se puede presentar capacidad de intercambio amónico (Cruz, 2009).

### **Efectos sobre la regulación del pH y la retención de iones**

El valor pH o potencial hidrogeno nos informa sobre la proporción relativa de iones hidrogeno y de iones hidróxidos en la solución del suelo. En general los compost maduros tienden a estabilizarse en valores de pH neutros o ligeramente básicos. En los suelos ácidos los compost actúan elevando el pH por lo que, además de mejorar las condiciones microbiológicas, mejoran las condiciones de disponibilidad de nutrientes. En los suelos neutros o básicos, la adición de compost maduros no provoca cambios apreciables de pH aunque contribuye a la mejora del poder amortiguador del suelo (Cruz, 2009).

### **Efectos sobre la nutrición nitrogenada, fosfórica, potásica, cálcica y magnésica**

La utilización de residuos orgánicos aporta una ventaja por su comportamiento como fuente de nitrógeno de liberación lenta. Este tipo de fertilizante nitrogenado y la disminución de la velocidad de los procesos de nitrificación han recibido mucha atención por sus ventajas en cuanto a proporcionar un suministro regulado de nitrógeno y su potencial en la reducción de la contaminación nitrogenada. El fosforo de los residuos orgánicos se encuentra fundamentalmente en formas de ácidos nucleicos, fosfolípidos y fitina. Las adiciones de abono no solo pueden aumentar los niveles de fosforo en el suelo por acción directa, sino que también pueden mejorar la capacidad de absorción y disponibilidad del fosforo del suelo. El potasio es un elemento muy móvil en el suelo, por lo que es fácilmente lixiviado y su porcentaje disponible es muy reducido. Los niveles de calcio y magnesio suelen ser suficientes para cubrir las necesidades de las plantas en la mayoría de los suelos neutros o básicos. Los aportes provenientes del compost pueden favorecer significativamente la nutrición cálcica y magnésica de los cultivos. Un efecto indirecto de la adición de

micronutrientes es el aumento total de la masa de microorganismos y de la actividad enzimática, aportando por tanto una mejora de la fertilidad del suelo (Román et al., 2013).

### **7.9.3 Efectos biológicos**

La actividad biológica del suelo, y de forma más concreta la microbiana, juega un papel clave tanto en la estabilidad como en la fertilidad del sistema edáfico, dado que interviene en los procesos de estructuración y es protagonista principal de los ciclos biológicos (Cruz, 2009).

#### **Efectos sobre la comunidad microbiana**

La aplicación de compost al suelo modifica las propiedades físico-químicas como las nutricionales, lo que afecta los niveles poblacionales microbianos. Los factores a través de los cuales el compost ejerce ese efecto estimulante sobre la población microbiana del suelo. La presencia de materia orgánica estabilizada contribuye a mejorar las características estructurales del suelo, incrementando de este modo su disponibilidad para actuar como hábitat idóneo para la microbiota edáfica. La influencia del compost sobre la población microbiana no se limita a aspectos cuantitativos. La estructura de dicha comunidad se ve igualmente afectada por el tratamiento con este tipo de enmiendas, dado que factores determinantes en la evolución poblacional de los distintos grupos microbianos que colonizan este hábitat, tanto de carácter nutricional como físico-químico, son modificados como consecuencia de las propiedades específicas del compost adicionado (Cruz, 2009).

## 8. MATERIALES Y MÉTODOS

### 8.1 Área de estudio

Para la realización del proyecto se utilizaron residuos agropecuarios del municipio de Fusagasugá, se tuvieron en cuenta los cultivos más representativos del municipio y los principales sistemas de producción animal, levantando esta información de los registros encontrados en el Plan de desarrollo municipal 2012–2015 (2012) de la Oficina de planeación de la Alcaldía de Fusagasugá.

Se establecieron microcomposteras para hacer un seguimiento de las variables fisicoquímicas en un ambiente controlado durante todo el proceso de descomposición del material orgánico en el invernadero del Centro de Investigaciones La Esperanza (CIE), ubicado en la vereda Guavio Bajo del municipio de Fusagasugá (figura 2), con una altitud de 1550 msnm, una temperatura aproximada de 20°C, precipitación de 1200 mm/año y una humedad relativa del 81%. Este trabajo se realizó durante el primer semestre del 2014.

El Municipio de Fusagasugá está ubicado en la región de Sumapaz, en el Departamento de Cundinamarca, vertiente suroccidental de la Cordillera Oriental y es la cabecera provincial.

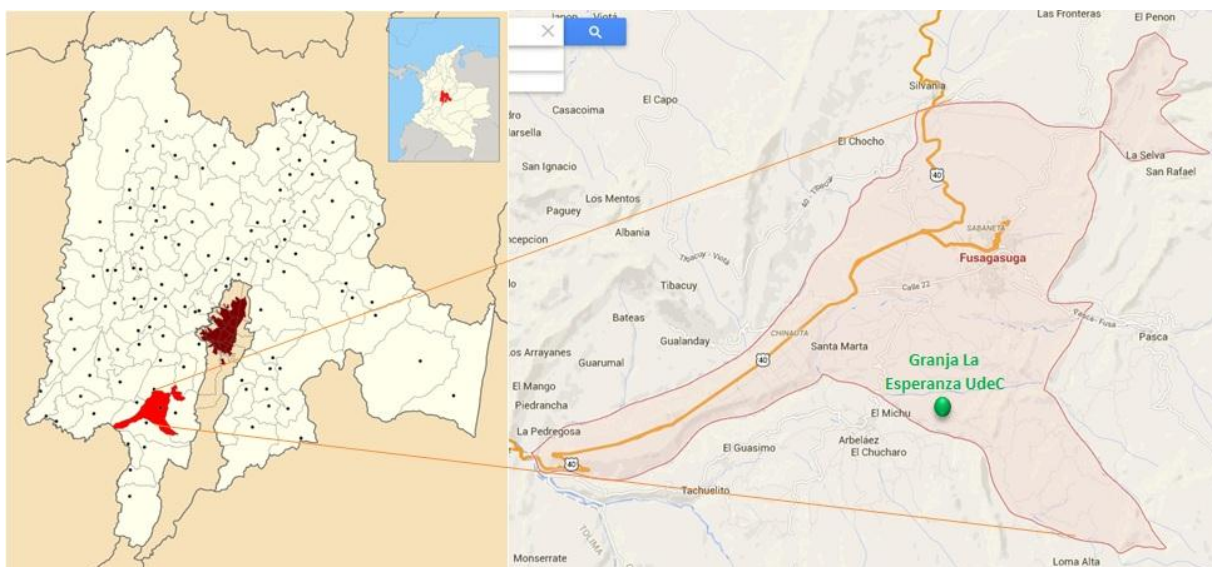


Figura 2. Localización de la zona de estudio en el municipio de Fusagasugá (Izquierda). Ubicación de la granja la Esperanza (Derecha, punto verde).

## 8.2 Fase de campo

Antes de iniciar el acopio de los diferentes tipos de residuos a utilizar se realizó una adecuación del sitio en el invernadero de la granja La Esperanza, allí se dispuso de un lugar en el cual se construyeron tres estructuras de madera de aproximadamente siete metros de largo por un metro de ancho, cada una de las cuales se dividió en seis partes correspondiente a cada una de las mezclas como se observa en la figura 3, a estas estructuras se les colocó un plástico en la parte superior y se instalaron con una leve inclinación, esto con el fin de recolectar el exceso de humedad que se filtra a través de los residuos sólidos (lixiviados).



Figura 3. Figura 3. Elaboración de estructura (Fuente: Autores, 2014).

### 8.2.1 Recolección de materia prima

Posteriormente se obtuvo la mayor parte del material orgánico de la zona aledaña a la granja La Esperanza, teniendo en cuenta los principales productos agropecuarios de la región. De las hortalizas se recolectó residuos de la cosecha de tomate (*Lycopersicon esculentum*) tallos, hojas y fruto residual; en cuanto a las frutas se utilizó naranja (fruto y hojarasca de la misma planta) debido a la facilidad de adquisición de esta; la cacota o pulpa de café (figura 4A); la gallinaza y la porquinaza se recolectaron de granjas cercanas; la bovinaza se recogió en la granja de la Universidad directamente de los potreros en los cuales se encontraban los bovinos en pastoreo (Figura 4B); otros residuos utilizados fueron el compost de una casa (cascaras de huevo, plátano, hortalizas), y el pasto estrella producto de una poda (Figura 4C).



Figura 4. Recolección de materia prima. A: Cacota o pulpa de café, B: Bovinasas, C: Pasto estrella. (Fuente: Autores, 2014).

### 8.2.2 Adecuación de materia prima e insumos

Una vez dispuesto el material este se revisó para evitar la presencia de residuos extraños o material no deseado como piedras o plásticos. A los diferentes sustratos se les realizó una disminución del tamaño de partícula con un machete como se observa en la figura 5A, para aumentar la superficie de contacto de estas, facilitando la actividad de los microorganismos en el proceso de descomposición, y reducir el tiempo de maduración del abono. El tamaño ideal de las partículas varía según el criterio de cada autor, estando en un promedio de 2 a 5 cm aproximadamente para garantizar su homogeneidad y un proceso adecuado de compostaje; posteriormente se procedió a preparar las diferentes mezclas teniendo en cuenta la relación C/N de cada uno de los materiales a compostar (Figura 5B y 5C).



Figura 5. Reducción del tamaño de los sustratos y preparación de las mezclas. A: Disminución del tamaño de partícula de los sustratos, B: Preparación de las mezclas, C: Empaque de las mezclas. (Fuente: Autores, 2014).

El experimento se realizó empleando un diseño en bloques completamente al azar con 3 repeticiones. Se evaluaron seis tratamientos (Tabla 5), considerando que la relación ideal de C/N para comenzar el compostaje es de 25:1 a 30:1, se debe mezclar materiales ricos en nitrógeno, con otros materiales ricos en carbono. Estos valores se encuentran en tablas (Ver anexo 1) donde se indica los valores de C/N de los materiales más comúnmente usados y se realiza la estimación.

**Tabla 5. Materiales utilizados para elaborar cada una de las mezclas. (Fuente: Autores, 2014).**

<b>TRATAMIENTO</b>	<b>RESIDUOS UTILIZADOS</b>
M1	Bovinaza + Plantas de tomate (tallos, hojas y tomate residual) + Compost de casa (cascaras de huevo, plátano y residuos de hortalizas)
M2	Gallinaza + Cacota + Plantas de tomate
M3	Porquinaza + Pasto estrella + Cítricos (naranja y hojarasca de la misma planta)
M4	Gallinaza + Porquinaza + Compost de casa + Cacota
M5	Bovinaza + Gallinaza + Cítricos
M6	Porquinaza + Bovinaza + Pasto estrella + Plantas de tomate

### **8.2.3 Preparación del abono**

Posteriormente se realizó la mezcla de los materiales por medio de un volteo y se adiciono melaza diluida, la cual se utiliza como fuente energética de los microorganismos con el fin de favorecer la multiplicación y la actividad microbiológica (Restrepo, 2001); además de ser necesario se aplicó agua a cada mezcla hasta obtener una humedad adecuada del 45% al 60 % aproximadamente. Si la humedad está por debajo de 45%, disminuye la actividad microbiana, sin dar tiempo a que se completen todas las fases de degradación, causando que el producto obtenido sea biológicamente inestable. Si la humedad es demasiado alta (>60%) el agua saturará los poros e interferirá la oxigenación del material (Román et al, 2013). Con cada una de estas mezclas se elaboraron microcomposteras en lonas de 0.80 x 1.20m, las

cuales se llenaron con aproximadamente 45 kg del material orgánico y fueron ubicadas aleatoriamente en los 18 compartimientos de la estructura de madera. A cada una de la microcomposteras se les dispuso un tubo de PVC de 90 cm de largo los cuales estaban perforados y fueron ubicados en el centro del material hasta la base de la lona, para mantener una adecuada aireación dentro de la mezcla (Figura 6).



**Figura 6. Tubos utilizados para la aireación de las mezclas y disposición final de las microcomposteras (Fuente: Autores, 2014).**

#### **8.2.4 Seguimiento y control**

Se realizó seguimiento cada tercer día (desde día inicial 1 hasta el día final 75) de las variables temperatura, pH y humedad, para cada mezcla. También se realizó un volteo cada tres días para asegurar una adecuada oxigenación de las muestras. Como se observa en la figura 7 cada una de las mezclas se disponía sobre un plástico en el suelo y con la ayuda de una pala se procedía a realizar el volteo del material.





Figura 7. Realización del volteo de las mezclas (Fuente: Autores, 2014).

### 8.2.5 Medición de variables físicas

La medición de las variables temperatura y pH se realizó cada tres días desde el día uno del tratamiento. Para esto se utilizó un pHmetro digital (Hanna HI 99121) de toma directa en suelo, como se observa en la figura 8. Estos datos se recopilaron en hojas de registro para su posterior análisis.



Figura 8. Toma de medición de variables físicas (Temperatura y pH). (Fuente: Autores, 2014)

Para el control del contenido de humedad, se aplicó el procedimiento empírico propuesto por Sztern (2008). Este consiste en lo siguiente: se toma con la mano una muestra de material, luego se cierra la mano y se aprieta fuertemente el mismo. Si con esta operación se verifica que sale un hilo de agua continuo del material, entonces se establece que el material contiene más de un 60% de humedad. Si el

material no gotea y cuando se abre el puño de la mano permanece moldeado, se estima que la humedad es aproximadamente de un 50% que es la humedad ideal para las mezclas. Finalmente si al abrir el puño el material se disgrega, se asume que el material contiene una humedad inferior al 30 %. Aunque este no es un método exacto ya que está influenciado por la interpretación de quien realice la prueba, dada la sencillez del mismo puede ser utilizado por cualquier persona para estimar el contenido de humedad sin necesidad de recurrir a un laboratorio.

### **8.3 Fase de Laboratorio:**

#### **8.3.1 Toma de muestras de microcomposteras**

Se tomaron muestras de las 6 mezclas a los: 1, 15, 30, 45, 60 y 75 días para su respectivo análisis microbiológico, estas se recogieron de manera aleatoria tomando una cantidad de 500 g, con guante protector, tratando de incorporar material del interior de la microcompostera. Para el transporte y conservación de las mismas, se depositaron en bolsas de autosellado, y se almacenaron en nevera a 4°C (Kirk, 2004), hasta su posterior análisis en el Laboratorio de Microbiología de la Universidad de Cundinamarca.

#### **8.3.2 Medición de variables Microbiológicas**

Para la determinar la poblaciones total de microorganismos a los días 1, 15, 30, 45, 60 y 75 días del proceso de compostaje, se realizaron muestreos para determinar las variables microbiológicas de: UFC/ml (Unidades Formadoras de Colonia) de bacterias y hongos; este procedimiento se desarrolló en el Laboratorio de Microbiología de la Universidad de Cundinamarca, teniendo en cuenta la Norma Técnica Colombiana (NTC 4491-2) sobre procedimientos microbiológicos. La toma de datos cada 15 días obedece a la relación microbiológica con las fases que presenta el proceso de compostaje así como la limitante en la asignación de recursos de este trabajo. Las UFC/ml de actinomicetos se determinaron dentro de las poblaciones totales de bacterias, para estos microorganismos solo se realizó la caracterización microbiológica mediante la tinción de Gram y la utilización del kit BBL Crystal.

#### **8.3.3 Esterilización**

Todos los materiales a utilizar en los diferentes procedimientos llevados a cabo en el laboratorio (cajas de Petri, Erlenmeyer, pipetas, tubos de ensayo, medios de cultivo)

se esterilizaron en autoclave durante 20 minutos a 121° C, también los medios de cultivo preparados en Erlenmeyer tapados con papel aluminio.

### **8.3.4 Preparación de Medios de Cultivo**

- Bacterias totales

Para realizar el conteo bacteriano se utilizó el medio Agar Agar AA OXOID.

-Hongos totales

Para el conteo de hongos se utilizó el medio Agar papa PDA (Potato Dextrosa Agar).

### **8.3.5 Servido y almacenamiento**

Los medios de cultivo se sirvieron en cajas de petri. Este procedimiento se realizó en condiciones totalmente estériles, mediante el uso de una cámara de flujo laminar (LABOTEC modelo 403) y mechero de gas encendido al que se aproxima el recipiente con el medio, mientras que con la otra mano se acerca la caja de Petri, se abre al lado de la llama y se vierte en ella un poco de medio, cerrándose inmediatamente (Figura 9). Este proceso se repite hasta terminar el medio preparado. Los medios servidos se dejaron enfriar y las cajas se voltean para ser almacenadas, esto con el fin de evitar que el agua de condensación que se pueda producir no altere el medio.



**Figura 9. Procedimiento para servir los medios de cultivo. (Fuente: Autores, 2014).**

### 8.3.6 Preparación de diluciones

#### - Agua peptonada

El agua peptonada es utilizada en la preparación de diluciones de microorganismos en grandes cantidades para conteo de viabilidad.

Su preparación fue la siguiente:

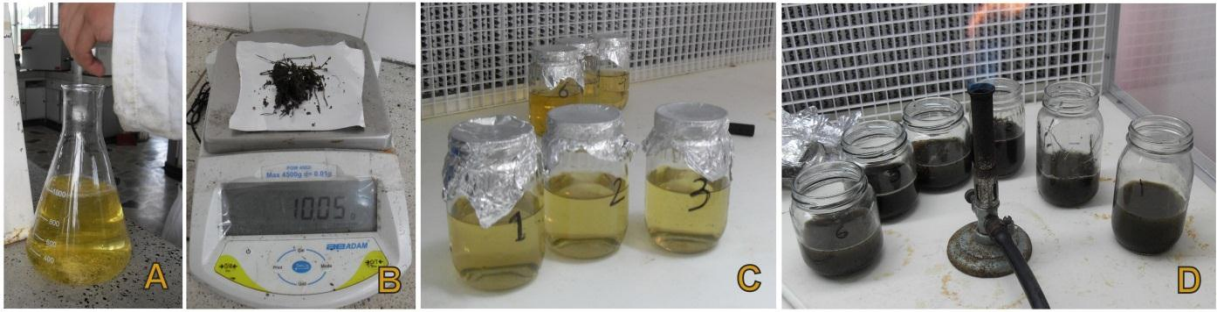
- Se pesó la cantidad del ingrediente de la preparación de agua peptonada necesaria para el volumen requerido (para 1L se pesa un 1g del ingrediente).
- Se disolvieron los componentes y se agitó hasta disolver la solución.
- Luego se esterilizó a 121° C por 15 minutos en autoclave.
- En los tubos de ensayo esterilizados se agregó agua destilada en el volumen requerido (9ml) para muestras de 1 ml (dilución 10<sup>-1</sup>).
- Se esterilizaron nuevamente los tubos preparados para evitar su contaminación.

### 8.3.7 Diluciones seriadas

Para todos los tratamientos (M1, M2, M3, M4, M5 y M6), previamente refrigerados se tomaron 10g de muestra utilizando una báscula digital.

Estas muestras se diluyeron en frascos que contenían 90ml de agua peptonada al 1.0%, agitando constantemente por 15 minutos y dejando en reposo 5 minutos (Figura 10). De esta dilución se tomó una alícuota de 1ml y se diluyó en 9ml de agua peptonada para obtener la dilución 10<sup>-2</sup>. Este procedimiento se repitió consecutivamente hasta obtener la dilución 10<sup>-8</sup>. De esta manera se espera que los primeros tubos tengan la mayor concentración bacteriana y que en los últimos tienda a cero.

Esta fase se realizó en condiciones totalmente estériles, mediante el uso de cámara de flujo laminar con un mechero encendido al que se aproxima los tubos de ensayo, utilizando una micropipeta de 1000µl. (NTC 4491-2,2004).



**Figura 10. Proceso para la preparación de diluciones. A: Preparación del agua peptonada al 1.0%, B: Pesaje de muestras (10g), C: Frascos con 90ml de agua peptonada para diluir muestras, D: Muestras diluidas. (Fuente: Autores, 2014).**

### 8.3.8 Siembra

Las siembras se hicieron por triplicado para cada dilución, de estas se escogieron solamente tres diluciones ( $10^{-4}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-6}$ ) para realizar el recuento de UFC/ml con base en lo reportado por Escobar et al., (2012), y a que estas diluciones fueron las que presentaron mejores resultados en la primera siembra.

- Una vez se realizaron las diluciones se continuó con la siembra en los medios de cultivo ya preparados, para cada tratamiento se alistaron 18 cajas de petri, divididas en: 9 cajas para PDA y 9 para AA. Se sembró un total de 108 cajas correspondientes a un muestreo.
- Trabajando en la cámara de flujo laminar, se procedió a sembrar 0.1ml a superficie del inóculo de las diluciones correspondientes en cada medio, se utilizó una micropipeta de 100 $\mu$ l, la muestra se extendió por toda la caja para lograr obtener colonias aisladas (Figura 11).
- Finalizada la siembra, se procedió a incubar las muestras. Para bacterias, se incubo a 30° C de 24 a 48 horas y para hongos a 25° C de 48 a 72 horas.

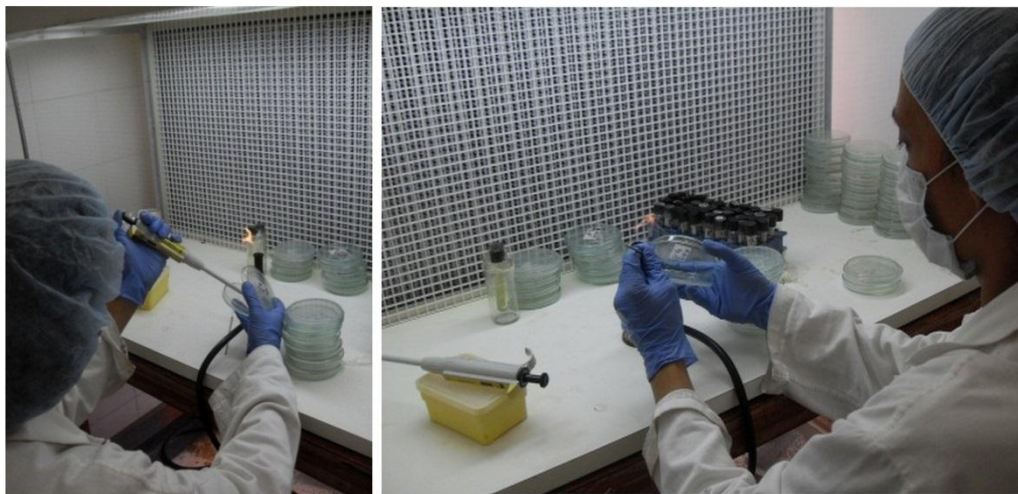


Figura 11. Siembra de muestras (Fuente: Autores, 2014).

### 8.3.9 Lectura de cajas

La lectura de las UFC/ml, consistió en contar las colonias que crecieron sobre el medio (Figura 12), teniendo en cuenta las cajas que contenían entre 30 y 300 colonias. Las cajas en las que se presentó sobrecrecimiento se descartaron y se realizó de nuevo el procedimiento.



Figura 12. Conteo de UFC/ml de los tratamientos evaluados. (Fuente: Autores, 2014).

## 8.4 Caracterización Microbiológica

### 8.4.1 Bacterias

#### Macroscopia

Para la identificación de bacterias se realizó una caracterización macroscópica con base en: tamaño de las colonias (puntiforme, pequeñas, medianas, grandes), color, forma (regulares, redondas, ovaladas, irregulares, filamentosas, rizoides), elevación de las colonias (plana, elevada, convexa monticular), bordes (entero, ondulado, aserrado, filamentosos y rizado), superficie, olor (amoniacal, fétido, dulzón), crecimiento (abundante, moderado, escaso) (Murray, 1999).

#### Microscopia

La identificación microscópica se llevó a cabo en el laboratorio de microbiología de la Universidad del Tolima. El método utilizado es el siguiente:

Inicialmente se realizó la tinción gram (Madigan et al., 2000).

Una vez realizada la tinción se utilizó el kit BBL Crystal (Marca B. D. Diagnostic Systems Europe), uno para Bacilos gram (-) que pertenecen a la familia *Enterobacteriaceae*, así como los más frecuentes aislamientos de bacilos gram (-) no fermentadores de glucosa y otro kit para organismos gram (+) (cocos y bacilos). El sistema BBL Crystal es un método miniaturizado de identificación. La tapa contiene 29 substratos deshidratados y un control fluorescente en las puntas de las púas de plástico. La base tiene 30 pocillos para las reacciones. El inóculo de la prueba se prepara con el fluido de inóculo y se utiliza para llenar los 30 pocillos en la base. Cuando la tapa se alinea con la base, y luego se cierra, el inóculo de la prueba rehidrata los substratos secos e inicia las reacciones de las pruebas. Después de un período de incubación, se examinan los pocillos para determinar cambios de color o presencia de fluorescencia que resultan de las actividades metabólicas de los microorganismos. La serie de colores resultante de las 29 reacciones se convierte en un número de perfil de diez dígitos que se utiliza como la base de identificación. Esta se deriva de un análisis comparativo entre las series de reacciones del aislado de la prueba y las de la base de datos de grupos taxonómicos (Winkler, 2014)

Muchos de los análisis utilizados son modificaciones de los métodos clásicos. Estos incluyen test para la fermentación, oxidación, degradación e hidrólisis de diversos sustratos. Además, contienen sustratos unidos a un cromógeno para detectar las enzimas que utilizan los microbios para metabolizar distintos sustratos (MacFaddin, 2000).

### 8.4.2 Hongos

Para la identificación del género de los hongos presentes en cada mezcla se utilizaron claves taxonómicas, para esto se tuvo en cuenta las características macro y microscópicas, es así como se examinó los aislamientos de cada una de las cepas y se contrastaron con la literatura.

#### Macroscopía

En este paso se utilizaron las mismas pautas de lectura y descripción de colonias bacterianas como se observa en la figura 13 (formas de las colonias, color, etc.).

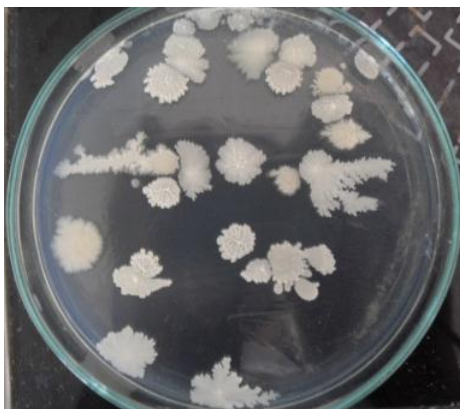


Figura 13. Identificación de colonias de bacterias. (Fuente: Autores, 2014).

#### Microscopía

Para la observación microscópica se utilizó la técnica de cinta pegante. Esta técnica es una de las más usadas, debido a que conserva la yuxtaposición original de las esporas y segmentos de hifas (Koneman, 2001). Para su realización se hace un doblez de una tira de 4cm, con el lado adhesivo hacia afuera y se sostiene con pinzas. El lado adhesivo se presiona firmemente contra la superficie de la colonia del hongo. El micelio aéreo se une a la superficie adhesiva por lo cual es fácilmente separado de la colonia. La tira de cinta con la muestra se colocará en una gota de azul de lactofenol con un portaobjeto y se procede con las observaciones.



## 8.5 Determinación de indicadores químicos

A los 75 días del proceso de compostaje, se tomaron muestras de los tratamientos M1, M2, M3, M4, M5 y M6 de distintas partes de la microcompostera para lograr un volumen final de (1 Kg/Mezcla), para evaluar la calidad de cada mezcla mediante la determinación de indicadores químicos (Tabla 6); estas muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos de la Universidad del Tolima.

Tabla 6. Indicadores químicos para evaluar calidad del compostaje. (Fuente: Autores, 2014).

PARAMETRO	UNIDADES	MÉTODOS
pH		Potenciométrico
C.I.C	Meq. 100g	NH <sub>4</sub> OAc-pH7
Materia Org.	%	Walkley-Black
Carbono Org	%	Walkley-Black
Nitrógeno	%	Kjeldahl
Potasio	%	Absorción Atómica
Sodio	Mg/Kg	Absorción Atómica
Calcio	%	Absorción Atómica
Magnesio	%	Absorción Atómica
Fósforo	%	Espectrofotométrico
Cobre	Mg/Kg	Absorción Atómica
Zinc	Mg/Kg	Absorción Atómica
Hierro	Mg/Kg	Absorción Atómica
Manganeso	Mg/Kg	Absorción Atómica
Boro	Mg/Kg	Espectrofotométrico
Azufre	%	Espectrofotométrico

## 8.6 Bioensayo de Germinación

Se evaluó el efecto del compostaje sobre la germinación de semillas en dos especies de plantas con potencial forrajeros, para este caso se utilizó una gramínea Pasto Braquiaria (*Brachiaria decumbens*) y una leguminosa Alfalfa (*Medicago sativa*). Se realizó un diseño experimental en bloques completamente al azar con 3 repeticiones para cada mezcla bajo condiciones controladas en el laboratorio de la Universidad de Cundinamarca, con el fin de evaluar el grado de fitotoxicidad de cada una de las mezclas.

Se tomaron 100 g de muestra de cada una de las mezclas al día 75 de compostaje. Cada muestra fue pesada y luego macerada en un mortero esterilizado. Se prepararon los extractos en una proporción de 1:5 (muestra: agua destilada). Posteriormente se filtró cada extracto y se adiciono 10 ml de este en cajas de Petri, en cada caja se colocaron 10 semillas sobre papel filtro (Figura 14).



**Figura 14. Preparación de extractos y siembra de semillas para el bioensayo de germinación. A: Maceración muestras, B: Filtración extractos, C: Semillas en extracto, D: Semillas en agua destilada. (Fuente: Autores, 2014).**

Se utilizaron 6 cajas de Petri (1 para cada mezcla), más una caja testigo que contenía solo agua destilada. Se hicieron 3 réplicas para un total de 21 cajas de Petri para el Pasto Braquiaria y de igual forma para la Alfalfa. Se llevaron a la cámara de germinación por espacio de 5 días a una temperatura de 25° C.

Luego se determinó el Índice de Germinación (IG), que combina Germinación Relativa (PGR) y Crecimiento de Radícula Relativo (CRR), para cada una de las

mezclas comparadas con un tratamiento control (agua destilada), según metodología propuesta por Zucconi et al., (1981), en la cual resultados con valores del IG inferiores al 50% indican una alta fitotoxicidad del material; IG entre 50% y 80% indican fitotoxicidad moderada, mientras que cuando los valores son superiores al 80% se considera que el material no presenta fitotoxicidad. Cuando el IG supere el valor el 100%, el compost se considera como fitonutriente o fitoestimulante.

$$PGR = \frac{N^{\circ} \text{ de Semillas Germinadas en el Extracto}}{N^{\circ} \text{ de Semillas Germinadas en el Testigo}} \times 100$$

$$CRR = \frac{\text{Enlongación de Radículas en el Extracto}}{\text{Enlongación de Radículas en el Testigo}} \times 100$$

$$IG = \frac{PGR \times CRR}{100}$$

También, se determinaron los índices del porcentaje de germinación residual normalizado (IGN) y de elongación radical residual normalizado (IER), de acuerdo con Bagur et al., (2011):

$$IGN = \frac{Germ_x \times Germ_{Testigo}}{Germ_{Testigo}}$$

Donde  $Germ_x$  es el porcentaje promedio de semillas germinadas en el agua de cada sitio de estudio y  $Germ_{Testigo}$  es el porcentaje de semillas germinadas en el testigo.

$$IER = \frac{Elong_x \times Elong_{Testigo}}{Elong_{Testigo}}$$

Donde  $Elong_x$  es la longitud promedio de la radícula de las semillas germinadas en cada sitio de estudio y cada dilución, y  $Elong_{Testigo}$  es la longitud promedio de la radícula de las semillas germinadas en el testigo.

Estos índices IGN e IER establecen valores de toxicidad desde  $-1$  hasta  $> 0$  (Tabla 7).

Tabla 7. Interpretación de los valores de toxicidad para los índices IGN e IER. (Fuente: Adaptado de Bagur et al., 2011).

VALOR	INTERPRETACIÓN
0 a $-0.25$	Baja Toxicidad
$-0.25$ a $-0.5$	Moderada Toxicidad
$-0.5$ a $-0.75$	Muy Tóxico
$-0.75$ a $-1.0$	Muy Alta Toxicidad
Valores $> 0$	Indican crecimiento de la radícula

## 8.7 Métodos Estadísticos

La verificación del efecto de las variables físicas (pH, temperatura interna y humedad), sobre la concentración de bacterias y hongos, durante el proceso de compostaje se realizó mediante un análisis del coeficiente de correlación de Spearman del paquete estadístico InfoStat versión 2014 para cada variable.

Los indicadores químicos (pH, relación C/N, CIC, MO, C, N, K, Na, Ca, Mg, P, Cu, Zn, Fe, Mn, B y S), para cada sustrato fueron tratados con estadística no paramétrica mediante la prueba de Kruskal-Wallis del paquete estadístico InfoStat versión 2014.

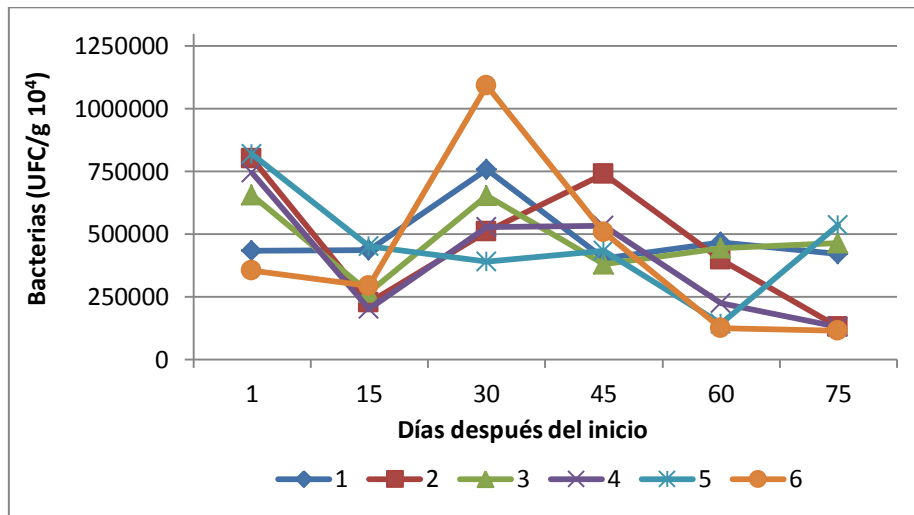
Se evaluó el efecto de las seis mezclas sobre la germinación de semillas mediante un análisis de varianza del paquete estadístico InfoStat versión 2014, además se realizó una comparación no planeada de Tukey ( $p < 0,005$ ) para las medias de los índices de germinación (IG) determinados en cada especie.

## 9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 9.1 Diversidad microbiana del proceso de compostaje

#### 9.1.1 Bacterias

La gráfica 1 muestra la dinámica de las poblaciones de bacterias durante el proceso de compostaje, mediante un conteo de Unidades Formadoras de Colonia (UFC/g) en un factor de dilución de  $10^4$ .

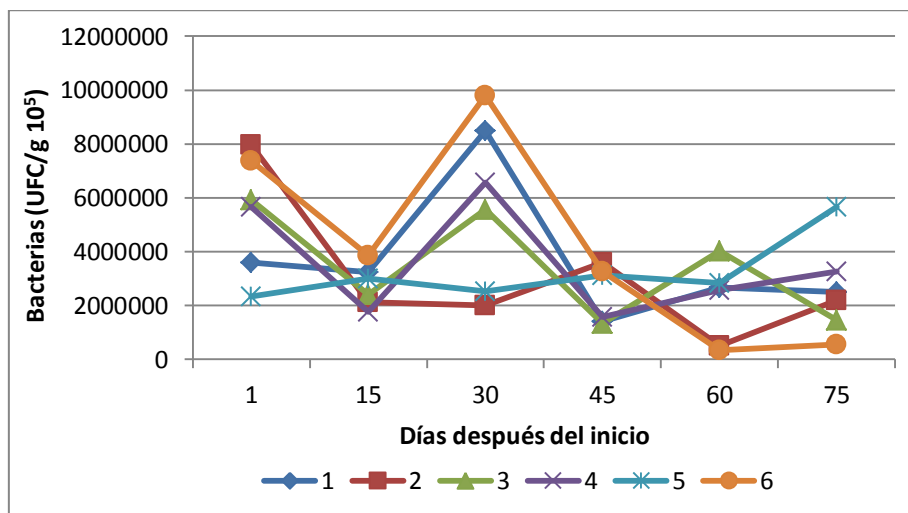


Gráfica 1. Conteo de UFC/g para bacterias en factor de dilución  $10^4$ . (Fuente: Autores, 2015)

Al inicio del proceso las poblaciones de bacterias mostraron una disminución desde el día 1 hasta el día 15, esta tendencia puede estar relacionada con la primera etapa del proceso donde empieza a aumentar la temperatura en las mezclas y la población inicial de bacterias mesófilas se reduce. Desde el día 15 del proceso las poblaciones de bacterias en las mezclas presentan un aumento, a diferencia de la mezcla 5 la cual presenta una tendencia a estabilizarse. Desde el día 30 se observa nuevamente una tendencia a la baja ya que las mezclas empiezan con la etapa de maduración en la cual disminuyen la población de bacterias termófilas y vuelven a aparecer las bacterias mesófilas, aunque en menor número ya que la materia orgánica se ha degradado casi por completo debido a su mineralización y a la consiguiente pérdida de carbono en forma de anhídrido carbónico (Zucconi et al., 1987), esta disminución del carbono representa menor disponibilidad de energía para los microorganismos

con lo cual se reduce la población. Estos resultados se relacionan con el estudio de Chroni et al., (2009) los cuales describen que después de registrar las temperaturas más altas en las mezclas hacia el día 35 los recuentos en las poblaciones de bacterias siguieron el descenso de temperatura a partir de entonces.

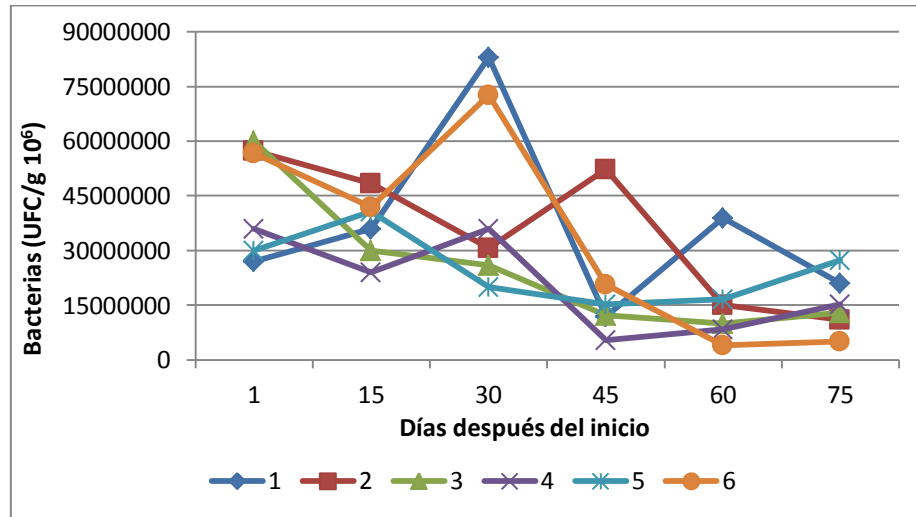
La sucesión de las diferentes poblaciones microbianas se observa en la gráfica 2, en un factor de dilución de  $10^5$ . Para este factor de dilución la población tiene la misma tendencia de descenso que en la gráfica anterior, Chroni et al., (2009), indicó que al comienzo del proceso de compostaje la actividad microbiana se debía principalmente a la comunidad microbiana mesófila. La mezcla 2 y 6 presentaron al inicio del proceso el mayor número de UFC. En cambio la mezcla 5 fue la que menos UFC presentó al inicio, y siguió con esta tendencia a lo largo del proceso, luego hacia el día 60 se incrementó la población hasta el día 75. Para este factor de dilución la mezcla 6 fue la que presentó el mayor número de UFC al día 30 del proceso.



Gráfica 2. Conteo de UFC/g para bacterias en factor de dilución  $10^5$ . (Fuente: Autores, 2015)

En la gráfica 3 se muestra el conteo de Unidades Formadoras de Colonia (UFC/g) de bacterias en un factor de dilución de  $10^6$ . Las mezcla 6 y 1 fueron las que presentaron los mayores conteos de UFC/g en la población de bacterias hacia el día 30 del proceso de compostaje. Los valores mínimos los presentó la mezcla 6 hacia el día 60 del proceso. En general se puede observar un descenso en la UFC/g en la mayoría de las mezclas hacia el día 15, el cual se relaciona con la el porcentaje de humedad de las mezclas, ya que los procesos de oxidación llevados a cabo por los microorganismos requieren de la disponibilidad de agua, a este respecto, MacGregor et al., (1981) menciona que en una pila de  $6 \text{ m}^3$  de material y 76 % de humedad, a

los 15 días la humedad de esta se redujo hasta en un 22%, por lo que es muy importante aplicar agua a las mezclas de manera constante durante el proceso de compostaje.



Gráfica 3. Conteo de UFC/g para bacterias en factor de dilución 10<sup>6</sup>. (Fuente: Autores, 2015)

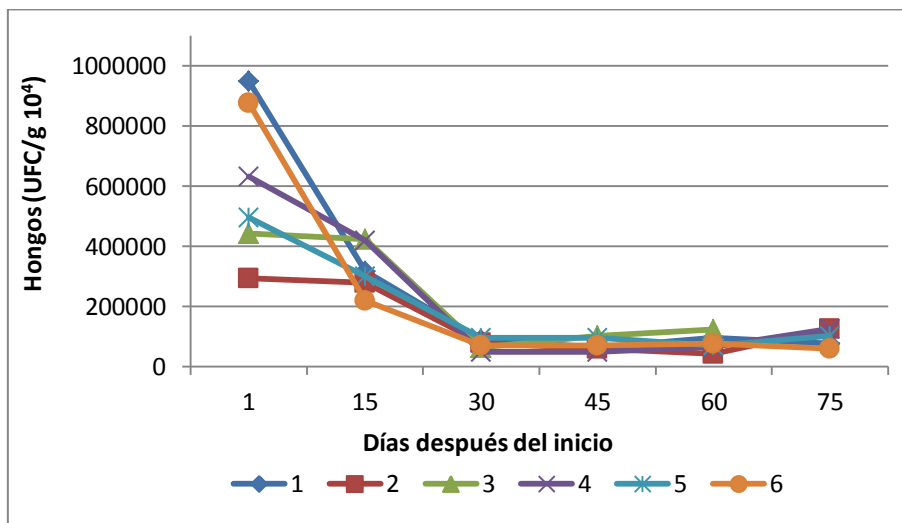
En general las tres graficas muestran una tendencia similar para la mezcla 6, en cambio las demás mezclas presentan diferencias de las UFC/g en cada dilución ya que las bacterias que se desarrollan en el medio de cultivo, son aquellas que pueden utilizar los nutrientes disponibles y que se adaptan a las condiciones del periodo de incubación. No existe un medio nutritivo ni una combinación de temperaturas y tiempos de incubación que aseguren la recuperación de todas las bacterias viables de una muestra (Manacorda et al., 2007), por lo cual es importante mostrar las tres gráficas.

### 9.1.2 Hongos

En la gráfica 4 se observa que las poblaciones de hongos en las 6 mezclas presentan una tendencia al descenso desde la fase inicial hasta el día 30. Luego presentan una estabilización hasta el final del proceso. La presencia y abundancia de hongos durante el compostaje está condicionada principalmente por la temperatura, la población de estos microorganismos disminuye a temperaturas superiores a 50°C, por esta razón desaparecen completamente durante la fase termófila (Uribe, 2003).

También se observa que la mayor cantidad de UFC de las poblaciones de hongos se presentó al inicio del proceso, en la fase mesófila, y desciende de forma muy marcada en las primeras semanas, esta tendencia se puede deber a lo mencionado por Pérez, Y., (2010) en el cual los restos de comida y vegetales frecuentemente

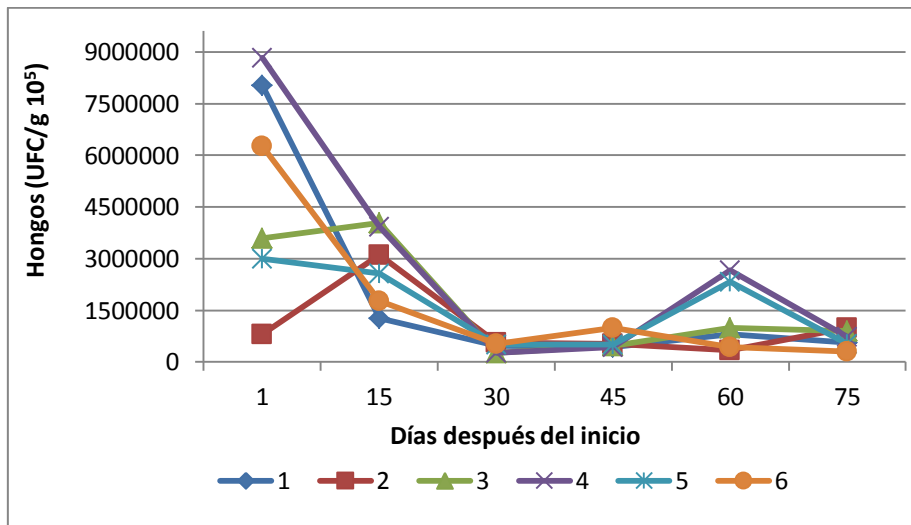
tienen un pH ligeramente ácido entre 4,5 - 5 que estimula la proliferación de los hongos al inicio del proceso, luego se empiezan a agotar las fuentes de nitrógeno lo que hace descender la población.



Gráfica 4. Conteo de UFC/g para Hongos en factor de dilución  $10^4$ . (Fuente: Autores, 2015)

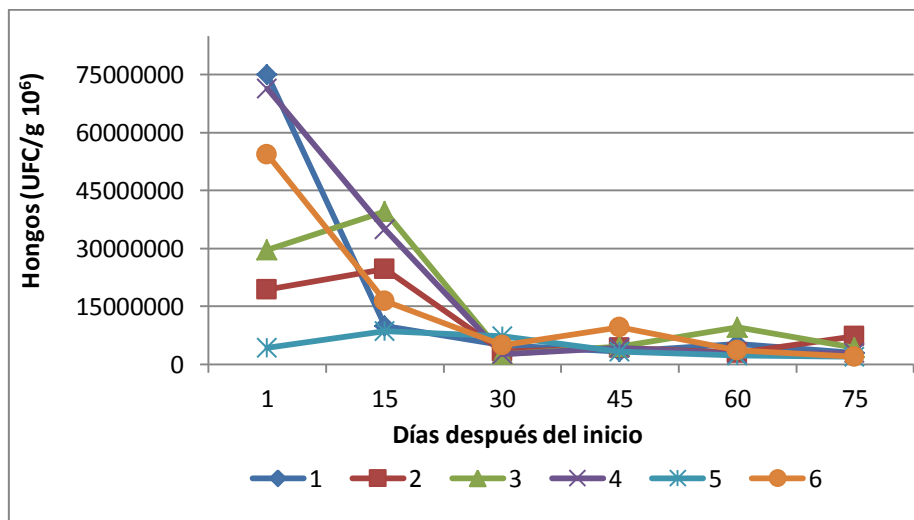
En la gráfica 5 se observa un aumento de la población de hongos hacia el día 60 del proceso para las mezclas 4 y 5, estas tendencias de crecimiento hacia el final del proceso se deben principalmente como lo menciona Sánchez (2009), a la capacidad de los hongos de descomponer residuos orgánicos como la lignina, la hemicelulosa y la celulosa, siendo activos en la última fase del proceso de compostaje, caso contrario a las bacterias que también mantienen una habilidad celulítica, pero en menor comparación con los hongos.





Gráfica 5. Conteo de UFC/g para Hongos en factor de dilución  $10^5$ . (Fuente: Autores, 2015)

En la gráfica 6 es más evidente la tendencia de aumento que presentó la mezcla 3 desde el inicio hasta el día 15, a partir de este día disminuye bastante el conteo de UFC al igual que las demás mezclas. Este comportamiento es descrito por Chroni et al., (2009), reporta que la población de hongos mesófilos se redujo drásticamente cuando se alcanzaron altas temperaturas hacia el día 22 del estudio, y se mantuvo ese nivel a partir de entonces. En contraste la población de hongos termófilos mostraron un pequeño aumento cuando la temperatura aumentó el primer mes de iniciado el proceso de compostaje. Esto se relaciona con los resultados obtenidos ya que la tendencia de los hongos es disminuir cuando aumenta la temperatura, en la mezcla 3 el aumento de las UFC durante los primeros 15 días se pudo deber a una población de hongos termófilos como lo indica el autor citado.



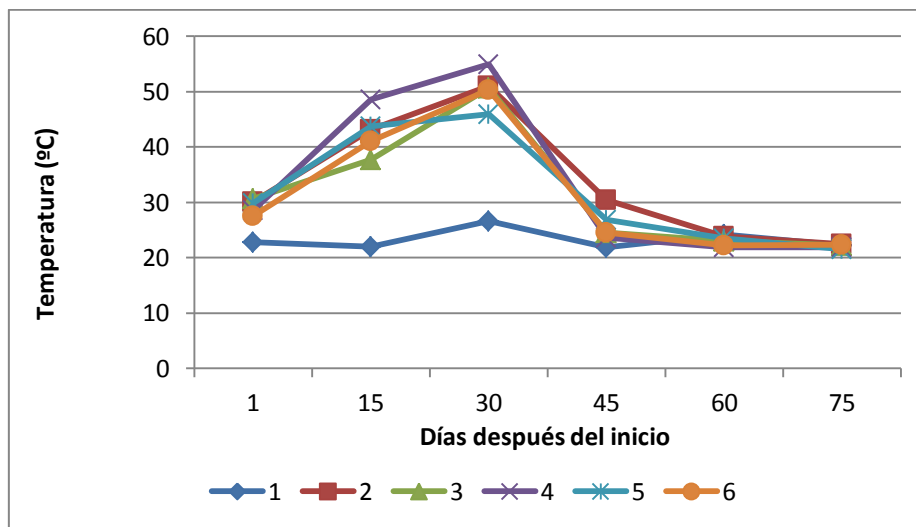
Gráfica 6. Conteo de UFC/g para Hongos en factor de dilución  $10^6$ . (Fuente: Autores, 2015)

En general en las tres diluciones se puede observar que las mezclas que contenían 2 tipos de estiércol como la 4, 5 y 6 fueron las que presentaron una mayor actividad de microorganismos en este caso de hongos. Esto puede ser debido a que hay un mayor aporte de nutrientes cuando se utilizan 2 tipos de estiércol.

## 9.2 TEMPERATURA

Se realizó una medición de la temperatura desde el día 1 hasta el día 75 para las 6 mezclas en cada una de las 3 repeticiones.

La gráfica 7 muestra el comportamiento promedio de la temperatura para las 6 mezclas durante el proceso de compostaje de los residuos orgánicos.



Gráfica 7. Temperatura promedio para cada una de las mezclas. (Fuente: Autores, 2015).

Las diferentes mezclas presentaron un aumento progresivo de la temperatura interna hasta el día 30, alcanzando temperaturas entre 40 y 60 °C. Después de esto presentaron un rápido descenso hasta el día 45, para luego estabilizarse con la temperatura ambiente entre los días 60 a 75. La producción de calor se asocia principalmente con la disponibilidad de compuestos como azúcares y almidones, fácilmente digeribles en los residuos utilizados en las mezclas, estos compuestos son de gran importancia durante el proceso de compostaje (Ruggieri et al., 2008). Esto indica que entre los días 15 y 30 había gran disponibilidad de sustrato de fácil degradación para los microorganismos termófilos que están presentes en esta etapa y la elevada temperatura se relaciona con una alta actividad microbiana. La disminución de la temperatura señala el agotamiento de los sustratos en cada una de las mezclas (Liang et al., 2003).

La mezcla 1 presentó la temperatura inicial más baja, con 22 °C en promedio, las demás mezclas iniciaron con una temperatura de entre 28 y 30 °C. Se observa también que la mezcla 1 presentó muy poca variación en la temperatura durante los 75 días del proceso de compostaje, pues estuvo en un rango promedio de 23 °C alcanzando un máximo de 26 °C a mitad del proceso. Esta mezcla contenía bovinasa, residuos de tomate y compost de una casa, cuando se dispusieron estos materiales al inicio del proceso presentaban gran contenido de humedad, esto sugiere que un exceso de agua en la mezcla (> 65 % de humedad), afecta negativamente la disponibilidad de oxígeno, y ya que el compostaje es un proceso desarrollado por microorganismos con metabolismo aeróbico, es de gran importancia

permitir el acceso de oxígeno a todas las partes del material. La insuficiencia de este elemento provoca que los microorganismos cambien su tipo de producción de energía hacia procesos fermentativos, mucho menos eficientes energéticamente (menos producción de calor, procesos más lentos), lo que no favorece el aumento de temperatura necesario para la estabilización biológica total del producto (Moreno y Moral, 2008).

La temperatura más alta registrada fue de 55 °C en el día 30 del proceso de compostaje, la mezcla 4 fue la que presentó este registro. Este marcado incremento en la temperatura se relaciona con la fase termófila (45 – 60 °C) del compostaje etapa en la cual hay un crecimiento activo de los microorganismos y una elevada disponibilidad de nutrientes, también con este rango de temperatura muchos patógenos y semillas de malezas son eliminadas (Turner & Williams, 2005).

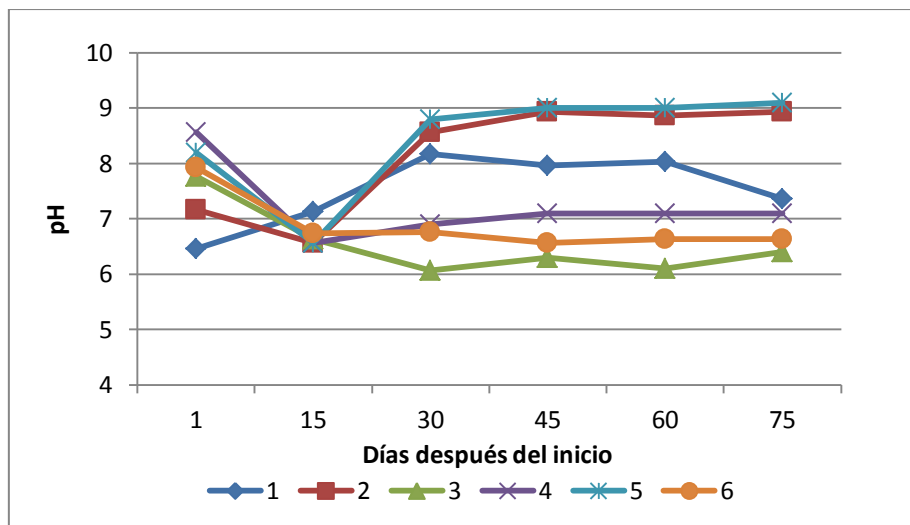
Hacia el día 30 del proceso las mezclas presentan un marcado descenso en la temperatura, entrando en un proceso de enfriamiento debido al agotamiento de compuestos fácilmente biodegradables y, como consecuencia de la reducción de la actividad microbiana, como lo indica Tiquia (2005) los altos índices de temperatura se relacionados con altas tasas de descomposición, mientras que la disminución se encuentra relacionada con el declive de la actividad microbiana y la transformación de los residuos orgánicos en compuestos más estables.

La temperatura es uno de los factores más importantes que gobiernan la velocidad de las reacciones bioquímicas. Defrieri (2005) concluye que las temperaturas de 50 a 60 °C durante el proceso de compostaje, están asociadas a la etapa termófila, durante esta se realiza la higienización de los materiales, con la consecuente eliminación de posibles patógenos. En este sentido solo las mezclas 4, 2, 6 y 3 tuvieron una temperatura igual o superior a los 50 °C; la mezcla 5 alcanzó solo una temperatura máxima de 45 °C y la mezcla 1 no superó los 28 °C, lo que indicaría que en estas dos mezclas no se eliminaron totalmente los patógenos.

### **9.3 pH**

La gráfica 8 nos describe el comportamiento promedio del pH de los 6 tratamientos durante los 75 días del proceso de compostaje. Inicialmente las 6 mezclas tienen un pH entre 7 y 8.5, a excepción de la mezcla 1 que inicia con un pH sobre 6.5. El pH tiene una influencia directa en el compostaje debido a su acción sobre la dinámica de los procesos microbianos. Mediante el seguimiento del pH se puede obtener una medida indirecta del control de la aireación de la mezcla, ya que si en algún

momento se crean condiciones anaeróbicas se liberan ácidos orgánicos que provocan el descenso del pH (Moreno y Moral, 2008).



Gráfica 8. pH promedio para cada una de las mezclas. (Fuente: Autores, 2015).

Es así como en el día 15 se observa un descenso en los niveles de pH en las mezclas, y a partir de este punto las mezclas 3, 4 y 6 tienden a estabilizar el pH (6 a 7). En las mezclas 1, 2 y 5 el pH aumenta (8 a 9), manteniéndose sobre estos niveles hasta el final del proceso. Según Sánchez (2001), la evolución del pH en el compostaje presenta tres fases. Durante la fase mesófitica inicial se observa una disminución del pH debido a la acción de los microorganismos sobre la materia orgánica más lábil, produciéndose una liberación de ácidos orgánicos. Este descenso inicial de pH puede ser muy pronunciado si existen condiciones anaeróbicas, pues se formarían aún más cantidad de ácidos orgánicos. En una segunda fase se produce una progresiva alcalinización del medio, debido a la pérdida de ácidos orgánicos y la generación de amoníaco procedente de la descomposición de las proteínas y en la tercera fase el pH tiende a la neutralidad debido a la formación de compuestos húmicos que tienen propiedades tampón. Se puede observar que la mezcla 4 al final del proceso registró un pH final por encima de 7, de acuerdo con lo reportado con Suler & Finstein (1977) se estableció una relación entre los cambios de pH y la aireación de la mezcla, concluyendo que el compostaje con la aireación adecuada conduce a productos finales con un pH entre 7 y 8; valores más bajos del pH son indicativos de fenómenos anaeróbicos y de que el material aún no está maduro. Las

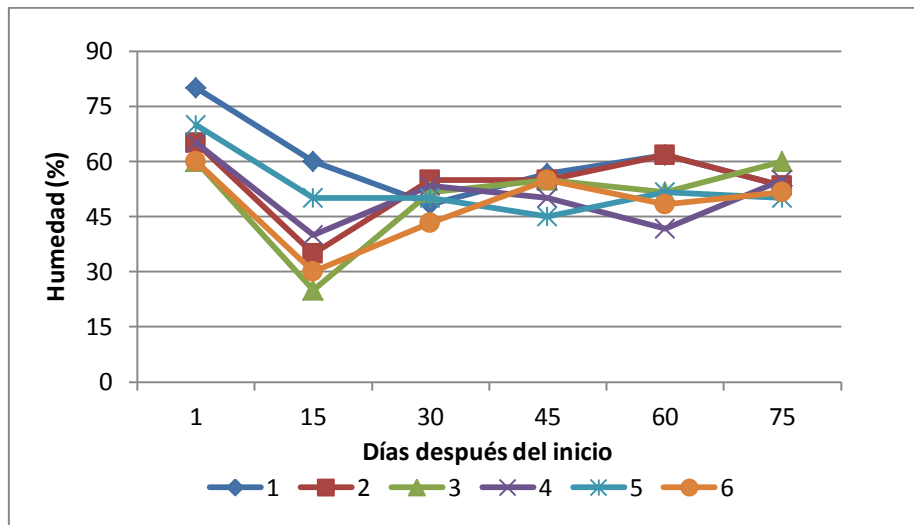
mezclas 6 y 3 registraron valores de pH por debajo de 7 al final del proceso, lo que puede indicar un inadecuado ingreso de oxígeno al interior del material.

Estos cambios de pH en los 6 tratamientos se relaciona con lo mencionado por Martínez et al., (2008) quien encontró que la dinámica del pH muestra una tendencia a disminuir luego del primer volteo producto de una posible liberación de ácidos orgánicos y luego aumenta hacia el final del proceso en especial en los tratamientos con estiércol. Sundberg (2005) plantea que la variación en el pH durante el proceso de compostaje se debe a cambios constantes en la composición química del sustrato, además que el pH está influenciado por tres sistemas acido-base: el sistema carbónico, con el dióxido ( $\text{CO}_2$ ) que se forma durante la descomposición y puede escapar en forma de gas; el sistema amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) – amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), que se forma cuando se descomponen las proteínas y el sistema de ácidos orgánicos como el acético y el láctico. Estos sistemas se combinan para formar la curva típica del pH del compostaje, donde se presenta un descenso en la fase inicial, un aumento en la fase de máxima actividad y por último la tendencia a la estabilización. Esta curva se puede apreciar en la gráfica 8 y se relaciona con los resultados obtenidos en el presente estudio. El aumento de valor de pH esta referenciado por autores como Sundberg (2003) y Chroni et al., (2009), los cuales atribuyen este cambio a la descomposición de los ácidos grasos volátiles que se forman en las primeras etapas del proceso de compostaje.

El comportamiento similar del pH en los seis tratamientos puede estar relacionando con lo que menciona Suler et al., (1977) afirman que el pH puede dar una medida indirecta del control de la aireación de la mezcla, ya que si en algún momento se crean condiciones anaeróbicas se liberaran ácidos orgánicos que provocan el descenso del pH. Lo que puede indicar que las mezclas mantuvieron una aireación adecuada durante el proceso.

#### **9.4 HUMEDAD**

La presencia de agua dentro de las mezclas durante el proceso de compostaje es de gran importancia, ya que es el medio por el cual se transportan las sustancias y nutrientes para que sean asimilados por la gran variedad de microorganismos presentes. En la gráfica 9 se observa en comportamiento promedio de la humedad en cada uno de los tratamientos en los 75 días de compostaje.



Gráfica 9. Humedad promedio para cada una de las mezclas. (Fuente: Autores, 2015).

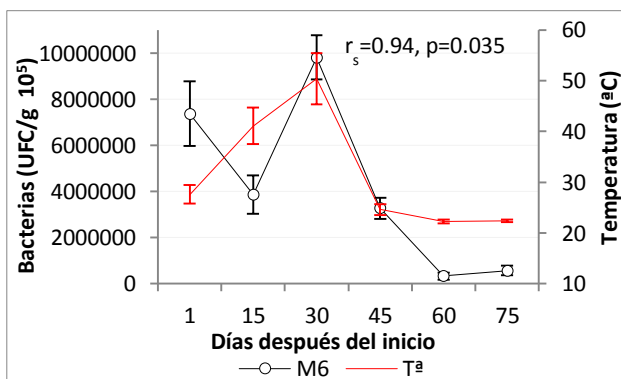
Todas las mezclas al inicio del proceso registraron una humedad inicial entre 60 al 75 %, Picado (2005) indica que la humedad óptima de las mezclas para el proceso es de 50% a 60%. Sin embargo la mezcla 1 presento un mayor porcentaje de humedad el cual estaba en 80 % aproximadamente, este exceso de humedad se debió principalmente a la bovinaza utilizado en esta mezcla, la cual se recolecto sin darle un tiempo previo de secado, lo que afecto de forma negativa el proceso de compostaje de esta. Soto (2003) reporta que cuando se composta materiales como la broza de café o la pulpa de naranja estos presentan un contenido de humedad de hasta el 90%, por lo cual deben ser volteados frecuentemente en los días iniciales del proceso para reducir la humedad. Este autor también indica que un exceso de agua (> 65 % de humedad), afecta negativamente la disponibilidad de oxígeno y puede originar condiciones de anaerobiosis y un lavado de nutrientes por lixiviación. Desde el inicio hasta el día 15 todas las mezclas presentaron un marcado descenso de la humedad, llegando como en el caso de la mezcla 3 a niveles por debajo del 30 %, lo cual no es recomendable ya que niveles menores del 40-45 % originan un descenso en la actividad microbiana, principalmente en las bacterias, ya que los hongos permanecen activos a humedades más bajas. Sin embargo, humedades por debajo del 20 % inhiben casi totalmente dicha actividad y, por lo tanto, el proceso de compostaje (Picado, 2005).

## 9.5 CORRELACIÓN DE VARIABLES (pH, TEMPERATURA Y HUMEDAD) SOBRE LA CONCENTRACIÓN UFC/g DE MICROORGANISMOS

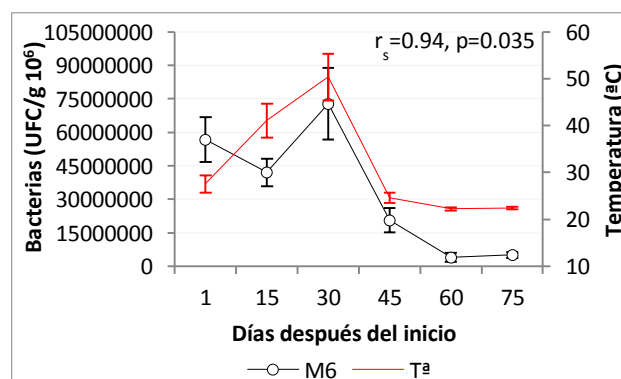
### 9.5.1 Correlación en Bacterias

Los microorganismos que intervienen en el compostaje sobreviven en determinados ambientes colonizando y utilizando los recursos que tienen a su disposición. En este sentido es de gran importancia relacionar las variables físicas (pH, Temperatura y Humedad) que inciden sobre las poblaciones de bacterias y la degradación de la materia orgánica durante el proceso. A los datos obtenidos de estas variables se les realizó un análisis del coeficiente de correlación de Spearman mediante el paquete estadístico InfoStat. Las gráficas muestran las mezclas donde las variables tuvieron un mayor grado de correlación.

La gráfica 10 y 11 corresponden a la mezcla 6, en estas podemos observar que la temperatura muestra una alta correlación respecto a la concentración de UFC/g a lo largo del proceso de compostaje. La temperatura es uno de los factores que influye de forma directa sobre la velocidad de descomposición de la materia orgánica. Como indican Moreno y Moral (2008) las temperaturas óptimas del proceso se encuentran entre 45 y 59 °C, temperaturas menores de 20 °C frenan el crecimiento microbiano y por lo tanto la descomposición de los materiales, por otro lado temperaturas superiores a 59 °C inhiben el desarrollo de gran parte de los microorganismos o provocan su eliminación, reduciendo la tasa de descomposición microbiana. El rango de temperatura registrado en las 6 mezclas estuvo dentro de los niveles adecuados los cuales no inhibieron la actividad microbiana, indicando un proceso de compostaje adecuado.



Gráfica 11. UFC/g 10<sup>5</sup> Mezcla 6 Vs Temperatura.



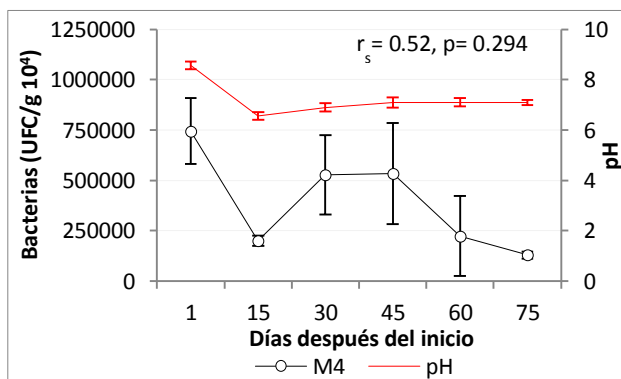
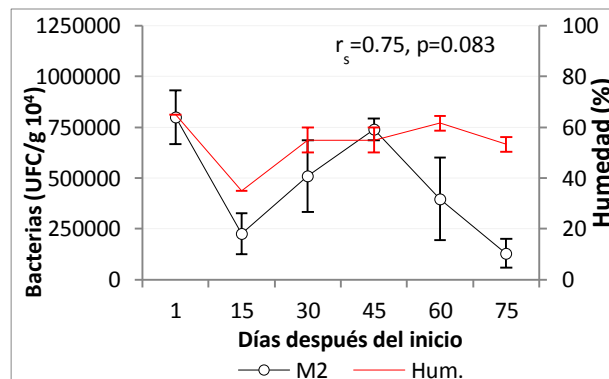
Gráfica 10. UFC/g 10<sup>6</sup> Mezcla 6 Vs Temperatura.



Las gráficas 12 y 13 muestran las variables pH y humedad en las mezclas 4 y 2 respectivamente. Aunque no se encontró en ninguna mezcla una correlación estadísticamente significativa estas son variables de gran importancia para desarrollar el proceso en forma óptima. En la gráfica 12 se puede establecer como las bacteria responden eficientemente a diferentes cambios de pH, al respecto Castrillón et al., (2006) indicaron que cuando unas colonias no toleran las condiciones presentes, existe otro grupo que se activa y continúa el proceso, ya que las bacterias son un grupo de microorganismos metabólicamente provistos de una artillería enzimática capaz de permitirles sobrevivir aún en condiciones extremas.

La actividad metabólica de los microorganismos presentes en la pila de compostaje condiciona variaciones en los valores de pH, que a su vez dependen de gran medida del valor de pH de las materias primas. Como menciona Moreno y Moral (2008) las bacterias prefieren valores de pH entre 6 y 7,5, si este desciende por debajo de 6, el proceso de descomposición por parte de las bacterias se detiene, por el contrario valores cercanos o superiores a 9, favorecen la conversión del nitrógeno en amonio, afectando negativamente al crecimiento y la actividad de los microorganismos. Durante el proceso de compostaje los valores de pH registrados para cada una de las mezclas estuvieron dentro de los valores de 6 y 9. Al inicio del proceso se presentó un descenso del pH hasta el día 15 debido a la actividad de las bacterias que forman ácidos orgánicos, posteriormente los niveles de pH mostraron una tendencia a estabilizarse con valores cercanos a la neutralidad, indicando la madurez de las mezclas.

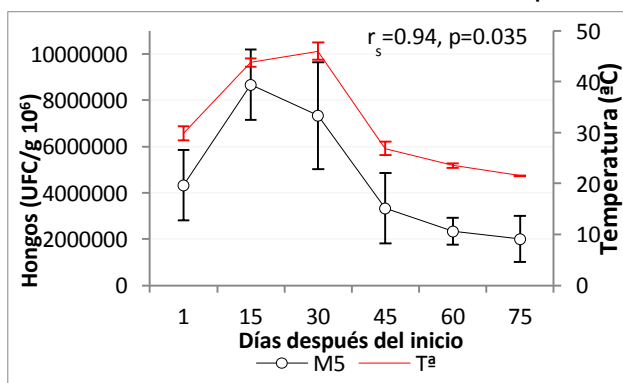
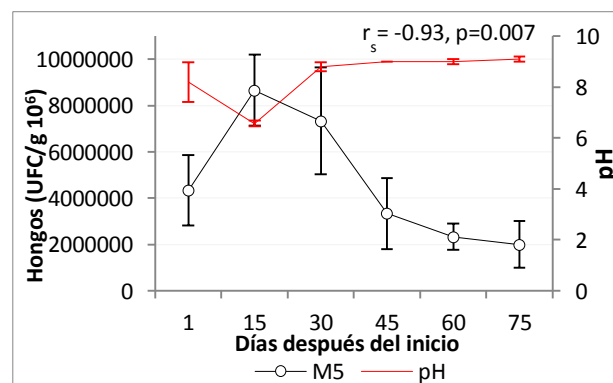
En un estudio realizado por Tiquia (2005) utilizando estiércol de cerdo para compostaje, afirma que este proceso exige un entendimiento de la interacción de factores ambientales tales como la aireación (volteo) y contenido de humedad. Demostró que un compostaje es eficiente, cuando el contenido de humedad se mantiene semanalmente en 60% y con una frecuencia de volteo cada 4 días. En este sentido la gráfica 13 nos muestra como el contenido de humedad de las seis mezclas se mantiene durante casi todo el proceso en un valor promedio al 55%; también se realizó 2 volteos semanales para todas las mezclas para que la humedad fuera homogénea y la temperatura se regulara.

Gráfica 12. UFC/g 10<sup>4</sup> Mezcla 4 Vs pH.Gráfica 13. UFC/g 10<sup>4</sup> Mezcla 2 Vs Humedad.

### 9.5.2 Correlación en Hongos

En la gráfica 14 se observa la correlación entre la temperatura y la población de hongos. La temperatura es un factor muy importante ya que afecta en gran medida el crecimiento de los hongos. Ryckeboer et al., (2003) reportaron que la mayoría de los hongos son mesófilos (5 – 37 °C), mientras que los hongos termófilos toleran temperaturas de 40 a 55°C, a temperaturas mayores de 60 °C los hongos son eliminados, aunque están presentes en forma de esporas. La correlación de la gráfica 14 entre la población de hongos y temperatura puede darse de forma positiva ya que según lo descrito por el anterior autor las primeras poblaciones identificadas serían hongos mesófilos que al aumentar la temperatura después del día 15, se daría una sucesión de la población por hongos termófilos que toleran mayores temperaturas.

En la gráfica 15 la correlación entre el pH y las UFC se presenta de forma muy marcada, ya que los hongos prefieren un ambiente ácido, la población aumentó cuando el pH disminuyó hacia el día 15, luego con el aumento del pH la población disminuyó. Autores como Castrillón et al., (2006) y Ryckeboer et al., (2003) encontraron una fuerte correlación entre el pH y las UFC de hongos, lo cual es un indicador cuantitativo de la evolución del proceso.

Gráfica 12. UFC/g 10<sup>5</sup> Mezcla 5 Vs Temperatura.Gráfica 13. UFC/g 10<sup>5</sup> Mezcla 5 Vs pH.

## **9.6 INDICADORES FÍSICOS**

### **9.6.1 Olor**

Al inicio del proceso las mezclas presentaban olores característicos de acuerdo a los sustratos utilizados en cada una. Al aumentar el proceso estos olores fueron disminuyendo a medida que los compuestos se degradaban. Solo en la mezcla 1 se presentó un problema de putrefacción del material debido al exceso de humedad presentado primero por la bovinaza que estaba muy fresca y a la cual se le adiciono residuos de tomate que incremento la humedad de la mezcla. Para este caso Costa et al., (1991) indica que a pesar de ser una medida subjetiva, la presencia de olores desagradables puede indicar que el producto se encuentra en fases iniciales del proceso o que esta ha sufrido condiciones anaerobias. En el primer caso, los malos olores son debidos a la descomposición de ácidos orgánicos (ácido acético, propiónico, butírico, etc.) en las primeras etapas de la fase bio-oxidativa y en el segundo, las condiciones anaerobias producen la formación de amoniaco y ácido sulfhídrico, causante de los malos olores. Para corregir este proceso se extendió todo el contenido de la mezcla 1 y se dejó secar durante varios días hasta que presentara un nivel de humedad más adecuado.

Al finalizar el proceso ninguna de las mezclas presento olores desagradables y se ajusta a lo descrito por Canet (2007), que los olores generados por los residuos en las fases iniciales, causados principalmente por sustancias volátiles (ácidos orgánicos, amoniaco entre otros) desaparecen, dando al compost maduro un olor característico similar al de la tierra húmeda, producido fundamentalmente por la excreción de geosmina, metabolito secundario producido por actinomicetos mesófilos, los cuales predominan durante la fase de maduración del compost.

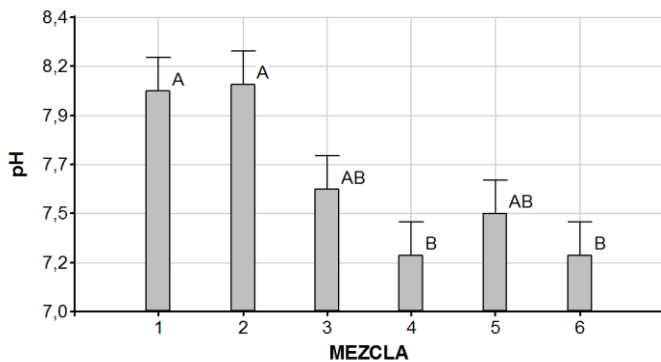
### **9.6.2 Color**

La descomposición de los materiales de las mezclas a lo largo del proceso cambiaron gradualmente a un color oscuro en las 6 mezclas al final del proceso, como lo reporta Canet (2007) el compost toma un color marrón oscuro, casi negro debido al mayor grado de humificación de los residuos. También describe que el color final depende principalmente del material inicial, así, en las mezclas que contenían residuos verdes como la 1, 2 y 3 al finalizar el proceso tenían un color negro oscuro, mientras que las mezclas que contenían más de 1 tipo de estiércol como la 4, 5 y 6 el color final fue generalmente más marrones.

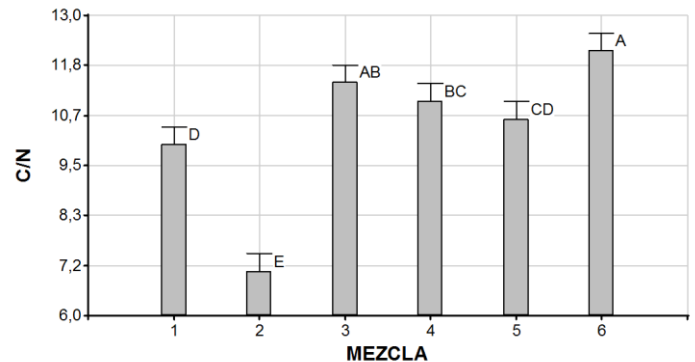
## 9.7 INDICADORES QUÍMICOS

El pH es un indicador de la evolución del proceso de compostaje. De forma general durante el compostaje, el pH desciende inicialmente como consecuencia de la formación de ácidos orgánicos y a medida que el proceso avanza aumenta gradualmente hasta valores constantes entre 6 y 8,5, dependiendo del material. En la gráfica 16 se observa que las mezclas 1 y 2 fueron las que tuvieron un valor de pH final más alto mostrando diferencias significativas en comparación con las mezclas 6 y 4. Según Gaiend (2014) los altos valores de pH están relacionados con un elevado contenido de calcio en los estiércoles utilizados y la mineralización de N orgánico, que para el caso de las mezclas 1 y 2 fue bovina y gallina. Todas las mezclas tienen un pH final que se ajusta a lo establecido por la NTC 5167 (2004) donde indica que los abonos orgánicos deben tener un pH entre 4 y 9. Aunque las plantas pueden sobrevivir en un amplio intervalo de pH, estos valores deben estar próximos a la neutralidad o ligeramente ácidos bajo condiciones de cultivo.

La relación C/N es un indicador de la madurez y estabilidad de la materia orgánica del compost. Varios autores establecen un valor inferior a 20 como óptimo, esta depende de la naturaleza química de los residuos utilizados. La gráfica 17 muestra la relación C/N al día 75 en cada una de las mezclas donde se presentan unos valores que oscilan entre 7 hasta 12 respectivamente; la mezcla 2 presentó una relación final de 7, siendo este el valor más bajo y significativamente diferente. Aunque una relación C/N por debajo de 20 es un indicativo de madurez aceptable, Gaiend (2014) establece que valores demasiado bajos (<10: 1) en el compostaje indica la inestabilidad final del producto. Pérez, R., (2010) propone que un valor de C/N entre 10 y 20 es aceptable, también indica que los abonos con valores menores de 10 tienen una liberación más rápida de nutrientes que aquellos con valores mayores de 20. Esto aplicaría para las mezclas 1 y 2 que aunque presentan relación C/N menor a 10 presentarían también un beneficio al ser utilizadas como abonos. En el estudio realizado por Martínez et al., (2008), indicó que a los 65 días del proceso de compostaje utilizando residuos de cebolla se alcanzaron valores C/N cercanos a 15 en las tres mezclas llegando a valores de C/N de 12 a 13 al final del proceso, estos resultados se relacionan con los obtenidos en la mayoría de las mezclas en el presente estudio. La mezcla 6 presenta el valor más alto (12.1) y presenta una diferencia estadística en relación con las demás muestras.



**Gráfica 15. pH de las mezclas al día 75.**  
(H=12.98, gl=5, p=0.021)



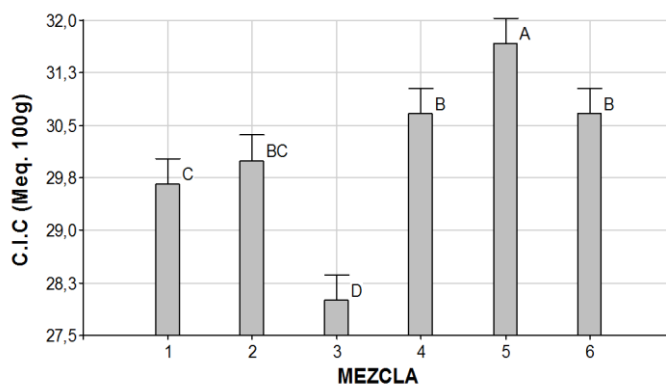
**Gráfica 14. Relación C/N.**  
(H=14.15, gl=5, p=0.014)

En cuanto a la capacidad de intercambio catiónico (C.I.C), en la gráfica 18 se muestra que las mezclas al finalizar el proceso tuvieron un valor promedio de 30 (meq. 100g<sup>-1</sup>), la mezcla 3 fue la que presentó el valor más bajo 28 (meq. 100g<sup>-1</sup>) y además presenta una diferencia estadística significativa con las demás muestras.

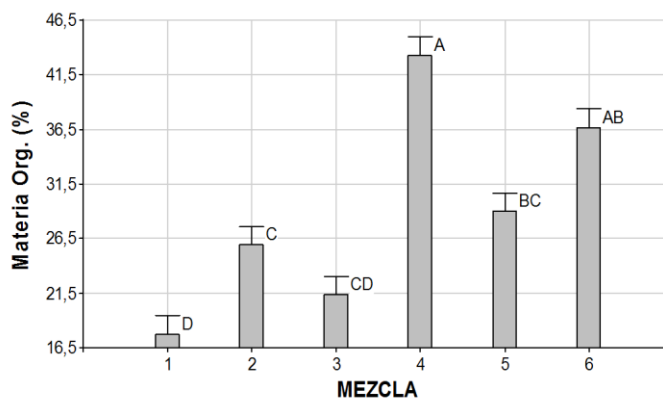
Cariello et al., (2007) reportan valores de 57,6 a 86,6 a los cinco meses del proceso de compostaje, indicando que un alto valor de este parámetro en las mezclas finales tendrían mayor potencialidad de retención de nutrientes y capacidad de retención de sustancias fitotóxicas como también mayor capacidad buffer, siendo este un indicador de la madurez del producto. Al relacionar esto con el presente estudio y con lo que indica la Norma técnica colombiana (2004) la cual estipula un valor mínimo de 30 (meq/100g), se puede decir que las mezclas cumplen con la normatividad establecida, y a la vez este valor da una idea de la madurez de las mezclas al día 75 del proceso de compostaje. También Pérez, R., (2010) estable una CIC mínima de 30 Meq.100g<sup>-1</sup> en las mezclas finales para ser utilizadas como abono orgánico.

De acuerdo a los resultados obtenidos para el contenido de materia orgánica (%) en la gráfica 19, las mezclas 4 y 6 registraron los valores más altos (43.3% y 36.6), las mezclas 2, 3 y 5 están en un promedio de 25%, mientras que la mezcla 1 registro el valor más bajo (17,7%). Las mezclas presentaron diferencias significativas (p=0.014), para este parámetro, Defrieri (2005) indica que la materia orgánica disminuye a medida que avanza el proceso de compostaje, y determino en su estudio valores del 40%, estos valores coinciden con los registrados para las mezclas 4 y 6 las cuales tienen un mayor contenido de materia orgánica. El contenido final será el resultado del valor inicial de MO, de su degradabilidad y de la transformación que haya sufrido durante el proceso. Soliva y López (2004), afirman

que este es un parámetro de gran importancia cuando se utiliza el compost como enmienda ya que incide de forma positiva sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.



**Gráfica 17. Capacidad de C.I.C (meq. 100g<sup>-1</sup>).**  
(H=13.08, gl=5, p=0.014)

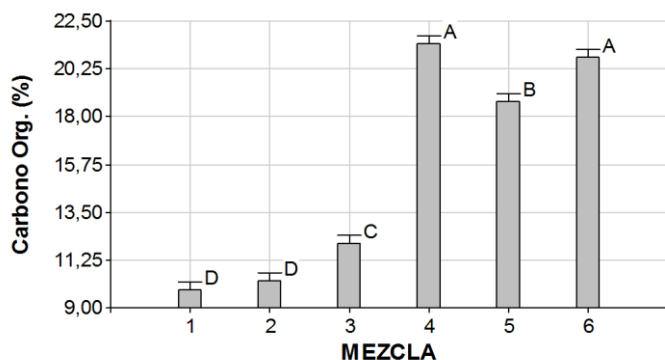


**Gráfica 16. Contenido de Materia Orgánica (%).**  
(H=15.53, gl=5, p=0.008)

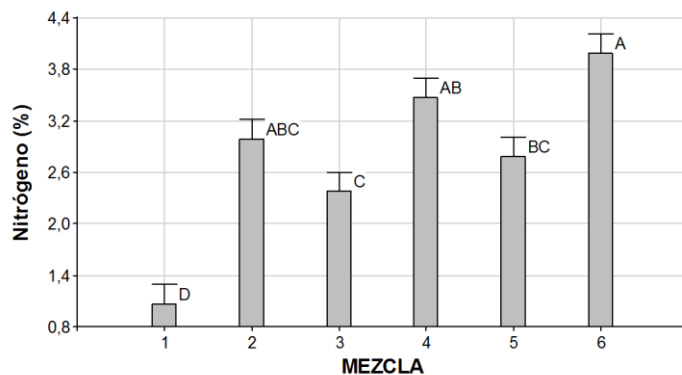
El contenido de carbono orgánico (%) es un indicador de su concentración en la materia orgánica y por tanto un índice de calidad del compost. La norma técnica colombiana (2004) indica que este parámetro debe tener un valor total mínimo del 15% al finalizar el proceso. En la gráfica 20 se observa que las mezclas 4, 6 y 5 superan este valor, mientras que las mezclas 1, 2 y 3 presentan valores inferiores al 15%. También se presentan diferencias estadísticas significativas entre las mezclas 6 y 4 con respecto a las demás muestras.

En la gráfica 21 se representa el contenido final de Nitrógeno (%) para las seis mezclas. La mezcla 1 fue la que presentó el valor más bajo (1.07%), esto se relaciona con lo reportado por Soto (2003), quien indica que uno de los casos donde se dan las mayores pérdidas por nitrógeno es cuando se compostan excretas frescas, encontrando pérdidas de nitrógeno de un 16% hasta un 78%. Las mezclas 6 y 4 presentaron los mayores valores (3.9% y 3.4%). El contenido de N total del compost es función directa de los materiales iniciales, del proceso de compostaje y de las condiciones de maduración. Para la elaboración de las mezclas 6 y 4 se utilizó como sustrato la porquinaza y gallinaza, estas excretas contienen un nivel inicial alto de nitrógeno, según Canet (2007), la alimentación de los animales es clave en el contenido de nutrientes del estiércol que producen: si abunda el forraje el nitrógeno es más abundante, mientras que las raíces y los tubérculos darán lugar a una mayor cantidad de potasio. Los estiércoles procedentes de animales en estabulación

permanente son también más ricos en elementos minerales, lo que pudo influir en los resultados finales de estas mezclas no solo para el contenido de Nitrógeno sino para los demás elementos.



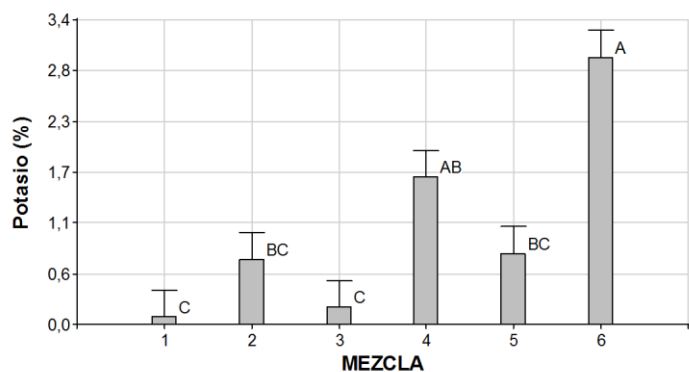
**Gráfica 18. Contenido de Carbono Orgánico (%).**  
( $H=15.08$ ,  $gl=5$ ,  $p=0.007$ )



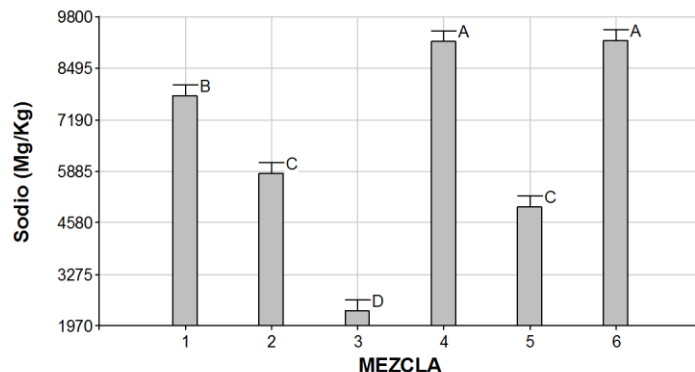
**Gráfica 19. Contenido de Nitrógeno (%).**  
( $H=14.84$ ,  $gl=5$ ,  $p=0.010$ )

El contenido final de potasio se representa en la gráfica 22, en la cual la mezcla 6 es la que presenta mayor contenido de este elemento, además tiene una diferencia estadística significativa en relación con las demás mezclas. La mezcla 4 tiene un contenido de 1.6%, las mezclas 1, 2, 3 y 5 no sobrepasan el 1%, según Pérez, R., (2010), los abonos orgánicos comerciales deben tener un valor total mayor del 1% para el contenido de potasio, condición que solo cumplen las mezclas 6 y 4. Este mismo autor obtuvo resultados similares utilizando gallinaza la cual presenta un valor cercano al 1% para este elemento, y con bovinaza valores por encima de 1%. Estos resultados concuerdan con el presente estudio en el cual la mezcla 6 que contiene como sustrato inicial bovinaza presentó un valor final de 2.9% para el potasio. Muñoz (2005) utilizando tres sistemas de compostaje diferente, encontró en los contenidos de potasio valores iniciales entre 1% y 1.5%, y afirma que estos contenidos son relativamente bajos teniendo en cuenta que pueden disminuir en la etapa final, finalmente concluye que para un compost completamente estabilizado este valor debe estar en aproximadamente 1.5%.

Para el contenido de final de sodio en la gráfica 23, los resultados indican que la mezcla 6 es la que presenta mayor concentración de este elemento (9193 Mg/Kg), seguido de la mezcla 4 con un valor de (9177 Mg/Kg); además estas dos mezclas presentan una diferencia estadística significativa en comparación con las demás mezclas. La que presenta un menor contenido es la mezcla 3 (2346).

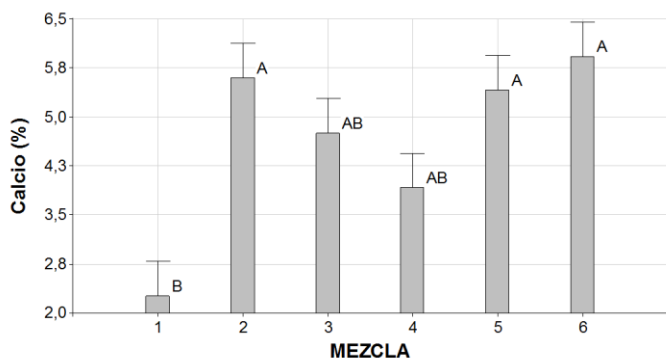


**Gráfica 21. Contenido de Potasio (%).**  
( $H=15.44$ ,  $gl=5$ ,  $p=0.008$ )

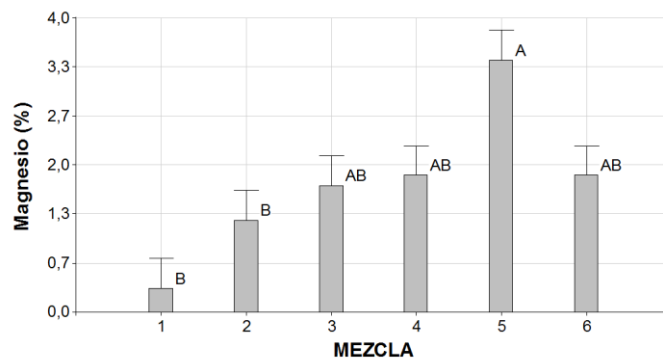


**Gráfica 20. Contenido de Sodio (Mg/Kg).**  
( $H=15.97$ ,  $gl=5$ ,  $p=0.006$ )

El contenido de calcio, gráfica 24, fue superior en la mezcla 6 (5.9%), seguido de la mezcla 2 (5.6%), el menor contenido lo presento la mezcla 1 (2.2%). Muñoz (2005) reporta para los tres tratamientos un contenido de calcio de (4,7%), el cual es menor en comparación con los resultados obtenidos en el presente estudio, teniendo en cuenta que este autor agrego cal dolomita en diferentes proporciones a las mezclas iniciales. Para el contenido de magnesio en la gráfica 25, la mezcla 5 presento un valor muy superior (3.4%) respecto a las demás muestras, las cuales tienen un contenido final en promedio de (1.5%), a excepción de la mezcla 1 la cual presenta en nivel más bajo (0.3%). El Magnesio en el suelo se puede lixiviar más fácilmente que el calcio, pero si proviene de abonos orgánicos tiene menos peligro de perdida. (Muñoz, 2005). Esto plantea una de las muchas ventajas que tienen los abonos orgánicos como enmiendas en los suelos.



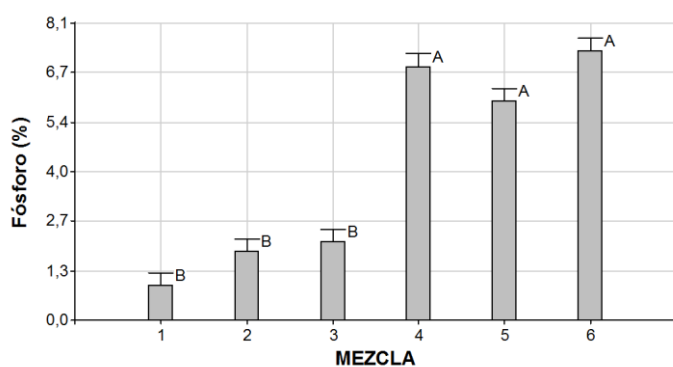
**Gráfica 22. Contenido de Calcio (%).**  
( $H=11.47$ ,  $gl=5$ ,  $p=0.004$ )



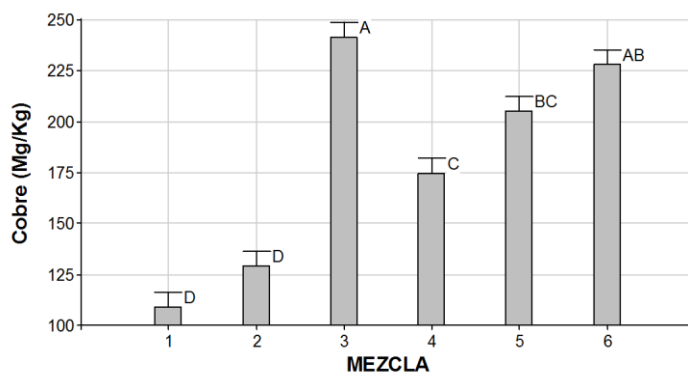
**Gráfica 23. Contenido de Magnesio (%).**  
( $H=12.13$ ,  $gl=5$ ,  $p=0.033$ )



El contenido de fósforo en los abonos orgánicos según la NTC 5167 (2004) debe tener un valor mínimo del (1%), y un máximo del (4%). En la gráfica 26 se representan los contenidos de fósforo al final del proceso. La mezcla 6 presentó el mayor valor (7.3%), sobrepasando por mucho lo estipulado en la NTC, al igual que la mezcla 4 y 5. Solo las mezclas 3 y 2 se encuentran entre los valores permitidos. Oviedo et al., (2013) reportaron que las mezclas que presentaron mayor contenido de fósforo fueron aquellas en las cuales se utilizaron 2 tipos de estiércol animal; estos resultados concuerdan con los contenidos finales encontrados en las mezclas 6 (porquinaza + bovinaza), mezcla 4 (gallinaza + porquinaza) y en la mezcla 5 (bovinaza + gallinaza), ya que en las mezclas 3 y 2 solo se utilizó 1 tipo de estiércol. Durán (2007), reportó valores para el contenido de fósforo por encima del (1%), y en particular en el vermicompost a partir de estiércol, que mostró el mayor valor con un (2%). Para el contenido de cobre, gráfica 27, la mezcla 3 presentó el mayor contenido (241 mg/Kg), seguido de la mezcla 6 (228 mg/Kg). La mezcla 1 presentó el menor contenido de este elemento (109 mg/Kg).



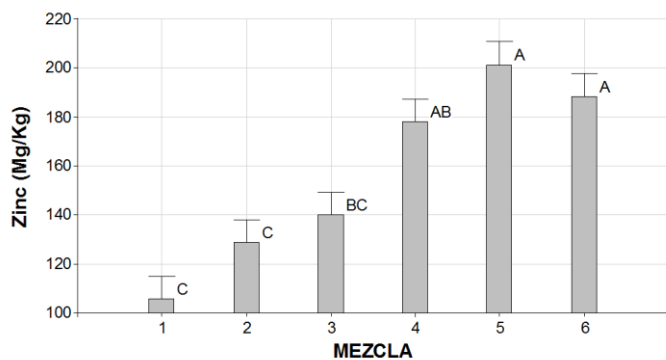
**Gráfica 25. Contenido de Fósforo (%).**  
( $H=15.5$ ,  $gl=5$ ,  $p=0.008$ )



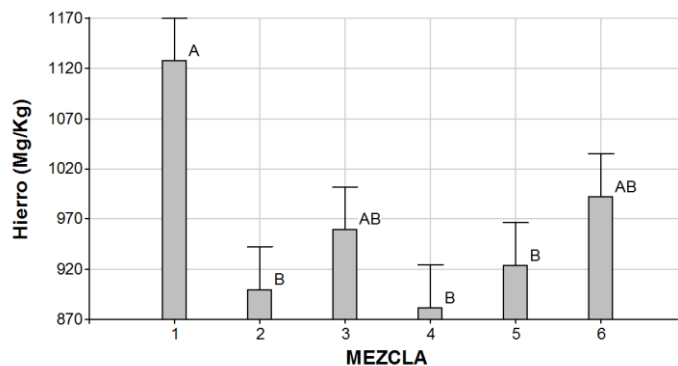
**Gráfica 24. Contenido de Cobre (mg/Kg).**  
( $H=15.6$ ,  $gl=5$ ,  $p=0.007$ )

Para el contenido de zinc, gráfica 28, la mezcla 5 presenta el valor más alto (201 mg/Kg), seguido de la mezcla 6 (188 mg/Kg). El menor contenido lo presentó la mezcla 1 (105 mg/Kg). Durán (2007) reporta que en 3 de los 5 vermicompostas evaluadas se obtuvieron valores mayores a (279 mg/Kg), en particular el tratamiento en el cual se utilizaron residuos domésticos con un valor de (1118 mg/Kg), este autor relaciona esta liberación de grandes cantidades de zinc con valores bajos de pH del material. Ninguna de las mezclas alcanza valores tan altos como los reportados por este autor, sin embargo las mezclas 4, 5 y 6 tienen un aporte considerable de este elemento. En la gráfica 29 se representa el contenido de hierro en las 6 mezclas. La mezcla 1 es la que presenta un valor muy elevado de este elemento (1127 mg/Kg), y además de tener una diferencia significativa con las mezclas 4, 2 y 5, que fueron las que presentaron el menor contenido de hierro. La concentración tan alta de hierro se

puede deber al proceso que tuvo esta mezcla, ya que desde el inicio presento una elevada humedad y la temperatura no sobrepaso los 30 °C.

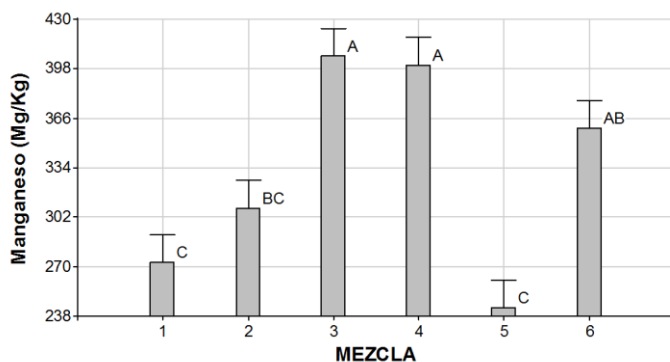


**Gráfica 27. Contenido de Zinc (mg/Kg).**  
(H=15.11, gl=5, p=0.009)

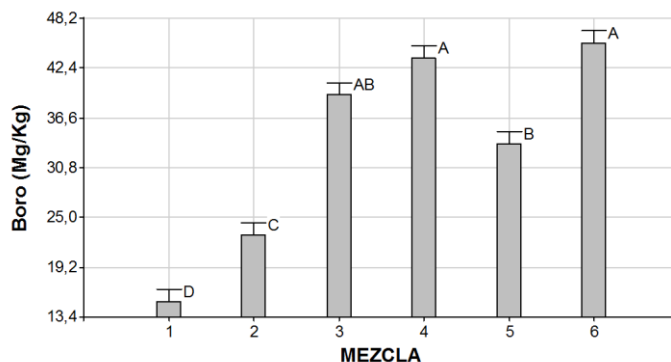


**Gráfica 26. Contenido de Hierro (mg/Kg).**  
(H=10.04, gl=5, p=0.074)

El contenido de manganeso, gráfica 30, en las mezclas 3 y 4 presenta el mayor contenido (406 y 400 mg/Kg) respectivamente, mientras que la mezcla 5 fue la que menor contenido de este elemento presento (243 mg/Kg). La gráfica 31 representa el contenido de boro, este elemento es mayor en la mezcla 6 (45,3 mg/Kg), mientras que es menor en la mezcla 1 (15,2 mg/Kg).

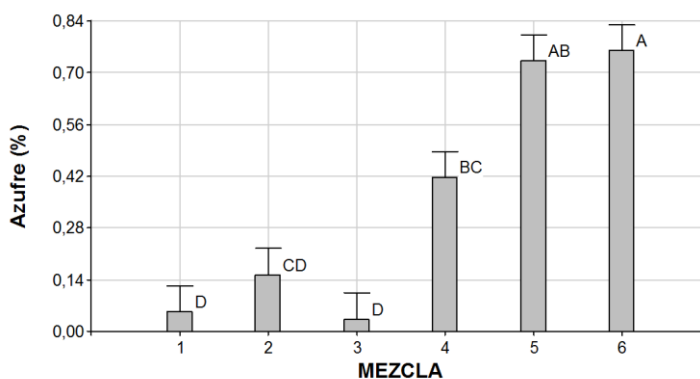


**Gráfica 29. Contenido de Manganeso (mg/Kg).**  
(H=15.67, gl=5, p=0.007)



**Gráfica 28. Contenido de Boro (mg/Kg).**  
(H=16.13, gl=5, p=0.006)

La gráfica 32 indica el contenido de azufre, la mezcla 6 presento el mayor contenido (0,76%), mientras que la mezcla 3 fue la que menor contenido de este elemento presento (0.03%).



Gráfica 30. Contenido de Azufre (%).  
(H=15.02, gl=5, p=0.010)

En general la mezcla 6 fue la que presento los valores más altos en la mayoría de los componentes químicos, (C/N, Nitrógeno, Potasio, Sodio, Calcio, Fosforo, Boro y azufre), seguida por la mezcla 4 en los componentes (C.I.C, Nitrógeno, Potasio, Sodio, Fosforo, Manganeso y Boro). Estas mezclas tiene algunas características en común, ambas están elaboradas con 2 sustratos de origen animal, porquinaza + bovinaza (Mezcla 6) y gallinaza + porquinaza (Mezcla 4). También un pH final entre 6 y 7, y temperaturas máximas de 50 °C en promedio en la etapa termófila. Estos parámetros pueden ser los indicados para elaborar un abono orgánico de muy buena calidad.

## 9.8 MICROORGANISMOS IDENTIFICADOS AL FINAL DEL PROCESO DE COMPOSTAJE

Cada una de las mezclas durante el proceso de compostaje integro un complejo ecosistema en el que diversas poblaciones de microorganismos degradaron la materia orgánica.

Estos microorganismos son diversos con respecto a la clase y el número de compuestos orgánicos o inorgánicos que pueden usar como fuente de carbono y energía, es así como inicialmente predominan las bacterias que son capaces de metabolizar compuestos orgánicos simples de fácil degradación, luego los hongos y actinomicetos característicos de la fase de maduración degradan compuestos orgánicos complejos menos biodegradables. Además el metabolismo microbiano

está influenciado por condiciones ambientales como pH, temperatura, humedad, oxígeno, nutrientes, sustancias tóxicas, etc., y las condiciones ambientales que pueden ser limitantes para un microorganismo pueden ser ideales para otro (Pérez, R., 2010).

### 9.8.1 Bacterias

Al finalizar el proceso de compostaje este material contiene un variado grupo de microorganismos los cuales proveen o mejoran la disponibilidad de nutrientes cuando se aplican a los cultivos, como lo indica Acuña (2003) bacterias como las *Nitrosomonas* las cuales se identificaron en forma leve en todas las muestras (Tabla 8) realizan la liberación de fosfatos insolubles a formas disponibles para las plantas mediante la producción de ácidos orgánicos como el ácido nítrico, otras como bacterias del género *Bacillus* presente en todas las mezclas en su mayoría de forma abundante, son microorganismos que durante su actividad metabólica son capaces de producir y liberar sustancias reguladoras de crecimiento para las plantas.

La tabla 8 nos muestra los géneros de bacterias identificadas al final del proceso de compostaje en el día 75. Dentro de estas se encuentran 2 géneros de actinobacterias (*Micrococcus* y *Streptomyces*) presentes en casi todas las mezclas de forma abundante especialmente el género *Streptomyces*, según Irola (2010), este género es el más abundante en la naturaleza y son capaces de degradar sustancias complejas como lignocelulosa y quitina o peptidoglicano contribuyendo notablemente a la mineralización de estos compuestos en las últimas etapas del compostaje, además, son los responsables del olor a tierra mojada característico del compost que es debido a la producción de un compuesto volátil denominado geosmina. Esta puede ser la razón por la cual se identificó en la mayoría de las mezclas en forma abundante.

Tabla 8. Géneros de bacterias identificadas en cada una de las mezclas al final del proceso (Día 75).

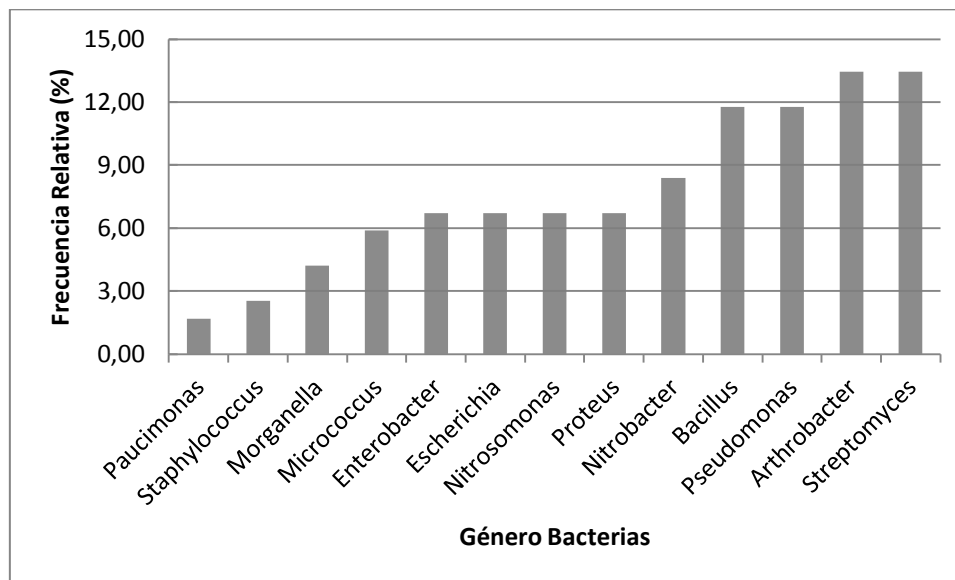
Género Bacterias	MEZCLAS					
	1	2	3	4	5	6
<i>Arthrobacter</i>	+++	+	+++	+++	+++	+++
<i>Bacillus</i>	+	+++	++	+++	++	+++
<i>Enterobacter</i>	-	++	+	++	++	+
<i>Escherichia</i>	++	++	+	++	-	+
<i>Micrococcus</i>	++	-	+++	+	+	-
<i>Morganella</i>	-	++	-	+	+	+
<i>Nitrobacter</i>	+++	-	-	+++	+	+++
<i>Nitrosomonas</i>	+	+	+	+++	+	+
<i>Paucimonas</i>	-	-	-	+	-	+
<i>Proteus</i>	++	++	-	++	+	+
<i>Pseudomonas</i>	+++	+	+	+++	+++	+++
<i>Staphylococcus</i>	-	-	-	+	+	+
<i>Streptomyces</i>	+	+++	+++	+++	+++	+++

(Ausente -), (Leve +), (Moderado ++), (Abundante +++)

Se identificaron 5 géneros de bacterias Gram positivas (*Arthrobacter*, *Bacillus*, *Micrococcus*, *Staphylococcus* y *Streptomyces*). De las cuales el género más abundante fue el de *Streptomyces* como lo indica la gráfica 33. La abundancia de este género se relaciona con lo mencionado por Storey et al., (2014), quienes indican que *Streptomyces* fue uno de los géneros dominantes en el compost maduro. Estos géneros también fueron identificados en compostaje utilizando residuos de café, banano, gallinaza y bovinaza (Escobar et al., 2012). Según Uribe (2003), durante la fase inicial del proceso donde las cantidades de carbohidratos asimilables son altas predominan las bacterias, y decrecen considerablemente en la fase de maduración debido a la reducción de sustratos disponibles conforme avanza el proceso de estabilización de la materia orgánica.

Se identificaron 8 géneros de bacterias Gram negativas (*Enterobacter*, *Escherichia*, *Morganella*, *Nitrobacter*, *Nitrosomonas*, *Paucimonas*, *Proteus* y *Pseudomonas*) de estas, 2 géneros *Nitrobacter*, y *Nitrosomonas* se asocian con la nitrificación, que forma parte del proceso de mineralización de la materia orgánica (Storey et al., 2014). También están presentes aunque en menor frecuencia como lo indica la gráfica 33, algunos géneros de enterobacterias como *Escherichia*, *Morganella* y *Proteus*, estas bacterias se encuentran en residuos de origen animal como el estiércol, y aunque participan en la degradación de la materia orgánica pueden ser considerados patógenos en un elevado número, estas presentan escasa viabilidad

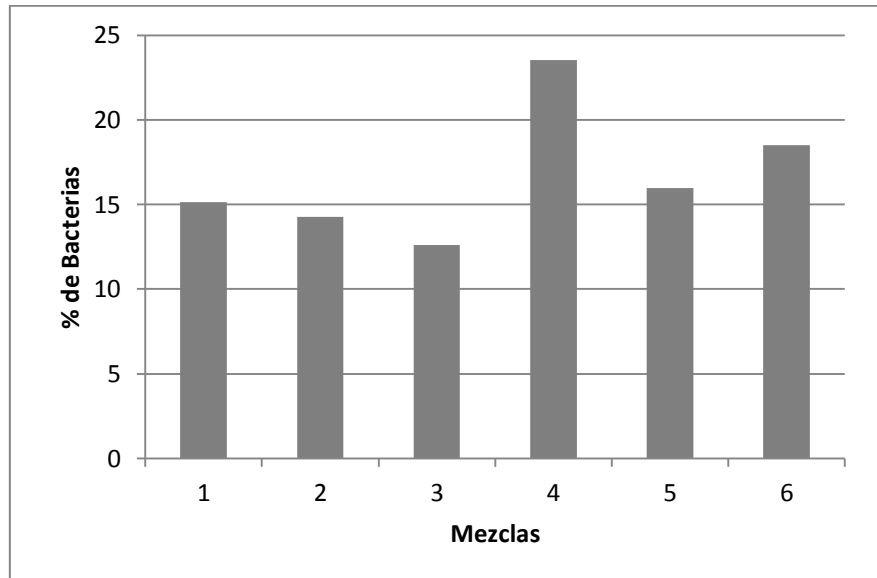
prolongada frente a elevadas temperaturas, es por eso no solo es necesario alcanzar altas temperaturas durante el proceso de compostaje, sino también que estos niveles se prolonguen cierto tiempo, esto se logró con la mayoría de las mezclas (M2, M3, M4, y M6) las cuales alcanzaron temperaturas de 50 a 55 °C durante más de 3 días. La presencia de estas bacterias en la fase de maduración puede ser un indicador de inmadurez del compost (Germer et al., 2010).



Gráfica 31. Frecuencia relativa de las bacterias identificadas en las seis mezclas.

Varios géneros de estas bacterias identificadas al final del proceso pueden encontrar aplicaciones como potenciales agentes de biocontrol de patógenos de las plantas transmitidas por el suelo, entre ellos bacterias del género *Bacillus* y *Pseudomonas* (Ryckeboer et al., 2003). En un estudio realizado por Vásquez (2010) fueron aislados e identificados estos mismos microorganismos en el proceso de biodegradación de la pulpa del café.

La gráfica 34 muestra el porcentaje de bacterias identificadas en cada mezcla, la mezcla 4 (M4) es la que presentó un número más elevado de microorganismos, superando en gran medida a las demás mezclas. Una de las razones por las cuales las mezclas 4 y 6 presentan el mayor porcentaje de bacterias se debe a la composición inicial de los sustratos los cuales tienen gran aporte de materia orgánica de origen animal como lo es la porquinaza y al gallinaza.



Gráfica 32. Porcentaje de bacterias identificadas en cada una de las mezclas al final del proceso de compostaje.

### 9.8.2 Hongos

La tabla 9 muestra los géneros de hongos identificados al final del proceso de compostaje en las 6 mezclas.

Se identificaron 21 géneros de hongos (*Alternaria*, *Aspergillus*, *Cephalophora*, *Cladosporium*, *Humicola*, *Macrosporium*, *Moniliella*, *Nigrospora*, *Penicillium*, *Phoma*, *Preussia*, *Rhizopus*, *Sordaria*, *Staphylotrichum*, *Sistotrema*, *Thielavia*, *Thysanophora*, *Trichoderma*, *Trichurus*, *Verticillium* y *Zygorhynchus*).

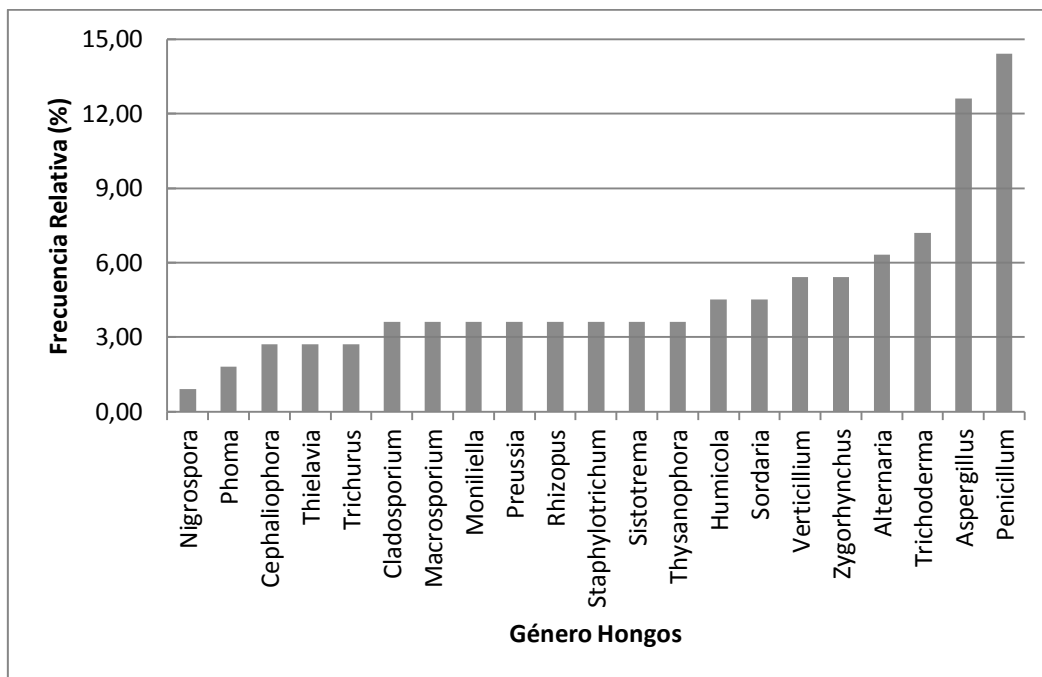
Tabla 9. Géneros de hongos identificados en cada una de las mezclas al final del proceso (Día 75).

Género Hongos	MEZCLAS					
	1	2	3	4	5	6
<i>Alternaria</i>	++	+	-	++	-	++
<i>Aspergillus</i>	++	+++	-	+++	+++	+++
<i>Cephalophora</i>	-	-	+	++	-	-
<i>Cladosporium</i>	-	+	-	+	-	++
<i>Humicola</i>	+	-	-	++	+	+
<i>Macrosporium</i>	-	++	-	++	-	-
<i>Moniliella</i>	-	-	-	+	++	+
<i>Nigrospora</i>	-	-	-		+	-
<i>Penicillium</i>	+++	++	+++	+++	++	+++
<i>Phoma</i>	-	+	-	+	-	-
<i>Preussia</i>	++	-	-	+	-	+
<i>Rhizopus</i>	-	-	-	++	+	+
<i>Sordaria</i>	-	++	-	+	-	++
<i>Staphylotrichum</i>	-	-	++	+	-	+
<i>Sistotrema</i>	-	-	+	+	++	-
<i>Thielavia</i>	+	-	-	+	+	-
<i>Thysanophora</i>	-	+	-	++	-	+
<i>Trichoderma</i>	-	++	-	+++	+	++
<i>Trichurus</i>	-	-	++	-	-	+
<i>Verticillium</i>	++	+	-	+	++	-
<i>Zygorhynchus</i>	+	+	-	++	-	++

(Ausente -), (Leve +), (Moderado ++), (Abundante +++)

En la gráfica 35 se observa que los géneros que tuvieron una mayor frecuencia relativa fueron *Penicillium* y *Aspergillus*, los cuales estaban presentes de forma abundante en casi todas las mezclas.





Gráfica 33. Frecuencia relativa de los hongos identificados en las seis mezclas.

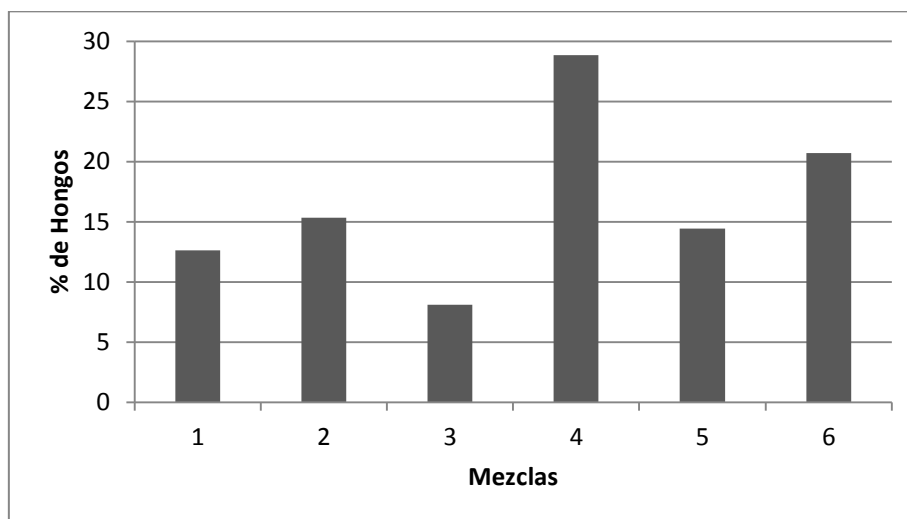
En un estudio presentado por Pérez, Y., (2010), indica que géneros de hongos como *Aspergillus* desempeñan un papel importante en la biorremediación de suelos contaminados por metales pesados como Cr y Ni; también reporta que el género *Penicillium* participa en la mineralización del fósforo orgánico del suelo, permitiendo la absorción de este mineral por las plantas, además tiene la habilidad de colonizar y degradar gran variedad de sustratos lo que contribuye a la fertilidad del suelo. Los altos porcentajes de este género identificados en las 6 mezclas determinan que éstos pueden tener un impacto muy positivo en el suelo.

El género *Alternaria* fue identificado de forma leve en 3 de las 6 mezclas (M1, M4 y M6), aunque no todas las especies de este hongo son patógenas y algunos se consideran agentes de biocontrol de plantas invasoras, además de intervenir en el proceso de descomposición de la pectina y lignina. Sin embargo, Pérez, Y., (2010) reporta que este género está presente como agente de pudrición en enfermedades post cosecha de una gran variedad de cultivos y como patógeno sobre varias especies de pastos y forrajes. Por lo anterior es importante determinar las especies de este hongo que están presentes en el compostaje ya que puede tener efectos desfavorables cuando sea utilizado como abono.

En otro estudio Sánchez (2009), determino la presencia de varias especies de *Aspergillus* como *A. flavus*, *A. fumigatus*, *A. niger* y *A. terreus*; de donde la primera

especie predomina en la fase inicial, la segunda en la fase termofílica y en la etapa final de estabilización están presentes todas menos *A. fumigatus*. Este es el género de hongos es el más común, identificado en todas las fases del proceso de compostaje.

La gráfica 36 muestra el porcentaje de bacterias identificadas en cada mezcla, al igual que los géneros de bacterias la mezcla 4 (M4) es la que presento un número más elevado de hongos al final del proceso de compostaje.



Gráfica 34. Porcentaje de hongos identificados en cada una de las mezclas al final del proceso de compostaje.

## 9.9 BIOENSAYO DE GERMINACIÓN

Se realizó un bioensayo de germinación en el cual se utilizaron dos especies que pueden ser sensibles a metabolitos fitotóxicos. Estas sustancias deben ser metabolizadas o inmovilizadas durante la fase de maduración del compostaje, generando un material estabilizado biológicamente y con una baja o nula fitotoxicidad. Se evaluó la sensibilidad de una leguminosa Alfalfa (*Medicago sativa*) y una gramínea Pasto Braquiaria (*Brachiaria decumbens*), a los extractos obtenidos de cada una de las mezclas que estaban en la fase de maduración del proceso de compostaje en el día 75.

### 9.9.1 Alfalfa (*Medicago sativa*)

La tabla 10 muestra los resultados en la prueba de germinación para las semillas de alfalfa sobre los extractos de las 6 mezclas en la etapa final del compostaje (75 días).

El índice de porcentaje de germinación relativa de semillas (PGR%) representa el porcentaje de semillas de alfalfa germinadas en los extractos de cada una de las mezclas con respecto a aquellas germinadas en el testigo (agua destilada). Las mezclas 1, 2 y 3 presentaron los valores más altos (95.4%, 95,4% y 100%), mientras que la mezcla 5 presento el valor más bajo (68%). En un estudio realizado por Varnero (2007), utilizando extractos de tres residuos agroindustriales en fase de maduración del proceso de compostaje utilizando semillas de rabanito y lechuga, obtuvo valores de PGR del 80% y 90% respectivamente; estos resultados son comparables con los obtenidos en el presente estudio en el cual cinco de las seis mezclas presentaron valores de PGR superiores al 80%, lo que puede indicar que estos residuos han finalizado la etapa de madurez.

El crecimiento relativo de la radícula (CRR%) representa el porcentaje de crecimiento de la radícula de las semillas de alfalfa en los extractos con respecto a las germinadas en el testigo. Las mezclas 3 y 4 presentaron los valores más altos (80.1 y 86.0%), los valores más bajos los presento las mezclas 1 y 2 (39.7 y 34.1%). En los resultados obtenidos por Varnero (2007), para este indicador, ninguna de las especies utilizadas supero el 80%, y asocia estos resultados a la presencia de metabolitos fitotóxicos moderados, que no impiden la germinación de las semillas, pero si limitan el desarrollo de la radícula; comparado con el parámetro anterior el CRR es un indicador mucho más sensible, ya que solo dos mezclas superaron el 80%.

El índice de germinación normalizado (IGN) indican una baja toxicidad (0 a - 0.18) para los extractos de las mezclas 1, 2, 3, 4 y 6, ya que estos no superaron el valor de -0.25 según la escala establecida por Bagur et al., (2011); solo el extracto de la mezcla 5 presento una moderada toxicidad (-0.31). En el estudio realizado por Rodríguez (2014) demostró que los extractos que tuvieron valores negativos para este índice (toxicidad moderada) presentaban valores altos de nitrógeno amoniacal, este produce fitotoxicidad en el proceso de germinación. Esto se relaciona con los resultados de la mezcla 5 en la cual los sustratos utilizados son gallinaza y bovinaza los cuales contienen altos niveles de nitrógeno orgánico, el cual es transformado durante el proceso de compostaje por la intervención de bacterias de los géneros *nitrosomonas* y *nitrobacter*, estas fueron identificadas de forma leve al final del

proceso en esta mezcla (tabla 8), lo que puede indicar un proceso de oxidación incompleta del nitrógeno lo cual afecto la germinación de las semillas.

Los valores obtenidos para el índice de elongación radical (IER) muestran en las mezclas 1, 4, 3, y 6 una baja toxicidad; para la mezcla 5 el valor indica una toxicidad moderada y para la muestra 2 se presenta una alta toxicidad, ya que esta última fue la que más inhibió la longitud de la radícula de las semillas germinadas de alfalfa. Rodríguez (2014) asocio estos índices de toxicidad a valores altos de amoníaco, especie química nitrogenada que produce fitotoxicidad en el proceso de germinación, lo cual indicaría los valores negativos del IGN en las muestras. Estos índices de toxicidad también pueden estar asociados a otro tipo de sustancias. Zubillaga et al., (2008) mencionan que muchas de las materias primas utilizadas para la elaboración del compost contienen metales pesados como algunos estiércoles, o contienen sales solubles como la gallinaza, también suelen ser ricos en proteínas y formas nitrogenadas de bajo peso molecular, como urea y ácido úrico. Por ello, estos productos liberan importantes cantidades de amoníaco cuando se compostan.

El valor obtenido para el índice de germinación en la tabla 10 indica que las mezclas 1, 2 y 5 presentan valores inferiores al 50% (37.8%, 32.5% y 33.7%) respectivamente, lo que indica un nivel alto de fitotoxicidad; las mezclas 6 y 4 tienen índices de germinación entre el 50% al 80% (78.7% y 70.4%), indicando un nivel moderado de fitotoxicidad; la mezcla 3 fue la única que presento un nivel mayor al 80% (80.1%), siendo esta la que se definiría como un compost maduro.

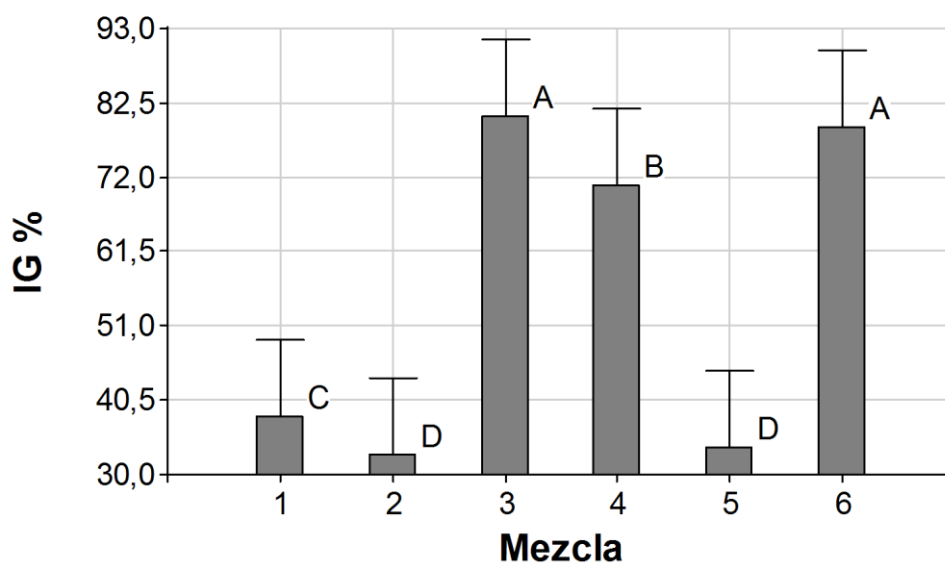
**Tabla 10. Resultados de los índices evaluados en cada mezcla para las semillas de Alfalfa.**

ALFALFA					
MEZCLA	PGR %	CRR %	IG %	IGN	IER
1	95,45	39,7	37,89	-0,04	-0,06
2	95,45	34,14	32,58	-0,04	-0,65
3	100	80,13	80,13	0	-0,19
4	81,81	86,06	70,4	-0,18	-0,13
5	68,18	49,47	33,72	-0,31	-0,5
6	100	78,74	78,74	0	-0,21

Resultados con valores del IG (Índice de Germinación) inferiores al 50% indican una alta fitotoxicidad; IG entre 50% y 80% moderada, valores superiores al 80% no presentan fitotoxicidad. Cuando el IG supere el valor el 100%, el compost se considera como fitoestimulante (Zucconi et al., 1981). Índices IGN (Índice de Germinación Normalizado) e IER (Índice de Elongación Radical) de 0 a -25 indican baja toxicidad, de -0.25 a -0.5 moderada toxicidad, de -0.5 a -0.75 muy toxico, de -0.75 a -1.0 muy alta toxicidad y valores > a 0 Indican crecimiento de la radícula (Bagur et al., 2011).

En la gráfica 37 se representa el índice de germinación para las semillas de alfalfa en los extractos de las 6 mezclas, haciendo una comparación estadística de los resultados obtenidos. Se observa que las mezclas con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ ). Según estudios como el de Varnero (2007) las mezclas que presentan índices de germinación menores al 50%, puede deberse a que estos residuos no han finalizado la etapa de madurez y contienen sustancias fitotóxicas que no se han metabolizado completamente. Este mismo autor indica en los resultados de los bioensayos a tres residuos un alto nivel de fitotoxicidad utilizando semillas de rabanito, en cambio cuando utilizo semillas de lechuga con estos mismos residuos el nivel de fitotoxicidad fue menor. Esto indicaría que algunas semillas son más sensibles a ciertas sustancias fitotóxicas presentes en las mezclas.

También otros autores como Zucconi et al., (1981) y Tiquia (2000) determinaron que el índice de germinación es el indicador más completo para saber si un compost se encuentra en etapa de maduración, según los resultados esto indicaría que la mezcla 3 y la 6 son las más maduras y podrían tener mejores resultados al ser utilizadas como abono orgánico para leguminosas como la alfalfa.



Gráfica 35. Índice de Germinación % (IG) de las semillas de Alfalfa en cada uno de los extractos.

### 9.9.2 Pasto Braquiaria (*Brachiaria decumbens*)

En la tabla 11 se muestran los resultados obtenidos en el bioensayo de germinación para las semillas de Braquiaria en las 6 mezclas. Para el índice de porcentaje de germinación relativa de semillas (PGR%), las mezclas 6 y 3 presentaron los valores más altos (37.5% y 25%); la mezcla 1 fue la que presentó el valor más bajo (6.2%) siendo contrario a los resultados obtenidos en las semillas de Alfalfa para esta misma mezcla, indicando posiblemente que las semillas de Braquiaria son más sensibles a compuestos fitotóxicos.

Para el crecimiento relativo de la radícula (CRR%), la mezcla 6 presentó el valor más bajo (75.3%), mientras que las demás mezclas presentaron valores que superaron el 100% y hasta el 200%, esto indica que aunque pocas semillas germinaron en los extractos, las que lo hicieron presentaron un crecimiento radicular mayor que las germinadas en el testigo.

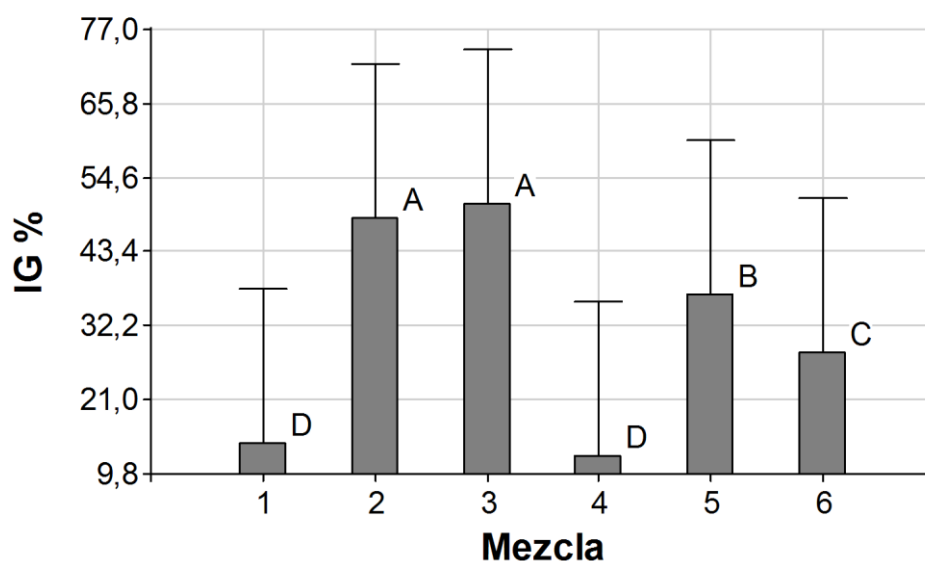
En cuanto al índice de germinación normalizado (IGN), según los valores obtenidos todas las mezclas presentarían una muy alta toxicidad por presentar valores cercanos o que superan el  $(-0,75)$ , ya que un número muy bajo de semillas de Braquiaria germinó en los extractos. Para el índice de elongación radical (IER) solo la mezcla 6 presentó un valor negativo  $(-0.24)$  que indica una baja toxicidad; las demás mezclas presentan valores iguales o superiores a cero, lo que puede establecer que estas mezclas tienen un efecto fitoestimulante sobre el crecimiento radicular de las semillas de pasto Braquiaria. En el estudio realizado por Rodríguez (2014) los valores de (IGN), presentados por 3 mezclas presentan una toxicidad moderada con inhibición en la germinación de semillas, mientras que los valores positivos del (IER) indican un fenómeno de hormesis para la elongación radical en estas mismas mezclas. Este es un fenómeno de respuesta a dosis caracterizado por una estimulación por dosis bajas y una inhibición para dosis altas.

**Tabla 11. Resultados de los índices evaluados en cada mezcla para las semillas de Brachiaria.**

BRACHIARIA					
MEZCLA	PGR %	CRR %	IG %	IGN	IER
1	6,25	233,3	14,58	-0,93	1,3
2	18,75	260	48,75	-0,81	1,6
3	25	203,3	50,82	-0,75	1,03
4	12,5	100	12,5	-0,87	0
5	18,75	197,3	36,9	-0,81	0,9
6	37,5	75,3	28,23	-0,62	-0,24

Resultados con valores del IG (Índice de Germinación) inferiores al 50% indican una alta fitotoxicidad; IG entre 50% y 80% moderada, valores superiores al 80% no presentan fitotoxicidad. Cuando el IG supere el valor el 100%, el compost se considera como fitoestimulante (Zucconi et al., 1981). Índices IGN (Índice de Germinación Normalizado) e IER (Índice de Elongación Radical) de 0 a -25 indican baja toxicidad, de -0.25 a -0.5 moderada toxicidad, de -0.5 a -0.75 muy toxico, de -0.75 a -1.0 muy alta toxicidad y valores > a 0 Indican crecimiento de la radícula (Bagur et al., 2011).

Por último el índice de Germinación % (IG) de las semillas de Brachiaria en cada uno de los extractos se muestra en la gráfica 38. La mezcla 3 presento un valor de (50,8%) indicando una fitotoxicidad moderada, aunque no presenta diferencia estadística significativa con la mezcla 2 que presento un valor de (48.7%); valores por debajo del 50%, como los de las mezclas 2, 5, 6, 1 y 4 indican una alta fitotoxicidad en los extractos según Zucconi et al., (1981).

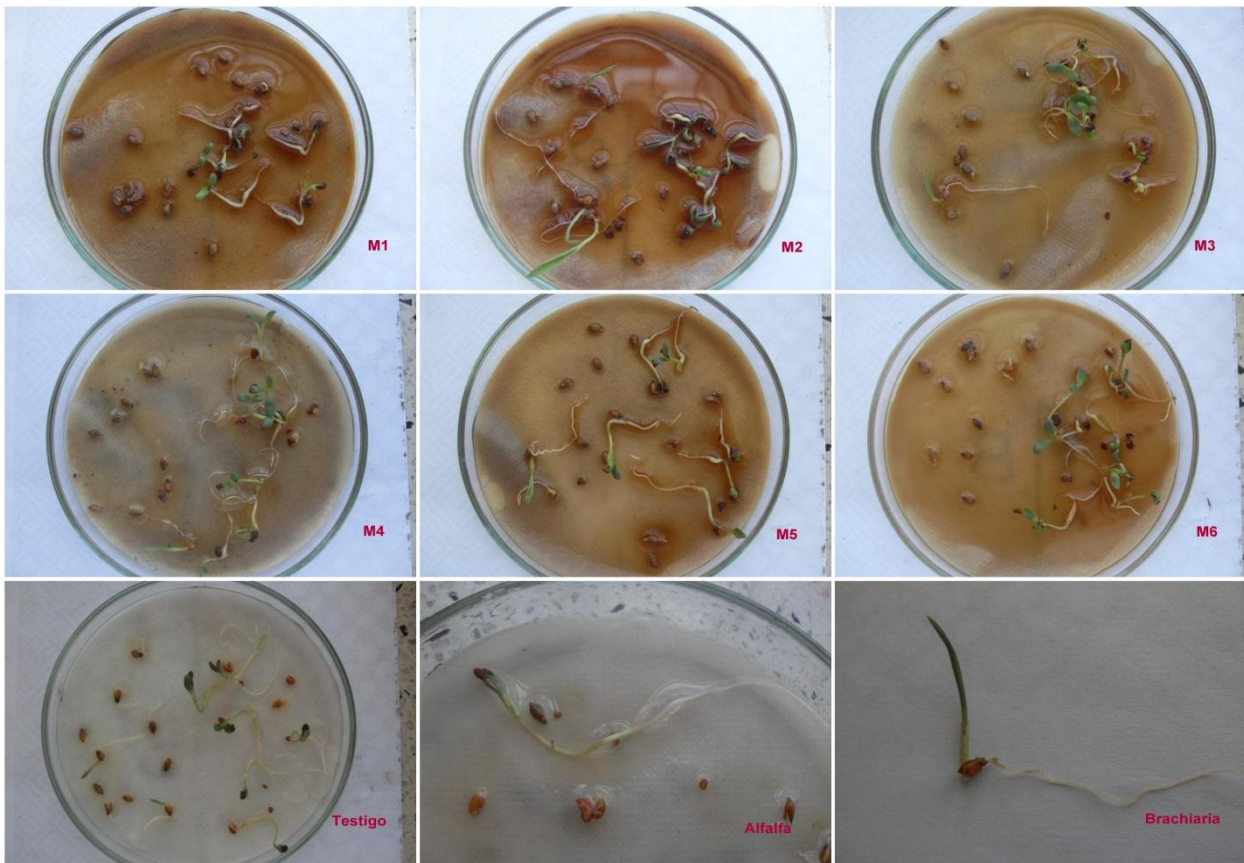


**Gráfica 36. Índice de Germinación % (IG) de las semillas de Brachiaria para cada uno de los extractos.**

En general los resultados obtenidos para la prueba de germinación con semillas de pasto *Brachiaria* indican un muy bajo porcentaje de germinación, pero las semillas que germinaron presentaron una longitud mayor de radícula en comparación con las semillas germinadas en agua destilada, esto puede indicar que este bajo porcentaje se debió quizás a otro factor y no a la presencia de sustancias fitotóxicas en el material. Lo anterior se relaciona con lo mencionado en el estudio de Martínez (2013), en el cual determino que las semillas de los pastos *Brachiaria brizanta* y *Marandu* presentan porcentajes muy bajos de germinación o latencia, que es un estado en el cual una semilla viable no germina aunque se coloque en condiciones óptimas para hacerlo, según este autor esta es una propiedad adaptativa que posee los pastos y se puede presentar por la presencia de un embrión inmaduro o que la cubierta seminal sea impermeable al agua, por lo tanto recomienda algunos procedimientos físicos para superar este estado como realizar una inmersión de las semillas de pastos en agua durante periodos de 12 a 24 horas.

El aporte adecuado de nutrientes y elementos químicos presentes en las mezclas puede determinar la respuesta positiva de las semillas de *Brachiaria* en cuanto a la longitud radicular presentada con los extractos. Sobre esto Navajas (2011) menciona que en un estudio realizado en pasto *Brachiaria* determino que en las primeras etapas del desarrollo de este pasto es muy importante el aporte de elementos como el potasio (K) que después del nitrógeno es el nutriente más extraído por las plantas para los procesos fisiológicos y bioquímicos; el boro (B) que está involucrado en los procesos de división celular en la primeras etapas de crecimiento de las plantas; y otros como el cobre (Cu) y el zinc (Zn). Indicando la presencia de estos elementos en las mezclas y su efecto positivo o fitoestimulante sobre las semillas de *Brachiaria*.





**Figura 15. Germinación de semillas en los extractos de cada mezcla y testigo (agua destilada) al día cinco del bioensayo (Fuente: Autores, 2014).**

La figura 15 muestra los resultados del bioensayo de germinación en el día 5 para los diferentes extractos (M1, M2, M3, M4, M5 y M6) y el testigo. También se muestra el crecimiento radicular de las semillas utilizadas Alfalfa y Brachiaria. Es muy importante determinar si un compost está maduro, ya que de lo contrario puede presentar una alta actividad de microorganismos, el cual al ser utilizado como abono puede reducir la concentración de oxígeno e inmovilizar el nitrógeno causando deficiencias de este elemento en las plantas (Zucconi et al., 1981). Los mejores resultados en el bioensayo de germinación se presentaron en las semillas de alfalfa con las mezclas 3 y 6, ya que estas mezclas presentaron unos índices de germinación entre el 78% y el 80% indicando una fitotoxicidad moderada para esta especie forrajera.

## 10. CONCLUSIONES

Las mezclas 6 y 4 son las que presentaron mejores parámetros de calidad tanto físicos, químicos y biológicos. Esto se asocia principalmente a la utilización de dos tipos de estiércol en su elaboración (porquinaza + bovinaza) y (gallinaza + porquinaza), los cuales aportan a las mezclas gran variedad de macro y microelementos (K, Na, Ca, Mg, P, y Cu, Zn, Mn), debido a que el alimento que se le suministra a estas especies tiene un buen aporte de proteínas y minerales.

La variable que más influye sobre la concentración de UFC/G de hongos y bacterias es la temperatura ya que si no se está dentro de los rangos óptimos (35 °C a 60 °C), detiene o inhibe el desarrollo de los microorganismos afectando en forma directa como en la mezcla 1 la descomposición de los residuos.

Al finalizar el proceso de compostaje se identificaron géneros de microorganismos los cuales tienen una gran importancia en la actividad biológica del suelo y están relacionados con la nutrición vegetal, estos fueron bacterias como *Bacillus*, y *Arthrobacter*, hongos como *Penicillium* y *Aspergillus*, y actinobacterias como *Micrococcus* y *Streptomyces*.

El tratamiento que presentó más diversidad en cuanto a la identificación microorganismos al finalizar el proceso fue la mezcla 4, seguida en proporción de la mezcla 6 en cuanto a bacterias y hongos. Las actinobacterias estuvieron presentes de forma moderada a abundante en las seis mezclas.

Los resultados del bioensayo indican que la mezcla 6 presentó los mejores Índices de Germinación sobre las semillas de Alfalfa; para el caso de la *Brachiaria* los resultados mostraron un bajo Índice de Germinación, pero se obtuvo valores positivos del (IER) en estas semillas, lo que puede indicar que las mezclas tienen un efecto fitoestimulante.

De acuerdo con los resultados de los indicadores químicos (pH, C/N, Materia orgánica, N, K, Na, Ca, P, B), físicos (color y olor) y microbiológicos (bacterias, hongos y actinobacterias), se puede determinar que estos se correlacionan con los resultados obtenidos en la prueba de germinación.

## 11. RECOMENDACIONES

Se recomienda no incorporar materiales con un alto grado de humedad, que como en el caso del estiércol es mejor dejarlo secar por unos días antes de su utilización, ya que de no ser así cuando se utiliza en fresco puede causar una putrefacción de la mezcla por el poco ingreso de oxígeno, originando malos olores y abonos de baja calidad.

Establecer pruebas sencillas para determinar la calidad final del compost que puedan realizar los campesinos a nivel de finca, y que sean un indicador confiable de la madurez del producto. Estas pueden ser el olor característico similar al de la tierra húmeda, el color marrón oscuro o negro, y además una prueba de germinación la cual consiste en colocar en un recipiente una delgada capa de la mezcla humedecerla, colocar un determinado número de semillas las cuales se tapan con una servilleta húmeda, aproximadamente una semana después determinar el porcentaje de semillas germinadas, teniendo en cuenta un tratamiento control sin ningún tipo de mezcla solo con las servilletas húmedas encima y debajo.

Hacer pruebas en campo para determinar de forma más confiable la respuesta biológica de las plantas cuando se aplica este tipo de abonos orgánicos, y que este tipo alternativas puedan ser implementadas en los sistemas agropecuarios de la región, como una opción de recuperación de suelos degradados y presente mejores ventajas en los agrosistemas de forrajes, ya que el compost tiene una liberación lenta de nutrientes y además aporta microorganismos benéficos para el suelo.

## 12. BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, O. (2003). El uso de biofertilizantes en la agricultura. Centro de Investigaciones Agronomicas. Costa Rica. 67-75.
- Altieri, M., y Nicholls, C. (2000). Agroecología. Teoría y práctica para una agricultura sustentable. México. 13 – 43.
- Angulo, J. (2012). Nutritional evaluation of fruit and vegetable waste as feedstuff for diets of lactating Holstein cows. Universidad de Antioquia. Colombia. 95, S210-S214.
- Bagur, M., Estepa, C., Martín, F., & Morales, S. (2011). Toxicity assessment using *Lactuca sativa* L. bioassay of the metal(loid)s As, Cu, Mn, Pb and Zn in soluble-in-water saturated soil extracts from an abandoned mining site. Universidad de Granada. España. 11(2), 281-289.
- Barker, X., Doane, T., & Horwath, W. (2014). Role of green waste compost in the production of N<sub>2</sub>O from agricultural soils. University of California Davis. USA. 83, 57-65.
- Bedada, W., Karlun, E., Lemenih, M., & Tolera, M. (2014). Long-term addition of compost and NP fertilizer increases crop yield and improves soil quality in experiments on smallholder farms. University of Agricultural Sciences. Ethiopia. 195, 193-201.
- Cariello, M., Castañeda, L., Riobo, I., y González, J. (2007). Inoculante de microorganismos endógenos para acelerar el proceso compostaje de residuos sólidos urbanos. Universidad Nacional de Entre Ríos. Argentina. 7(3), 26-37.
- Canet, R. (2007). Uso de la materia orgánica en la agricultura. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias. España. 11-17.
- Castrillón, O., Bedoya, O., y Montoya, D. (2006). Efecto del pH sobre el crecimiento de microorganismos durante la etapa de maduración en pilas estáticas de compost. Corporación Universitaria Lasallista. Colombia. 1(2): 87 – 98.
- Chroni, C., Kyriacou, A., Georgaki, I., Manios, T., Kotsou, M., & Lasaridi, K. (2009). Microbial characterization during composting of biowaste. Greece. 1520–1525
- Costa, F., García, C., Hernández, T., y Polo, A. (1991). Residuos Orgánicos Urbanos. Manejo y Utilización. Centro de Edafología y Biología Aplicada. España.
- Cruz, J. (2009). Valoración agronómica de compost y vermicompost de alperujos mezclados con otros residuos agrícolas, efecto como enmiendas sólidas y líquidas. Universidad Politécnica De Valencia. España. 8 – 56.
- Defrieri, R. (2005). Utilización de parámetros químicos y microbiológicos como criterios de madurez durante el proceso de compostaje. Facultad de Agronomía. UBA. Buenos Aires. Argentina 22(1): 25-31.
- Doon, S. (2014). Improved soil fertility from compost amendment increases root growth and reinforcement of surface soil on slopes. The James Hutton Institute. England. 458–465.

Durán, L., y Henríquez, C. (2007). Caracterización química, física y microbiológica de vermicompostes producidos a partir de cinco sustratos orgánicos. Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 31(1): 41-51.

Escobar, N., Delgado, J., y Romero, N. (2012). Identificación de poblaciones microbianas en compost de residuos orgánicos de fincas cafeteras de Cundinamarca. Universidad de Cundinamarca. Colombia. *bol.cient.mus.hist.nat.* 16 (1): 75 – 88.

Gaind, S. (2014). Effect of fungal consortium and animal manure amendments on phosphorus fractions of paddy-straw compost. Division of Microbiology, Indian Agricultural Research Institute. India. 90-97.

Germer, J., Yongha, M., Schoeffler, M., & Amoah, P. (2010). Temperature and deactivation of microbial faecal indicators during small scale co-composting of faecal matter. University of Hohenheim. Germany. 185–191.

Guenon, R., & Gros, R. (2014). Increasing the maturity of compost used affects the soil chemical properties and the stability of microbial activity along a mediterranean post-fire chronosequence. Institut Mediterranéen. France. 1-10.

Hernández, S., y Rodríguez, O. (2013). Calidad nutrimental de cuatro abonos orgánicos producidos a partir de residuos vegetales y pecuarios. México. 31: 35-46.

Illera-Vives, M., Seoane L., & Brito, L. (2015). Evaluation of compost from seaweed and fish waste as a fertilizer for horticultural use. Universidad Santiago de Compostela. España. 101–107.

InfoStat. Versión 2014. Grupo InfoStat, FCA. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

INTEC. Corporación de Investigación Tecnológica de Chile. (1999). Manual de compostaje. Chile. 82.

Irola, E. (2010). Microbiología: *Streptomyces*. Instituto tecnológico superior de Champotón. México. 1-4.

Kirk, J. (2004). Methods of studying soil microbial diversity. Wastewater Technology Center, Burlington. Ontario, Canadá. (58): 169-188.

Koneman, E. (2001). Diagnóstico Microbiológico: Texto y Atlas a Color. Quinta Edición. *Médica Panamericana*. Argentina. 10-16.

Liang, C., Das, K., & McClendon, R. (2003). The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. Department of Biological and Agricultural Engineering. University of Georgia. USA. 76:275-278.

López, D. y Llorente, M. (2011). La agroecología: hacia un nuevo modelo agrario. Sistema agroalimentario, producción ecológica y consumo responsable. España, 7–42.

MacFaddin, J. (2000). Biochemical tests for identification of medical bacteria, 3rd Ed. Lippincott.

- MacGregor, S., Miller, K., & Finstein, M. (1981). Composting process control based on interaction between microbial heat output and temperature. Department of Environmental Science. Rutgers University. New Jersey. USA. 41(6), 1321-1330.
- Madigan, M., Martinko, J., & Parker, J. (2000). Brock Biology of microorganisms. Pearson-Prentice Hall. España. 1012.
- Manacorda, A., Cuadros, D., y Álvarez, A. (2007). Manual práctico de microbiología - Tomo I: Microbiología Ambiental. <http://lessauncoma.edu.ar/catedras>.
- Martínez, J. (2013). Estrategias de escarificación para eliminar la latencia en semillas de *Cenchrus ciliaris* L. y *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México. 1263-1272.
- Martínez, R., Miglierina, A., Luna, M., Konijnenburg, A., y Pellejero, G. (2008). Evaluación del compostaje de los residuos del procesamiento de la cebolla. Universidad Nacional del Comahue. Argentina. (9), 3.
- Matheus, L., Graterol, B., Simancas, G., y Fernández, O. (2007). Eficiencia agronómica relativa de tres abonos orgánicos (vermicompost, compost, y gallinaza) en plantas de maíz (*Zea mays* L). Laboratorio de Investigación de Suelos. Trujillo. Venezuela. 13: 27-38.
- Memon, M., Miran, S., & Jamro, G. (2012). Comparative evaluation of organic wastes for improving maize growth and NPK content. Department of Soil Science. Sindh Agriculture University. Pakistan. 11(39): 9343-9349.
- Morales, G., y Aristizabal, O. (2007). Estudio de factibilidad técnico financiero de abono orgánico a partir de los desechos orgánicos de la plaza de corabastos de Bogotá. Universidad de la Salle. Colombia. 1-29.
- Moreno, J., y Moral, R. (2008). Compostaje. Mundi-Prensa. Barcelona España. 570 p.
- Muñoz, J. (2005). Compostaje en pescador, cauca: tecnología apropiada para el manejo de residuos orgánicos y su contribución a la solución de problemas medioambientales. Universidad Nacional de Colombia. 30-38.
- Murray, P. (1999). Manual of clinical microbiology. American Society for Microbiology. 12-26.
- Navajas, V. (2011). Efecto de la fertilización sobre la producción de biomasa y la absorción de nutrientes en *Brachiaria decumbens* y *Brachiaria híbrido* Mulato. Universidad Nacional de Colombia. Facultad Agronomía. Colombia. 40-64.
- Nieto, A. (2002). El uso de compostas como alternativa ecológica para la producción sostenible del chile (*capsicum annum* l.) en zonas áridas. México. 27(8): 417- 421.
- Norma Técnica Colombiana 4491-2. (2004). Suspensión inicial y diluciones decimales para análisis microbiológico.
- Norma Técnica Colombiana 5167. (2004). Productos para la industria agrícola, productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo.

Ochoa, A., y Lemus, D. (2008). Curso básico de agroecología. Plan de capacitación. Sistema departamental de áreas naturales protegidas. Universidad Tecnológica De Pereira. Colombia.

Oviedo, R., Marmolejo, L., y Torres, P. (2012). Perspectivas de aplicación del compostaje de biorresiduos provenientes de residuos sólidos municipales. Universidad de Medellín. Colombia. 11(20), 67 – 76.

Penagos, J., Adarraga, J., Aguas, D., y Molina, E. (2011). Reducción de los Residuos Sólidos Orgánicos en Colombia por medio del Compostaje Líquido. Universidad del Norte. Colombia. 11, 37- 44.

Pérez, R., Pérez, A., y Vertel, M. (2010). Caracterización nutricional, fisicoquímica y microbiológica de tres abonos orgánicos para uso en agroecosistemas de pasturas en la subregión Sabanas del departamento de Sucre. Colombia. 5: 27-37.

Pérez, Y., Rebollido, R., y Martínez, J. (2010). Aislamiento e identificación de hongos en compost elaborado a partir de residuos sólidos urbanos. Universidad de la Habana. Cuba. 38(1), 1-7.

Picado, J., y Añasco, A. (2005). Agricultura orgánica. En Preparación y uso de abono orgánico sólidos y líquidos. Costa Rica.

Plan de Desarrollo Municipal 2012 – 2015. (2012). Alcaldía de Fusagasugá. Oficina de planeación. Colombia.

Price, G., Zeng, J., & Arnold, P. (2013). Influence of agricultural wastes and a finished compost on the decomposition of slaughterhouse waste composts. Faculty of Agriculture. Dalhousie University. Canada. 130, 248-254.

Puerta, S. (2004). Los residuos sólidos municipales como acondicionadores de suelos. Corporación Universitaria Lasallista. Colombia. 1(1), 56- 65.

Restrepo, J., Angel, D., y Prager, M. (2000). Actualización Profesional en Manejo de Recursos Naturales, Agricultura Sostenible y Pobreza Rural Agroecología. Universidad Nacional de Colombia. 1 – 84.

Restrepo, J. (2001). Elaboración de abonos orgánicos fermentados y biofertilizantes. San Jose, Costa Rica.

Rivera, C. y León, T. (2013). Anotaciones para una historia de la Agroecología en Colombia. 16.

Rodríguez, A. (2014). Índices de germinación y elongación radical de *lactuca sativa* en el biomonitoreo de la calidad del agua del río Chalmá. Instituto Politécnico Nacional. México. 30(3), 307-316.

Román, P., Martínez, M., y Pantoja, A. (2013). Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Oficina Regional para América Latina y el Caribe. 13-43.

Ruggieri, L., Gea, T., Artola, A., & Sanchez, A., (2008). Influence of different co-substrates biochemical composition on raw sludge co-composting. *Biodegradation*. 403–415.

Ryckeboer, J., Mergaert, J., & Vaes, K. (2003). A survey of bacteria and fungi occurring during composting and self-heating processes. *Annals of Microbiology*. Belgium. 53(4), 349-410

Sánchez, M. (2001). Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. 78(3), 301-308

Sánchez, T. (2009). Caracterización microbiológica del proceso de compostaje a partir de residuos azucareros. *Universidad Central*. Venezuela. 59(3), 309-316.

Santamaria, S. (2001). Dinámica y relaciones de microorganismos, C-Orgánico y N-Total durante el composteo y vermicomposteo. *Especialidad de Edafología*. México. 35: 377-384.

Silva, M. (2014). Almpoving the nutrient content of sheep bedding compost by adding cattle manure, Research group on Water Resources and Environmental Sanitation. Western Parana State University. Brazil.

Silva, M., Elisabete, F., Lemos, L., & Bastos, M. (2012). Recovery of humic-like susbtances from low quality composts. *Universidad Técnica de Lisboa*. Portugal.

Soliva, M., y López, M. (2004). Calidad del compost: Influencia del tipo de materiales tratados y de las condiciones del proceso. *Escola Superior d'Agricultura de Barcelona*. España. 1-17.

Storey, S., Chualain, D., Doyle, O., Clipson, N., & Doyle, E. (2014). Comparison of bacterial succession in green waste composts amended with inorganic fertiliser and wastewater treatment plant sludge. *Science Centre West*. University College Dublin. Ireland. 71–77.

Suler, D., & Finstein, S. (1977). Effect of Temperature, Aeration, and Moisture on CO2 Formation in Bench-Scale, Continuously Thermophilic Composting of Solid Waste. *Appl. Environ. Microbiol.* 33(2), 345-350.

Sundberg, C. (2005). Improving Compost Process Efficiency by Controlling Aeration, Temperature and pH. *University Uppsala*. Suecia. 103.

Sztern, D. y Pravia, M. (2008). Manual para la elaboración de compost. Bases conceptuales y procedimientos. *Uruguay*. 69.

Tiquia, S. (2000). Evaluating toxicity of pig manure from the pigeon-litter system. Department of Food, Agricultural, and Biological Engineering. *The Ohio State University*. U.S.A. 1-23.

Tiquia, S. (2005). Microbiological parameters as indicators of compost maturity. Department of Natural Sciences. *University of Michigan*. USA. 99(4), 816-828.

Torrentó, M. (2011). Materia orgánica y compostaje. Control de la calidad y del proceso. *Jornada Técnica: Fertilidad y Calidad del Suelo*. Instituto Canario de Investigaciones Agrarias. Chile. 19.

Turner, C., & Williams, A. (2005). Inferring pathogen inactivation from the surface temperatures of compost heaps, *Bioresour. Technology*. 96(5), 521-529.



Valderrama, A. (2013). Biodegradación de residuos sólidos agropecuarios y uso del bioabono como acondicionador del suelo. Universidad pontificia bolivariana. Colombia. 54.

Vásquez, M. (2010). Optimización del proceso de compostaje de productos post-cosecha (pulpa) del café con la aplicación de microorganismos nativos. Universidad de Santander. Colombia. 41.

Winkler Ltda. (2014). Equipos de Laboratorio. Chile.

Zubillaga, M., Branzini, A., y Lavado, R. (2008). Problemas de Fitotoxicidad en compost. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Argentina. (9), 1.

Zucconi, F., Forte, M., Monaco, A., & Bertoldi, M. (1981). Biological evaluation of compost maturity. Italia. 1-4.

Zucconi, F., & Bertoldi, M. (1987). Specifications for solid waste compost. Italia. 1-3.

## ANEXOS

### 1. Relación C/N de algunos materiales usados en el compostaje.

Nivel alto de nitrógeno 1:1 – 24:1		C:N equilibrado 25:1 – 40:1		Nivel alto de carbono 41:1 – 1000:1	
Material	C:N	Material	C:N	Material	C:N
Purines frescos	5	Estiércol vacuno	25:1	Hierba recién cortada	43:1
Gallinaza pura	7:1	Hojas de frijol	27:1	Hojas de árbol	47:1
Estiércol porcino	10:1	Crotalaria	27:1	Paja de caña de azúcar	49:1
Desperdicios de cocina	14:1	Pulpa de café	29:1	Basura urbana fresca	61:1
Gallinaza camada	18:1	Estiércol ovino/caprino	32:1	Cascarilla de arroz	66:1
		Hojas de plátano	32:1	Paja de arroz	77:1
		Restos de hortalizas	37:1	Hierba seca (gramíneas)	81:1
		Hojas de café	38:1	Bagazo de caña de azúcar	104:1
		Restos de poda	44:1	Mazorca de maíz	117:1
				Paja de maíz	312:1
				Aserín	638:1

Fuente: Román et al., (2013)

### 2. Prueba de Kruskal Wallis para variable C.I.C

Variable	MEZCLA	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
C.I.C	1	3	29,67	0,58	30,00	13,08	0,0143
C.I.C	2	3	30,00	0,00	30,00		
C.I.C	3	3	28,00	1,00	28,00		
C.I.C	4	3	30,67	0,58	31,00		
C.I.C	5	3	31,67	0,58	32,00		
C.I.C	6	3	30,67	0,58	31,00		

Trat. Ranks			
3	2,17	A	
1	6,50	A	B
2	8,00	A	B C
6	12,00		B C
4	12,00		B C
5	16,33		C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

### 3. Prueba de Kruskal Wallis para el pH en las seis mezclas

Variable	mezcla	N	Medias	D.E.	Medianas	gl	H	p
pH	1	6	7,52	0,66	7,67	5	16,34	
	0,0058							
pH	2	6	8,17	1,04	8,72			
pH	3	6	6,55	0,63	6,35			
pH	4	6	7,22	0,69	7,10			
pH	5	6	8,45	0,97	8,90			
pH	6	6	6,88	0,52	6,68			

Trat. Ranks			
3	7,17	A	
6	13,25	A	B
4	17,00	A	B C
1	20,00		B C
2	25,33		C
5	28,25		C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

### 4. Análisis de la varianza para el Índice de Germinación (IG%) de las semillas de Alfalfa

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
IG %	18	0,66	0,52	33,47

#### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	8121,87	5	1624,37	4,63	0,0139
Mezcla	8121,87	5	1624,37	4,63	0,0139
Error	4212,12	12	351,01		
Total	12333,98	17			

**Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=2,46292**

Error: 0,5000 gl: 5

Mezcla	Medias	n	E.E.			
3	80,75	3	10,82	A		
6	79,16	3	10,82	A		
4	70,89	3	10,82		B	
1	38,31	3	10,82			C
5	33,86	3	10,82			D
32	32,90	3	10,82			D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

### 5. Análisis de la varianza para el Índice de Germinación (IG %) de las semillas de Brachiaria

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
IG %	18	0,17	0,00	126,75

#### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	4045,71	5	809,14	0,49	0,7743
Mezcla	4045,71	5	809,14	0,49	0,7743
Error	19618,19	12	1634,85		
Total	23663,89	17			

**Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=2,46292**

Error: 0,5000 gl: 5

Mezcla	Medias	n	E.E.			
3	50,65	3	23,34	A		
2	48,58	3	23,34	A		
5	36,95	3	23,34		B	
6	28,23	3	23,34			C
1	14,53	3	23,34			D
4	12,46	3	23,34			D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )