

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**



**“EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COMPOSTAJE A BASE DE  
RESIDUOS DE COCINA CON BOSTA DE CABALLO  
PROVENIENTES DE LA UNALM”**

**TRABAJO ACADÉMICO PARA OPTAR EL TÍTULO  
PROFESIONAL DE  
INGENIERA AMBIENTAL**

**GABRIELA ARRIETA VELA**

**LIMA – PERÚ**

**2020**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**“EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COMPOSTAJE A BASE DE  
RESIDUOS DE COCINA CON BOSTA DE CABALLO  
PROVENIENTES DE LA UNALM”**

Presentada por:

**GABRIELA ARRIETA VELA**

Trabajo Académico para Optar el Título Profesional de:

**INGENIERA AMBIENTAL**

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado

Mg. Quím. Mary Flor Cesaré Coral  
PRESIDENTE

Mg. Sc. Wilfredo Celestino Baldeón Quispe  
MIEMBRO

Ing. Lawrence Enrique Quipuzco Ushñahua  
MIEMBRO

Ph.D. Lizardo Visitación Figueroa  
ASESOR

## **DEDICATORIA**

A Dios, y a mis padres, Elva y Juan Carlos

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi profesor asesor, a los miembros y presidenta del jurado y al Centro Modelo de Tratamiento de Residuos Sólidos CEMTRAR por todo el apoyo brindado durante esta investigación.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN

ABSTRACT

I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	4
2.1. Antecedentes .....	4
2.2. Residuos sólidos.....	4
2.3. Residuos de cocina.....	5
2.4. Fracción orgánica.....	5
2.5. Biodegradabilidad .....	6
2.6. Microorganismos del compostaje .....	6
2.7. Pila de compostaje .....	8
2.8. Descomposición de la materia orgánica.....	10
2.9. Bosta de caballo para compostaje .....	11
2.10. Rastrojos vegetales para compostaje.....	12
2.11. Mezcla de materiales.....	13
2.12. Parámetros de evaluación en los materiales.....	14
2.12.1. Relación carbono nitrógeno .....	14
2.12.2. Densidad aparente.....	15
2.12.3. pH .....	15
2.12.4. Conductividad eléctrica .....	16
2.12.5. Humedad relativa.....	16
2.13. Parámetros de evaluación durante el compostaje .....	17
2.13.1. Temperatura.....	17
2.13.2. pH .....	20
2.13.3. Conductividad eléctrica .....	21

2.13.4. Humedad relativa.....	21
2.13.5. Materia orgánica .....	23
2.13.6. Relación carbono nitrógeno .....	23
2.13.7. Aireación.....	25
2.13.8. Capacidad de retención de agua.....	27
2.13.9. Condiciones climáticas .....	27
2.14. Madurez del compost y aplicación al suelo .....	28
2.15. Calidad del compost.....	29
2.16. Norma técnica de calidad de compost.....	29
2.17. Macronutrientes y micronutrientes esenciales en el compost.....	31
2.18. Test de germinación y crecimiento de semillas en compost.....	32
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>34</b>
3.1. Ubicación de la investigación .....	34
3.2. Características Ecológicas.....	34
3.3. Materiales.....	35
3.4. Equipos .....	36
3.5. Muestreo de los materiales.....	36
3.6. Ensayos medidos en los materiales .....	37
3.7. Determinación de parámetros en las mezclas .....	42
3.8. Formulación de los tratamientos .....	44
3.9. Determinación de los pesos de los materiales.....	45
3.10. Construcción de las pilas .....	46
3.11. Programa de volteos.....	48
3.12. Programa de riego .....	49
3.13. Determinación de parámetros durante el compostaje .....	49
3.13.1. Frecuencia de monitoreo.....	49
3.13.2. Toma de muestras .....	50

3.13.3. Monitoreo de parámetros .....	50
3.14. Métodos de determinación de nutrientes esenciales .....	52
3.15. Metodología para el test de germinación y crecimiento de semillas .....	53
3.16. Análisis de calidad de compost.....	54
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	55
4.1. Caracterización de los materiales del compostaje.....	55
4.2. Parámetros evaluados durante el proceso .....	59
4.2.1. Temperatura.....	60
4.2.2. pH .....	64
4.2.3. Conductividad eléctrica .....	67
4.2.4. Humedad relativa.....	70
4.2.5. Densidad Aparente .....	72
4.2.6. Capacidad de Retención de Agua.....	75
4.2.7. Carbono Orgánico Total .....	78
4.2.8. Nitrógeno Total .....	81
4.2.9. Relación carbono nitrógeno.....	83
4.3. Parámetros evaluados en el compost final .....	85
4.3.1. Macronutrientes esenciales.....	85
4.3.2. Micronutrientes esenciales .....	91
4.3.3. Porcentaje de Germinación.....	94
4.3.4. Porcentaje de Crecimiento.....	95
4.3.5. Índice de Germinación de Zucconi.....	96
4.4. Comparación con la normativa internacional vigente.....	97
V. CONCLUSIONES.....	100
VI. RECOMENDACIONES .....	101
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	102
VIII. ANEXOS .....	109

8.1.	Anexo 1: Informe de Análisis de Materia Orgánica .....	110
8.2.	Anexo 2: Metodología de Análisis de Materia Orgánica .....	111
8.3.	Anexo 3: Registro de mediciones de parámetros durante el compostaje .....	112
8.4.	Anexo 4: Registro Fotográfico.....	117

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Biodegradabilidad de la fracción orgánica.....	6
Tabla 2: Microorganismos del compost .....	8
Tabla 3: Composición media de N, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , K <sub>2</sub> O por tipos de estiércol.....	12
Tabla 4: Contenido de elementos esenciales en estiércoles.....	12
Tabla 5: Destrucción de patógenos por temperatura .....	19
Tabla 6: Parámetros de calidad según la norma mexicana.....	30
Tabla 7: Características de los materiales.....	42
Tabla 8: Nomenclatura y descripción de los tratamientos.....	44
Tabla 9: Distribución porcentual de materiales .....	45
Tabla 10: Dimensiones de la pila de compostaje.....	45
Tabla 11: Volumen de los materiales en los tratamientos .....	46
Tabla 12: Pesos de los materiales en los tratamientos.....	46
Tabla 13: Programación de volteos .....	48
Tabla 14: Programación de riegos .....	49
Tabla 15: Frecuencia de monitoreo por parámetro.....	49
Tabla 16: Parámetros de monitoreo.....	59
Tabla 17: Metodología para análisis de macronutrientes .....	52
Tabla 18: Metodología para análisis de micronutrientes.....	53
Tabla 19: Caracterización de los materiales utilizados en los tratamientos .....	55
Tabla 20: Relación carbono nitrógeno de la mezcla.....	57
Tabla 21: Densidad Aparente de la mezcla .....	58
Tabla 22: Humedad Relativa de la mezcla .....	59
Tabla 23: Relación C/N final y C/N inicial .....	85
Tabla 24: Macronutrientes esenciales en el compost final .....	86
Tabla 25: Micronutrientes esenciales en el compost final.....	91
Tabla 26: Resultados en el compost final y cumplimiento de los valores recomendados ..	99

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Microorganismos del compostaje .....	8
Figura 2: Esquema de evolución de la materia orgánica .....	10
Figura 3: Materiales del compostaje.....	14
Figura 4: Evolución del pH y la Temperatura durante las etapas del compostaje.....	20
Figura 5: Disponibilidad de nutrientes en función del pH.....	32
Figura 6: Ubicación del área de estudio .....	34
Figura 7: Molienda de la muestra .....	37
Figura 8: Equipo kjeldahl de laboratorio .....	39
Figura 9: Equipo mufla para calcinación.....	40
Figura 10: Pesaje de la muestra .....	40
Figura 11: Equipo agitador de laboratorio.....	41
Figura 12: Balanza analítica para el pesaje de las muestras .....	41
Figura 13: Diseño de la pila de compostaje.....	47
Figura 14: Tratamientos implementados en la zona de estudio.....	48
Figura 15: Comportamiento de la Temperatura en el Tratamiento 1 .....	60
Figura 16: Elevación de la Temperatura en el Tratamiento 1 .....	61
Figura 17: Comportamiento de la Temperatura en Tratamiento 2 .....	62
Figura 18: Elevación de la Temperatura en el Tratamiento 2 .....	62
Figura 19: Comportamiento de la Temperatura en el Tratamiento 3 .....	63
Figura 20: Elevación de la Temperatura en el Tratamiento 3 .....	63
Figura 21: Comportamiento de la Temperatura en T1, T2 y T3 .....	64
Figura 22: Mediciones de pH en el Tratamiento 1 .....	65
Figura 23: Mediciones de pH en el Tratamiento 2 .....	65
Figura 24: Mediciones de pH en el Tratamiento 3 .....	66
Figura 25: Comportamiento del pH en T1, T2 y T3.....	67
Figura 26: Mediciones de conductividad eléctrica en el Tratamiento 1 .....	68
Figura 27: Mediciones de conductividad eléctrica en el Tratamiento 2.....	68
Figura 28: Mediciones de conductividad eléctrica en el Tratamiento 3.....	69
Figura 29: Comportamiento de la conductividad eléctrica en T1, T2 y T3.....	69
Figura 30: Mediciones de humedad relativa en el Tratamiento 1 .....	70
Figura 31: Mediciones de humedad relativa en el Tratamiento 2 .....	71

Figura 32: Mediciones de humedad relativa en el Tratamiento 3 .....	71
Figura 33: Comportamiento de la humedad relativa en T1, T2 y T3 .....	72
Figura 34: Mediciones de densidad aparente en el Tratamiento 1 .....	73
Figura 35: Mediciones de densidad aparente en el Tratamiento 2 .....	74
Figura 36: Mediciones de densidad aparente en el Tratamiento 3 .....	74
Figura 37: Comportamiento de la densidad aparente en T1, T2 y T3 .....	75
Figura 38: Mediciones de capacidad de retención de agua en el Tratamiento 1 .....	76
Figura 39: Mediciones de capacidad de retención de agua en el Tratamiento 2 .....	76
Figura 40: Mediciones de capacidad de retención de agua en Tratamiento 3 .....	77
Figura 41: Comportamiento de la capacidad de retención de agua en T1, T2 y T3 .....	77
Figura 42: Mediciones de carbono orgánico total en el Tratamiento 1 .....	78
Figura 43: Mediciones de carbono orgánico total en el Tratamiento 2 .....	79
Figura 44: Mediciones de carbono orgánico total en el Tratamiento 3 .....	79
Figura 45: Comportamiento del carbono orgánico total en T1, T2 y T3 .....	80
Figura 46: Pérdida de materia orgánica durante el compostaje .....	80
Figura 47: Mediciones de nitrógeno total en el Tratamiento 1 .....	81
Figura 48: Mediciones de nitrógeno total en el Tratamiento 2 .....	82
Figura 49: Mediciones de nitrógeno total en el Tratamiento 3 .....	83
Figura 50: Comportamiento del nitrógeno total en T1, T2 y T3 .....	83
Figura 51: Comportamiento de la relación carbono nitrógeno en T1, T2 y T3 .....	84
Figura 52: Relación carbono nitrógeno inicial y final en T1, T2 y T3 .....	84
Figura 53: Carbono orgánico total en el compost final .....	87
Figura 54: Nitrógeno total en el compost final .....	87
Figura 55: Fósforo total en el compost final .....	88
Figura 56: Potasio Total en el compost final .....	89
Figura 57: Calcio en el compost final .....	90
Figura 58: Magnesio en el compost final .....	90
Figura 59: Hierro en el compost final .....	91
Figura 60: Cobre en el compost final .....	92
Figura 61: Zinc en el compost final .....	93
Figura 62: Manganeseo en el compost final .....	93
Figura 63: Boro en el compost final .....	94
Figura 64: Índice de germinación en el compost final .....	94

Figura 65: Índice de crecimiento en el compost final .....	95
Figura 66: Índices de Germinación, Crecimiento y Zucconi para T1, T2 y T3 .....	97

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Informe de Análisis de Materia Orgánica.....	110
Anexo 2: Metodología de Análisis de Materia Orgánica .....	111
Anexo 3: Registro de mediciones de parámetros durante el compostaje .....	112
Anexo 4: Registro Fotográfico .....	117

## RESUMEN

En la presente investigación se evaluó el compostaje de residuos de cocina, bosta de caballo y rastrojos vegetales. Se establecieron 3 tratamientos a fin de determinar en cuál de ellos es más eficiente el proceso de degradación de los residuos orgánicos, así como mayor la calidad del compost final para fines agronómicos. Se implementó un sistema abierto de compostaje denominado método Indore, por un periodo de 105 días. En las mezclas, se adicionó gradualmente mayor cantidad de residuos de cocina, de la siguiente forma: Tratamiento 1 (bosta de caballo 50%, rastrojos vegetales 50%, residuos de cocina 0%); Tratamiento 2 (bosta de caballo 50%, rastrojos vegetales 40%, residuos de cocina 10%); Tratamiento 3 (bosta de caballo 50%, rastrojos vegetales 30%, residuos de cocina 20%). Durante el proceso se monitorearon los parámetros físico químicos: temperatura, pH, conductividad eléctrica, humedad relativa, materia orgánica, relación carbono nitrógeno, densidad aparente y capacidad de retención de agua. En el compost final, se midió el contenido de macronutrientes y micronutrientes esenciales, y se realizó una prueba de germinación y crecimiento de semillas de *Lactuca sativa*, según la metodología de Zucconi (1981). Los resultados demostraron que en el Tratamiento 3, hubo una pérdida de materia orgánica durante el proceso igual a 27 por ciento, resultando este tratamiento más eficiente con respecto a los tratamientos 1 y 2. De igual manera, el Tratamiento 3 resultó de mayor calidad en cuanto a su capacidad de retención de agua, con un valor de 112 por ciento, el mismo cumple lo exigido por la norma de calidad de compost (Ö NORM S 2200), a diferencia del Tratamiento 1 y el Tratamiento 2, cuyos resultados están por encima del rango exigido en dicha norma. Se observó que, al incrementar residuos de cocina entre los Tratamientos 2 y 3, mejoró el contenido de nutrientes esenciales en el compost final; sin embargo, fue el Tratamiento 1 el que obtuvo un mejor contenido de nutrientes. No encontrándose una relación consistente entre el incremento de residuos de cocina y un mejor contenido de nutrientes. Por último, un índice de germinación de 91 por ciento, demostró que el Tratamiento 3 presenta mayor madurez y escasa fitotoxicidad, en comparación a los Tratamientos 1 y 2 cuyos índices fueron de 64 por ciento.

**Palabras clave:** compostaje, residuos de cocina, calidad agronómica del compost, nutrientes esenciales en el compost, índice de germinación de Zucconi.

## ABSTRACT

In the present investigation, the composting of kitchen waste, horse manure and vegetable stubble was evaluated. Three treatments were established in order to determine in which of them the organic matter degradation process is more efficient, as well as the quality of the final compost for agronomic purposes. An open composting system was implemented using the Indore method, for a period of 105 days. In the mixtures, a greater quantity of kitchen waste was gradually added, as follows: Treatment 1 (50% horse manure, 50% vegetable stubble, 0% kitchen waste); Treatment 2 (50% horse manure, 40% vegetable stubble, 10% kitchen waste); Treatment 3 (50% horse manure, 30% vegetable stubble, 20% kitchen waste). During the process, the physical-chemical parameters were monitored: temperature, pH, electrical conductivity, relative humidity, organic matter, carbon-nitrogen ratio, apparent density and water retention capacity. In the final compost, the content of essential macronutrients and micronutrients was measured, and a germination and growth test of *Latuca sativa* seeds was performed using the Zucconi method. The results showed that in Treatment 3, there was a loss of organic matter during the process equal to 27 percent, resulting in this treatment more efficient with respect to treatments 1 and 2. Similarly, Treatment 3 was of higher quality in terms of Due to its water retention capacity, with a value of 112 percent, it meets the requirements of the compost quality standard (Ö-NORM-S-2200), unlike treatments 1 and 2 whose results are above of the range required in said standard. It was observed that, by increasing kitchen waste between Treatments 2 and 3, the content of essential nutrients in the final compost improved; however, it was Treatment 1 that obtained the best nutrient content. Not finding a consistent relationship between the increase in kitchen waste and a better nutrient content. Finally, a germination index of 91 percent, showed that Treatment 3 presents greater maturity, compared to Treatments 1 and 2 whose indexes were 64 percent.

**Keywords:** composting, kitchen waste, agronomic quality of compost, essential nutrients in compost, Zucconi germination index.

## I. INTRODUCCIÓN

En la Universidad Nacional Agraria La Molina se genera aproximadamente 9 toneladas de residuos orgánicos de cocina mensualmente, los cuales provienen del comedor y los cafetines universitarios. Dichos residuos requieren gestionarse y disponerse adecuadamente; acorde con los reglamentos y normas de la UNALM, y la legislación nacional relacionada al manejo de residuos sólidos (Centro Modelo de Tratamiento de Residuos [CEMTRAR], 2018). En el Decreto Legislativo N° 1501 (2020), que modifica la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, dentro de los procesos y operaciones de manejo de residuos sólidos, considera la valorización de residuos orgánicos:

“La valorización constituye la alternativa de gestión y manejo que debe priorizarse frente a la disposición final de los residuos. Dicha operación consiste en la transformación química y/o biológica de los residuos sólidos, para constituirse, de manera total o parcial, como insumos, materiales o recursos...” (artículo N° 37).

El compostaje es un proceso mediante el cual son tratados los residuos orgánicos, permite reciclar diversos materiales orgánicos que se generan día a día en la ciudad y en el campo. El compostaje ha estado presente a través de la historia, surge junto a la agricultura, cuando el ser humano se hace sedentario y empieza a acumular los restos de las cosechas en un solo sitio. Surgiendo pues, la necesidad de gestionar sus desechos; ya sea enterrándolos, quemándolos o reutilizándolos como alimento para animales (Moreno y Moral, 2011).

La experiencia de compostar está relacionada con imitar al proceso natural de biodegradación que tiene cualquier material orgánico en el suelo (Red Española de Compostaje [REC], 2015). El suelo, dentro de sus funciones principales, tiene la de recuperar los nutrientes y no acumular desechos. Este proceso de transformación de residuos orgánicos, retribuye la fertilidad a los suelos. Surgiendo así, una necesidad por tratar los residuos orgánicos con continuidad, dada su utilidad para la fertilización y mantenimiento de los cultivos. Gotaas (1956), menciona que ciertamente, el empleo de los residuos

orgánicos en la agricultura fue un factor muy importante en la prevalencia de antiguas civilizaciones.

En el siglo XIII, la civilización de Los Templarios, fue la primera en describir las técnicas del proceso de compostaje. Ellos definen la importancia de factores como, el tamaño de partícula, dimensiones de las pilas, proporciones de residuos animales y vegetales en la pila de compost, contenido de humedad; así como también los usos recomendados y aplicaciones de los compost (REC, 2015).

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en los meses de setiembre, octubre, noviembre y diciembre del 2018, en el CEMTRAR, unidad encargada del tratamiento de los residuos sólidos de la UNALM. Este estudio tiene como fin contribuir a la adecuada gestión de los residuos de cocina de la universidad, analizando alternativas de tratamiento, a base de bosta de caballo y rastrojos vegetales, del establo y áreas verdes respectivamente; que han sido mezclados conjuntamente con los residuos de cocina en tres tratamientos distintos. Se ha evaluado el desarrollo del compostaje, por medio de parámetros durante dicho proceso, así como parámetros de calidad final de los compost obtenidos. Se ha podido evaluar cuál de los tratamientos resulta más eficiente en el proceso de transformación de los materiales orgánicos y aporta mayores beneficios al producto final, en el ámbito agronómico.

El presente estudio favorece directamente a la población universitaria ya que es un aporte para el manejo eficiente y sostenible de sus residuos de cocina, evitando problemas de contaminación al ambiente y a la salud; así como, al público consumidor de compost que requiere un producto de buena calidad.

El objetivo principal de la investigación ha sido:

- Evaluar el proceso de compostaje de residuos de cocina, bosta de caballo, rastrojos vegetales, en tres tratamientos; y la calidad agronómica del compost final.

y los objetivos secundarios o específicos:

- Caracterizar los materiales iniciales: residuos de cocina, bosta de caballo, rastrojos vegetales; y formular tres diferentes proporciones de los materiales en los tratamientos.
- Monitorear los tres tratamientos y compararlos con los valores recomendados por Moreno y Moral (2011); en base a parámetros físico químicos durante el proceso,

como son: Temperatura, pH, Conductividad Eléctrica, Humedad Relativa, Materia Orgánica, Relación Carbono/Nitrógeno, Densidad Aparente y Capacidad de Retención de Agua.

- Evaluar la calidad agronómica en los compost obtenidos, mediante el Análisis de Macronutrientes y Micronutrientes Esenciales y la Prueba de Germinación y Crecimiento de Semillas (*Lactuca sativa*).

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. Antecedentes**

Se han realizado investigaciones relacionadas con el presente estudio. Una de ellas evalúa la degradación de la lignina en la cascarilla de arroz de la bosta de caballo, mediante el compostaje de bosta de caballo, rastrojos vegetales y residuos de cocina, utilizando como blanco un tratamiento con 100 por ciento de bosta de caballo. En dicho estudio, se monitoreo el parámetro de porcentaje de lignina a lo largo del tiempo de compostaje, encontrándose que este varía entre 19 y 24 por ciento, notándose un mayor incremento en los tratamientos con mayor contenido de residuos de cocina y rastrojos vegetales, pudiendo deducir que la incorporación dichos materiales promueve la ruptura o modificación de la lignina en compuestos más simples; sin embargo, ésta no llega a sufrir una biotransformación, ya que al final del compostaje, haciendo un balance, el contenido de lignina no disminuye (CEMTRAR, 2018).

Igualmente, ha sido de utilidad para la presente investigación, la publicación sobre la estabilización de bosta de caballo a través de un proceso aeróbico, parecido al compostaje, de donde se ha consultado la composición y características de la bosta de caballo durante la descomposición aeróbica (Téllez *et. al.*, 2019).

Estos estudios investigan el aprovechamiento de la bosta de caballo como un insumo soporte para la descomposición de materiales fácilmente biodegradables como son los residuos de cocina de la Universidad.

### **2.2. Residuos sólidos**

Un residuo sólido es un material que resulta del consumo o empleo de un bien, destinado al desecho o abandono luego de haber cumplido su utilidad o misión. Se cree que no tiene valor

económico alguno y que se destina a una disposición final; sin embargo, los residuos pueden aprovecharse o transformarse en un nuevo bien, y adquirir un nuevo uso.

Son residuos sólidos todas aquellas sustancias, productos, subproductos; “en estado sólido o semisólido, de los que su generador dispone o está obligado a disponer, en virtud de lo establecido en la normatividad nacional o de los riesgos que causan a la salud y al medio ambiente” (Ministerio del Ambiente, 2016).

### **2.3. Residuos de cocina**

Los residuos de cocina son los residuos alimenticios, generados específicamente durante la preparación de comidas para el consumo humano. Incluye a los desperdicios generados durante la preparación y después del consumo de comidas. Incluye también pérdidas de alimentos que no llegaron a ser preparados y/o consumidos; por caducidad, devolución, descarte, mal estado u otros. Los residuos de cocina son generados en establecimientos que brindan dicho servicio, así como en hogares, oficinas, centros educativos, centros de salud, y cualquier otro lugar donde se prepare y consuma alimentos (Baquero, 2017).

Están constituidos por material orgánico que proviene de un organismo biológico, puede ser una planta o un animal. Están constituidos principalmente por los elementos C, H, O, N; cuatro elementos que son indispensables para los microorganismos, nutrición de las plantas y para la alimentación de animales (Prieto, 2003).

Ejemplo de residuos de cocina son restos de frutas y verduras, huevos, cáscaras, carnes, lácteos, pan, pastas, pescado, intestinos, pieles, etc. Todos ellos poseen la capacidad de descomponerse naturalmente; algunos con mayor rapidez que otros, pero todos pueden ser transformados en una materia orgánica nueva (Bueno, 2007).

### **2.4. Fracción orgánica**

El residuo de cocina puede contener una fracción no orgánica o partes muy estables, al punto de considerarse no biodegradables. El resto, lo constituye la fracción orgánica, la cual se refiere a la parte del residuo con capacidad de descomposición. Esta porción, también llamada biodegradable, puede determinarse analizando el porcentaje de sólidos volátiles en el material (Prieto, 2003).

## 2.5. Biodegradabilidad

La biodegradabilidad de un residuo orgánico está referida a la facilidad con que ésta se descompone, en elementos o compuestos más simples, debido a la actividad microbiana, y en determinadas condiciones, principalmente de forma aerobia, con una relativa rapidez, y con el fin de obtener un nuevo producto (Jaramillo y Zapata, 2008).

Según su capacidad de biodegradación, podemos clasificar los residuos orgánicos en lignocelulósicos, fermentables, proteicos y aceites y grasas. Los residuos fermentables son los que poseen mayor rapidez de biodegradación, seguido por los proteicos y grasas y finalmente por los lignocelulósicos. En la Tabla 1 se observa los constituyentes de la fracción orgánica de mayor y menor biodegradabilidad.

**Tabla 1: Biodegradabilidad de la fracción orgánica**

Fracción Orgánica	Constituyente	Biodegradabilidad
Fermentables	Azúcares, féculas, aminoácidos, ácidos orgánicos	70%
Proteicos	Cadenas de aminoácidos	50%
Aceites, Grasas, Ceras	Ésteres de alcoholes, ácidos grasos	50%
Hemicelulosa	Azúcares con 5 y 6 carbonos	70%
Celulosas	Glucosa de azúcar con 6 carbonos	70%
Lignina	Polímeros de lignina	0%

FUENTE: Jaramillo y Zapata (2008); Haug (1993).

Para que ocurra la descomposición del residuo orgánico, además de la biodegradabilidad, es fundamental que se presente un balance de los elementos carbono y nitrógeno en el material compostable. Los residuos de cocina, requieren mezclarse con rastrojos vegetales, abono animal u otro material, para adquirir una adecuada relación de los elementos carbono y nitrógeno, con lo que se obtiene las condiciones nutritivas adecuadas para la proliferación y desarrollo de los microorganismos del compostaje (Bueno, 2007).

## 2.6. Microorganismos del compostaje

El ecosistema del compostaje contiene una amplia biodiversidad de especies microbianas que establecen relaciones simbióticas entre sí, en un equilibrio dinámico favorable. Los

microorganismos que intervienen en el compostaje varían continuamente no solo en función de la naturaleza de los materiales compostados; sino también de la concentración de oxígeno, del contenido de humedad, la temperatura del medio, el pH, la presencia de compuestos antibióticos, etc. (Bueno 2007). Las poblaciones microbianas se desarrollan en un ambiente con temperaturas específicas, siguiendo una cadena alimentaria entre sí. Los más importantes son las bacterias, los actinomicetos y los hongos filamentosos. Seres unicelulares simples en estructura y composición, cuyo hábitat y condiciones de vida son similares a las de las plantas con las que conviven en el suelo.

Algunas poblaciones son muy activas a temperatura ambiente (de 20 a 30°C), otras viven a temperaturas bajas, incluso bajo los cero grados (de -5 a 5°C), aunque son muy poco activas, y otras, sólo actúan a temperaturas elevadas (de 35 a 65°C) (Bueno, 2008). A medida que se eleva la temperatura, las poblaciones microbianas son reemplazadas por otras mejor adaptadas, y cada una de ellas tiene un tiempo de duración limitado (Laich, 2011).

#### A) Bacterias:

Las bacterias aeróbicas más comunes en el compost son la mesófilas. Éstas actúan hasta los 35°C aproximadamente. Luego se encuentran las termófilas que pertenecen en su mayoría al género bacillus. Las “bacillus” se caracterizan por formar esporas cuando el medio es desfavorable, sobreviviendo de forma pasiva, sin realizar actividad de descomposición de la materia orgánica (Sáez, 2000). En la Figura 1a se observa una vista microscópica de las bacterias mesófilas.

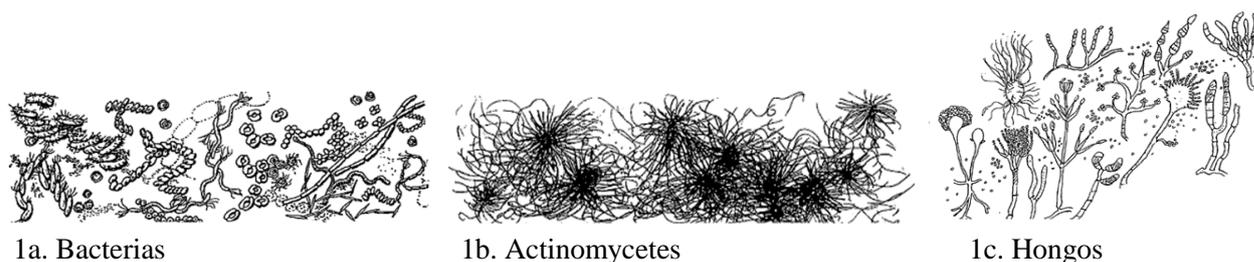
#### B) Actinomicetos

Los actinomicetos son una especie de bacteria que crecen en forma de micelio, pegados a superficies en las que pueden adaptarse. Se encuentran principalmente en materiales como papel y hojas, y requieren de oxígeno necesariamente. Son activos en la degradación de la celulosa, durante la etapa mesófila; pero también hay actinomicetos termófilos como los *Thermoactinomyces*, que crecen a temperaturas superiores a los 60°C. Los actinomicetos aparecen relativamente tarde en la etapa mesófila, en comparación con los hongos y bacterias (Sáez, 2000). En la Figura 1b se tiene una vista microscópica de actinomicetos en forma de micelio.

#### C) Hongos

Los hongos que aparecen durante el compostaje se pueden dividir en tres grupos según la etapa donde aparecen.

En la etapa mesófila, hasta temperaturas de 40°C, existen hongos mesófilos y termófilos. Estos hongos una vez que desaparecen ya no reaparecen a excepción de un par de especies termófilas que sobreviven hacia la siguiente etapa. En la etapa termófila, cuando la temperatura empieza a descender, reaparecen algunas especies. Durante el enfriamiento aparecen otros hongos termófilos y mesofilos. La primera flora de hongos ya no encuentra el alimento que necesita, dando paso a los hongos tintas, que aparecen alrededor de los 30°C. Estos hongos son capaces de descomponer compuestos más difíciles como ligninas (Sáez, 2000). En la Figura 1c se observan diversos hongos del compostaje.



**Figura 1: Microorganismos del compostaje**  
FUENTE: Sáez (2000)

En la Tabla 2 se observa la concentración de los microorganismos en el compost en unidades formadoras de colonia por gramo.

**Tabla 2: Microorganismos del compost (UFC/gr)**

Microorganismos	Etapas del compostaje			N°especies
	Mesofílica 20-40°C	Termofílica 40-70°C	Mesofílica 40-20°C	
<b>Bacterias</b>				
Mesófilas	10 <sup>8</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>11</sup>	6
Termófilas	10 <sup>4</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>7</sup>	1
<b>Actinomycetes</b>				
Termófilos	10 <sup>4</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>5</sup>	14
<b>Hongos</b>				
Termófilos	10 <sup>6</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>5</sup>	18
Mesófilos	10 <sup>3</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>6</sup>	16

FUENTE: Haug (1993)

## 2.7. Pila de compostaje

La palabra compost significa “poner junto” o apilar. Hoy en día existen diversos métodos para producir compost, entre sistemas abiertos y cerrados. Sin embargo, la forma tradicional de producir compost, es la formación de pilas de residuos orgánicos al aire libre, conocida esta metodología como el método Indore o Howard, en honor a su descubridor. En dichas

“pilas” o “montones” tiene lugar el consiguiente proceso fermentativo (Bueno, 2007; Sáez, 2000).

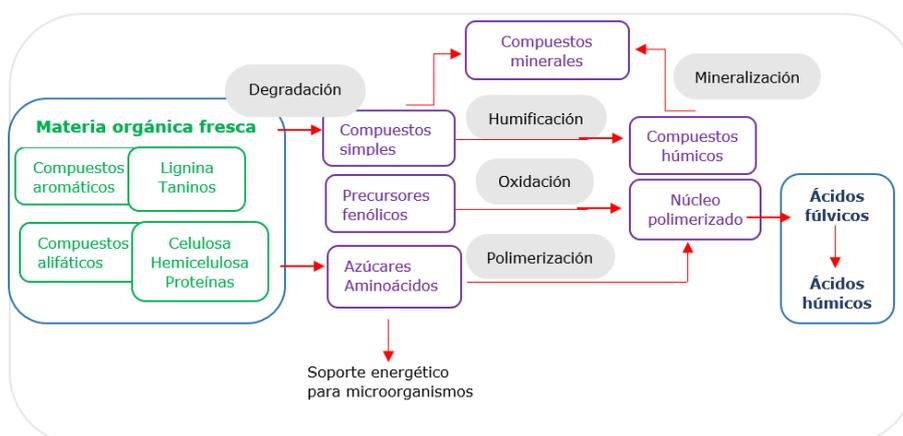
La transformación de la materia orgánica ocurre de forma natural, por medio de un ciclo biogeoquímico de nutrientes que se retroalimenta a sí mismo. Cuando el desarrollo vegetal se produce de manera continuada en el medio ambiente, las hojas, hierbas, arbustos, ramas de árboles etc., mueren y caen sobre la superficie, formando una capa orgánica superficial, que se descompone y filtra nutrientes hacia la tierra del subsuelo, para ser luego aprovechados por las plantas y cultivos. Algunos nutrientes pueden ser arrastrados por el agua de lluvia, mediante procesos de lixiviación. Las plantas, además, absorben nutrientes del aire mediante fijación biológica en sus hojas; así compensa las pérdidas que ocurren por arrastre de nutrientes, manteniéndose el balance del ciclo biogeoquímico de los nutrientes en el suelo. Cuando este equilibrio se ve afectado debido a condiciones externas, es necesario aplicar al suelo enmiendas orgánicas para recuperar su fertilidad (Sáez, 2000).

Una pila de compostaje se puede elaborar con una variedad de materiales orgánicos. Puede emplearse, por ejemplo: restos de cosechas, hojas caídas de los árboles, malezas, restos de podas, ramas trituradas, algas marinas, estiércoles de animales, residuos de comida, restos de tejidos de fibras naturales, etc. La elección de los materiales compostables, dependerá del contenido de nutrientes en cada material y de la aplicación que tendrá el compost producido. Por otro lado, dependerá también del acceso que se tenga a los residuos orgánicos y a la urgencia de su tratamiento y disposición (Bueno, 2007).

Según Bueno (2007), lo más recomendable es usar diferentes tipos de materiales, de origen animal y vegetal, que se compensen en características como contenido de humedad y tamaño de partículas, a fin de obtener una mezcla homogénea. La estructura y constitución de los materiales son infinitamente variables, debido a sus múltiples procedencias y grandes variedades de restos orgánicos; así también, sus niveles de descomposición pueden variar de acuerdo al tiempo que llevan de haber sido generados. Según Bueno (2007), cuanto más variada sea la procedencia y las texturas de los residuos compostables, será mejor la calidad agronómica del compost.

## 2.8. Descomposición de la materia orgánica

Las principales reacciones que atraviesa la materia orgánica en descomposición son la mineralización y la humificación de sus compuestos orgánicos. La mineralización consiste en el paso de los nutrientes de sus formas orgánicas a formas inorgánicas aprovechables. La humificación consiste en una serie de reacciones secundarias de polimerización o condensación, entre subproductos de la descomposición del material biodegradable y los compuestos de re-síntesis formados durante los procesos metabólicos, dando lugar a la formación de complejos de carbono altamente estables y de lenta degradación, que constituyen las unidades estructurantes de las sustancias húmicas. Las quinonas, derivadas de las ligninas y/o sintetizadas por los microorganismos, son las principales unidades de construcción de las sustancias húmicas. En la Figura 2 se puede ver un esquema de los principales procesos que sufre la materia durante el compostaje.



**Figura 2: Esquema de evolución de la materia orgánica**

FUENTE: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Desarrollo FAO (2013)

Las reacciones de descomposición liberan además de subproductos, también calor, CO<sub>2</sub> y agua. Las pérdidas de carbono como CO<sub>2</sub> pueden llegar a representar un 20 por ciento de toda la materia orgánica compostada. A través del proceso se espera que la mayor parte del material sea transformado en sustancias húmicas de manera eficiente, es decir, minimizando las pérdidas de materia orgánica que puedan darse producto de ralentizaciones durante el proceso o debido a arrastres o lavados excesivos durante el manejo de la pila.

## 2.9. Bosta de caballo para compostaje

La bosta de caballo es un residuo orgánico de origen animal, que se genera al mezclarse el estiércol de caballo y orines del animal con la cascarilla de arroz que cubre el suelo de las caballerizas, en el establo de la UNALM. Es un residuo agropecuario que en promedio puede generarse 30 Kg. al día por caballo y requiere un manejo adecuado, recojo, tratamiento y disposición final; ya que al acumularse con el paso de los días genera contaminación al ambiente, y no puede ser aplicado directamente al suelo como abono, ya que esto puede ser perjudicial para los cultivos (Téllez *et. al.* 2019).

Según Bueno (2007), siempre conviene agregar al compost algún tipo de estiércol, ya que éstos funcionan como activadores del proceso de compostaje. Además, menciona que cualquier tipo de estiércol funciona como un buen aporte de nitrógeno. El estiércol de caballo se caracteriza por tener un poder fermentativo y fogoso natural, ya que contiene muchos microorganismos y enzimas que aceleran el proceso de compostaje. Contiene abundante celulosa, por ello se aconseja mezclarlo con restos de hierba fresca, para propiciar la presencia de microorganismos que degraden la celulosa (Bueno, 2007).

La bosta de caballo está compuesta por un 20 por ciento de cascarilla de arroz, 50 por ciento de orines de caballo y 30 por ciento de estiércol de caballo (Téllez *et. al.*, 2019). Presenta en su composición nitrógeno, fósforo, potasio y otros nutrientes como azufre, manganeso, calcio, boro y cobre, que lo hacen un material de un valor fertilizante considerable para el compost. La presencia de urea, producto de los orines del animal, le aporta nitrógeno; y la cascarilla de arroz, le aporta carbono (Mirabelli, 2008).

Su proporción carbono nitrógeno medida in situ es de 19:1. Por otro lado, Mirabelli (2008), menciona que la bosta de caballo tiene una relación carbono nitrógeno alrededor de 25:1. Esta diferencia ocurre debido al manejo que se le brinda en el establo y a los procedimientos de recojo, traslado y almacenaje, que de ser poco cuidadosos podrían propiciar pérdidas de materia orgánica (Millar, Turk y Forth, 1975). Por esta razón, conviene mezclar este material con pajas y hojas trituradas, de relación carbono nitrógeno igual a 31:1, y residuos de cocina, de relación carbono nitrógeno igual a 31:1, para obtener una mezcla que resulte de una relación carbono nitrógeno entre 25-35/1, que es lo ideal para que el proceso inicie y progrese de manera correcta (Moreno y Moral, 2011).

En la Tabla 3 podemos observar la concentración media de nutrientes nitrógeno, fósforo y potasio en diversos estiércoles; y en la Tabla 4, el contenido de otros elementos nutritivos como azufre, magnesio, calcio, manganeso, boro y cobre.

**Tabla 3: Composición media de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O por tipos de estiércol**

<b>Estiércol</b>	<b>N</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>
<b>Kg. por cada tonelada de estiércol</b>			
<u>Caballo</u>	<u>6.7</u>	<u>2.3</u>	<u>7.2</u>
Vacuno	3.4	1.3	3.5
Cerdo	4.5	2.0	6.0
Oveja	8.2	2.1	8.4
Gallina	15.0	10.0	4.0

FUENTE: Instituto Colombiano Agropecuario (1972)

**Tabla 4: Contenido de elementos esenciales en estiércoles**

<b>Elemento</b>	<b>Kg. o gr./tonelada de estiércol</b>
Azufre	0.5 kg.
Magnesio	2.0 kg.
Calcio	5.0 kg.
Manganeso	30-50 gr.
Boro	4.0 gr.
Cobre	2.0 gr.

FUENTE: ICA (1972)

La bosta de caballo es un insumo previamente compostado, por los mismos animales que caminan sobre ella. Este material es trasladado hacia la planta de compostaje del CEMTRAR, donde se deposita a modo de pilas.

Se debe cuidar que este material no se deseque muy rápido, hacer un volteo y regarlo si fuera necesario, así como controlar que no baje mucho el pH, incorporando caliza de ser necesario (Mirabelli, 2008).

Luego de este pre tratamiento, se dispuso este material, para ser mezclado junto con los residuos de cocina y rastrojos vegetales para la construcción de las pilas de compostaje de la presente investigación (CEMTRAR, 2018).

## **2.10. Rastrojos vegetales para compostaje**

Los residuos de cosechas, podas y hojas caídas, se descomponen fácilmente en el compostaje debido a que es un material que se considera aún fresco. Los rastrojos vegetales, si se recogen

al poco tiempo de generarse, y se encuentran todavía frescos, poseen un buen equilibrio de carbono nitrógeno, lo que favorece su descomposición, además que, su estructura aporta aireación en la pila de compostaje (Bueno, 2007).

Los rastrojos frescos proceden generalmente de hojas caídas de árboles frutales, ramas, frutos, flores y restos de jardinería. Los árboles tienen un sistema radicular muy largo, con el que extraen nutrientes del subsuelo y lo llevan hacia las hojas, por lo que éstas son muy ricas en sustancias minerales, como potasio, fósforo y nitrógeno (Bueno, 2007).

Por el contrario, las hojas secas y rastrojos que llevan tiempo de haber sido generados, suelen endurecerse y perder nitrógeno con el tiempo, y por ello su descomposición es más lenta y dificultosa; sin embargo, siguen siendo un buen aporte de carbono en la pila de compostaje, y pueden ser mezclados con otros materiales que contengan nitrógeno como estiércoles, restos de frutas, verduras frescas y pastos verdes (Bueno, 2007).

La mezcla de rastrojos vegetales utilizada en la presente investigación, contiene diversos residuos de cortes de césped, barrido de hojas secas, podas de limpieza y mantenimiento, restos de cosechas etc. recogidos en el campus de la UNALM. Estos son colectados en los campos de cultivo y áreas verdes, en promedio 3 veces a la semana, y son llevados a la Planta de Compostaje del CEMTRAR. Antes de ser usado este material para la formación de pilas de compost, se seleccionan los rastrojos, que estén libres de algunas impurezas que puedan afectar el compostaje. De igual manera, se entrevista a los agricultores, quienes nos informan si existen residuos de fertilizantes inorgánicos o alguna sustancia peligrosa (Bueno, 2007).

Esta mezcla pre seleccionada de rastrojos es triturada, de ser necesario, con una cortadora de césped o con palas y trinchas. Luego, es caracterizada según parámetros fisicoquímicos: relación carbono nitrógeno, conductividad eléctrica, pH, densidad aparente y humedad relativa.

### **2.11. Mezcla de materiales**

La mezcla de materiales es la incorporación de los tres tipos de residuos seleccionados (residuos de cocina, bosta de caballo y rastrojos vegetales), buscando homogeneidad en cada pila; usando diferentes cantidades de estos materiales, con el fin de analizar los efectos de

trabajar con diferentes proporciones en la mezcla. En las Figuras 3a, 3b y 3c se observan los materiales empleados para la preparación de las mezclas.



3a. Residuos de cocina

3b. Bosta de caballo

3c. Rastrojos vegetales

### **Figura 3: Materiales del compostaje**

De acuerdo con Bueno (2007), en una mezcla de materiales se recomienda incluir iguales cantidades de materia orgánica de procedencia animal como de vegetal. Las proporciones planteadas fueron las siguientes:

Se utilizaron iguales cantidades de residuos vegetales y animales. El porcentaje de la bosta de caballo se mantuvo en 50 por ciento en las tres pilas, considerando que los residuos animales en los residuos cocina son el 20 por ciento, y que, además, la bosta de caballo tiene en su composición 20 por ciento de cascarilla de arroz (residuo vegetal) (Bueno, 2007). El 50 por ciento restante se constituye a base de rastrojos vegetales, y se incorporó residuos de cocina de forma progresiva en cada una de las mezclas.

## **2.12. Parámetros de evaluación en los materiales**

### **2.12.1. Relación carbono nitrógeno**

Para que el proceso inicie y desarrolle correctamente, debe existir un equilibrio entre los nutrientes presentes en la mezcla que se va a compostar, especialmente entre el carbono y el nitrógeno.

Los microorganismos necesitan de 30 partes de carbono por 1 de nitrógeno para iniciar su actividad; debido a ello, la relación carbono nitrógeno óptima en la mezcla es entre 25 y 35; pues, durante el compostaje esta relación tiende a disminuir con las reacciones de

transformación de los compuestos orgánicos y con las pérdidas de carbono como gas CO<sub>2</sub> al ambiente. El nitrógeno tiene gran influencia en los valores de relación carbono nitrógeno, ya que pequeños cambios de este elemento generan amplias variaciones en la relación carbono nitrógeno.

### **2.12.2. Densidad aparente**

Es la relación masa/volumen de los materiales. Es un dato fundamental para poder dimensionar recipientes de pre recogida y equipos de recogida y de transporte, capacidad del lugar y de la pila, etc. El valor de este parámetro varía en un amplio rango dependiendo del grado de compactación de los residuos (Moreno y Moral, 2011).

En mezclas muy densas se procura añadir otros materiales más ligeros con el fin de mejorar la aireación y la vida microbiana (Moreno y Moral, 2011).

En promedio, el montón de compost debe contener un 50 por ciento de partículas orgánicas y el otro 50 por ciento debe contener aire y agua en igual proporción. De ser necesario, algunos materiales pueden triturarse ligeramente, para ganar superficie de contacto y facilitar la actividad microbiana (Bueno *et. al.*, 2008).

### **2.12.3. pH**

El pH de la mezcla de la pila de compost debe encontrarse en un rango de 6 a 8 para beneficiar el trabajo microbiano y la rapidez en la descomposición del material biodegradable. Se debe procurar pues, que los materiales empleados, tengan pH neutro, o de lo contrario, mezclarlos con otros materiales más ácidos o alcalinos, según el caso, y de esta manera neutralizar el pH en la pila (Moreno y Moral, 2011).

Los materiales ácidos que podemos encontrar para compostar, son por ejemplo restos de cosechas de tierras ácidas, hojas de coníferas, residuos de cítricos.

En los materiales compostables utilizados, es de esperar que la bosta de caballo presente cierta acidez, por su contenido de úrea; los residuos de cocina podrían presentar pH ligeramente ácido, debido a que son transportados en bolsas herméticas donde podría

iniciar una fermentación anaeróbica y la consiguiente acidificación en el medio. Los rastrojos vegetales se caracterizan por un pH relativamente neutro (Bueno, 2007).

#### **2.12.4. Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica representa la concentración de sales en la fase líquida del compost. Depende de la naturaleza y procedencia de los materiales, es decir, del contenido de sales solubles en cada uno de estos (Bueno *et. al.*, 2008). La conductividad eléctrica generalmente aumenta durante el compostaje, como consecuencia de la mineralización y la formación de iones amonio y nitratos (Bueno *et. al.*, 2008). Por ello no es recomendable que sea alta al inicio, ya que los valores finales deben estar por debajo de los 12 mS/cm, de acuerdo con la norma mexicana de calidad de compost NMX-AA-180-SCFI-2018.

La bosta de caballo presenta una conductividad eléctrica igual a 5 mS/cm, en los residuos cocina es de 3 mS/cm y en los rastrojos vegetales, de 2 mS/cm (Red Española de compostaje, 2014).

#### **2.12.5. Humedad relativa**

Este parámetro indica el porcentaje de agua en la masa húmeda de compost, equivale a la suma del agua libre, capilar e higroscópica. Para iniciar el proceso se recomienda una humedad ideal entre 50 y 70 por ciento.

La humedad relativa de los residuos orgánicos es variable. En los estiércoles depende de la dieta del animal; en los rastrojos vegetales, depende de su capacidad de retención de agua; en los residuos de cocina, dependerá de la cantidad de agua utilizada durante la preparación de comidas.

La bosta de caballo presenta una humedad relativa de 17 por ciento, mientras que los rastrojos vegetales cuentan con una humedad relativa de 10 por ciento y los residuos de cocina, de 80 por ciento (REC, 2014).

Si la humedad relativa inicial es superior a 70(%) se debe buscar la forma de disminuirla, ya sea por evaporación, o modificando la proporción de materiales, adicionando mayor proporción de materiales secos que absorban la humedad (Robles, 2015).

### **2.13. Parámetros de evaluación durante el compostaje**

Estos parámetros nos indican cómo va evolucionando el proceso de compostación en cada mezcla o tratamiento, mediante los cuales se puede observar las diferencias entre un tratamiento y otro.

Es importante evaluar cada uno de estos parámetros, ya que deben seguir un comportamiento estándar que garantice que el proceso funciona efectivamente. Si se observa algún valor fuera de los rangos recomendados establecidos en la literatura, se procura corregirlo, adoptándose medidas que mejoren las condiciones en el sistema, que favorezcan la actividad microbiana. Estas condiciones incluyen no solo al sistema de compostaje y procedimientos físicos, químicos y biológicos adoptados, sino también el clima donde se desarrolla la investigación (Bueno, 2007).

Los factores que intervienen en un sistema al aire libre de compostación, pueden ser múltiples y muy complejos. La compostación al aire libre es lenta y a veces puede verse limitado el desarrollo de los microorganismos; conservar los nutrientes de los residuos orgánicos al máximo no siempre es posible; tampoco se puede asegurar una higiene absoluta en el compost. Sin embargo, se ha seleccionado los parámetros de control más convenientes para su evaluación. Estos son, la temperatura, el pH, la conductividad eléctrica, la humedad relativa, la aireación, la materia orgánica, la relación carbono nitrógeno, la densidad aparente, la capacidad de retención de agua, entre otros.

#### **2.13.1. Temperatura**

Al comienzo del proceso, la temperatura en la pila compost se encuentra en equilibrio con la temperatura ambiental. Al crecer los microorganismos y comenzar a descomponer la materia orgánica, se desprende calor en la pila, elevándose la temperatura. Esto es conocido como la capacidad de autocalentamiento, la cual es mayor durante los primeros días del proceso, y luego disminuye con el tiempo del compostaje, hasta estabilizarse nuevamente con la temperatura del medio ambiente. En función de la temperatura, se establecen cuatro etapas del proceso de compostaje:

A. Etapa mesófila 1

Es la etapa inicial del proceso, en la que se presentan temperaturas menores a los 45°C. En esta fase se descompone la materia orgánica lábil. Actúan microorganismos mesófilos que se reproducen rápidamente, elevando la temperatura, a consecuencia de las reacciones metabólicas. Se observa la producción de ácidos orgánicos, manifestándose una leve acidez en la pila.

B. Etapa termófila

Durante esta etapa la temperatura se encuentra por encima de los 45°C hasta 70°C. En esta fase la microflora mesófila es sustituida por microflora termófila. Se descompone principalmente proteínas, aceites, grasas y hemicelulosas. Los microorganismos termófilos transforman el nitrógeno orgánico en amoníaco, lo que conlleva a elevaciones en el pH. En esta etapa se eliminan los gérmenes patógenos, gracias a las altas temperaturas; además es transformada la mayor parte del material biodegradable.

C. Etapa de enfriamiento o mesófila 2

La mezcla comienza a disminuir su temperatura, se alcanzan nuevamente temperaturas por debajo de los 45°C. En esta fase ya se ha consumido la mayor parte de los nutrientes, por ello, desaparecen los microorganismos termófilos, reapareciendo microorganismos mesófilos, que se alimentan de materiales más resistentes como ligninas y polímeros muy complejos. El pH desciende ligeramente (Cajahuanca, 2016).

D. Etapa de maduración

La temperatura se estabiliza en valores cercanos a la temperatura ambiente. Esta etapa se caracteriza por la formación de compuestos húmicos muy estables. Se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización del humus.

Durante cada etapa del compostaje se observa la aparición de grupos de microorganismos que se desarrollan a un intervalo de temperatura en concreto. Cada especie encuentra una temperatura óptima en la que su actividad se beneficia y es más efectiva: entre 15°C-45°C aparecen microorganismos mesófilos y entre 45°C-70°C, microorganismos termófilos (Bueno, Díaz y Cabrera, 2008).

El calentamiento de la pila puede ocurrir también a consecuencia de otros factores como las dimensiones en la pila de compost. A mayor volumen y masa del material, mayor será el calor producido, por otro lado, a mayor superficie de contacto en la pila, mayores serán

las pérdidas de calor. Otros factores que afectan a la temperatura del compostaje son las condiciones meteorológicas del área de estudio, y el método de adición de aire a la pila, por medio de volteos manuales o por medio de aireación forzada. (Pisco, 2014).

Las temperaturas máximas, sobre los 75°C, pueden perjudicar el crecimiento y la multiplicación de microorganismos, que son los que generan este mismo calor; este fenómeno se conoce como suicidio microbiano. Para corregir la temperatura, se debe incitar la pérdida de calor mediante el volteo de la pila o la aireación forzada (Ocampo, Robles y Wu, 2002).

La temperatura es el parámetro fundamental del compostaje, ya que indica un equilibrio entre la aireación, la humedad y los componentes de la mezcla. Hay una relación directa entre la elevación de la temperatura y la rapidez de descomposición de los compuestos orgánicos. Así también, con el tiempo durante el cual la temperatura ha sido alta. Monitoreando la evolución de la temperatura se puede deducir el nivel de estabilización que se ha logrado (Labrador, 1996).

En la Tabla 5, se observa los organismos patógenos que se logran eliminar durante el compostaje en función de la temperatura.

**Tabla 5: Destrucción de patógenos por temperatura**

<b>Organismos</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Tiempo</b>
<i>Salmonella typhosa</i>	56°C	1 hora
<i>Salmonella spp.</i>	55°C	1 hora
<i>Escherichia coli</i>	55°C	1 hora
<i>Micrococcus aureus</i>	50°C	10 min
<i>Streptococcus pyogenes</i>	54°C	10 min
<i>Corynebacterium diphtheriae</i>	55°C	45 min
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	66°C*	20 min
<i>Shigella spp.</i>	55°C	1 hora
<i>Brucella abortus</i>	61°C*	3 min
<i>Taenia saginata</i>	71°C*	5 min
<i>Trichinella spiralis</i>	50°C	1 hora
<i>Necator americanus</i>	45°C	50 min

\*Las altas temperaturas están relacionadas con periodos cortos, la eliminación puede ocurrir con temperaturas más bajas, pero con periodos más largos.

FUENTE: Jones y Martin (2003)

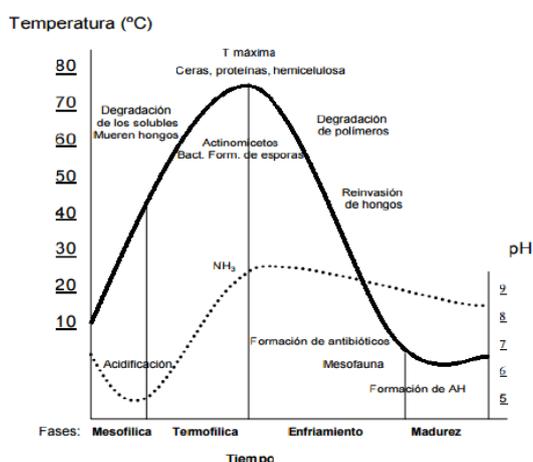
### 2.13.2. pH

El pH durante el compostaje influye sobre la presencia y dinámica de los microorganismos. La microflora del compost se desarrolla correctamente a pH neutro o ligeramente alcalino (7-8). En general los hongos toleran un margen de pH más amplio, entre 5-8, mientras que las bacterias tienen menor capacidad de tolerancia (Bueno, 2007).

En la etapa mesófila inicial, se degrada el material orgánico lábil, se observa la liberación de ácidos orgánicos simples, con lo que podría disminuir el pH. Eventualmente, el pH puede descender pronunciadamente, cuando ocurren condiciones anaeróbicas, que acidifican aún más el medio de la pila de compost. En la etapa termófila, ocurre una alcalinización progresiva del medio, como consecuencia de la descomposición de proteínas y liberación de amoníaco, el cual actúa como una base en el medio (Bueno *et. al.*, 2008). Por último, durante la etapa de maduración, el pH tiende a ser neutro como consecuencia de la presencia de compuestos húmicos y fúlvicos, los cuales tienen la capacidad de amortiguar el pH.

Suler y Finstein (1976) definieron la relación entre los cambios de pH y la aireación. Una adecuada aireación evita que se den condiciones anaeróbicas que acidifican el medio. Estos autores afirman que un compostaje con aireación adecuada produce un compost final con un pH de 7-8; afirman también que, a pHs muy bajos se inhiben los procesos de degradación, siendo esto un síntoma de inmadurez del compost.

En la Figura 4, se observa las variaciones del pH durante el compostaje.



**Figura 4. Evolución del pH y la Temperatura durante las etapas del Compostaje**

FUENTE: Díaz (2017)

### **2.13.3. Conductividad eléctrica**

La tendencia de este parámetro durante la compostación es a aumentar, como consecuencia de reacciones durante el proceso, de mineralización y de formación de sales de nitratos (Moreno y Moral, 2011). Su valor será más alto conforme mayor sea la facilidad con que se mueve la corriente eléctrica a través del mismo, y esto dependerá del tipo de sales solubles presentes, así como de su concentración (Bueno *et. al.*, 2008). Por otro lado, en ocasiones la conductividad eléctrica puede disminuir, por efecto de fenómenos de lixiviación de sales, generados por un riego excesivo en la pila de compost (Bueno *et. al.*, 2008).

Es un parámetro que no se toma mucho en cuenta al evaluar el proceso de compostaje; sin embargo, es importante como criterio de calidad final, ya que una alta concentración de sales puede tener un efecto tóxico en los cultivos. Al realizar la aplicación del compost al suelo, la cantidad debe ser proporcional a su conductividad eléctrica. Los excesos de conductividad eléctrica perjudican la absorción de agua por las raíces de las plantas, y en estas condiciones sólo sobreviven especies muy resistentes (Bueno *et. al.*, 2008).

Idealmente, el valor de la conductividad eléctrica debe ser menor a 1.5 mS/cm para lograr una adecuada germinación y crecimiento de plántulas (Moreno y Moral, 2011).

### **2.13.4. Humedad relativa**

La humedad relativa en el compostaje es regulada mediante la incorporación de agua a las pilas, sobre todo en sitios donde la precipitación es escasa. Los materiales utilizados repercuten también en la humedad y deben seleccionarse teniendo en cuenta la textura del residuo, la cual brinda propiedades esponjantes, estructurantes y de soporte, que favorecen la retención de la humedad. La materia orgánica, por naturaleza, tiene la propiedad de retener humedad. La fracción orgánica aporta la máxima retención de la humedad en el residuo (Rabbani, Jindal, Kubota y Obeng, 1983).

La humedad relativa de la pila de compostaje debe mantenerse entre 50 y 70 por ciento. No debe bajar de 45 – 50 por ciento, excepto en la etapa final que puede llegar a 30 – 40 por ciento (Mirabelli, 2008). El componente acuoso en el compost provee el medio de

transporte de sustancias que sirven de alimento a los microorganismos y así mismo, conduce las sustancias de desecho y productos de las reacciones metabólicas (Moreno y Moral, 2011). El agua durante el compostaje, no debe ocupar los espacios porosos totalmente. Cuando la humedad relativa está por encima del 70 por ciento puede afectarse la aireación de la mezcla, y con esto la liberación de gases de desecho y la entrada de oxígeno, produciéndose anaerobiosis, que puede atraer malos olores y dificultar la descomposición (Bueno *et. al.*, 2008).

Comúnmente se utiliza el método del puño para estimar si a la mezcla le falta agua o si le sobra, tomándose una cantidad de mezcla con el puño y apretándola. Si se humedece la mano, sin llegar a escurrir agua entre los dedos, la humedad será adecuada (Palmero, 2010).

Shulze (1962) estudió la relación entre distintos valores de humedad y el oxígeno consumido por una masa de compost, a una temperatura constante. Resultando que pequeños cambios en la humedad provocaba grandes elevaciones de la temperatura y mayor oxígeno consumido.

El agua en la pila puede fácilmente evaporarse o infiltrarse en el suelo. Es aquí donde cobra importancia el manejo que se da a la pila mediante el riego.

#### **2.13.4.1. Riego de la pila**

El riego se efectúa con una frecuencia y técnica determinada. Se realiza con una manguera de riego común reforzada. La técnica debe ser tal que, empape todo el material uniformemente, teniendo el cuidado del caso, ya que el agua a veces circula sin empapar todo el montón o se escurre por los lados sin penetrar en el interior.

El agua ideal para compostar es la de lluvia, porque está saturada de oxígeno, además de que retiene partículas en suspensión y microorganismos, que pueden servir como activadores en el compost. El agua potable con cloro puede ser perjudicial, ya que el cloro es bactericida y puede inhibir los procesos fermentativos. Una alternativa para usar agua con cloro, es almacenarla en bidones para que el cloro se evapore (Palmero, 2010). El agua utilizada para la presente investigación fue agua de pozo de la UNALM.

### **2.13.5. Materia orgánica**

El contenido de materia orgánica cobra importancia en el compost debido a sus propiedades y funciones en el suelo. La materia orgánica se solubiliza en el agua, interactuando con minerales como las arcillas y forma compuestos complejos, con iones metálicos y óxidos hidratados, permitiendo la liberación o biodisponibilidad de los nutrientes, para poder ser absorbidos por las raíces de las plantas. Cuando el tiempo de compostaje es demasiado largo, el compost podría disminuir sus propiedades nutritivas, como consecuencia de una mineralización excesiva.

Otra propiedad importante es que mejora la estructura en suelo, porque contribuye a la formación de estructuras granulares. Este tipo de estructura mejora la permeabilidad en el suelo al mismo tiempo que atribuye una buena capacidad de retención de agua. La materia orgánica puede llegar a retener el 90 por ciento de su peso en agua, lo que es también una ventaja para la disposición de nutrientes.

“El conocimiento del contenido de materia orgánica es fundamental, pues se considera como el principal factor para determinar su calidad agronómica” (Kiehl, 1985). El contenido de materia orgánica nos da una clara idea de la fertilidad que aporta el compost. La presencia o ausencia de materia orgánica es un parámetro útil para prevenir la pérdida de fertilidad en los suelos y para los cultivos, aplicando mayores cantidades al suelo, para lograr mayor calidad agronómica.

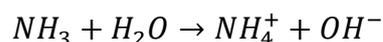
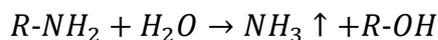
El parámetro utilizado para estimar la materia orgánica en términos agronómicos, es el carbono orgánico total, el cual representa la materia orgánica estabilizada. El carbono orgánico total se determina a partir de los sólidos volátiles, multiplicándolos por un factor de conversión igual a 0.58. Los sólidos volátiles son obtenidos mediante el método de calcinación.

### **2.13.6. Relación carbono nitrógeno**

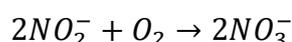
La relación carbono nitrógeno a lo largo del compostaje es un indicador de la madurez del material. Los microorganismos se alimentan del nitrógeno orgánico, presente en péptidos y proteínas. La microflora transforma el nitrógeno a formas mineralizadas, generándose pérdidas de nitrógeno como gas amoniacado durante la descomposición. El nitrógeno sufre

un ciclo de reacciones químicas en la pila de compost, principalmente reacciones de amonificación, nitrificación y desnitrificación.

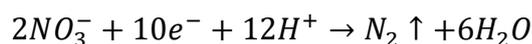
Amonificación:



Nitrificación:



Desnitrificación:



La concentración de las formas de nitrógeno dependerá de la rapidez en la descomposición orgánica, y de la evolución de estas reacciones (Sánchez-Monedero, Roig, Paredes y Bernal, 2001).

Para que el compostaje sea eficiente, es decir, que se aproveche la mayor parte del nitrógeno y del carbono, sin que se ralentice ni que se acelere demasiado el proceso, la relación carbono nitrógeno del material debe ser entre 25-35 partes de carbono por 1 de nitrógeno (Bueno *et. al.*, 2008).

Cuando la relación carbono nitrógeno es mayor a 40, disminuye la actividad biológica, ocurre la ralentización del proceso, porque los microbios demoran oxidando el alto contenido de carbono; además, al no obtener el nitrógeno necesario, deben esperar que fallezcan colonias de microorganismos, para que el nitrógeno contenido en ellas se recicle, y sirva de alimento para la sucesión de nuevas especies microbianas.

Por otro lado, cuando la relación carbono nitrógeno es menor a 18-19, las reacciones del metabolismo microbiano pueden ocurrir con mayor rapidez (Golueke y Díaz, 1987), pero el nitrógeno excedente se desprende como amoníaco. Esta pérdida de nitrógeno, si bien no

afecta en la actividad microbiana; supone un derroche de nitrógeno, ya que este es el nutriente fundamental para las plantas, además que representa un problema medioambiental, ya que el amoníaco es un gas de efecto invernadero (Bueno *et. al.*, 2008).

Durante la compostación, un valor en concreto de la relación carbono nitrógeno, no refleja, ni es indicador, del estado de madurez del compost, debido a que el nitrógeno varía mucho, como efecto de las reacciones de transformación.

La relación carbono nitrógeno en el compost terminado y totalmente maduro debe ser cercana a 15:1, similar a la relación carbono nitrógeno del humus. Lo más indicado para la verificación de este parámetro es evaluar la tendencia a disminuir, o calcular la diferencia entre el valor inicial y final para poder determinar el grado de madurez del compost.

#### **2.13.7. Aireación**

Otro elemento importante para los microorganismos, además de los nutrientes y el agua, es la presencia de oxígeno, ya que estos microorganismos son aerobios en gran mayoría. El porcentaje de oxígeno aumenta en la parte más externa de la pila, siendo casi igual al porcentaje de oxígeno en el aire (18%-20%). Conforme se profundiza al interior de la pila, el oxígeno disminuye y aumenta el porcentaje de dióxido de carbono. A más de 60 cm de profundidad el porcentaje de oxígeno suele estar entre 0.5 y 2 por ciento (Bueno *et. al.*, 2008).

Los volteos airean el material bajo un efecto breve, quedando la pila aireada pasivamente. Después de ser efectuado el volteo, los microorganismos toman el oxígeno rápidamente acelerando su actividad. En cada volteo, mueren millones de microorganismos, y sus restos sirven de alimento para otros microorganismos, con los que se multiplican rápidamente, favoreciendo la descomposición.

En ausencia de ventilación, los microorganismos aerobios mueren, sustituyéndolos los microorganismos anaerobios, deteniéndose los procesos de degradación, además que aparecen malos olores por la presencia de sulfuro de hidrógeno.

Por otro lado, una excesiva ventilación puede ser también perjudicial ya que provoca el enfriamiento de la masa, y la temperatura no evoluciona de forma adecuada, limitándose la aparición de microorganismos mesófilos y termófilos (Bueno *et. al.*, 2008).

Durante la última etapa del compostaje, no es necesario hacer mayores aportaciones de oxígeno, porque la actividad microbiana es mucho menor. El exceso de aireación en esta etapa, puede propiciar pérdida de compuestos húmicos o su total mineralización (Bueno *et. al.*, 2008).

#### **2.13.7.1. Densidad aparente**

La densidad aparente con el tiempo de compostaje se va incrementando, como consecuencia de una mayor descomposición y reducción del tamaño de las partículas. Altos valores de densidad aparente en general indican un incremento en masa y reducción en la porosidad, mientras que muy bajos valores de densidad aparente indican excesiva aireación e indirectamente una disminución del agua disponible (Quevedo, 2017).

Los compost ya terminados presentan una densidad aparente entre 400 y 700 kg/m<sup>3</sup> (Moreno y Moral, 2011).

#### **2.13.7.2. Volteo de la pila**

La frecuencia de los volteos va a estar condicionada a los valores de la temperatura. El volteo debe garantizar la homogenización e higienización del material; haciendo pasar toda la masa por la zona central, donde se alcanzan las temperaturas más elevadas, y así eliminar los agentes patógenos en todo el material. La frecuencia para realizar los volteos, de modo estándar, se considera cada 15 días, esto ayudará a la eliminación de gases y malos olores productos de la fermentación, los cuales de permanecer en los cúmulos de compost podrían generar molestias en los alrededores, así como a los operadores (Moreno y Moral, 2011).

El sistema de compostaje en pilas requiere de mucho cuidado, de ahí que sea un método lento; aún con un adecuado sistema de volteos y aireación, se necesita en promedio, 100 - 120 días para obtener buenos resultados de estabilización (Moreno y Moral, 2011).

### **2.13.8. Capacidad de retención de agua**

La capacidad de retención de agua está determinada por propiedades en el compost como su textura, su estructura y porcentaje de materia orgánica. Está representada por el agua que almacena el compost; luego de que el agua gravitacional drene a favor de la pendiente, se pierde al ambiente por evaporación, o es absorbida por las plantas. En otros términos, corresponde al agua higroscópica más el agua capilar. Su medida indica el contenido de agua en la muestra de compost saturada a capacidad de campo, en relación a su masa seca.

El valor recomendado de capacidad de retención de agua en el compost, se encuentra entre 85 y 120 g/100g MS, de acuerdo con la norma austriaca Ö NORM S 2200, lo que significa que el compost debe retener, aproximadamente, su propio peso en agua.

Este es un parámetro de calidad más preciso que la humedad relativa, pues indica el contenido de agua exacto, disponible para fines agronómicos.

### **2.13.9. Condiciones climáticas**

Las condiciones climáticas del área de estudio, influyen en los sistemas de compostaje abiertos y afectan a la temperatura y a la humedad en los cúmulos de compost. El área de estudio tiene la clasificación ecológica de Desierto superárido - premontano tropical (ds-PT), de acuerdo con Holdridge (1941).

En esta zona de vida, durante los meses que se llevó a cabo la investigación, se tuvo una temperatura promedio de 22° C, precipitación escasa y una humedad relativa promedio de 72 por ciento.

Durante el día, se debe procurar que el montón de compost esté a la sombra de un árbol que lo proteja de la radiación y del calor excesivo, a fin de evitar la rápida deshidratación en la pila. De igual manera, de haber vientos intensos, pueden generar deshidratación en la pila, de manera que ésta debe ser protegida mediante barreras naturales de vegetación como setos, arbustos y otros, o artificiales como mallas y estructuras protectoras (Bueno, 2007).

En lugares con abundante precipitación y/o humedad, de ser necesario, se recomienda cubrir la pila de compost durante las noches, con una lona impermeable, que a la vez sea transpirable, para que no afecte la entrada de oxígeno (Bueno, 2007).

Durante el día, las temperaturas suelen ser más altas. Conforme pasan los días, se evapora la humedad, y será necesario realizar el riego. Se aconseja regar durante la mañana para evitar excesos de humedad.

#### **2.14. Madurez del compost y aplicación al suelo**

Una vez que se termina la etapa de maduración, se puede cosechar el compost y ser aplicado como abono o enmienda orgánica en el suelo. La manera de aplicarlo puede a nivel superficial, cubriéndolo con un acolchado de pajas; o puede mezclarse bajo superficie en la tierra, solamente cuando ya lleva varios meses de maduración y el material no perjudicará a los cultivos (Bueno, 2007).

La aplicación del compost inmaduro no es recomendable, ya que el compost inmaduro no ha pasado la etapa termófila del compostaje, para eliminar posibles patógenos presentes en el material. Además, su incorporación a la tierra de cultivo puede generar un exceso de nitrógeno en el suelo y propiciar la presencia de plagas, que dañan a las raíces y plantas (Bueno, 2007).

Bueno (2007) indica que, se aplica idealmente un compost inmaduro, pero que haya culminado la fase termófila, y además un compost maduro. El primero brinda mayor actividad microbiológica y materia orgánica; y el segundo actúa como una reserva de nutrientes, a la vez que incrementa la fertilidad del suelo.

Cabe mencionar que hay plantas más voraces que otras, y plantas que son poco exigentes en nutrientes. Esto condicionará también las cantidades de compost a aplicar en el suelo.

Por último, el tipo de suelo también condiciona la manera de incorporar el compost al suelo. Los suelos arenosos precisan de compost inmaduros ya que requieren mayores cantidades y reposiciones de nutrientes, debido a que estos drenan y lixivian los líquidos más rápido. En cambio, en suelos arcillosos y húmedos se procura usar compost muy descompuestos y

maduros, ya que, si se entierra materia orgánica a medio descomponer en estos suelos, pueden propiciarse condiciones anaeróbicas desfavorables (Bueno, 2007).

### **2.15. Calidad del compost**

La calidad del compost se refiere al cumplimiento de valores estándar en los resultados de medición de parámetros físicos, químicos y biológicos en el compost final para garantizar sus bondades fertilizantes y de mejorador de suelos, según el uso para el que se requiera. Para determinar la calidad del compost se siguen criterios como el contenido materia orgánica, la cantidad de fitonutrientes, la relación carbono nitrógeno, sustancias contaminantes, contenido de metales pesados; y además implica otros factores que dan valor a su producción, como, por ejemplo, mejoría en la gestión de residuos sólidos, beneficios sociales y ambientales, ahorro energético y económico, etc. (Bohórquez, Puentes y Menjivar, 2014).

Debido a la variedad de materiales compostables y mezclas de ellos, un compost compite con diversos abonos de distintas calidades y cualidades. Sin embargo, existe una calidad general del compost, concorde a su uso potencial; la cual considera que, a los noventa días del compostaje, la madurez del compost es tal, que manifiesta al máximo sus beneficios, contiene adecuados porcentajes de nutrientes y facultades fertilizantes (Bohórquez *et. al.*, 2014).

Según Ansorena (2016), la calidad del compost no es un concepto absoluto. Dicho autor la define como “la capacidad o aptitud del compost para satisfacer las necesidades de las plantas, con un mínimo impacto ambiental y sin riesgo para la salud pública”.

### **2.16. Norma técnica de calidad de compost**

Como referencia comparativa, además de libros de referencia especializados en calidad del compost aplicado a suelos agrícolas, se ha considerado las normas de calidad de compost. Las normas técnicas nos brindan la ventaja que son documentos vigentes y son elaboradas de acuerdo a la realidad y situación del compostaje en el respectivo país. Han sido elaboradas por instituciones y centros de investigación especializados, con el fin de brindar productos confiables a usuarios y consumidores. Son de gran ayuda para los agricultores, quienes

requieren saber qué tipo de producto se está aplicando a los suelos, y qué cantidades, de acuerdo a sus propiedades y especificaciones técnicas (Pérez, Céspedes y Núñez, 2008).

La norma mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018, establece los métodos y procedimientos para el tratamiento aerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Describe la infraestructura y especificaciones técnicas de una planta de compostaje, así como los parámetros de calidad del compost producido, la información comercial y la metodología de muestreo.

Los parámetros de calidad que se ha visto conveniente comparar en el compost final son los siguientes:

**Tabla 6: Parámetros de calidad según la norma mexicana**

<b>Parámetros</b>	<b>Norma Mexicana MX-AA-180-SCFI-2018</b>
Temperatura	25 °C – 50 °C
pH	6.7 – 8.5
Conductividad Eléctrica	0.5 dS/m - 12 dS/m
Humedad Relativa	25 % - 45 %
Carbono Orgánico Total	Mínimo 10 %
Relación C/N	15 – 25
Fitotoxicidad (Índice de Germinación)	IG ≥ 80 %
Macronutrientes primarios (N, P, K)	De 1% a 3% en cualquiera de ellos y su suma ≤ 7 %

FUENTE: Dirección General de Normas (2018)

Las normas técnicas suelen ser de mayor exigencia respecto a metales pesados y a contaminantes microbiológicos, ya que se enfocan en aspectos de inocuidad y sustancias peligrosas para el consumo humano, más que en la calidad fertilizante y agronómica. Por otro lado, en Latinoamérica, la normativa en general es más flexible; sin embargo, hay países como Brasil, donde la norma es estricta en parámetros como materia orgánica y nitrógeno y no deja de ser exigente en sustancias contaminantes como el mercurio (Cabrera y Rossi, 2016).

## **2.17. Macronutrientes y micronutrientes esenciales en el compost**

Los macro y micro nutrientes son los elementos esenciales para el desarrollo de las plantas. Las plantas absorben del suelo muchos elementos, pero está demostrado que sólo dieciséis de ellos son esenciales.

Las plantas requieren estos elementos a fin de completar sus ciclos vegetativo y reproductivo. Cumplen funciones específicas en el metabolismo de la planta, ya que no pueden ser reemplazados por otro elemento; se identifican como parte de un metabolito o alguna otra estructura química.

La ausencia o cantidades limitadas de estos nutrientes puede producir alteraciones graves en los cultivos, ya que los procesos bioquímicos se ven limitados; mientras que el exceso de estos nutrientes produce un efecto tóxico, y limita el crecimiento de los cultivos. Los macronutrientes, como lo dice su nombre, son requeridos en mayores cantidades por las plantas (Guerrero, 2005). Estos son el nitrógeno, el fósforo y el potasio (macronutrientes primarios) y el azufre, calcio, magnesio y sodio (macronutrientes secundarios). El nitrógeno se considera de mayor importancia por su función proteínica en el protoplasma, lo que es esencial en la reproducción celular de las plantas. El fósforo cumple un rol importante formando compuestos celulares ricos en energía, necesarios durante el metabolismo microbiano. El potasio cumple un rol en la regulación de la presión osmótica del líquido celular, además que interviene durante la síntesis de proteínas (Mirabelli, 2008).

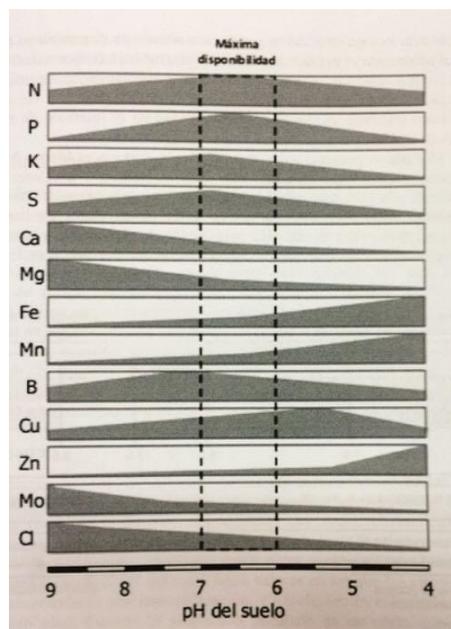
Por otro lado, los micronutrientes son requeridos en menores cantidades por la planta y es menos probable su deficiencia en el suelo. Los micronutrientes cumplen un rol fundamental en la formación de enzimas y en los mecanismos de transporte intracelular y extracelular. Su función primordial es favorecer los procesos que llevan a cabo la asimilación del resto de nutrientes.

Siguiendo un criterio estructural, los nutrientes se pueden clasificar en cuatro grupos.

- Grupo 1: carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y azufre; ligados mediante enlaces covalentes como elementos fundamentales en la materia reorganizada.
- Grupo 2: fósforo y boro; existen en forma de fosfatos y boratos, formando oxianiones.

- Grupo 3: potasio, magnesio, calcio, manganeso y cloro; formando iones que tienen la función de regular la presión osmótica. También cumplen funciones enzimáticas, encontrándose como complejos de metal-proteína.
- Grupo 4: hierro, cobre, zinc; formando quelatos o metaloenzimas, fundamentales en los procesos de óxido-reducción (Guerrero, 2005).

En la Figura 5 se puede observar la disponibilidad de nutrientes en un suelo o sustrato, según el valor del pH.



**Figura 5: Disponibilidad de nutrientes en función del pH**  
FUENTE: Navarro y Navarro (2013)

## 2.18. Test de germinación y crecimiento de semillas en compost

El índice de germinación elaborado por Zucconi, Pera, Forte y De Bertoli (1981), es el más utilizado para evaluar la madurez del compost. En este test se evalúan tanto la germinación de semillas como el crecimiento de las plántulas emergentes, que pueden verse afectados con el contenido de sustancias fitotóxicas. Dichas sustancias son metabolitos secundarios formados durante las reacciones de degradación. Este test evalúa el nivel de dichas sustancias en el compost, cuando es inmaduro, o cuando siendo maduro aún mantiene un contenido de ellas, que no pudieron ser removidas durante la compostación. Dependiendo de la concentración de sustancias fitotóxicas, puede retardarse la germinación, o bien inhibirse el crecimiento (Zucconi *et. al.*, 1981).

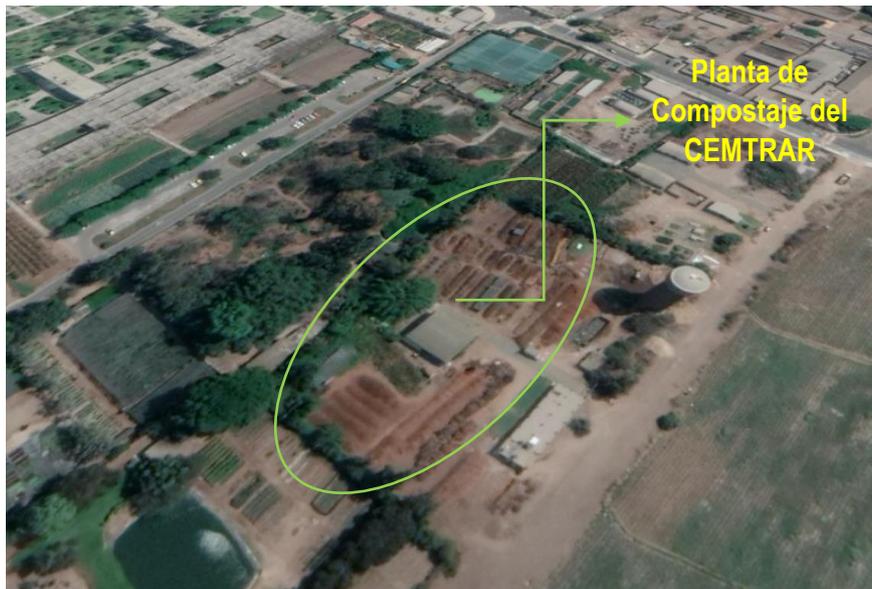
Algunos criterios cualitativos para la evaluación de esta prueba, según Bueno (2007), son los siguientes:

- Cuando la germinación ocurre de forma rápida, dentro de los 3 primeros días de la prueba, se trata de un compost bien fermentado.
- Cuando los primeros brotes y hojas aparecen y se desarrollan dentro de los 15 primeros días, indica que es un compost maduro y de calidad, con adecuado contenido de nutrientes.
- Si la germinación se da de forma irregular, el compost no está bien fermentado ni descompuesto.
- Cuando a germinación ocurre en 8 días o más, el compost tiene un exceso de nutrientes, puede tratarse de compost de estiércoles, y contiene sustancias volátiles tóxicas.
- Los amarillamientos, la baja intensidad del verde, las podredumbres, las necrosis, el secado de la plántula, formación de velos o telarañas; son evidencias de hongos, patógenos o sustancias fitóxicas (Bueno, 2007).

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Ubicación de la investigación

El presente trabajo de investigación se desarrolló en la Planta de Compostaje del Centro Modelo de Tratamiento de Residuos Sólidos CEMTRAR, ubicada en el campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina, distrito de La Molina, ciudad de Lima. En la Figura 6 se observa la ubicación de dicha planta, cuyas coordenadas geográficas son 12°05'05.07''S; 76°56'47.61''O, y se encuentra a una altitud de 241 m.s.n.m.



**Figura 6: Ubicación del área de estudio**

#### 3.2. Características Ecológicas

Las condiciones ecológicas del distrito de La Molina corresponden a una zona calificada como desierto superárido – Premontano Tropical, según la clasificación climática de Holdridge (1971). Durante los meses en que se ha realizado la fase experimental, la temperatura mensual promedio ha sido de 22°C, con temperatura mínima de 17°C durante la madrugada, a las 4:00 am, y temperatura máxima de 26.5°C, a las 2:00 pm; la humedad

relativa media fue de 72 por ciento, con humedad máxima de 90 por ciento a las 6:00 am y una mínima de 50 por ciento a las 2:00 pm; la presión atmosférica fue de 985 mb y velocidad del viento promedio fue de 3 m/s; estas condiciones son favorables para este tipo de investigación.

### **3.3. Materiales**

#### **Construcción de las pilas**

- Residuos del comedor
- Rastrojos vegetales
- Bosta de caballo
- Pala
- Carretilla
- Trinche
- Manguera

#### **Equipo de seguridad:**

- Mascarilla
- Mandil guardapolvo
- Guantes
- Botas de jebe

#### **Ensayos de laboratorio**

- Baldes de plástico
- Bolsas de muestreo
- Envases pequeños de plástico
- Bandejas de plástico
- Papel filtro
- Semillas de lechuga (*Lactuca sativa*)
- Materiales de laboratorio (pipetas, vasos Erlenmeyer, vaso de precipitado, tubos de ensayo, etc.)

### **3.4. Equipos**

- Estufa
- Potenciómetro
- Conductímetro
- Balanza analítica
- Termómetro digital
- Mufla
- Equipo de digestión y destilación de Kjeldahl.
- Molino
- Cámara fotográfica digital
- Computadora portátil
- Calculadora

### **3.5. Muestreo de los materiales**

Se realizó un muestreo de cada material, con la ayuda de una pala y una carretilla, una bolsa de muestreo y el equipo de protección correspondiente.

Antes de realizar el muestreo se siguieron ciertas medidas en el manejo de los materiales:

- Los rastrojos vegetales fueron previamente fragmentados con ayuda de palas y trinchas.
- La bosta de caballo ha sido pre compostada con un volteo semanal y riego de la pila.
- Los residuos de cocina, provenientes del comedor universitario, han sido previamente segregados, eliminando algunos residuos inorgánicos e impurezas presentes en la recolección.

Se siguió el método de cuarteo de la muestra, el cual garantiza que ésta sea representativa, como se describe a continuación:

- Colocar los materiales a modo de pilas o montones
- Seleccionar los puntos de muestreo. Estos deben ser 3, y a una profundidad de 30 cm aproximadamente.
- Tomar una porción de 1 Kg. aproximadamente en cada punto de muestreo, con ayuda de herramientas como palas y trinchas y depositarla en una carretilla.
- Se coloca toda la muestra en forma cónica y se divide en cuatro partes iguales.

- Se eliminan dos partes, y las dos partes restantes, se vuelven a mezclar y se colocan nuevamente en forma cónica para realizar un segundo cuarteo.
- Si es necesario se repite el cuarteo hasta obtener la cantidad apropiada para realizar los ensayos (1 ó 2 Kg.)
- Se etiqueta la muestra en una bolsa de plástico y se almacena en el laboratorio (Binner, 2017).

### 3.6. Ensayos medidos en los materiales

Para la caracterización de los materiales se han realizado los siguientes ensayos.

#### A. Determinación de la relación carbono nitrógeno

Para determinar la relación de carbono nitrógeno de los materiales se determina por separado el carbono orgánico total y el nitrógeno total. Para ello previamente se realiza la molienda de la muestra:

- Tomar la muestra de cada material (residuos de cocina, bosta de caballo y rastrojos vegetales) de 200 gramos aproximadamente.
- La muestra es secada en una estufa de laboratorio para retirar la humedad, a 105°C por 24 horas, y molida a un tamaño menor de 0.5 mm, usando un molino de discos de platillo de ágata.



**Figura 7: Molienda de la muestra**

En la Figura 7 se puede observar el proceso de molido de la muestra seca de residuos de cocina. La muestra pulverizada se utilizó para el análisis de nitrógeno, así como para el análisis de carbono orgánico total, pH y conductividad eléctrica del material.

- **Nitrógeno Total**

La concentración de nitrógeno en la muestra se determinó mediante el método de Kjeldahl. Este método consiste en llevar a un proceso de digestión y destilación una pequeña cantidad de muestra (0.3 gr.).

Se coloca la muestra en un balón de digestión, y se adiciona una pastilla Kjeldahl, ácido sulfúrico concentrado, y se mezcla.

Esta mezcla es llevada a 400°C por 4 horas aproximadamente. Este proceso favorece la transformación del nitrógeno orgánico de la muestra en ion amonio.

En seguida, para liberar amoniaco a partir del ion amonio, se adiciona agua desionizada e hidróxido de sodio al 33 por ciento.

Luego, la muestra es llevada a un proceso de destilación mediante un equipo de destilación por arrastre de vapor de agua. El destilado es colectado en un frasco que contiene ácido bórico al 2 por ciento. Se adiciona unas gotas de indicador Tashiro.

Finalmente se procede a titular la muestra destilada con HCL 0.1 N hasta observar un cambio de color, de rojo a verde (Association of Official Agricultural Chemists [AOAC], 1990).

Se anota el gasto de HCL y se calcula el %N mediante la fórmula siguiente:

$$\%N_{Kjeldahl}[\%MS] = \frac{0.014007 * V_{\text{ácido}} * 100}{\text{peso [gr]}(100 - \text{contenido de agua restante})}$$

En la Figura 8 se observa el equipo kjeldahl utilizado durante los ensayos.



**Figura 8: Equipo kjeldahl de laboratorio**

- **Carbono Orgánico Total**

Para la determinación del carbono orgánico total, se utilizó una pequeña cantidad (10 gr.) de muestra seca y molida a menos de 0.5 mm. La metodología seguida fue el método de pérdida por calcinación. Consiste en llevar la muestra a 550°C en una mufla, para que, producto de la reacción de oxidación, se pierdan cenizas y CO<sup>2</sup>. La pérdida de peso experimentada durante esta reacción en la muestra está asociada con el contenido de materia orgánica en la muestra, mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Pérdida por calcinación} = PC[\%MS] = \frac{(\text{peso seco} - \text{peso extinguido}) \cdot 100}{\text{peso seco}}$$

El carbono orgánico total se calcula multiplicando el contenido de sólidos volátiles, hallado por diferencia de peso en la muestra, por el factor de conversión para compost de materia orgánica, igual a 0.58 (Ö NORM S 2200, 1993).

$$COT = \text{sólidos volátiles} * \text{factor de conversión}$$

En la Figura 9 se puede observar el uso de la mufla durante la calcinación, y en la Figura 10 se observa el pesaje de la muestra, luego de la pérdida de sólidos volátiles.



**Figura 9: Equipo mufla para la calcinación**



**Figura 10: Pesaje de la muestra**

Finalmente, la relación carbono nitrógeno se halla dividiendo el porcentaje de carbono orgánico total entre el porcentaje de nitrógeno total determinados.

## **B. Determinación del pH**

Para medir el pH en la muestra, se prepara una solución en la que se introduce un equipo potenciómetro, que mide el valor correspondiente del potencial de grupos  $[H^+]$ . Se pesa 10 gramos de muestra seca y molida a menos de 0.5 mm, y se le añade 100 ml de agua destilada como diluyente. Se filtra la dilución mediante un papel filtro, y luego se mide el pH en el filtrado con el potenciómetro.

La medición del pH se realiza por medio de un par de electrodos (electrodo de referencia y electrodo de gas) que representa la parte sensible del instrumento potenciómetro. La cadena de medición debe ser guardada en una solución KCl-AgCl, 3 molar, para conservarla siempre húmeda (Jorge *et. al.*, 2018).

### C. Determinación de la conductividad eléctrica

Para determinar la conductividad eléctrica de las muestras, se preparó una pasta de saturación a base de 10 gramos de muestra seca y molida a menos de 0.5 mm, con 100 ml de agua destilada. Esta disolución se agita durante dos horas en un equipo agitador de laboratorio, luego se filtra a otro envase por medio de un papel filtro, y seguidamente se pasa a medir la conductividad eléctrica con el conductímetro, en las unidades mS/cm. En la Figura 11 se puede observar el uso del equipo agitador de laboratorio para la determinación de la conductividad eléctrica.



**Figura 11: Equipo agitador de laboratorio**

### D. Determinación de la densidad aparente

Se determinó la densidad aparente pesando una muestra fresca de cada material, en un contenedor de plástico. Luego se mide el volumen del contenedor, determinado por el área de la base multiplicada por la altura del mismo, y posteriormente, se calcula la relación del peso de la muestra sobre el volumen que ocupa en el recipiente. Se expresa en  $\text{kg/m}^3$ . En la Figura 12 se observa el uso de la balanza analítica en la determinación de la densidad aparente.



**Figura 12: Balanza analítica para el pesaje de las muestras**

## E. Determinación de la humedad relativa

El procedimiento consistió en pesar la muestra fresca en una balanza, para luego llevarla a la estufa a 105°C durante 24 horas aproximadamente. Luego se toma el peso de la muestra seca. La humedad relativa se calcula mediante la siguiente expresión.

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{\text{Peso Fresco (Kg)} - \text{Peso Seco (Kg)}}{\text{Peso Fresco (Kg)}} * 100$$

Las propiedades de cada material fueron consultadas, además, en datos encontrados en fuentes bibliográficas, como se puede apreciar en la Tabla 7; estos datos han servido de referencia para luego constatarlos con los resultados obtenidos.

**Tabla 7: Características de los materiales**

Material	Relación C/N p/p	Densidad Aparente Kg/m <sup>3</sup>	Humedad Relativa (%)	pH	Conductividad Eléctrica (mS/cm)
1. Residuos de cocina	35/1 <sup>(1)</sup>	435 <sup>(1)</sup>	80 <sup>(2)</sup>	6 <sup>(1)</sup>	3.6 <sup>(1)</sup>
2. Bosta de caballo	19/1 <sup>(2)</sup>	400 <sup>(2)</sup>	20 <sup>(3)</sup>	7.8 <sup>(2)</sup>	3.2 <sup>(2)</sup>
3. Rastrojos vegetales	34/1 <sup>(1)</sup>	120 <sup>(3)</sup>	10 <sup>(1)</sup>	6.6 <sup>(1)</sup>	2 <sup>(1)</sup>

FUENTE: <sup>(1)</sup>REC (2014); <sup>(2)</sup>Jorge *et. al.* (2018); <sup>(3)</sup>CEMTRAR (2018)

### 3.7. Determinación de parámetros en las mezclas

#### A. Relación carbono nitrógeno en la mezcla

En base a la relación carbono nitrógeno hallada en cada uno de los materiales, se determinó la relación carbono nitrógeno en las mezclas de los tratamientos 1, 2 y 3, de acuerdo al contenido en peso de cada material como componente en la mezcla.

Para calcular la relación carbono nitrógeno de una mezcla se siguió el siguiente procedimiento en gabinete:

- Se obtuvo las relaciones carbono nitrógeno de cada material o componente de la mezcla.
- Se suman los kilogramos de los tres componentes en la mezcla, y se toma dicho valor como el 100 por ciento del peso.

- Se halla el porcentaje correspondiente a cada componente, mediante una regla de tres simple.
- Habiendo hallado el porcentaje de cada uno de los componentes en mezcla, se divide cada uno de ellos entre 100.
- Los resultados anteriores se multiplican por sus correspondientes valores de relación carbono nitrógeno.
- Por último, se suman estos tres valores, resultando la relación carbono nitrógeno de la mezcla (Mirabelli,2008).

## B. Densidad aparente en la mezcla

La densidad aparente en la mezcla, es el promedio ponderado de las densidades de los componentes que intervienen en la mezcla. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Dm = \frac{m_T}{V_T}$$

donde:

$$m_t = m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n = \text{masa total de la mezcla};$$

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n = \text{volumen total de mezcla}$$

## C. Humedad relativa de la mezcla

La humedad relativa en la mezcla se calcula, hallando el contenido de humedad por cada componente, se divide entre el peso total de la pila y se multiplica por 100.

$$\%HR_{mezcla} = \frac{\%HR_{RC} \times W_{RC} + \%HR_{BC} \times W_{BC} + \%HR_{RV} \times W_{RV}}{W_{pila}} \times 100$$

donde,

$\%HR_{mezcla}$ = porcentaje de humedad relativa en la mezcla

$\%HR_{RC}$ = porcentaje de humedad relativa en los residuos de cocina

$\%HR_{BC}$ = porcentaje de humedad relativa en la bosta de caballo

$\%HR_{RV}$ = porcentaje de humedad relativa en los rastrojos vegetales

$W_{RC}$ = peso en kilogramos de los residuos de cocina

$W_{BC}$ = peso en kilogramos de la bosta de caballo

$W_{Rv}$ = peso en kilogramos de los rastrojos vegetales

$W_{pila}$ = peso en kilogramos de la pila

Las características de cada mezcla fueron estimadas además con los datos consultados en fuentes bibliográficas, para luego constatarlas con los resultados obtenidos.

### 3.8. Formulación de los tratamientos

Se ha formulado los tratamientos mezclando bosta de caballo con rastrojos vegetales, e incorporando gradualmente 10 por ciento de residuos de cocina y luego 20 por ciento de residuos de cocina, implementándose en total tres tratamientos, como se observa en la Tabla 8 a continuación.

**Tabla 8: Nomenclatura y descripción de los tratamientos**

Tratamiento	Nomenclatura	Descripción
1	T1	Bosta de caballo(50%) + Rastrojos vegetales(50%)
2	T2	Bosta de caballo(50%) + Rastrojos vegetales(40%) + Residuos de cocina(10%)
3	T3	Bosta de caballo(50%) + Rastrojos vegetales(30%) + Residuos de cocina (20%)

FUENTE: Elaboración propia

El tratamiento 1 se construyó a base de 50 por ciento de bosta de caballo y otro 50 por ciento de rastrojos vegetales para observar la influencia de la incorporación de residuos de cocina en los tratamientos 2 y 3.

La bosta de caballo se utilizó por su función de soporte en la pila para favorecer la descomposición de los residuos de cocina. Además, se utilizó también, por su función inoculante, dada la cantidad de microorganismos que aporta, además de su capacidad de autocalentamiento en la pila.

En la Tabla 9 se observa la distribución porcentual del volumen de los materiales en los tratamientos.

**Tabla 9: Distribución porcentual de materiales**

Tratamiento	Bosta de Caballo	Rastrojos Vegetales %	Residuos de Cocina
1	50%	50%	0%
2	50%	40%	10%
3	50%	30%	20%

### 3.9. Determinación de los pesos de los materiales

Para calcular los pesos de los materiales incorporados en cada uno de los tratamientos, previamente se dimensiona la pila de compostaje.

El tamaño de la pila, en especial la altura, influye en la pérdida del calor generado por los microorganismos en la pila. En FAO (2013), se recomienda hacer pilas de 1.5 a 2 metros de alto para evitar pérdidas de calor y a la vez facilitar las tareas de volteo.

En cuanto al ancho y longitud dependerá del área disponible y de la cantidad de material a compostar, sugiriendo como mínimo 1.5 metros de ancho. En la Tabla 10, se observa las medidas de ancho, largo y alto definidos para la pila de compostaje.

**Tabla 10: Dimensiones de la pila de compostaje**

Tratamiento	Ancho	Largo m.	Alto	Volumen m <sup>3</sup>
1				
2	1.5	2.0	1.5	4.5
3				

Para hallar los pesos de los materiales se determinó el volumen de cada componente en los tratamientos, según los porcentajes ya formulados.

$$V_{material} = \%material \times V_{pila}$$

En la Tabla 11 se observa los volúmenes de los materiales en los tratamientos.

**Tabla 11: Volumen de los materiales en los tratamientos**

Tratamiento	Residuos de Cocina	Bosta de Caballo	Rastrojos Vegetales m <sup>3</sup>	Total
1	0	2.25	2.25	
2	0.45	2.25	1.8	4.5
3	0.9	2.25	1.35	

Finalmente, con las densidades ya halladas de cada material, se obtuvo el peso de los materiales en los tratamientos.

$$W_{material} = D_{material} \times V_{material}$$

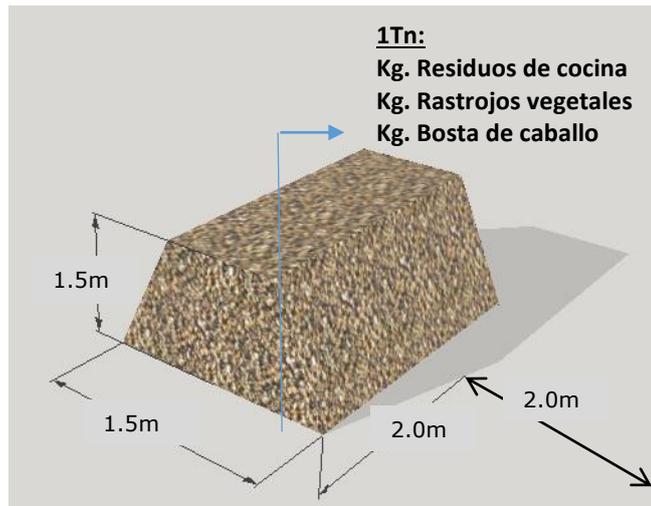
En la Tabla 12, se observan los pesos de los materiales en los tratamientos.

**Tabla 12: Pesos de los materiales en los tratamientos**

Tratamiento	Bosta de Caballo	Rastrojos Vegetales	Residuos de Cocina	Total
			Kg.	
1	836.5	175.7	0	1012.3
2	836.5	140.6	272.8	1249.9
3	836.5	105.4	545.6	1487.5

### 3.10. Construcción de las pilas

Los materiales hacen un total de aproximadamente 1 tonelada en 4.5 m<sup>3</sup> en cada pila. Siendo los pesos exactos igual a 1012 Kg para el tratamiento 1, 1250 Kg para el tratamiento 2 y 1487 Kg para el tratamiento 3. En la Figura 13 se puede ver el diseño de la pila de compostaje.



**Figura 13: Diseño de la pila de compostaje**

La metodología para la formación de pilas consistió en un sistema abierto, de apilamiento al aire libre con volteos periódicos como medida de aireación y riegos como medida de control de la humedad en la pila (Sáez, 2000).

Las dimensiones de cada pila fueron de 1.5 m de ancho x 2 m de largo x 1.5 m de altura, con un volumen de  $4.5 \text{ m}^3$ , y con forma trapezoidal, como se muestra en la Figura 13. En el terreno, al lado de cada pila, se tuvo en cuenta dejar un espacio de 2m de ancho x 2m largo, para realizar los volteos. El diseño corresponde a una adaptación del método Indore, descrito por Bueno (2007). Para su ejecución se siguieron los procedimientos siguientes:

- Colocar un plástico en la base del terreno.
- Dejar un espacio 2 m x 2 m aproximadamente al costado para realizar el volteo respectivo.
- Rociar la superficie con pajas para mitigar los malos olores
- Colocar letreros para señalar e identificar las pilas.

Para incorporar los materiales se tuvo en cuenta lo siguiente:

- Pesar los materiales en una balanza y transportarlos con ayuda de carretillas y palas,
- Agregar primero una capa de 10 cm de altura de rastrojos vegetales.
- Encima de esta capa, agregar una capa de bosta de caballo de 20cm; luego una de residuos de cocina de 5cm; y luego nuevamente rastrojos vegetales; repitiendo esta secuencia hasta alcanzar la altura diseñada (1.5m) y de acuerdo con los volúmenes de materiales destinados para cada pila.

- Procurar la homogenización de los materiales en las mezclas con ayuda de las palas.
- Realizar el primer volteo de la pila, incorporando todos los materiales, y a la vez realizar el riego de todo el material (Bueno, 2007).

En la siguiente Figura 14 se observan las pilas recién armadas en el área de estudio.



**Figura 14: Tratamientos 1, 2 y 3 instalados en el área de estudio**

### 3.11. Programa de volteos

Los volteos se realizaron semanalmente; los días lunes se volteó el tratamiento 1, los días martes el tratamiento 2 y los días miércoles el tratamiento 3. Los volteos se realizan considerando el control de la temperatura, de modo que no se afecten las etapas del compostaje (Bueno, 2007). En la Tabla 13 se observan los volteos programados durante el tiempo de compostaje.

**Tabla 13: Programación de volteos**

Etapa	Set		Oct						Nov			Dic	
	17	24	1	8	15	22	29	5	12	19	26	3	10
Mesófila (20°-40°)	X												
Termófila (40°-70°)		X	X										
Enfriamiento (70°-20°)				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

### 3.12. Programa de riego

Los riegos se realizaron de manera quincenal, los mismos días que se realizaron los volteos. En la Tabla 14 se observan los riegos programados durante el tiempo de compostaje.

**Tabla 14: Programación de riegos**

Etapa	Set		Oct				Nov			Dic				
	17	... 24	... 1	... 8	... 15	... 22	... 29	... 5	... 12	... 19	... 26	... 3	... 10	...
Mesófila (20°-40°)	X													
Termófila (40°-70°)		X	X											
Enfriamiento (70°-20°)				X		X		X		X		X		

### 3.13. Determinación de parámetros durante el compostaje

#### 3.13.1. Frecuencia de monitoreo

La medición y control de parámetros durante el compostaje se realizó con una frecuencia semanal, quincenal o diaria, según el parámetro monitoreado, como se aprecia en la Tabla 15.

**Tabla 15: Frecuencia de monitoreo por parámetro**

Parámetro	Frecuencia de Monitoreo	Total de Monitoreos
Nitrógeno total	Semanal	13
Carbono orgánico total	Semanal	13
Relación carbono/nitrógeno	Semanal	13
Humedad relativa	Semanal	13
Temperatura	Diario	90
pH	Semanal	13
Conductividad eléctrica	Semanal	13
Densidad aparente	Quincenal	7
Capacidad de retención de agua	Quincenal	7

### **3.13.2. Toma de muestras**

Para realizar la toma de muestra en cada tratamiento, se siguió el método del cuarteo para obtener una muestra representativa, según el siguiente procedimiento:

- Tomar una porción del material de cada pila, con ayuda de herramientas como pala y trinche y depositarla en una carretilla.
- Tomar la muestra en dos o tres puntos de la pila, a una profundidad de 30 cm aproximadamente, de manera que ésta sea representativa.
- Se coloca la muestra en forma cónica y se divide en cuatro partes iguales.
- Se eliminan dos partes, y las dos que quedan se vuelven a mezclar y se colocan nuevamente en forma cónica para realizar un segundo cuarteo.
- Si es necesario se repite el cuarteo hasta obtener una cantidad apropiada para realizar los ensayos (1 ó 2 Kg.)
- Se etiqueta la muestra en una bolsa de plástico y se almacena en el laboratorio (Binner, 2017).

### **3.13.3. Monitoreo de parámetros**

A continuación, se describe la metodología seguida para el monitoreo de cada parámetro durante el compostaje.

#### **A) Medición de la temperatura**

La medición de la temperatura se realizó mediante un termómetro digital con sonda larga, La temperatura se midió en el centro de la pila, a una profundidad de dos tercios de la altura de la misma, a razón de que en esta área se logran temperaturas más altas y representativas. Se obtuvo datos diariamente, se realizaron tres mediciones y se registró el promedio de estas en una libreta de campo, para ser luego debidamente digitalizados (Ocampo *et. al.*, 2002).

#### **B) Medición de la humedad relativa**

Para registrar la humedad de las pilas se tomaron muestras pequeñas de cada material en recipientes de aluminio. Estos fueron introducidos en la estufa a 105°C hasta el día siguiente. La humedad se determina por diferencia del peso inicial y final de la muestra fresca. Dichos datos se evaluaron semanalmente, realizándose 13 mediciones, durante todo el proceso. Los resultados se anotaron en una ficha de campo y luego fueron digitalizados en gabinete (Ocampo *et. al.*, 2002).

### **C) Medición del pH**

Para monitorear el pH, se pesan 10 gr de muestra y se le añade 100 ml de agua desionizada. Esta suspensión se filtra mediante un papel filtro y un embudo. Se procede a leer el pH en el filtrado, directamente con el equipo potenciómetro (Ocampo *et. al.*, 2002).

### **D) Medición de la conductividad eléctrica**

El procedimiento seguido para medir la conductividad eléctrica en la muestra fue similar al de la medición del pH:

- Se mezcló 10 gramos de muestra con 100 ml de agua desionizada, luego se agita en un equipo agitador de laboratorio, por un tiempo de 2 horas, y se transfiere la suspensión a un embudo con papel de filtro cualitativo rápido.
- Se mide la conductividad eléctrica en el filtrado directamente con el equipo conductímetro.
- Si el conductímetro no dispone de compensación de temperatura, debe hacerse la corrección a 25°C por medio de las tablas correspondientes (Ocampo *et. al.*, 2002 & Mendo, 2004).

### **E) Medición de la densidad aparente**

La medición de la densidad aparente se realizó de manera quincenal, realizándose un total de 7 monitoreos durante todo el compostaje. Se tomaron muestras frescas de 1 kg aproximadamente, de cada pila. Se enrazó una probeta de 1000 ml. con compost, y se pesó la muestra, mediante una balanza de precisión. La densidad aparente será igual a la relación masa/volumen, expresada en kg/m<sup>3</sup> o kg/l (CEMTRAR, 2018).

### **F) Medición de la capacidad de retención de agua**

La capacidad de retención de agua se evaluó quincenalmente, realizándose en total de 7 monitoreos. El procedimiento consistió en llenar seis recipientes cilíndricos con muestras de las tres pilas (dos repeticiones por pila). Se colocaron los recipientes en una bandeja llena de agua, con la finalidad de saturar la muestra de agua. Los recipientes tienen un tamiz en la base que permite que el agua infiltre. Se dejan las muestras por 24 horas aproximadamente. Luego, se retiran los recipientes de la bandeja con agua y son colocados en una bandeja llena de arena húmeda a capacidad de campo, con la finalidad de que el agua sobrante de los recipientes escurra a través de la arena. Se dejan los recipientes por 24 horas aproximadamente. Después de este tiempo se pesan los recipientes, para obtener el peso de la muestra saturada.

En seguida se llevan las muestras a estufa, a 105°C por 24 horas. Finalmente se pesan las muestras, obteniéndose el peso de la muestra seca.

El porcentaje de capacidad de retención de agua se calcula por medio de la fórmula siguiente (Ö NORM S 2200, 1993).

$$CRA(\%) = \frac{Wh - Ws}{Ws} * 100$$

Donde,

Wh: peso de la muestra saturada

Ws: peso de la muestra seca

### G) Medición de la relación carbono/nitrógeno

Se tomaron muestras de cada uno de los tratamientos de 0.5 Kg., las cuales fueron llevadas al laboratorio, donde se midió el carbono por el método de Calcinación y el nitrógeno por el método de Kjeldhal. Los procedimientos son los mismos que se detallan en el ítem 3.6. La relación será la división de dichos resultados (Mendo, 2004).

### 3.14. Métodos de determinación de nutrientes esenciales

Para realizar los análisis se tomaron 3 muestras de compost final, cosechado y tamizado y fueron llevadas al Laboratorio de Análisis de Suelos de la Facultad de Agronomía, donde se siguieron los siguientes métodos, que se observan en la Tabla 16 y Tabla 17, para el análisis de macronutrientes y micronutrientes en compost, respectivamente.

**Tabla 16: Metodología para análisis de macronutrientes**

Macronutriente	Método
Nitrógeno	Método de Kjeldahl
Fósforo	Método del azul de molibdeno
Potasio	Espectrofotometría de absorción atómica
Calcio	Espectrofotometría de absorción atómica
Magnesio	Espectrofotometría de absorción atómica
Sodio	Espectrofotometría de absorción atómica
Materia Orgánica	Método de Walkley y Black
Carbono	

FUENTE: LASPAF - UNALM

**Tabla 17: Metodología para análisis de micronutrientes**

Micronutriente	Método
Hierro	Espectrofotometría de absorción atómica
Cobre	Espectrofotometría de absorción atómica
Zinc	Espectrofotometría de absorción atómica
Manganeso	Espectrofotometría de absorción atómica
Boro	Método colorimétrico empleando la curcumina disuelta en ácido acético glacial

FUENTE: LASPAF - UNALM

### 3.15. Metodología para el test de germinación y crecimiento de semillas

Para evaluar la germinación y emergencia de plántulas en el compost final, se ha adaptado la metodología de Zucconi (1981), descrita en Illera-Vives *et. al.* (2011), también denominado test de fitotoxicidad.

Se realizó el siguiente procedimiento:

- Se seleccionan seis recipientes de plástico y se perfora la base de estos, para asegurar el drenaje de agua.
- Se llena los recipientes con muestras de compost final cosechado y tamizado de cada tratamiento respectivamente. Se realizan dos repeticiones de cada tratamiento.
- Adicionalmente, se utilizan dos recipientes con papel toalla absorbente como control.
- Se rocía todos los recipientes con agua embotellada, con ayuda de una piseta.
- Se toman 25 semillas de *Lactuca sativa* para cada recipiente, y se siembran de manera distribuida equidistantes entre sí, con la ayuda de una pinza.
- Se cubren las semillas con una capa delgada de compost, para protegerlas del viento.
- Se riega todos los recipientes todos los días a la misma hora.
- Se registra el día y la cantidad de semillas germinadas en cada recipiente.
- Las semillas que ya germinaron se eliminan con ayuda de una pinza, a fin de evitar contaminación y para facilitar el conteo de las siguientes germinaciones.
- Luego se procedió a evaluar el índice de germinación. El resultado expresa el porcentaje de las semillas sembradas que lograron germinar, en relación a las semillas germinadas en el control, mediante la siguiente fórmula:

$$\%germinación = \frac{N^{\circ} \text{ de semillas germinadas}}{N^{\circ} \text{ de semillas germinadas en el control}} * 100$$

- Se seleccionan cinco plántulas emergentes y se identifican con palitos de fósforo numerados del 1 al 5 (se considera emergencia cuando hay aparición de cotiledones).
- En cada plántula se toman datos de altura de crecimiento y frecuencia de aparición de hojas.
- El ensayo termina cuando las plántulas forman la tercera hoja, esto ocurre a los 21 días aproximadamente.
- El índice de crecimiento expresa la altura media de las plántulas en cada tratamiento, en relación a la altura media de las plántulas en el control, mediante la siguiente fórmula:

$$\%crecimiento = \frac{\text{altura media de la plántula}}{\text{altura media de la plántula en el control}} \times 100$$

Finalmente se calcula el Índice de Zucconi mediante la siguiente fórmula:

$$IG = \frac{\%G * \%C}{100}$$

Donde,

%G= porcentaje de germinación de semillas en compost

%C=porcentaje de crecimiento de las plántulas en compost

Para evaluar la fitotoxicidad del compost, se estableció el criterio de interpretación siguiente: resultados con un  $IG \geq 80(\%)$  indica que no existen sustancias fitotóxicas o que la presencia de éstas es escasa; un  $IG \leq 50(\%)$ , indica que hay una elevada concentración de sustancias fitotóxicas, por último, si el IG obtenido se encuentra entre 50 y 80 por ciento, indica regular presencia de sustancias fitotóxicas en el compost (Zucconi *et. al.*, 1981).

### **3.16. Análisis de calidad de compost**

Para el análisis de calidad, se interpretarán las mediciones en laboratorio de parámetros físicos y químicos de los tres compost obtenidos. Los resultados de cada compost serán comparados entre sí y con la norma mexicana, así como con resultados obtenidos en otras investigaciones consultadas.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1. Caracterización de los materiales del compostaje

A continuación, en la Tabla 18 podemos observar los resultados de relación carbono nitrógeno, densidad aparente, humedad relativa, pH y conductividad eléctrica, medidos en cada material compostable.

**Tabla 18: Caracterización de los materiales utilizados en los tratamientos**

Parámetros	Bosta de Caballo	Otros Autores	Rastrojos Vegetales	Otros Autores	Residuos de Cocina	Otros Autores
Ph	8	7.8 <sup>(2)</sup>	6.3	6.6 <sup>(1)</sup>	6.5	6 <sup>(1)</sup>
Conductividad eléctrica (mS/cm)	4.8	3.2 <sup>(2)</sup>	12.7	2 <sup>(1)</sup>	6.7	3.6 <sup>(1)</sup>
Humedad relativa (%)	17	20 <sup>(3)</sup>	5	10 <sup>(1)</sup>	71	80 <sup>(1)</sup>
Densidad aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	372	400 <sup>(2)</sup>	78	120 <sup>(3)</sup>	606	435 <sup>(1)</sup>
Relación C/N	19/1	19/1 <sup>(2)</sup>	31/1	34/1 <sup>(1)</sup>	31/1	35/1 <sup>(1)</sup>

FUENTE: <sup>(1)</sup>REC (2014); <sup>(2)</sup>Jorge *et. al.* (2018); <sup>(3)</sup>CEMTRAR (2018)

El pH de la bosta de caballo resulta muy cercano al obtenido en Jorge *et. al.* (2018), estudio desarrollado también en el CEMTRAR, en una pila de 3 m de ancho x 1.5 m de altura y 10 m de largo, construida al 100% de bosta de caballo. Se observa un pH de 8, el cual resulta mayor al de los otros materiales, cuyos pH son ligeramente ácidos. Los rastrojos vegetales tuvieron un pH de 6.3, éste coincide con lo indicado por la Red Española de Compostaje (REC, 2014) para rastrojos vegetales de áreas verdes urbanas (ciudad de Montreal), con pH igual a 6.6. Los residuos de cocina obtuvieron un pH de 6.5, lo cual se asemeja a la caracterización hecha para residuos alimenticios de un restaurante del centro de la ciudad de Montreal, con un pH igual a 6.0 (REC, 2014).

La disminución del pH se atribuye a la presencia de ácidos orgánicos simples en los materiales frescos, mientras que su alcalinización ocurre debido a la producción de amoníaco a partir de la descomposición de proteínas (Mirabelli, 2008). La bosta de caballo es un

material que viene siendo pre compostado, desde su origen, debido a ello su contenido de ácidos orgánicos es menor, lo que explicaría el aumento en su pH.

Respecto a la conductividad eléctrica, la bosta de caballo obtuvo un valor de 4.8 mS/cm, el mismo se acerca a lo obtenido por Jorge *et. al.* (2016) y se encuentra dentro de lo adecuado para iniciar un proceso de compostaje. De igual manera los residuos de cocina presentaron un valor de conductividad eléctrica igual a 6.7 mS/cm, estando por encima de lo obtenido por REC (2014) con 3.6 mS/cm. En el producto final, según la norma austriaca, el valor de la conductividad eléctrica no debe exceder los 2 mS/cm, ya que los altos contenidos de sales repercuten directamente en la germinación de semillas y en el desarrollo general de los cultivos (Moreno y Moral, 2011). Sin embargo, estos resultados son aceptables, ya que durante el proceso las sales pueden ser lavadas por medio de los riegos, disminuyendo su concentración.

En los rastrojos vegetales se obtuvo una conductividad eléctrica de 12 mS/cm, mucho mayor que los resultados mostrados en REC (2014) para restos vegetales de jardín de la ciudad de Montreal. Podemos notar que el mayor contenido de sales en este material se debió a que las áreas verdes de la Universidad son regadas con agua de alto contenido de sales, y éstas quedan depositadas y acumuladas en los rastrojos que son recogidos del suelo de dichas áreas verdes.

La humedad relativa resultó mucho mayor para los residuos de cocina, dado el alto contenido de agua con que se preparan las comidas, con 71 por ciento, lo que se puede comparar con un 80 por ciento citado en REC (2014) para residuos de alimentos de un restaurante del centro de la ciudad de Montreal. Le sigue la bosta de caballo con una humedad relativa de 17 por ciento, debido posiblemente a los orines del animal y contenido líquido del estiércol, finalmente los rastrojos vegetales con un escaso 5 por ciento de humedad relativa, ya que están compuestos en su mayoría por hojas y restos de podas que ya han perdido su humedad (REC, 2014).

La densidad aparente ha sido notoriamente mayor en los residuos de cocina con 606 Kg/m<sup>3</sup>, esto debido a la propiedad que tienen los residuos de cocina de retener la humedad y al uso de agua durante la preparación de comidas, aumentado la masa de estos. Para el caso de la bosta de caballo se obtuvo una densidad aparente de 372 Kg/m<sup>3</sup>, similar a lo obtenido en

Jorge *et. al.* (2018) para el inicio del compostaje de bosta de caballo en una pila de 10 m de largo por 3m de ancho y por 1.5 m de altura; mientras que en los rastrojos vegetales la densidad aparente fue de 78 Kg/m<sup>3</sup>, ya que estos residuos por su naturaleza suelen ocupar mucho espacio y presentar bajo peso.

La relación carbono nitrógeno fue de 31/1 para los residuos de cocina y los rastrojos vegetales, dada la composición principalmente vegetal de dichos materiales era de esperarse que tenga una mayor concentración de carbono que la bosta de caballo, que obtuvo una relación carbono nitrógeno de 19/1, la cual coincide con los resultados de Jorge *et. al.* (2018) para el inicio del proceso de compostaje de bosta de caballo en el CEMTRAR.

Luego de analizar dichos parámetros, se ha verificado que las formulaciones planteadas para los tres tratamientos cumplen con los rangos mínimos recomendados de relación carbono nitrógeno para que se inicie el proceso (25/1-35/1) (Moreno y Moral, 2011). En la Tabla 19, se observan los resultados de la relación carbono nitrógeno en la mezcla.

**Tabla 19: Relación carbono nitrógeno inicial**

Tratamiento	Composición	Relación C/N de la mezcla	Valor Recomendado
T1	Bosta de caballo(50%) + Rastrojos vegetales(50%)	26	
T2	Bosta de caballo(50%) + Rastrojos vegetales(40%) + Residuos de cocina(10%)	28	25-35*
T3	Bosta de caballo(50%) + Rastrojos vegetales(40%) + Residuos de cocina(20%)	29	

FUENTE: \*Moreno y Moral (2011)

Se pudo notar que el Tratamiento 3 presenta una mejor relación carbono nitrógeno inicial, esto es debido a la mayor incorporación en este tratamiento de residuos de cocina y rastrojos vegetales, cuya relación carbono nitrógeno en ambos materiales fue de 31/1, aproximándose más este resultado al valor recomendado para iniciar el proceso de compostaje (Moreno y Moral, 2011).

Los valores de relación carbono nitrógeno obtenidos en las mezclas, resultan ligeramente menores a lo obtenido en el estudio de Tinco y Vásquez (2016) para un compost hecho a

base de 360 Kg. de estiércol de caballo y 640 Kg. de residuos vegetales; cuya relación carbono nitrógeno inicial fue 32.7; esto se debe a que el contenido de estiércol de caballo fue inferior al utilizado en los tratamientos de la presente investigación (836Kg.), y dicho material aporta nitrógeno en la mezcla, lo que reduce, en consecuencia, el valor de la relación carbono nitrógeno inicial.

Igualmente, se comprobó que la densidad aparente en mezcla cumpla con los valores recomendados por Moreno y Moral (2011), como se puede ver en la Tabla 20.

**Tabla 20: Densidad Aparente de la mezcla**

Tratamiento	Composición	Densidad Aparente de la mezcla (Kg./m <sup>3</sup> )	Valor Recomendado
T1	Bosta de caballo(50%) + Rastrojos vegetales(50%)	225	
T2	Bosta de caballo(50%) + Rastrojos vegetales(40%) + Residuos de cocina(10%)	277	200-400*
T3	Bosta de caballo(50%) + Rastrojos vegetales(40%) + Residuos de cocina(20%)	330	

FUENTE: \*Moreno y Moral (2011)

El tratamiento 3 presentó una mayor densidad aparente con 330 Kg/m<sup>3</sup>, esto se debe a que en su composición presenta 20 por ciento de residuos de cocina, material con mayor densidad aparente. Según Moreno y Moral (2011), la densidad aparente debe ser menor a 400 Kg/m<sup>3</sup> al inicio del compostaje, debido a que esta tiende a aumentar como consecuencia de la descomposición y reducción del tamaño de partículas durante el compostaje. Los tres tratamientos cumplen con los valores recomendados por dicho autor.

Por último, se pudo estimar también la humedad relativa en cada tratamiento, a tener en cuenta para realizar el primer riego. Los resultados se pueden ver en la Tabla 21.

**Tabla 21: Humedad Relativa de la mezcla**

Tratamiento	Composición	Humedad Relativa de la mezcla (%)	Valor Recomendado
T1	Bosta de caballo(50%) + Rastrojos vegetales(50%)	15	50*
T2	Bosta de caballo(50%) + Rastrojos vegetales(40%) + Residuos de cocina(10%)	27	
T3	Bosta de caballo(50%) + Rastrojos vegetales(40%) + Residuos de cocina(20%)	36	

FUENTE: \*Moreno y Moral (2011)

En la Tabla 21 se observa que el contenido de humedad varía en los tratamientos de acuerdo con la mayor incorporación de materiales húmedos, como es el caso de los residuos de cocina. Con la incorporación del riego, se ajustaron estos resultados al valor recomendado. La humedad ideal para iniciar el proceso de compostaje se encuentra entre 40 por ciento y 65 por ciento, para la mayoría de los residuos orgánicos. Su valor exacto va a depender de la porosidad y absorción de agua del material (Moreno y Moral, 2011).

#### 4.2. Parámetros evaluados durante el proceso

En la Tabla 22 se observa los parámetros de monitoreo durante el proceso de compostaje, además sus unidades respectivas de medición. Se muestra también el valor estándar para cada parámetro consultado en fuentes bibliográficas y/o normas técnicas de calidad.

**Tabla 22: Parámetros de monitoreo**

Parámetro	Equipo	Unidades	Valores Estándar
Temperatura	Termómetro digital	°C	25-75 <sup>(1)</sup>
Humedad	Estufa	%MH	40-70 <sup>(1)</sup>
pH	pH-metro	-	6.5-8.5 <sup>(1)</sup>
Carbono/Nitrógeno	Mufla/Kjeldahl	-	15/1-25/1 <sup>(1)</sup>
Conductividad Eléctrica.	Conductímetro	mS/cm	≤2 <sup>(2)</sup>
Densidad Aparente	Probeta	Kg/m <sup>3</sup>	<700 <sup>(1)</sup>
Capacidad de Retención de Agua	Cilindros	%MS	85-120 <sup>(2)</sup>

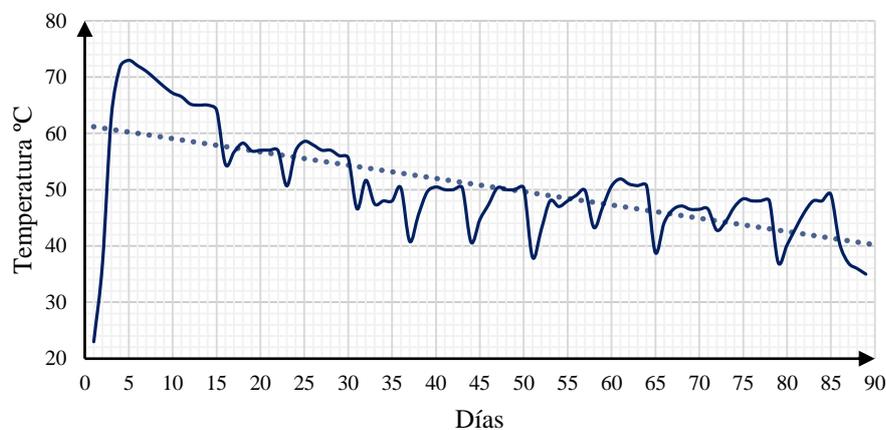
FUENTE: <sup>(1)</sup>Moreno y Moral (2011); <sup>(2)</sup> Ö-NORM-S-2200 (1993)

#### 4.2.1. Temperatura

En la Figura 15 se observa que, para el Tratamiento 1, a base de bosta de caballo (50%) y rastrojos vegetales (50%), la etapa mesófila 1 tuvo una duración aproximada de tres días, dando paso a la etapa termófila, con temperaturas mayores a 45°C. Esto se asemeja a lo revisado en Tinco y Vásquez (2016), donde se menciona que, la etapa mesofila 1 se supera a los tres días, para una pila hecha a base de estiércol de caballo y rastrojos vegetales de cosecha de pallar, en proporciones de 20 y 80 por ciento, respectivamente.

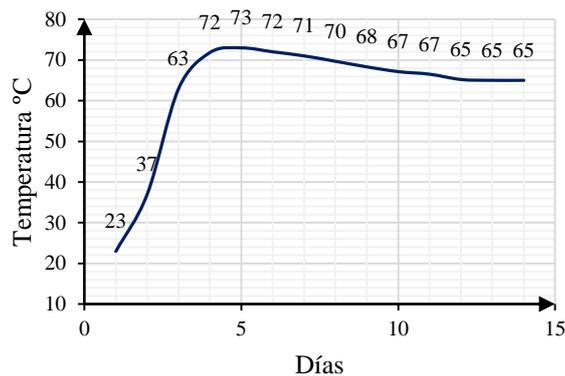
El monitoreo en la etapa termófila, muestra que el Tratamiento 1 elevó su temperatura hasta el quinto día, alcanzando un máximo de 73°C, para descender el sexto día. Durante la etapa termófila, los microorganismos degradan compuestos más complejos como aceites, ceras y grasas. En esta etapa también ocurre la destrucción de agentes patógenos, a razón de ello se hizo el volteo de la pila procurando que la masa de la superficie ingrese y la del fondo sea removida, de modo que toda la masa logre altas temperaturas y así se garantice la higienización en toda la pila. En seguida ocurrió una etapa de enfriamiento, durante la cual se termina de consumir la mayor parte de los compuestos orgánicos, para dar paso a la etapa mesófila 2, hacia el día 30 del compostaje. A partir del día 30, se nota una tendencia a igualarse con la temperatura ambiental. En la etapa de maduración, el carbono orgánico proviene principalmente de compuestos lignocelulósicos, de difícil descomposición, por ello la temperatura va descendiendo lentamente.

Finalmente, durante los últimos días del proceso se alcanza temperaturas cercanas a la temperatura ambiental. Siendo esto señal de que el proceso ha finalizado y el compost ya puede cosecharse.



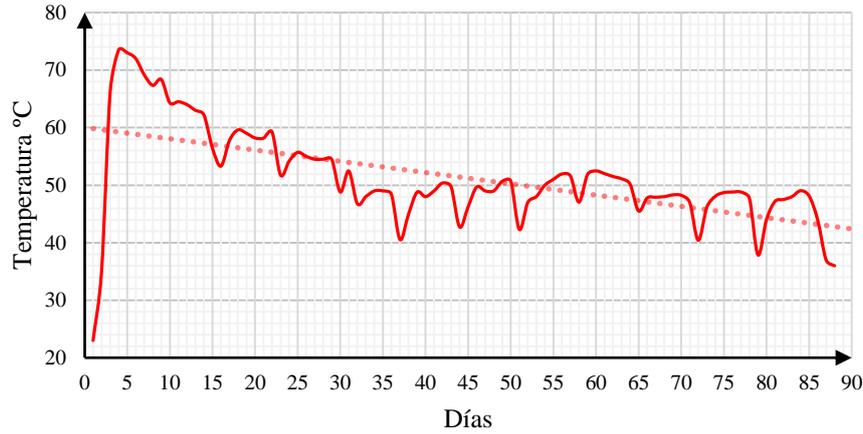
**Figura 15: Comportamiento de la Temperatura en el Tratamiento 1**

La Figura 16 muestra la elevación de la temperatura durante los primeros días en el tratamiento 1. Podemos comparar estos resultados con lo obtenido en Tinco y Vásquez (2016) para un compost hecho a base de 360 Kg. de estiércol de caballo y 640 Kg. de residuos vegetales de cosecha de pallar. En dicho estudio se alcanzó una temperatura máxima de 67°C, menor a las obtenidas en el presente tratamiento 1, esto se debe a un menor contenido de estiércol de caballo, ya que este material favorece el calentamiento en la pila de compost (Mirabelli, 2008).



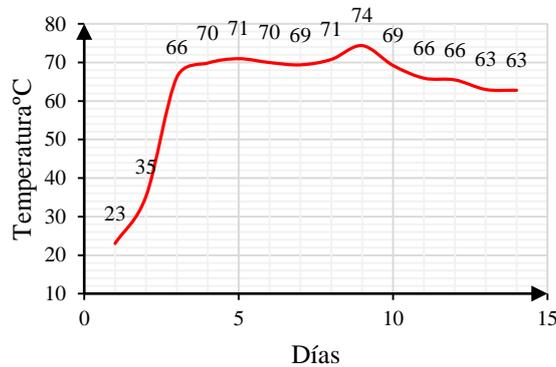
**Figura 16: Elevación de la Temperatura en el Tratamiento 1**

En la Figura 17 se puede notar que para el Tratamiento 2, a base de bosta de caballo (50%), rastrojos vegetales (40%) y residuos de Cocina (10%), la etapa mesófila 1 tuvo igualmente una duración de dos días. La temperatura se elevó hasta el quinto día, para descender durante la etapa de enfriamiento. Se observa a través del tiempo de compostaje, que cada semana se alcanzan temperaturas mínimas para luego elevarse y volver a descender continuando con la tendencia de la temperatura a descender (Ver Figura 17). Esto ocurrió debido a los volteos realizados, ya que, al momento del volteo, aún existían compuestos orgánicos que fueron reincorporados hacia el centro de la pila para ser degradados por los microorganismos, incrementando el calor generado. La etapa de enfriamiento duró hasta el día 32 del compostaje, continuando la etapa mesófila 2, con una tendencia de la temperatura a ser constante, igual a lo ocurrido en el Tratamiento 1.



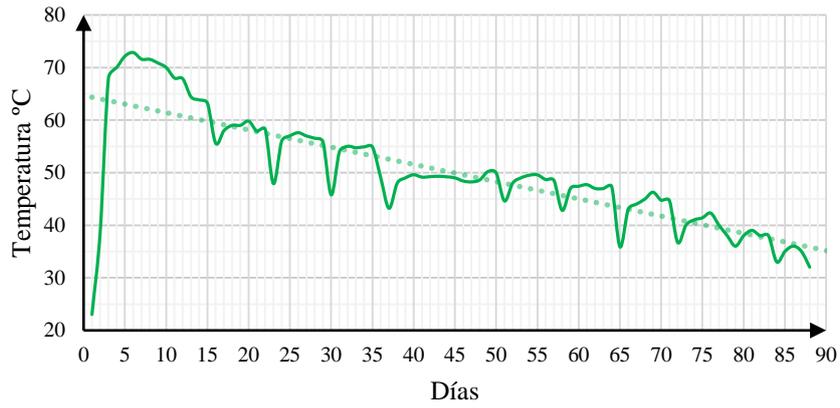
**Figura 17: Comportamiento de la Temperatura en Tratamiento 2**

La Figura 18 muestra la elevación de la temperatura en el tratamiento 2, manteniéndose las temperaturas más altas, desde el día 3 hasta el día 14 del compostaje, similar a lo ocurrido en Tinco y Vásquez (2016), para el compostaje de estiércol de caballo y rastrojos vegetales de cosecha de pallar, quienes señalan que la temperatura se mantuvo entre 54°C y 67°C, durante las dos primeras semanas del proceso.



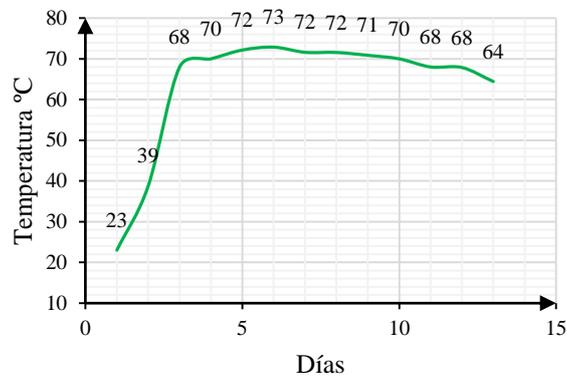
**Figura 18: Elevación de la Temperatura en el Tratamiento 2**

Por otro lado, en la Figura 19, se observa el comportamiento de la temperatura en el Tratamiento 3, a base de bosta de caballo (50%), rastrojos vegetales (40%) y residuos de cocina (20%), notándose que la etapa mesófila 1 tuvo una duración de dos días. La temperatura aumentó hasta el día 6, con 73°C, para iniciar el enfriamiento desde el día 7 hasta el día 30 del compostaje. La temperatura se mantuvo sobre los 70°C durante 6 días, asegurándose igualmente la higienización del compost.



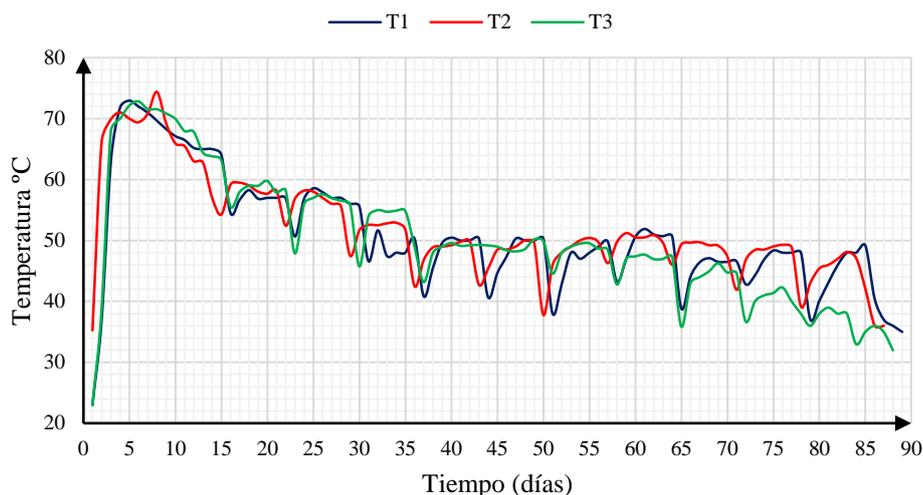
**Figura 19: Comportamiento de la Temperatura en el Tratamiento 3**

En la Figura 20, se puede observar la elevación de la temperatura en el Tratamiento 3.



**Figura 20: Elevación de la Temperatura en el Tratamiento 3**

En la Figura 21 se puede notar que, los tres tratamientos tuvieron un comportamiento eficiente en cuanto al grado de la degradación y de estabilización del material orgánico, ya que los tres transcurren las etapas características del compostaje. Podemos apreciar que, la fase mesófila inicial fue muy corta en los tres tratamientos, esto demuestra el rápido consumo de azúcares simples por los microorganismos mesófilos, posiblemente debido al poder fermentativo característico de la bosta de caballo (Bueno, 2007).



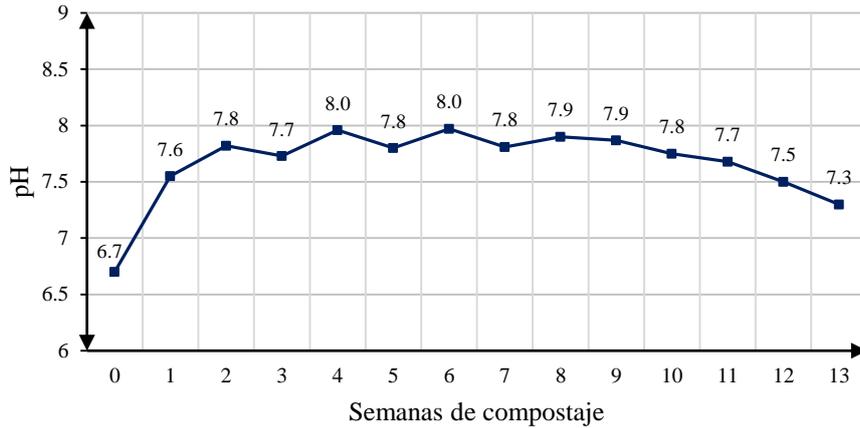
**Figura 21: Comportamiento de la Temperatura en T1, T2 y T3**

En el tratamiento 2 podemos notar que la temperatura llega a un máximo valor de 74°C, ligeramente mayor a la de los tratamientos 1 y 3. Esto ocurre debido a la formulación de la mezcla de materiales: bosta de caballo (50%), rastrojos vegetales (40%), residuos de cocina (10%), la cual favorece la capacidad de autocalentamiento.

En el tratamiento 3, a base de bosta de caballo (50%), rastrojos vegetales (30%) y residuos de cocina (20%), se nota una mayor tendencia al enfriamiento de la pila y a estabilizarse con la temperatura ambiental. Esto indica una descomposición más acelerada y mayor consumo de los compuestos orgánicos. Se puede notar, en este tratamiento, una ligera mejora en la bioestabilización de la materia orgánica. Esto posiblemente se deba a la mayor presencia de restos de cocina, en comparación a los tratamientos 1 y 2.

#### 4.2.2. pH

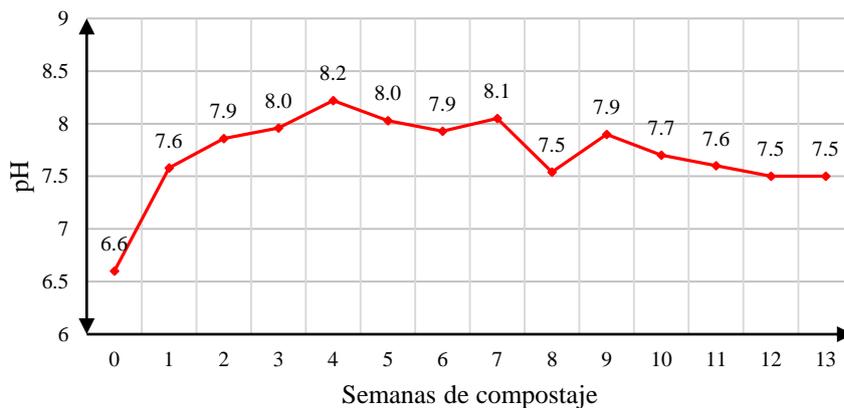
Los resultados de los ensayos de pH se presentan en los gráficos siguientes. Varían desde mínimos de 6.6 al inicio del compostaje, hasta máximos de 8.3 durante la novena semana del compostaje. En el Tratamiento 1, a base de bosta de caballo (50%) y rastrojos vegetales (50%), el pH varía desde 6.7 durante los primeros días del compostaje para tomar valores de 7.6 hacia el quinto día del compostaje. Como se puede observar en la Figura 22, el pH llega hasta un máximo de 8 entre la cuarta y sexta semana del proceso, en la etapa de enfriamiento y etapa mesófila 2; para finalmente manifestar una tendencia a la neutralidad, hacia el final de la etapa de maduración del compost.



**Figura 22: Mediciones de pH en el Tratamiento 1**

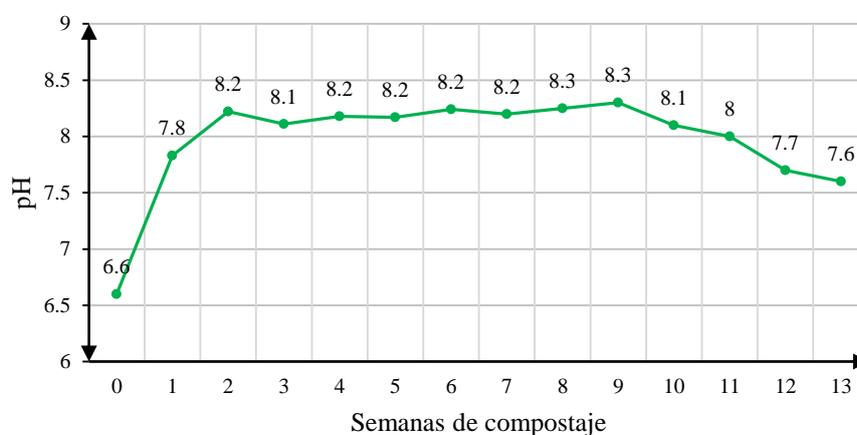
Esto coincide con lo mencionado por Moreno y Moral (2011), quienes indican que el pH terminando el proceso fluctúa entre 6.5 y 8.5, dependiendo de los materiales compostados. La formación de compuestos húmicos generará una capacidad tapón en el compost, manteniéndose el pH neutral.

En la Figura 23 observamos que, para el Tratamiento 2, el pH inicia con un valor de 6.6, luego en la semana 4, empezando la etapa mesófila 2, alcanza un máximo de 8.2. Esto guarda relación con la emisión de amoníaco, producto de la descomposición de proteínas, ya que este es un compuesto base que favorece la alcalinización (Moreno y Moral, 2011). A fines del proceso, el pH se estabiliza en 7.5. Siendo esto un indicador de presencia de humus y mineralización de los compuestos.



**Figura 23: Mediciones de pH en el Tratamiento 2**

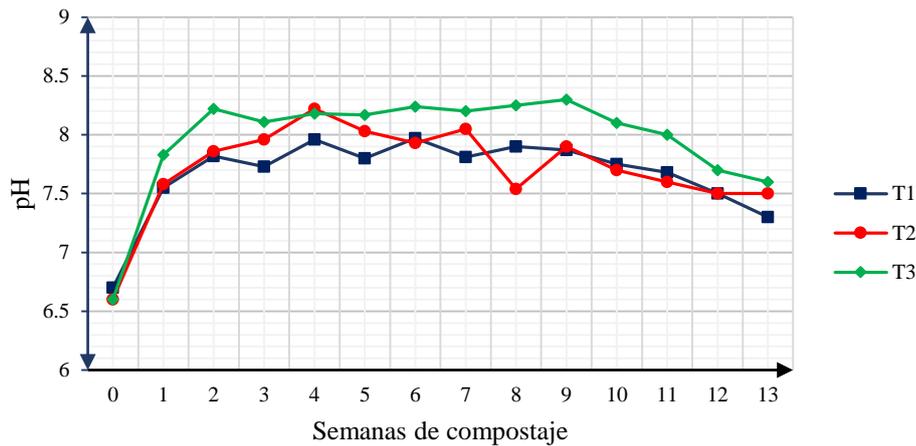
Para el caso del Tratamiento 3, se puede observar en la Figura 24 que, los resultados llegan a valores máximos de 8.3 hacia el día 60 del compostaje. Podemos notar en este tratamiento que, el pH se mantiene estable, alrededor de 8, desde la semana 2 hasta la semana 11. Esto puede indicar que la descomposición de compuestos nitrogenados fue constante y no hubo pérdidas excesivas de nitrógeno como gas amoníaco. Por último, el pH disminuye al final del proceso, como consecuencia de la presencia de humus y de la liberación de CO<sub>2</sub>. Se puede deducir que la composición en este tratamiento (bosta de Caballo 50%, rastrojos vegetales 30% y residuos de cocina 20%), ha favorecido la estabilización del nitrógeno (Jorge *et. al.*, 2018).



**Figura 24: Mediciones de pH en el Tratamiento 3**

Desde el ámbito agronómico, pH neutros confieren una mejor calidad en el compost, porque la mayoría de los macronutrientes y micronutrientes son biodisponibles a pH neutro o ligeramente ácido (Moreno y Moral, 2011).

De acuerdo con Moreno y Moral (2011), el comportamiento del pH varía con las etapas del compostaje. La producción de ácidos orgánicos de cadena corta genera una disminución del pH en la etapa mesófila 1. Durante la etapa termófila, aumenta la descomposición de proteínas, con lo que se eleva el pH. Finalmente, el pH se neutraliza durante la maduración. En los tres tratamientos, no se observaron pHs demasiado bajos en ninguna de las etapas del proceso, lo cual es señal de que no ocurrieron condiciones anaeróbicas por falta de aireación o de oxígeno. En la Figura 25, se observa los cambios de pH en los tres tratamientos evaluados.



**Figura 25: Comportamiento del pH en T1, T2 y T3**

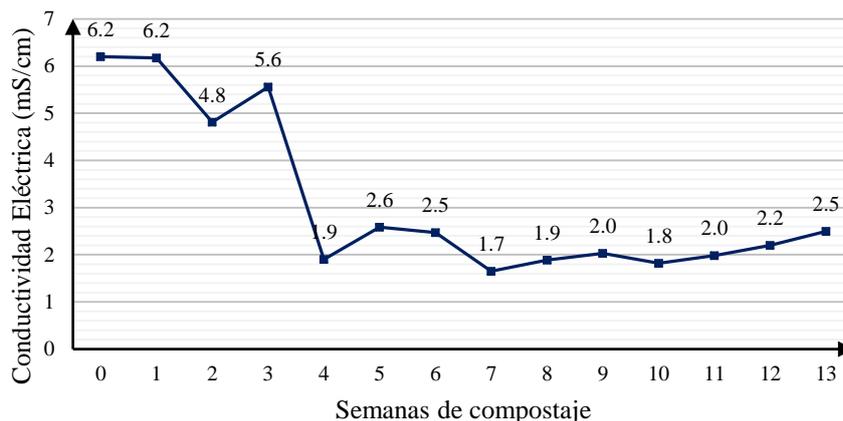
#### 4.2.3. Conductividad eléctrica

Se realizaron 14 mediciones de conductividad eléctrica en total, en cada tratamiento, con una frecuencia semanal.

En la Figura 26 se puede ver el comportamiento de la conductividad eléctrica en el tratamiento 1. Al inicio la conductividad eléctrica es igual a 6.2 mS/cm, tendiendo a disminuir durante el proceso. Según Moreno y Moral (2011), este parámetro tiende normalmente a incrementarse, producto de la mineralización de la materia orgánica, y de la formación de nitratos; sin embargo, se aprecia en los resultados una tendencia a disminuir. Podemos explicar este comportamiento, debido a los lavados de las sales durante el riego, ya que este se llevó a cabo con mangueras a presión, escurriéndose el agua a favor de la pendiente, lixiviando las sales presentes.

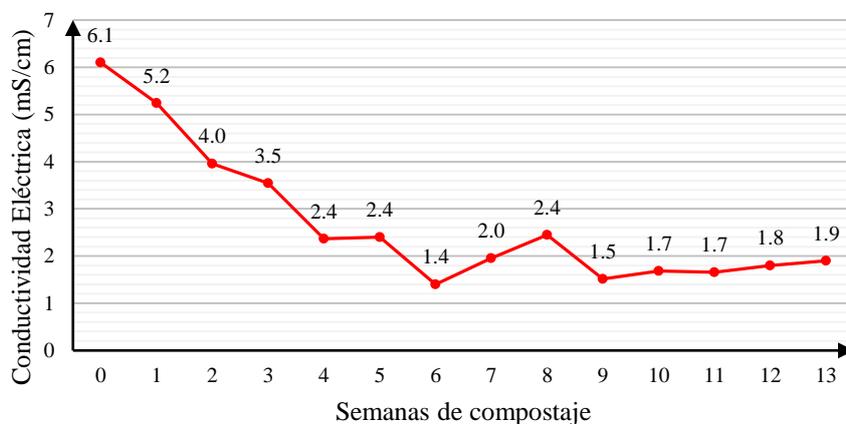
La conductividad eléctrica en el compost final fue 2.5 mS/cm. Este resultado supera ligeramente el valor límite recomendado en la norma austriaca, para no causar toxicidad a las plantas, el cual es de 2 mS/cm.

El agua de riego, con un contenido de sales igual a 5.7 mS/cm, no tuvo mayor influencia en el aumento del contenido de sales durante el proceso. Esto se explica debido al consumo de sales por parte de los microorganismos durante su desarrollo, y a que el riego fue cada vez menos frecuente, en la última fase del compostaje.



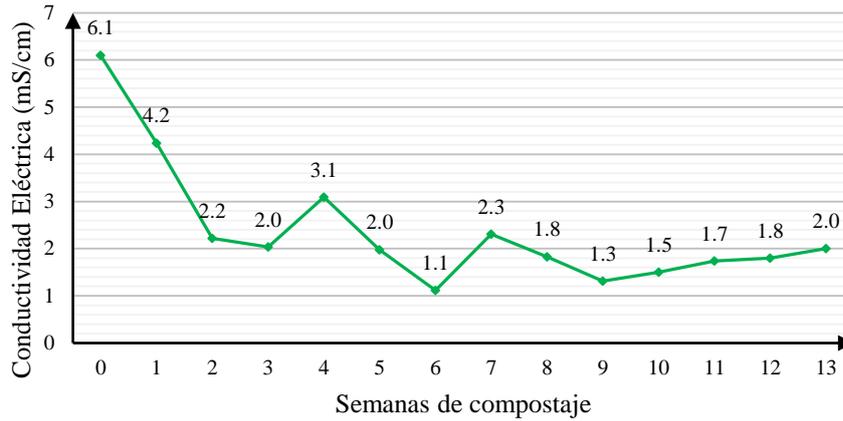
**Figura 26: Mediciones de conductividad eléctrica en el Tratamiento 1**

En el caso de Tratamiento 2 se nota en la Figura 27, que los valores de la conductividad eléctrica son ligeramente menores, comenzando con una conductividad eléctrica igual a 5.2 mS/cm, llegando a un mínimo de 1.4 mS/cm durante la sexta semana, en la etapa mesofila 2; para luego aumentar hasta 1.9 mS/cm en el compost final. Estos valores cumplen con los valores establecidos en la norma austriaca para calidad del compost final ( $\leq 2$  mS/cm).



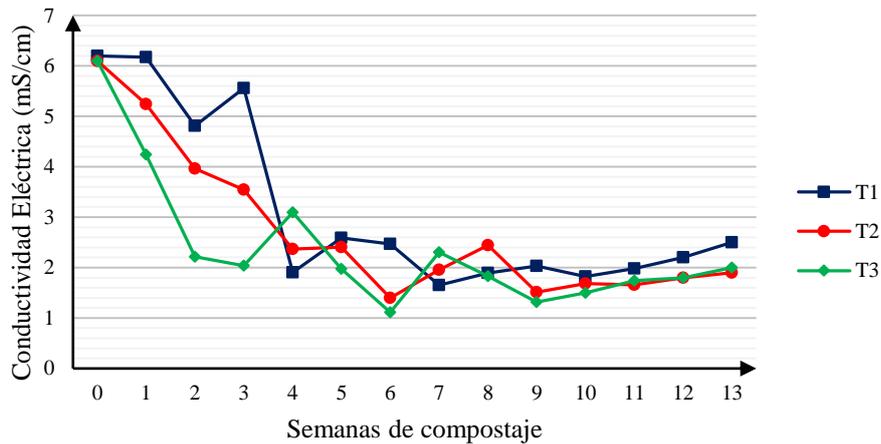
**Figura 27: Mediciones de conductividad eléctrica en el Tratamiento 2**

Para el Tratamiento 3 se observa en la Figura 28, un menor contenido de sales tanto al inicio del proceso, como al final de este. Se observan valores de 4.2 mS/cm, durante la segunda semana, llegando a un mínimo de 1.1 hacia la sexta semana del compostaje, y terminando el proceso con un valor de 2 mS/cm.



**Figura 28: Mediciones de conductividad eléctrica en el Tratamiento 3**

En la Figura 29 se observa el comportamiento de la conductividad eléctrica durante el compostaje en los tres tratamientos evaluados.



**Figura 29: Comportamiento de la conductividad eléctrica en T1, T2 y T3**

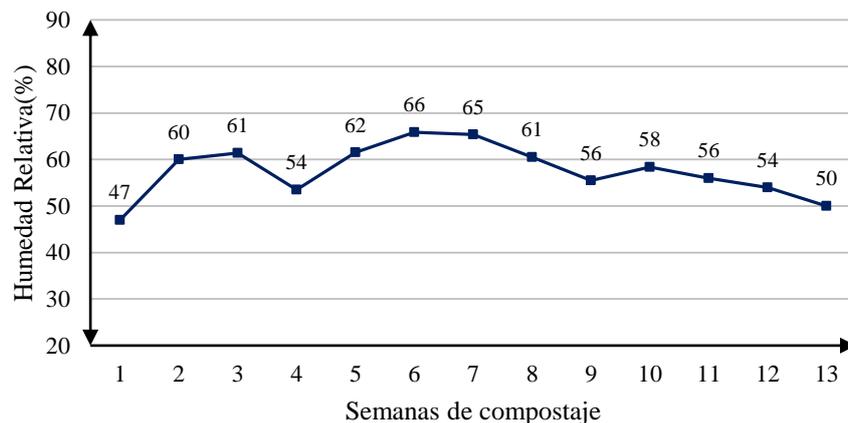
Se deducir que, este parámetro se ha visto influenciado por, el contenido de sales de cada material, por la lixiviación de sales que ocurre con los riegos, y por la formación de sales de nitratos y de otros compuestos orgánicos.

En general, en los tres tratamientos, la salinidad disminuye en las primeras semanas y luego aumenta durante la etapa de maduración. En el compost final, la conductividad eléctrica resulta mayor para el tratamiento 1 y ligeramente menor para los tratamientos 2 y 3, tratamientos que contienen desechos de cocina; lo que confirma que el material que aporta mayor salinidad fueron los rastrojos vegetales.

#### 4.2.4. Humedad relativa

Se realizaron en total 13 monitoreos de la humedad relativa, con frecuencia semanal. La humedad relativa óptima se encuentra alrededor del 50 por ciento durante el proceso de compostaje, y ligeramente menor, alrededor de 40 por ciento, en el compost final.

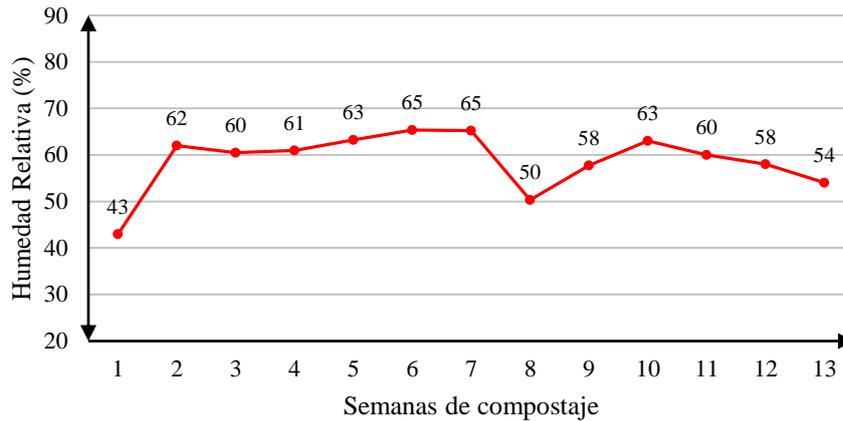
La Figura 30 muestra que, para el Tratamiento 1, los valores de humedad se encuentran entre 47 y 65 por ciento a lo largo del proceso. Esto coincide con el rango recomendado de humedad relativa por Moreno y Moral (2011), entre 40 – 65 por ciento. En el compost final, se registró una humedad de 48.25 por ciento, encontrándose dentro del rango de humedad recomendado para un compost final, el mismo que es de 30 a 50 por ciento (Mirabelli, 2008).



**Figura 30: Mediciones de humedad relativa en el Tratamiento 1**

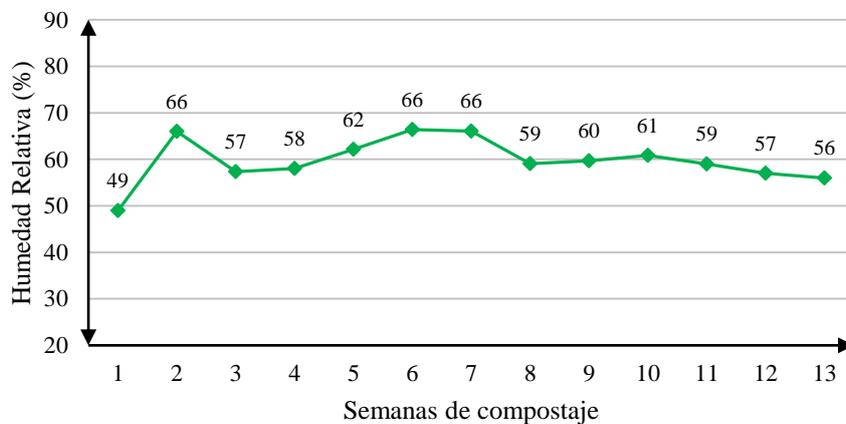
Para el tratamiento 2, se puede observar en la Figura 31, resultados de humedad relativa entre 50 y 65 por ciento a lo largo del periodo de compostaje, los cuales coinciden con el rango recomendado de 40 a 65 por ciento. Estos resultados permiten que haya un equilibrio entre la fase líquida y espacios aéreos en el compost, lo que permite un buen desarrollo del compostaje.

En el compost final, se obtuvo una humedad relativa de 41 por ciento, coincidiendo con lo recomendado para el compost final, que es de 30 a 50 por ciento (Mirabelli, 2008).



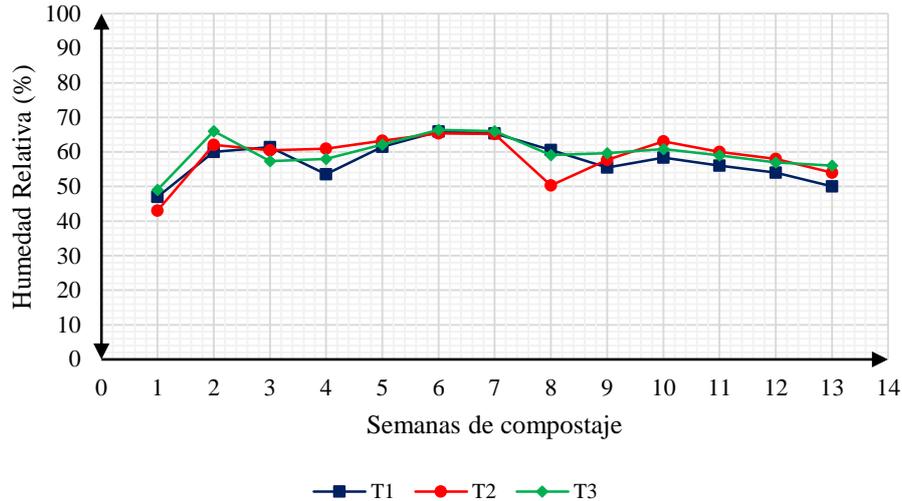
**Figura 31: Mediciones de humedad relativa en el Tratamiento 2**

En la Figura 32, se observan valores de humedad para el Tratamiento 3, entre 57 y 66 por ciento, los que cumplen el rango recomendado de 40 a 65 por ciento (Moreno y Moral, 2011). En el producto final, se registró una humedad de 42 por ciento, coincidiendo con el rango recomendado para el compost final, de 30 a 50 por ciento (Mirabelli, 2008). Podemos deducir, que los tres tratamientos han tenido un buen humedecimiento y una correcta aireación, para que la humedad relativa se mantenga dentro del valor adecuado.



**Figura 32: Mediciones de humedad relativa en el Tratamiento 3**

El comportamiento de este parámetro fue similar en los tres tratamientos, ya que el riego se efectuó con la misma frecuencia en las tres pilas. La incorporación de restos de cocina en el tratamiento 2 y tratamiento 3 ha podido tener una influencia en el contenido de humedad, pues en estos tratamientos predominan los valores más altos, y dicho material es el que presenta mayor humedad inicial. En la Figura 33 se muestra el comportamiento de la humedad relativa en los tres tratamientos evaluados.



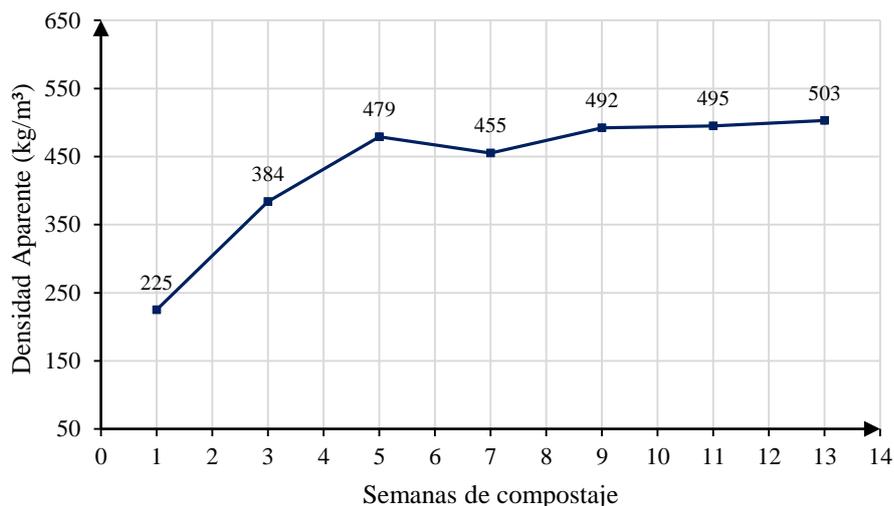
**Figura 33: Comportamiento de la humedad relativa en T1, T2 y T3**

Podemos comparar estos resultados con las gráficas del pH, las cuales muestran que no ocurrió anaerobiosis ni pHs fuertemente ácidos en el proceso. Concluyendo que, cuando se cuenta con una correcta humedad, entre 40 y 65 por ciento y oxigenación adecuada, los valores de pH se mantienen cercanos a 7.

#### 4.2.5. Densidad Aparente

En la Figura 34, se observa que la densidad aparente inició con un valor de 225 Kg/m<sup>3</sup>, para el tratamiento 1, formulado a base de bosta de caballo (50%) y rastrojos vegetales (50%). Este parámetro varía de acuerdo al grado de compactación del material (Moreno y Moral, 2011). Una vez que inicia la degradación en la pila de compost, es de esperarse que la densidad aparente aumente, como consecuencia de la reducción del tamaño de las partículas (Moreno y Moral, 2011), y el asentamiento del material, lo cual disminuye los espacios aéreos, aumentando el peso del material (Téllez *et. al.*, 2019).

Por otro lado, se observa algunos descensos de la densidad aparente en el tiempo, esto se explica debido a las pérdidas de materia orgánica producto de la descomposición y de los riegos del material. Sin embargo, la densidad aparente tuvo una tendencia general a aumentar, hasta valores alrededor de los 500 Kg/m<sup>3</sup> durante la última semana del compostaje, lo cual cumple con lo sugerido por Moreno y Moral (2011), quienes indican que, la densidad aparente debe incrementarse en el tiempo hasta valores en el rango de 400 a 700 Kg/m<sup>3</sup>.

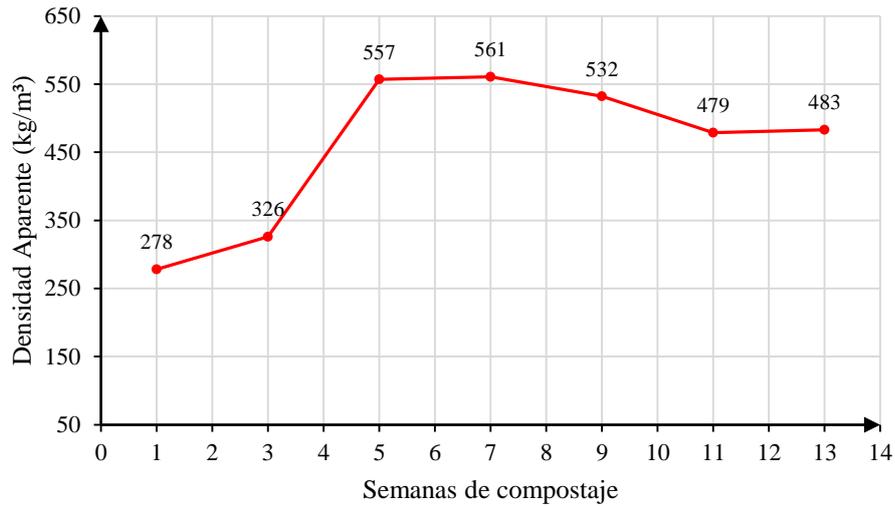


**Figura 34: Mediciones de densidad aparente en el Tratamiento 1**

La densidad aparente en el tratamiento 2, a base de bosta de caballo (50%), rastrojos vegetales (40%) y residuos de cocina (10%), inició con 278 Kg/m<sup>3</sup>, como se aprecia en la Figura 35. Este valor es mayor en comparación con el tratamiento 1 (225 Kg/m<sup>3</sup>) gracias a la incorporación de restos de cocina en la mezcla, cuya densidad aparente fue 606 Kg/m<sup>3</sup>. En la Figura 35 se puede ver que la densidad aparente tiende a aumentar hacia la semana 5 con un valor de 557 Kg/m<sup>3</sup>, siendo su valor más alto de 561 Kg/m<sup>3</sup> en la semana 7. Luego presenta una disminución hacia la semana 11 con 479 Kg/m<sup>3</sup>, para finalmente estabilizarse en 483 Kg/m<sup>3</sup> durante la última semana del proceso.

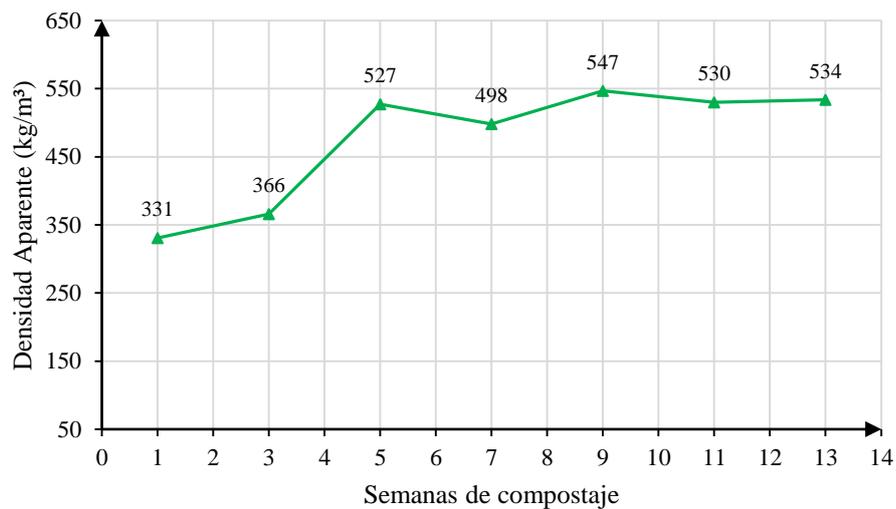
La tendencia de la densidad aparente es a aumentar al terminar el proceso, coincidiendo con lo señalado en Moreno y Moral (2011), quienes indican que, debido a la descomposición y la disminución en el tamaño de las partículas, la densidad aumenta, comúnmente hasta valores entre los 400 y 700 Kg/m<sup>3</sup>.

Por otro lado, descensos de la densidad aparente, entre las semanas 5 - 11, ocurrieron a consecuencia de los lavados y volteos que generan pérdidas de material compostable por arrastres y la consecuente pérdida de masa, así como de su capacidad de retención de agua (Téllez *et. al.* 2019).



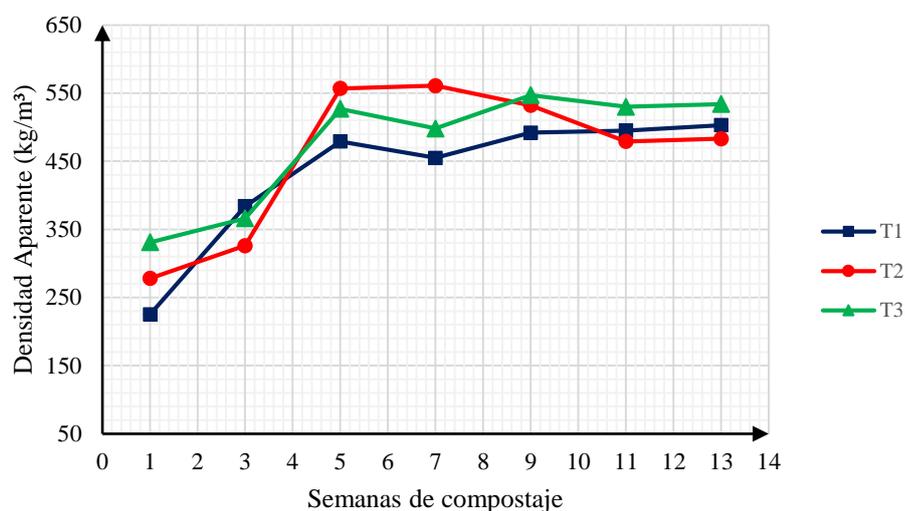
**Figura 35: Mediciones de densidad aparente en el Tratamiento 2**

La densidad aparente en el tratamiento 3 tiende a incrementarse desde valores de 331 Kg/m<sup>3</sup> al inicio del proceso, hasta un máximo de 547 Kg/m<sup>3</sup> durante la semana 9, terminando el compostaje en la semana 13 con una densidad aparente de 534 Kg/m<sup>3</sup>, como se puede ver en la Figura 36. Estos valores cumplen con lo recomendado por Moreno y Moral (2011), quienes señalan que, la densidad aparente aumenta en el tiempo, efecto de la transformación del material orgánico y el menor tamaño de las partículas del material, las cuales se asientan disminuyendo los espacios aéreos y ganando peso.



**Figura 36: Mediciones de densidad aparente en el Tratamiento 3**

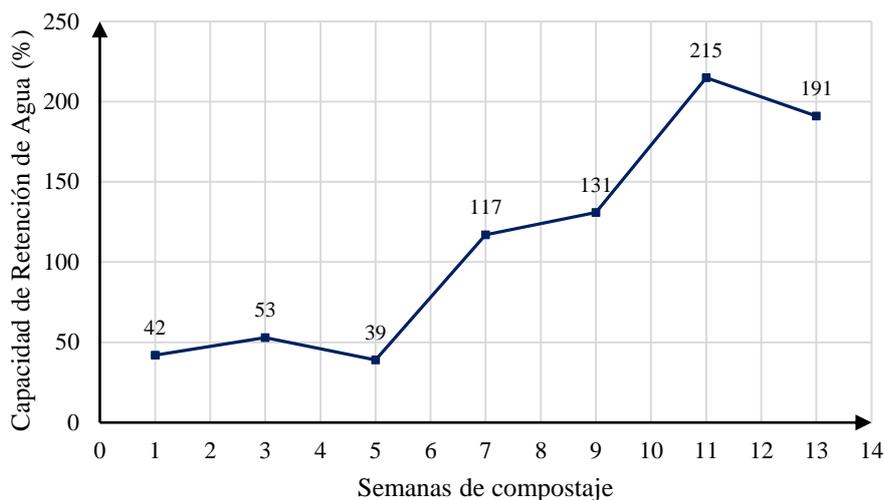
La Figura 37 muestra la comparación de la densidad aparente en los tres tratamientos. Se puede observar que, en el caso del tratamiento 2, al ocurrir mayores pérdidas de materia orgánica, finaliza el proceso con una densidad aparente menor a las del tratamiento 1 y tratamiento 3. Sin embargo, los tres tratamientos lograron una densidad aparente final que se encuentra dentro de los rangos de calidad recomendados por la norma mexicana ( $<600 \text{ Kg/m}^3$ ).



**Figura 37: Comportamiento de la densidad aparente en T1, T2 y T3**

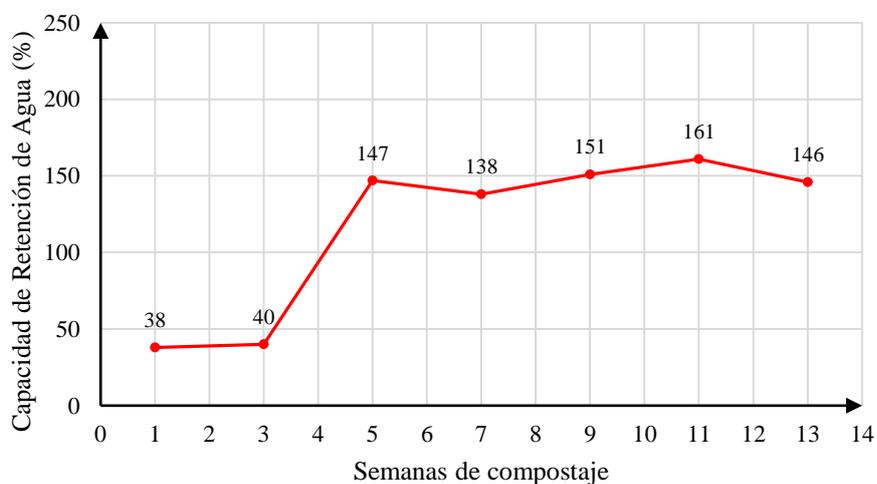
#### 4.2.6. Capacidad de Retención de Agua

En la Figura 38 se aprecia el comportamiento de la capacidad de retención de agua en el tratamiento 1, cuya composición de materiales fue de bosta de caballo (50%) y rastrojos vegetales (50%). Podemos observar que la capacidad de retención de agua aumenta a medida que la materia orgánica se estabiliza, desde valores de 42 por ciento al iniciarse el proceso, hasta estabilizarse en 191 por ciento durante la semana final del proceso. Los bajos valores en la capacidad de retención de agua durante las primeras semanas, ocurre debido al tamaño de las partículas en el material, el cual es aún muy grande que no permite una adecuada retención de agua en el compost. A partir de la etapa mesófila 2, hacia la quinta semana del proceso, la capacidad de retención de agua se encuentra por encima del 100 por ciento, registrándose un máximo en la semana 11 de 215 por ciento, para luego disminuir hasta 191 por ciento al final del compostaje. La disminución de la capacidad de retención de agua en la etapa de maduración, se explica debido a que la pérdida de materia orgánica es mayor en esta etapa, lo que disminuye consecuentemente, la capacidad de retención de agua.



**Figura 38: Mediciones de la capacidad de retención de agua en el Tratamiento 1**

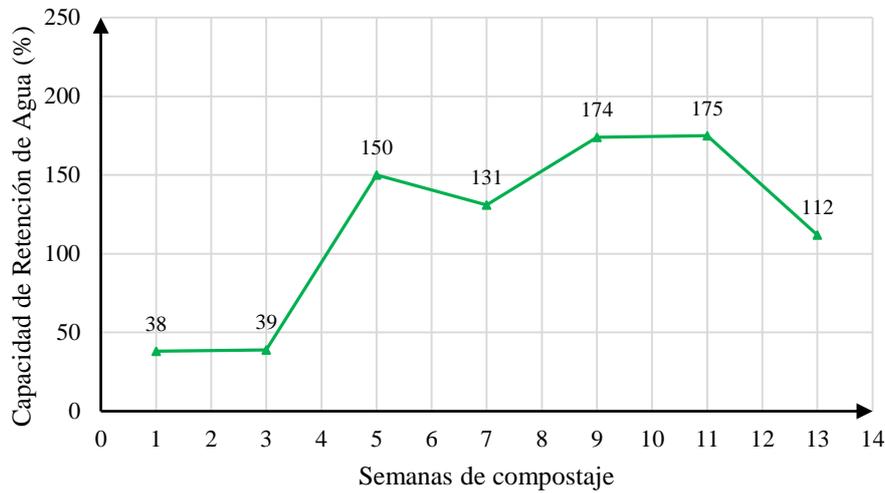
En el tratamiento 2, se aprecia en la Figura 39, valores de capacidad de retención de agua de 40 por ciento al inicio del compostaje, obteniéndose durante la etapa mesófila 2 un máximo de 161 por ciento. El valor recomendado de capacidad de retención de agua, por la norma austriaca, es entre 85 y 120 g/100g (Ö-NORM S 2200, 1993). En el compost final del tratamiento 2, se obtuvo una capacidad de retención de agua de 146 por ciento, superando por poco el rango recomendado.



**Figura 39: Mediciones de la capacidad de retención de agua en el Tratamiento 2**

En el Tratamiento 3, como se observa en la Figura 40, se obtuvo valores de capacidad de retención de agua desde 39 por ciento en las primeras semanas del compostaje, aumentando durante la etapa mesófila 2 hasta valores de 175 por ciento. En el producto final, la capacidad de retención de agua fue de 110 por ciento, encontrándose este valor dentro del

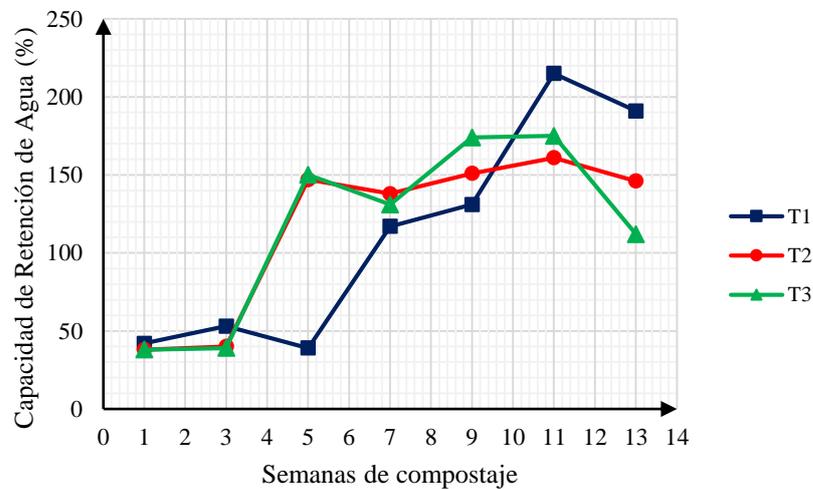
rango que recomienda la norma austriaca (85gr/100gr a 120gr/100gr). La capacidad de retención de agua es un indicador importante en la calidad final, ya que viene a ser el agua higroscópica y capilar contenida en el compost, la cual es la que facilita la nutrición de las plantas (Moreno y Moral, 2011).



**Figura 40: Mediciones de la capacidad de retención de agua en Tratamiento 3**

En la Figura 41, se puede notar que, únicamente en el tratamiento 3 se obtuvo valores de capacidad de retención de agua en el compost final, dentro del rango recomendado. Los tratamientos 1 y 2 superan ligeramente dicho valor. Esto significa una menor calidad para estos tratamientos, ya que el exceso de agua para los cultivos puede ser perjudicial.

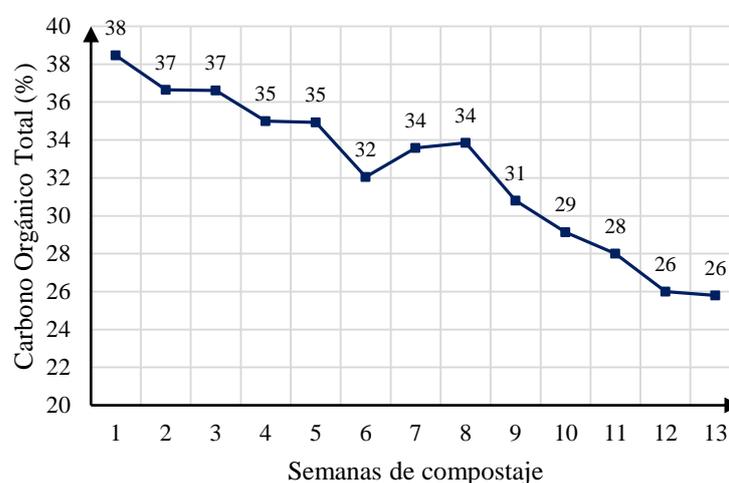
Podemos deducir también que la mayor cantidad de restos de cocina en el tratamiento 3 contribuye a regular esta capacidad de retención de agua al rango recomendado.



**Figura 41: Comportamiento de la capacidad de retención de agua en T1, T2 y T3**

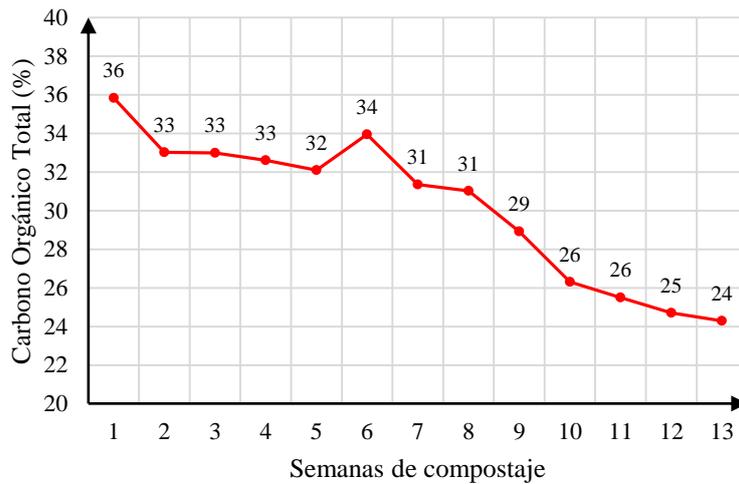
#### 4.2.7. Carbono Orgánico Total

El carbono orgánico total se midió semanalmente, realizándose en total 13 ensayos. En la Figura 42, se puede ver que, los porcentajes de carbono orgánico total en el tratamiento 1 varían desde un máximo de 38 por ciento en la primera semana, hasta un mínimo de 25.7 por ciento, durante la última semana de compostaje. En general, el carbono orgánico total tiene tendencia a disminuir, ya que la materia orgánica es consumida en el proceso. Siendo esta disminución pues, un indicador de la presencia diversas poblaciones de microorganismos. Durante la quinta semana se aprecia que el carbono orgánico total disminuye y luego aumenta hacia la séptima semana, estos cambios ocurren por la formación del humus, cuya presencia incrementa los porcentajes de carbono orgánico total (Moreno y Moral, 2011).



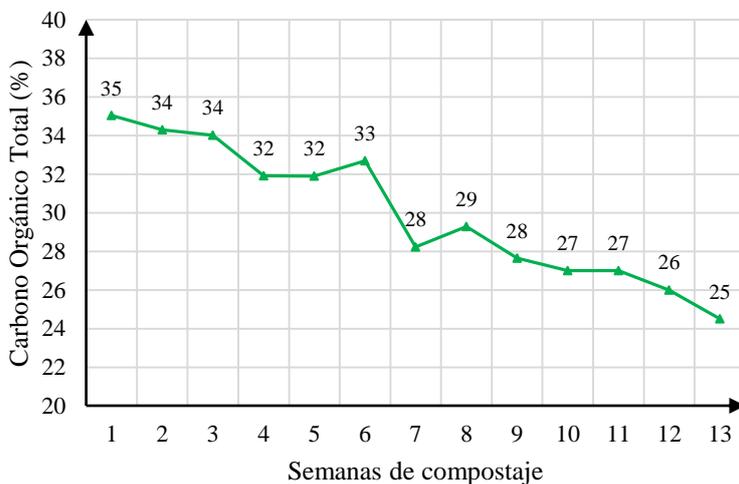
**Figura 42: Mediciones de carbono orgánico total en el Tratamiento 1**

Moreno y Moral (2011) recomiendan valores de carbono orgánico total al final del compostaje, de aproximadamente 25 por ciento. Los porcentajes determinados en el tratamiento 2 varían de un máximo de 36 por ciento durante los primeros días, a un mínimo de 24.3 por ciento, durante la última semana, como se aprecia en la Figura 43. En general, el carbono orgánico total tiende a descender en el compostaje, pues ocurren pérdidas de carbono como anhídrido carbónico, y la mineralización de los compuestos, producto de las reacciones de transformación (Moreno y Moral, 2011).



**Figura 43: Mediciones de carbono orgánico total en el Tratamiento 2**

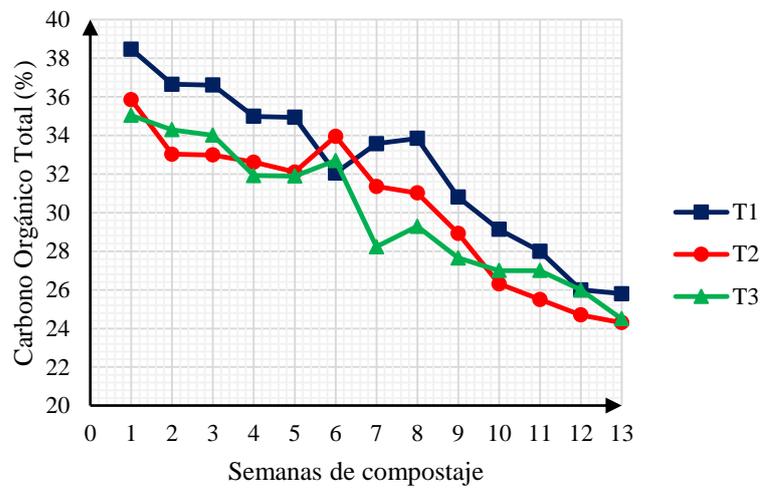
Los porcentajes determinados de carbono orgánico total en el tratamiento 3 varían de un máximo de 35 por ciento hasta un mínimo de 25 por ciento en la última semana del proceso, como se puede ver en la Figura 44. Similar a los otros dos tratamientos, se observan caídas y aumentos del porcentaje de carbono orgánico total, debido a pérdidas de carbono en forma de CO<sub>2</sub> y a aumentos producto de la formación de humus a lo largo del proceso.



**Figura 44: Mediciones de carbono orgánico total en el Tratamiento 3**

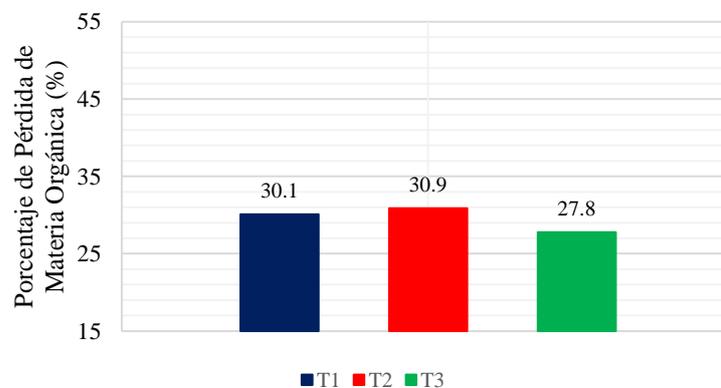
En la Figura 45 podemos observar la tendencia del carbono orgánico total durante la transformación de los desechos orgánicos, para los tres tratamientos. La diferencia del carbono inicial y final es 12 unidades aproximadamente. Según Moreno y Moral (2011), estos resultados muestran un comportamiento típico, en el que las pérdidas de carbono

orgánico total, acabando el proceso, llegan a ser aproximadamente el 20 por ciento en peso, para un proceso adecuado de compostaje (Moreno y Moral, 2011).



**Figura 45: Comportamiento del carbono orgánico total en T1, T2 y T3**

En la Figura 46 se observan las pérdidas de materia orgánica en los tratamientos, estos resultados son bastante menores en comparación a los obtenidos en la investigación de Quevedo (2017), la cual se basó en el compostaje de residuos vegetales de frutas y verduras, para una pila de compost de 2 m de ancho por 2 m de largo por 0.8 m de altura; cuyo resultado fue 71 por ciento en pérdidas de materia orgánica, notoriamente mayor a lo obtenido en la presente investigación. De esto, se deduce que, los residuos de frutas y verduras requieren mezclarse con otros materiales para favorecer su compostaje, y evitar pérdidas excesivas de materia orgánica.



**Figura 46: Pérdida de materia orgánica durante el compostaje**

Por otro lado, la norma austriaca, establece un valor mínimo de 12 por ciento de carbono orgánico total en el producto final, de manera que, los tres tratamientos cumplen con dicho estándar de calidad.

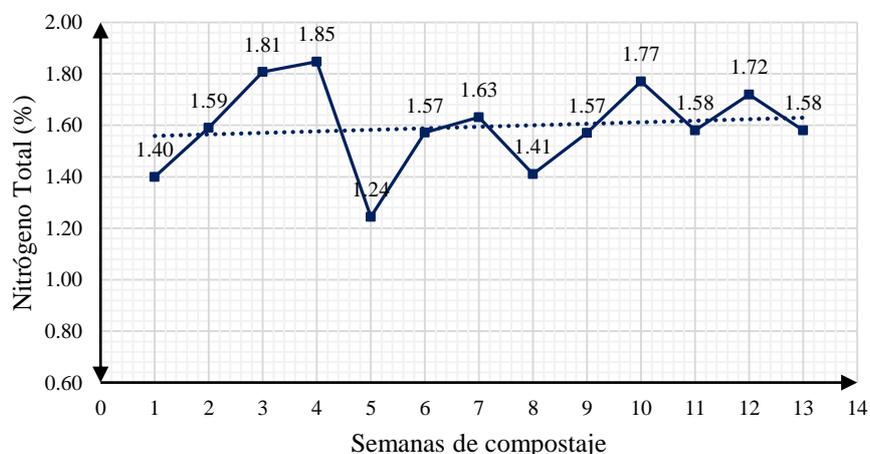
#### 4.2.8. Nitrógeno Total

Los resultados de los monitoreos del nitrógeno total corresponden a 13 mediciones, realizadas de manera semanal, durante el compostaje.

La metodología Kjeldahl permite determinar la suma del nitrógeno orgánico (aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos, etc.) y del amonio, mas no de los nitratos mineralizados en el proceso; sin embargo, el amonio es un equivalente a los nitratos formados por medio de las reacciones de nitrificación. Por lo tanto, estos resultados se consideran un indicador del nitrógeno total aprovechable por las plantas.

Acorde con la norma mexicana, el límite adecuado de nitrógeno total para el producto final, es menor o igual a 3 por ciento.

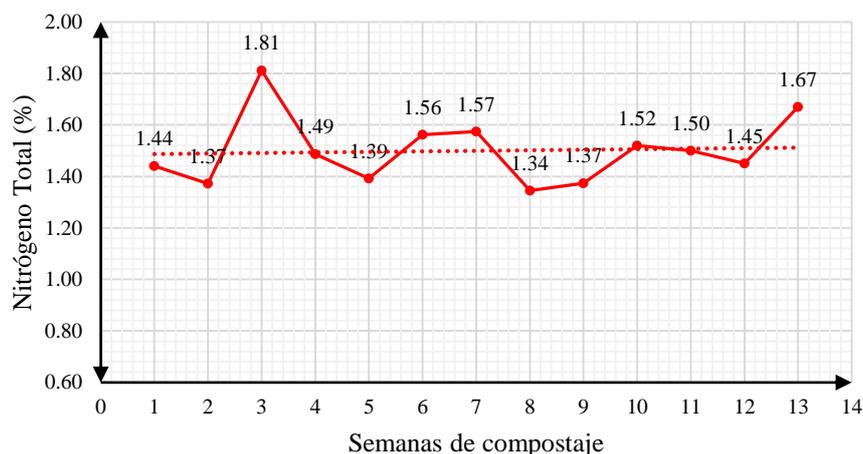
En la Figura 47, se puede ver que, el nitrógeno total, no varía significativamente en el tiempo de compostaje. Se obtienen resultados entre 1.4 y 1.8 por ciento, con una leve tendencia aumentar al final. El nitrógeno orgánico en el compostaje sufre reacciones de mineralización, amonificación y nitrificación; esto explica su tendencia a aumentar en el compost final, con un valor de 1.58 por ciento, el mismo que se ajusta a las exigencias de la norma mexicana para porcentaje de nitrógeno total en el producto final ( $\leq 3\%$ ).



**Figura 47: Mediciones de nitrógeno total en el Tratamiento 1**

En el tratamiento 2, los porcentajes de nitrógeno total varían igual que en el caso del tratamiento 1, entre 1.4 y 1.8 por ciento, notándose un valor máximo hacia la tercera semana, producto de la ruptura de compuestos nitrogenados durante la etapa termófila. Luego disminuye hacia la semana 5, durante la etapa mesófila 2, a 1.39 por ciento, como se aprecia en la Figura 48.

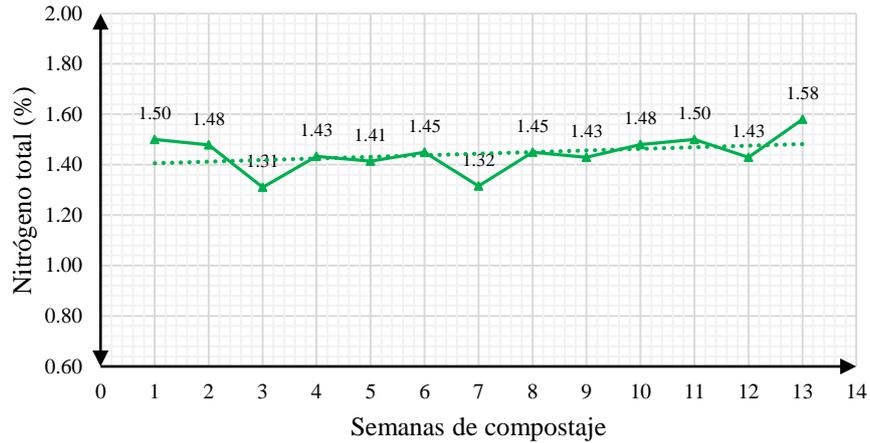
Las variaciones observadas, se deben al desprendimiento de amoníaco  $\text{NH}_3$  durante las reacciones de amonificación que generan disminución del nitrógeno total; y a la producción de amonio que, al contrario, aumenta el porcentaje de nitrógeno. Según la norma mexicana, el nitrógeno total en el producto final debe ser menor o igual a 3 por ciento. En el tratamiento 2, se obtuvo un resultado de 1.67 por ciento, de modo que cumple con lo establecido en dicha norma.



**Figura 48: Mediciones de nitrógeno total en el Tratamiento 2**

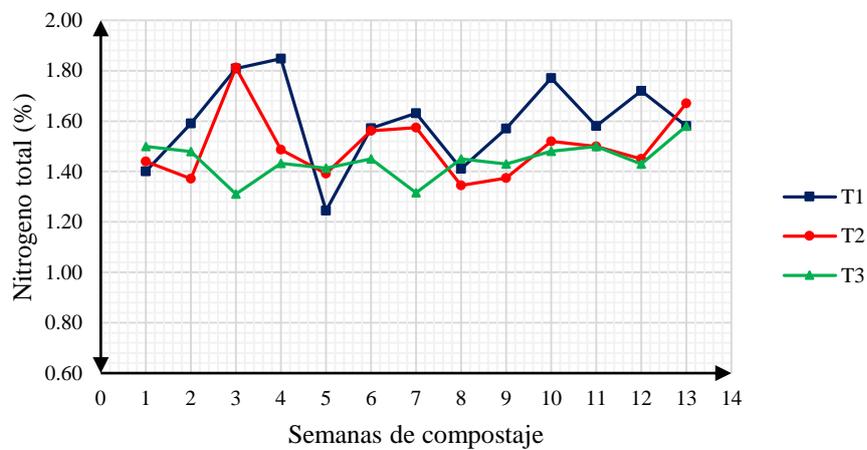
En el tratamiento 3, el contenido de nitrógeno total varía entre 1.3 y 1.58 por ciento a lo largo del compostaje. Estos valores son levemente menores a los de los tratamientos 1 y 2. Además se aprecia menos variaciones durante la transformación del material, lo que puede ser indicio de una mayor estabilización. El valor final del contenido de nitrógeno fue de 1.58 por ciento, lo cual cumple con lo recomendado por la norma mexicana.

Cabe mencionar, que el rango límite de nitrógeno se determina, además, considerando los requerimientos nutricionales de los cultivos, los cuales varían de una especie a otra.



**Figura 49: Mediciones de nitrógeno total en el Tratamiento 3**

En la Figura 50 se puede comparar los tres tratamientos. Durante el proceso, cuando el nitrógeno se eleva, puede significar mayor presencia de amonio debido a la amonización de nitrógeno orgánico (proteínas, aminoácidos, etc.). Cuando el nitrógeno disminuye, se asocia con condiciones de baja oxigenación y producción de amoniaco, además con procesos de desnitrificación, que generan pérdidas de nitrógeno como gas  $N_2$ .

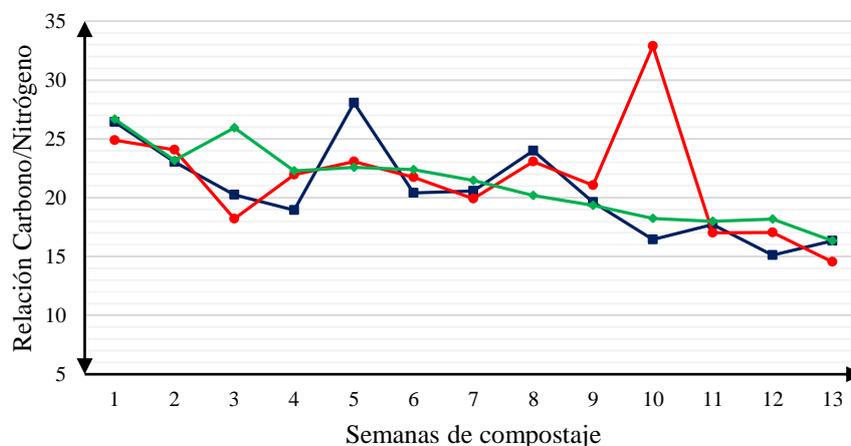


**Figura 50: Comportamiento del nitrógeno total en T1, T2 y T3**

#### 4.2.9. Relación carbono nitrógeno

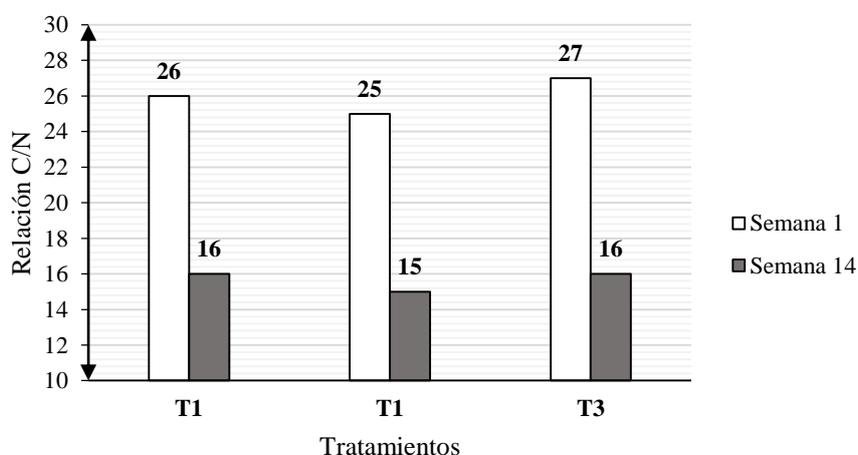
Los resultados de las mediciones de la relación carbono nitrógeno se aprecian en la Figura 51. Corresponden a 13 monitoreos, realizados de forma semanal. La relación carbono nitrógeno suele variar mucho durante el proceso, ya que el carbono sigue constantemente un ciclo biogeoquímico, al igual que el nitrógeno durante la formación del humus (Moreno y Moral, 2011). Iglesias y Pérez (1989) indican que, la relación de carbono nitrógeno final

dividida entre la relación carbono nitrógeno inicial debe ser menor al factor de 0.75, esto es un indicador de que se ha logrado la madurez en el compost.



**Figura 51: Comportamiento de la relación carbono nitrógeno en T1, T2 y T3**

En la Figura 51 se aprecia una tendencia a disminuir en los tres tratamientos. La relación carbono nitrógeno debe disminuir en el producto final, a efecto del consumo de estos nutrientes por la flora microbiana. Para iniciar el proceso, y proveer a la microflora, del carbono y nitrógeno necesarios, los valores iniciales de relación carbono nitrógeno deben ser de por lo menos 25/1-35/1 (Moreno y Moral, 2011). En las muestras finales, las relaciones carbono nitrógeno fueron de 16/1, 14/1 y 15/1 para los tratamientos 1, 2 y 3 respectivamente; lo que indica que ha habido un proceso de degradación eficiente. Un proceso ideal lograría en el mismo tiempo de compostaje una relación final de 10/1, de acuerdo con Moreno y Moral (2011).



**Figura 52: Relación carbono nitrógeno inicial y final en T1, T2 y T3**

En la Tabla 23 se puede ver la relación carbono nitrógeno inicial y final en los tratamientos. Lo ideal es que la división de ellas,  $CNf/CNi$ , sea  $<0.75$ , de manera que, el tratamiento 1 ha resultado ligeramente más eficiente, seguido por el tratamiento 2 y finalmente por el tratamiento 1.

**Tabla 23: Relación C/N final y C/N inicial**

Tratamiento	Ci/Ni	Cf/Nf	CfNf/CiNi
T1	26	16	0.62
T2	28	15	0.6
T3	29	16	0.59

### 4.3. Parámetros evaluados en el compost final

#### 4.3.1. Macronutrientes esenciales

El adecuado comportamiento de los parámetros antes vistos, favorece la disposición de nutrientes en el compost, en concentraciones adecuadas. El contenido de macronutrientes ha sido comparado con lo exigido por la normativa internacional y en fuentes bibliográficas revisadas. Estas establecen un valor límite para comercialización del compost para uso en cultivos en general. Según Bueno (2007), los compostajes que utilicen mayor cantidad y diversidad de materiales orgánicos tendrán mayores concentraciones de nutrientes y producirán un compost más enriquecido. Los nutrientes se manifiestan al máximo entre los 3-4 meses del proceso.

A continuación, se observa en la Tabla 24 los resultados de análisis de macronutrientes en el producto final.

**Tabla 24: Macronutrientes esenciales en el compost final**

Macronutriente	T1	T2	T3	Valor Recomendado
C(%)	25.76	24.3	24.51	$\geq 20^{(1)}$
N(%)	1.58	1.67	1.58	1-3 <sup>(2)</sup>
P(%)	0.91	1.22	1.43	0.5-1-5 <sup>(1)</sup>
K(%)	1.32	1.04	1.03	0.5-1.5 <sup>(1)</sup>
Ca(%)	2.63	2.61	3.64	1.5-3 <sup>(1)</sup>
Mg(%)	1.37	1.41	1.13	0.6-1.2 <sup>(1)</sup>

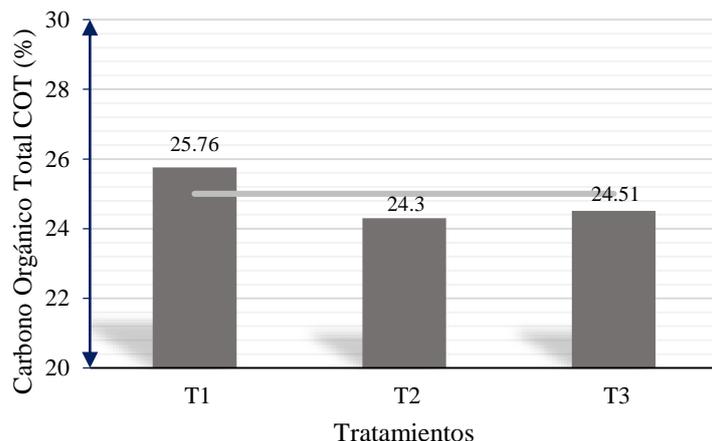
FUENTE: <sup>(1)</sup>Mirabelli (2008); <sup>(2)</sup>Ö NORM S 2200 (1993)

### **Carbono Orgánico Total**

El porcentaje de carbono orgánico total en el producto final fue 25.7 por ciento para el tratamiento 1; 24.3 para el tratamiento 2 y 24.5 en el tratamiento 3, como se observa en la Figura 53. Estos valores se ajustan a lo establecido en la norma austriaca, que indica un valor límite de carbono, mayor o igual a 12 por ciento.

Según Mirabelli (2008), el valor recomendado promedio de carbono orgánico total en el producto final es entre 20-25 por ciento. El tratamiento 1 obtuvo un porcentaje ligeramente mayor, sin embargo, no necesariamente resultó un compost de mejor calidad agronómica, ya que para evaluar la calidad agronómica se debe considerar no solo el carbono, sino también otros macronutrientes y micronutrientes que deben encontrarse en concentraciones adecuadas.

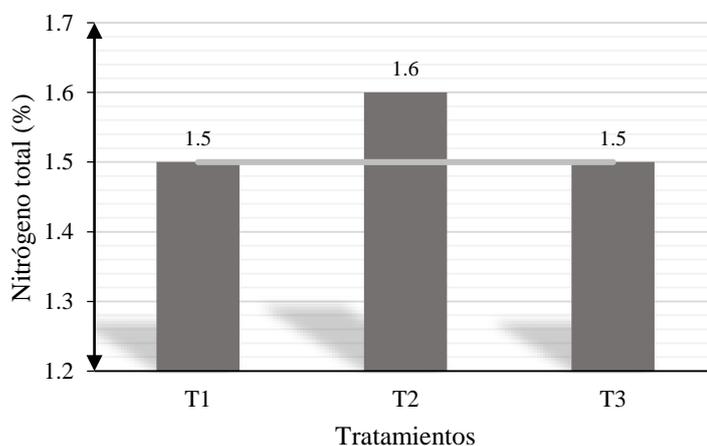
Por último, podemos deducir que, el compost se cosechó en un tiempo oportuno, para poder aplicarlo al suelo, ya que, de continuar compostando, los porcentajes de materia orgánica podrían disminuir.



**Figura 53: Carbono orgánico total en el compost final**

### Nitrógeno Total

El nitrógeno total recomendado por la norma mexicana en el compost final es entre 1 – 3 por ciento. En la Figura 54 se observa que, los resultados en los tres tratamientos son ligeramente mayores a 1 por ciento. Estos valores indican una calidad adecuada. Sin embargo, se debe aumentar ligeramente la relación carbono nitrógeno en la mezcla. La relación carbono nitrógeno al inicio debe ser mayor a 25/1, y esta fue de apenas 25/1. Se espera que, aumentado esta relación, mejore también el contenido final de nitrógeno total.

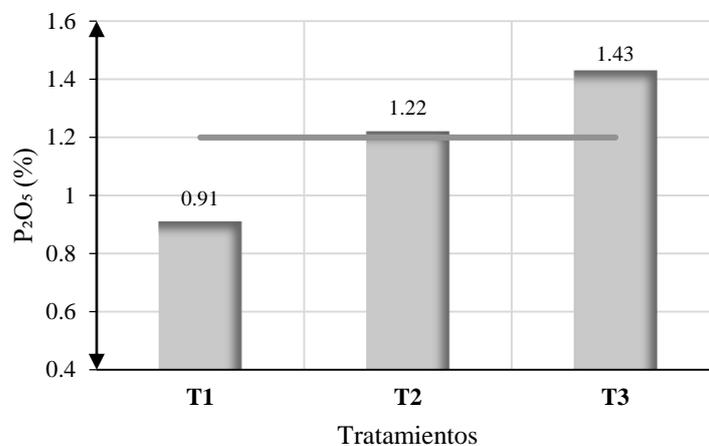


**Figura 54: Nitrógeno total en el compost final**

### Fósforo

Los valores recomendados de fósforo, de acuerdo con Mirabelli (2008), son de 0.5 – 1.5 por ciento. Según la norma mexicana debe ser de 1 – 3 por ciento y debe sumar  $\leq (7\%)$  con el nitrógeno y potasio, para tener la categoría de “Composta - Mejorador de suelo

orgánico”. Como se observa en la Figura 55, los tres tratamientos cumplen con dichos rangos, con un 0.91 por ciento para el tratamiento 1, 1.22 por ciento para el tratamiento 2 y 1.43 por ciento para tratamiento 3.

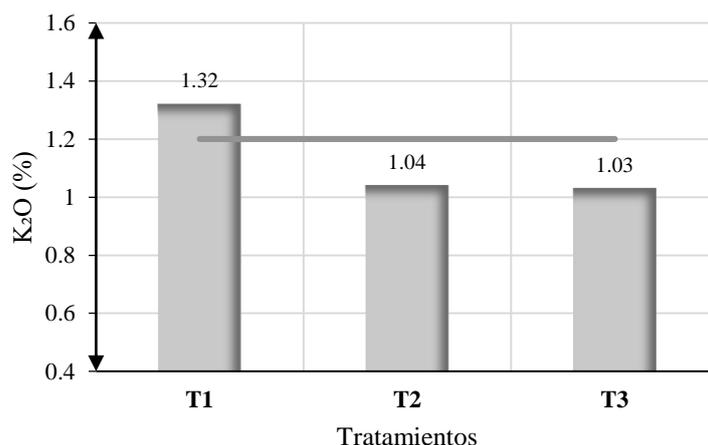


**Figura 55: Fósforo total en el compost final**

### **Potasio**

Los valores recomendados de potasio, son de 0.5 - 1.5 por ciento, de acuerdo con Mirabelli (2008). La norma mexicana recomienda entre 1 a 3 por ciento y debe sumar  $\leq 7$  por ciento con el nitrógeno y fósforo. En la Figura 56 se observa que los tres tratamientos cumplen con dicha normativa, con 1.32 por ciento para el tratamiento 1, 1.04 por ciento para el tratamiento 2 y 1.03 por ciento para el tratamiento 3.

Además, tenemos que la suma de nitrógeno, fósforo y potasio para el tratamiento 1 fue igual a 3.73; para el tratamiento 2 fue igual a 3.86; y para el tratamiento 3, fue de 3.96, cumpliendo con lo recomendado en la norma mexicana (nitrógeno + fósforo + potasio  $\leq 7\%$ ).

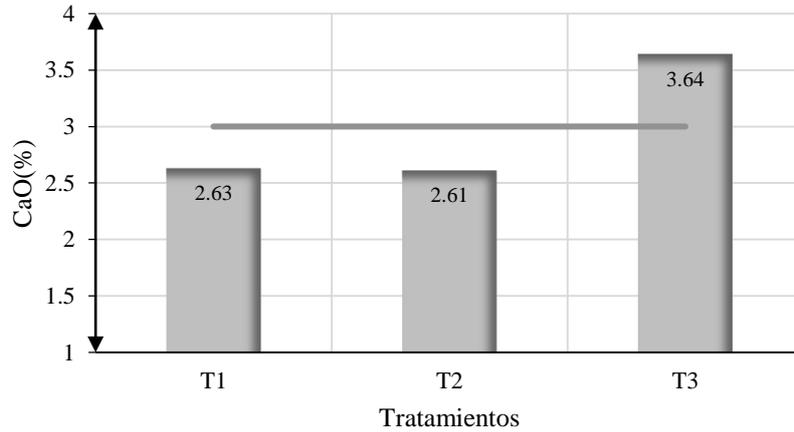


**Figura 56: Potasio total en el compost final**

### Calcio

En la Figura 57 se aprecian los resultados del calcio en el producto final, para los tres tratamientos. Mirabelli (2008) recomienda un rango entre 1.5 – 3 por ciento de calcio en el compost, cumpliendo con este rango el tratamiento 1 con 2.63 por ciento y el tratamiento 2 con 2.61 por ciento; en el caso de tratamiento 3, se supera ligeramente el rango con 3.64 por ciento. Sin embargo, este valor se aproxima al obtenido en la investigación realizada por Hernández-Rodríguez *et. al.* (2013) donde se reporta un contenido de 2 por ciento de calcio para un compost hecho a base de estiércol vacuno y aserrín; y un contenido de hasta 5.3 por ciento de calcio para un compost de estiércol vacuno con esquilmo de maíz.

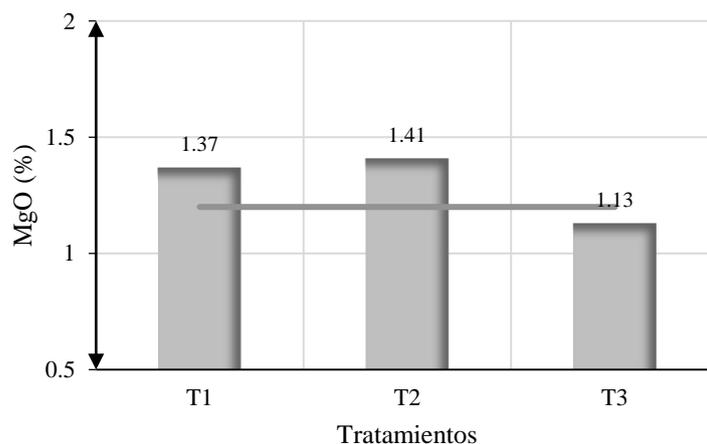
Por otro lado, Mirabelli (2008) recomienda evaluar la relación de calcio magnesio en el compost Ca/Mg, la cual debe ser de 2-5/1. Se tiene pues que, la relación calcio magnesio para el tratamiento 1 es igual a 1.92; en el tratamiento 2 es igual a 1.85 y en el tratamiento 3 es igual a 3.22. Se deduce entonces que, en el tratamiento 3 existe un mejor balance dichos nutrientes.



**Figura 57: Calcio en el compost final**

### Magnesio

El valor recomendado de magnesio en el compost final, de acuerdo con Mirabelli (2008), se encuentra entre 1.4 – 5 por ciento. Por otro lado, en el estudio de Pérez *et. al.* (2008) se reporta valores de magnesio entre 0.57 – 1.88 por ciento para compost preparados a base de una mezcla de materiales (estiércoles, restos vegetales diversos, inóculos, tierra de bosque, entre otros) obteniendo como promedio, 1.34 por ciento de Mg. Los resultados de la presente investigación, se acercan a dicho valor, con 1.37 por ciento para el tratamiento 1, 1.41 por ciento para el tratamiento 2 y 1.13 por ciento para el tratamiento 3, como se aprecia en la Figura 58.



**Figura 58: Magnesio en el compost final**

### 4.3.2. Micronutrientes esenciales

Los resultados del análisis de micronutrientes en el producto final se presentan en la Tabla 25. Los rangos recomendados de micronutrientes en el compost final han sido tomados de Mirabelli (2008) y Stoffella (2004), ya que estos autores se orientan a la calidad de compost para fines agronómicos.

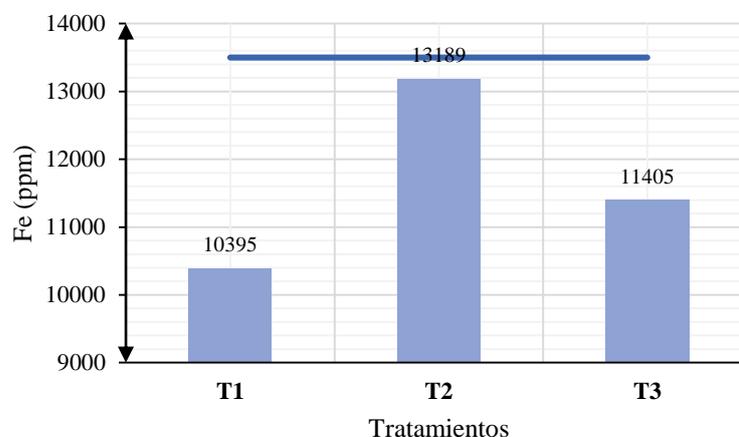
**Tabla 25: Micronutrientes esenciales en el compost final**

Micronutriente	T1	T2	T3	Valor Recomendado
Fe(ppm)	10395	13189	11405	2000-16000 <sup>(1)</sup>
Cu(ppm)	46	40	37	40-630 <sup>(1)</sup>
Zn(ppm)	199	160	162	200-1650 <sup>(1)</sup>
Mn(ppm)	480	475	425	400-600 <sup>(1)</sup>
B(ppm)	65	74	59	5-70 <sup>(1)</sup>

FUENTE: <sup>(1)</sup>Mirabelli (2008)

### Hierro

La Figura 59 muestra la concentración de hierro en unidades partes por millón, en el producto final. El valor recomendado para el hierro en el compost final, es de 2000 - 16 000 ppm, de acuerdo con Mirabelli (2008). El tratamiento 2 presentó un valor mayor, con 13189 ppm, seguido por el tratamiento 3 con 11405 ppm y finalmente, el tratamiento 1 con 10395 ppm. Estos resultados muestran un contenido balanceado de hierro para fines agronómicos.

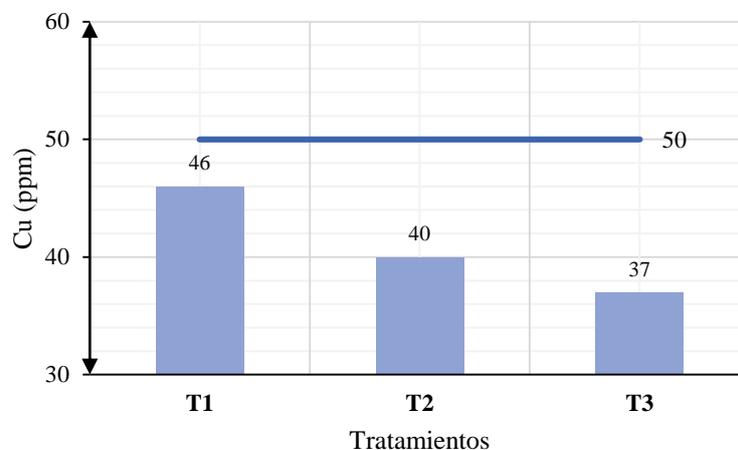


**Figura 59: Hierro en el compost final**

## Cobre

El valor recomendado para el cobre en el producto final, es menor o igual a 70 ppm, según la norma mexicana. Los tres valores de los tres tratamientos, se encuentran en dicho rango. El tratamiento 1 muestra un resultado de mayor valor, con 46 ppm de cobre, seguido por el tratamiento 2 con 40 ppm y finalmente tratamiento 3 con 37 ppm.

En Stoffella (2004) se establece un rango de contenido de cobre en el compost más amplio, entre 40-630 ppm. Se puede notar en la Figura 60, que el tratamiento 3 se encuentra ligeramente por debajo de lo mínimo recomendado.

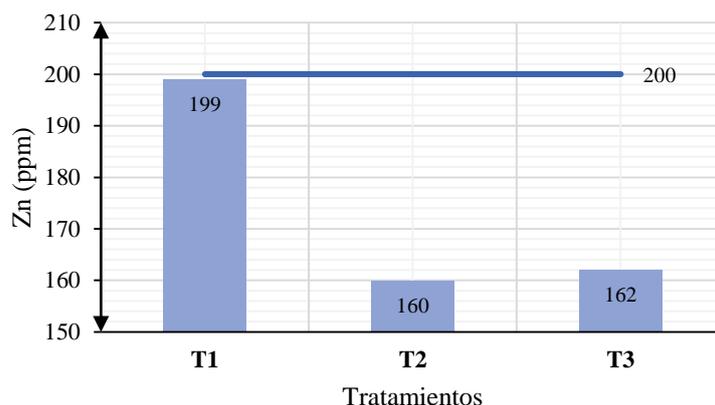


**Figura 60: Cobre en el compost final**

## Zinc

El valor recomendado para el zinc en el producto final, según la norma mexicana, es menor o igual a 200 ppm. Los tres resultados, de los tres tratamientos, se encuentran en dicho rango. El tratamiento 1 muestra un resultado que se aproxima más a dicho valor, con 199 ppm de zinc en el compost, seguido por el tratamiento 3 con 162 ppm y finalmente el tratamiento 2 con 160 ppm.

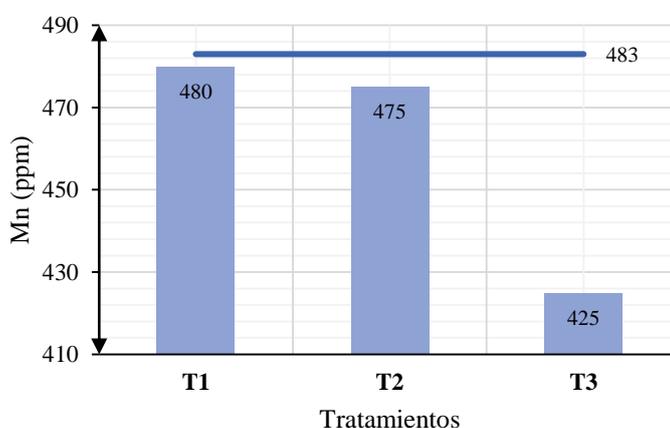
Por otro lado, en Mirabelli (2008) se sugiere un contenido de zinc en el compost para fines agronómicos desde 200 ppm hasta 1650 ppm, resultando los tratamientos 2 y 3, por debajo de dichos límites recomendados, como se observa en la Figura 61.



**Figura 61: Zinc en el compost final**

### Manganeso

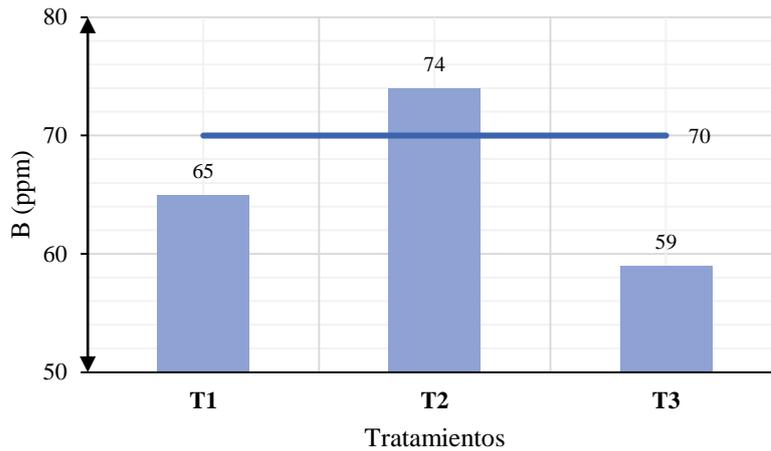
La Figura 62 muestra los resultados de Manganeso en los compost finales. El valor recomendado para el manganeso, es entre 400-600 ppm, según Mirabelli (2008). Los tres tratamientos, 1, 2 y 3, se encuentran en dicho rango. El tratamiento 1 muestra un valor mayor, con 480 ppm de manganeso en el compost, seguido por el tratamiento 2 con 475 ppm y finalmente el tratamiento 3 con 425 ppm.



**Figura 62: Manganeso en el compost final**

### Boro

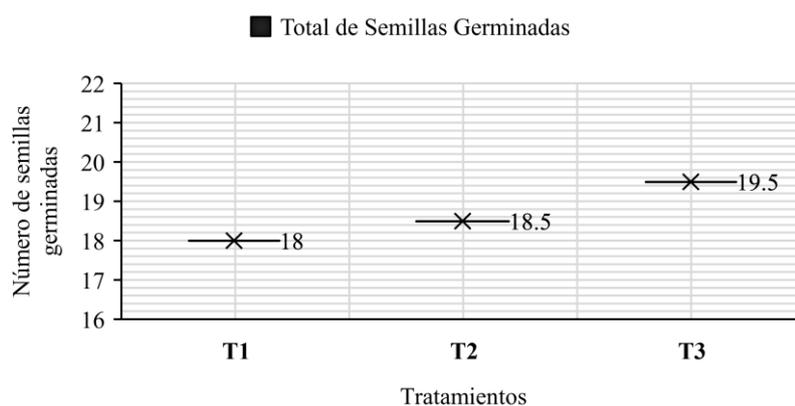
El valor recomendado para el boro en el producto final, es entre 5 – 70 ppm, como señala Mirabelli (2008). En la Figura 63 se aprecia que el tratamiento 2 logró un resultado de 74 ppm, seguido por el tratamiento 1 con 65 ppm, y finalmente tratamiento 3 con 59 ppm. Los tres resultados se consideran adecuados, siendo ligeramente alto el del tratamiento 2.



**Figura 63: Boro en el compost final**

### 4.3.3. Porcentaje de Germinación

Los resultados de la prueba de germinación de semillas corresponden a la cantidad de semillas germinadas en la muestra de compost, con respecto a la cantidad de semillas germinadas en el control (papel toalla con agua destilada). Se puede observar en la Figura 64, que el tratamiento 1 logró una media de 18 semillas germinadas, el tratamiento 2 obtuvo 18.5 semillas germinadas y el tratamiento 3, 19.5 semillas germinadas. En el control se obtuvo un promedio de 15.5 semillas germinadas. Se sembraron un total de 25 semillas de *Lactuca sativa* para cada tratamiento. La germinación ocurrió durante los 5 primeros días del experimento.



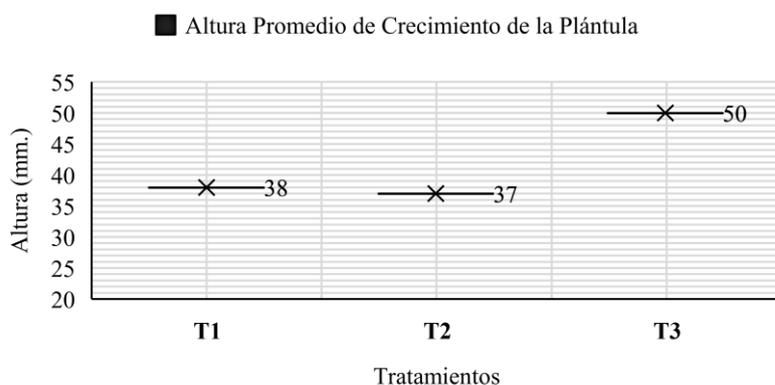
**Figura 64: Promedio de germinación en el compost final**

El porcentaje de germinación ha sido mayor en el tratamiento 3, con 93 por ciento; seguido por el tratamiento 2, con 88 por ciento y finalmente por el tratamiento 1, con 86 por ciento. La germinación fue regular y rápida para los tres tratamientos.

En Tinco y Vásquez (2016), se obtuvo resultados similares para el compostaje de rastrojos vegetales de cosecha de pallar y tres diferentes tipos de estiércol (vacuno, gallina, caballo) en pilas de un volumen de  $1\text{m}^3$ , con porcentaje de germinación de 90 por ciento para el compost de caballo, seguido del compost de gallina con 85 por ciento y menor a 80 por ciento para el compost vacuno. Se puede discutir aquí, que a pesar de haber utilizado en dicho estudio menor porcentaje de estiércol de caballo (640 Kg de rastrojos vegetales de cosecha de pallar y 360 Kg de estiércol de caballo) se obtuvo un adecuado índice de germinación, debido probablemente a la incorporación de 3 litros de microorganismos eficientes caseros, en dicho estudio.

#### 4.3.4. Porcentaje de Crecimiento

El porcentaje de crecimiento fue de 74.5 por ciento para el tratamiento 1, de 72.5 por ciento para el tratamiento 2, y de 98 por ciento para el tratamiento 3. En la Figura 65 se observa la altura promedio de crecimiento de las plántulas, que se alcanzó durante los 21 días de duración de la prueba. En el tratamiento 3 se alcanzaron mayores alturas en las plántulas, con un promedio de 50 mm; seguido por el tratamiento 1, con 38 mm y el tratamiento 2, con 37 mm.



**Figura 65: Promedio de altura de crecimiento en el compost final**

La emergencia de la plántula, así como el desarrollo de los brotes y hojas se produjo con normalidad en el tratamiento 2 y tratamiento 3, lo cual indica que el compost está maduro y bien fermentado. Se pudo analizar que, el tratamiento 3 presentó mayor contenido de fósforo, así como mejor relación de calcio/magnesio, lo cual pudo favorecer el mayor índice de crecimiento conseguido para este tratamiento, comparado con los tratamientos 1 y 2.

En el tratamiento 1, se apreció marchitez en dos plántulas, durante el día diez del experimento. De acuerdo con Al-Maskri *et. al.* (2010), la salinidad provoca estrés durante el crecimiento de la *Lactuca sativa*; lo cual explica el bajo índice de crecimiento en este tratamiento, ya que este obtuvo un mayor contenido de sales (2.5 mS/cm) con respecto a los otros.

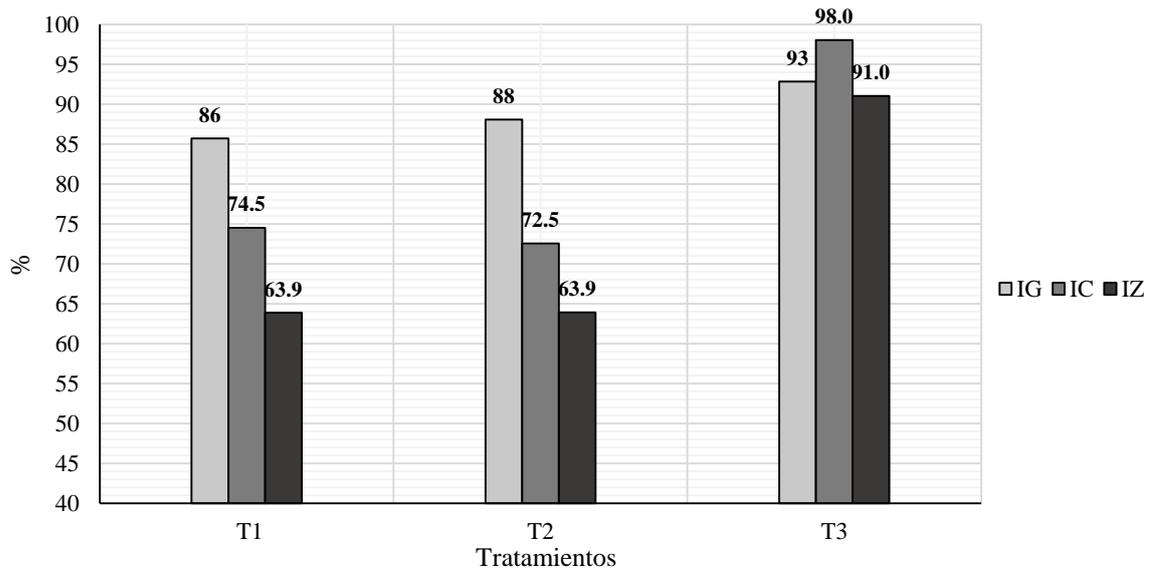
En el tratamiento 2, se pudo apreciar que la concentración de boro resultó ligeramente alta, como se observa en la Figura 63, lo que podría explicar también su menor índice de crecimiento, con respecto al tratamiento 1 y tratamiento 3.

Finalmente, pudo apreciarse una relación entre índice de crecimiento y la capacidad de retención de agua en los tratamientos. Se pudo notar que, cuanto mayor fue la capacidad de retención de agua en el compost final, disminuyó el índice de crecimiento. Esto confirma que dicho parámetro no debe exceder de 85 - 120 por ciento en el producto final (Ö NORM S 2200), ya que podría afectar el crecimiento de las plántulas.

#### **4.3.5. Índice de Germinación de Zucconi**

Finalmente, el índice de Zucconi relaciona los porcentajes de germinación y crecimiento, siendo un indicador, además de la madurez y estabilidad del compost, del contenido de sustancias fitotóxicas presentes en él (por ejemplo, metales pesados, herbicidas persistentes, exceso de sales, exceso de nutrientes, etc.)

En la Figura 66 se presenta los resultados del índice de Zucconi, siendo estos de, 63.9 por ciento para el tratamiento 1, 63.9 por ciento para el tratamiento 2 y de 91 por ciento para el tratamiento 3. Para los tratamientos 1 y 2 se obtuvo una presencia moderada de sustancias fitotóxicas; mientras que, para el tratamiento 3, no se presenta sustancias fitotóxicas o son mínimas. Puede deducirse que el tratamiento 3 ha logrado una mejor estabilización del material y calidad en el producto final.



**Figura 66. Índices de Germinación, Crecimiento y Zucconi para T1, T2 y T3**

T1: bosta de caballo 50%, rastrojos vegetales 50%

T2: bosta de caballo 50%, rastrojos vegetales 40%, residuos de cocina 10%

T3: bosta de caballo 50%, rastrojos vegetales 30%, residuos de cocina 20%

#### 4.4. Comparación con la normativa internacional vigente

En la Tabla 26 se comparan los resultados de los parámetros físicos y químicos obtenidos en el producto final, con los establecidos en la normativa internacional, así como en otros autores, tales como Moreno y Moral (2011) y Mirabelli (2008).

De los principales aspectos a discutir en relación a la Tabla 26, tenemos que la conductividad eléctrica si bien cumple los estándares de la norma austriaca para los tratamientos 2 y 3, resultó ligeramente alta en el tratamiento 1. Se ha podido observar que durante la germinación y crecimiento de plántulas es recomendable que esta sea muy baja, incluso  $\leq 1.5$  mS/cm, por ello se recomienda disminuir la concentración de sales en los insumos del compostaje, así mismo en el agua de riego utilizada.

Podemos ver también que la capacidad de retención de agua mejora con el mayor contenido de residuos de cocina en los tratamientos, siendo el tratamiento 3 el que obtuvo mejor capacidad de retención de agua en el compost final, cumpliendo con el rango recomendado de 85 - 120 por ciento por la norma austriaca. Se puede ver en la Tabla 26 que el incumplimiento de dicho parámetro en los tratamientos 1 y 2 guarda relación con un menor

resultado en el índice de germinación de Zucchini para estos tratamientos, en comparación al tratamiento 3, cuyo índice de germinación de Zucchini resultó de 91 por ciento.

En términos generales, el tratamiento 1 resultó con un mejor contenido de nutrientes esenciales, ya que todos sus resultados cumplen los valores recomendados por Mirabelli (2008).

El fósforo resultó mayor en el tratamiento 3, además, la relación calcio magnesio resultó también mejor en este tratamiento, al igual que su capacidad de retención de agua, y su conductividad eléctrica.

Finalmente, en cuanto al tratamiento 2, el boro resultó ligeramente alto y su relación de calcio magnesio ligeramente por debajo de lo recomendado, lo que podría explicar un menor índice de germinación de Zucchini. Esto último se atribuye a la composición de dicho tratamiento (50% de bosta de caballo, 40% de rastrojos vegetales y 10% de residuos de cocina), la cual presenta un contenido insuficiente de residuos de cocina, que atribuyen una mejor capacidad de retención de agua y balance de nutrientes en el producto final.

**Tabla 26: Resultados en el compost final y cumplimiento de los valores recomendados**

Parámetros	Tratamientos			Valor Recomendado		Cumplimiento		
	T1	T2	T3	Norma Mexicana NMX-AA-180-SCFI- 2018	Otras Fuentes	T1	T2	T3
<b>pH</b>	7	7.07	7.19	6.7-8.5	6.5-8.5 <sup>(1)</sup>	Cumple	Cumple	Cumple
<b>Conductividad Eléctrica (mS/cm)</b>	2.5	1.9	2.0	0.5-4	<2 <sup>(3)</sup>	NC	Cumple	Cumple
<b>Humedad Relativa (%)</b>	48.25	41.57	42.08	25-45	35-45 <sup>(1)</sup>	Cumple	Cumple	Cumple
<b>Densidad Aparente (kg/m<sup>3</sup>)</b>	503	483	534		400-700 <sup>(1)</sup>	Cumple	Cumple	Cumple
<b>Capacidad de Retención de Agua (%)</b>	191	146	112		85-120 <sup>(3)</sup>	NC	NC	Cumple
<b>Carbono Orgánico Total(%)</b>	25.7	24.3	24.5	≥ 10		Cumple	Cumple	Cumple
<b>N (%)</b>	1.58	1.67	1.58	1 – 3		Cumple	Cumple	Cumple
<b>Relación C/N</b>	16.3	14.5	15.5	15-25	<20 <sup>(1)</sup>	Cumple	Cumple	Cumple
<b>P (%)</b>	0.91	1.22	1.43		0.5-1.5 <sup>(2)</sup>	Cumple	Cumple	Cumple
<b>K (%)</b>	1.32	1.04	1.03		0.5-1.5 <sup>(2)</sup>	Cumple	Cumple	Cumple
<b>Ca (%)</b>	2.63	2.61	3.64		1.5-3 <sup>(2)</sup>	Cumple	Cumple	NC
<b>Mg (%)</b>	1.37	1.41	1.13		0.6-1.2 <sup>(2)</sup>	NC	NC	Cumple
<b>Relación Ca/Mg</b>	1.92	1.85	3.22		5-2/1 <sup>(2)</sup>	Cumple	NC	Cumple
<b>Fe (ppm)</b>	10395	13189	11405		2000-16000 <sup>(2)</sup>	Cumple	Cumple	Cumple
<b>Cu (ppm)</b>	46	40	37		40-630 <sup>(2)</sup>	Cumple	Cumple	NC
<b>Zn (ppm)</b>	199	160	162		200-1650 <sup>(2)</sup>	Cumple	NC	NC
<b>Mn (ppm)</b>	480	475	425		400-600 <sup>(2)</sup>	Cumple	Cumple	Cumple
<b>B (ppm)</b>	65	74	59		5-70 <sup>(2)</sup>	Cumple	NC	Cumple
<b>IG(%)</b>	64	64	91	>80		NC	NC	Cumple

<sup>(1)</sup> Moreno y Moral (2011); <sup>(2)</sup> Mirabelli, (2008); <sup>(3)</sup> Ö-NORM-S-2200 (1993); NC: No Cumple

## V. CONCLUSIONES

- De los tres tratamientos evaluados, se encontró que el tratamiento 3, con mayor porcentaje de residuos de cocina tratados (20%), resultó con una mayor calidad agronómica, ya que presentó una mejor germinación y crecimiento de semillas de *Lactuca sativa* en el compost final, con un Índice de Germinación de Zucconi igual a 91 por ciento.
- La caracterización de los insumos ha sido importante para determinar qué material aporta mayor conductividad eléctrica en el compost final; así como para evaluar las condiciones iniciales en la mezcla a compostar.
- Los residuos de cocina aplicados en 20 por ciento a la pila de compost mejoraron el proceso de compostaje, esto se pudo notar en una menor pérdida de materia orgánica en el Tratamiento 3, así como en un adecuado valor de capacidad de retención de agua.
- Los rastrojos vegetales aplicados en 50 por ciento a la pila de compost, confieren un adecuado balance de macronutrientes y micronutrientes en el Tratamiento 1; de acuerdo con los valores recomendados para compost con fines agronómicos según Mirabelli (2008).

## **VI. RECOMENDACIONES**

- Mantener el porcentaje de residuos de cocina en 20 por ciento, aumentando a la vez el porcentaje de rastrojos vegetales y disminuyendo el de bosta de caballo. Se sugiere la siguiente proporción: Bosta de Caballo (30%), Rastrojos Vegetales (50%), Residuos de Cocina (20%). Con el fin de obtener un adecuado contenido de nutrientes esenciales y un adecuado índice de germinación.
- Reducir la salinidad de los rastrojos vegetales, mediante lavados, y utilizar fuentes de agua con bajo contenido de sales.
- Continuar realizando los análisis de los resultados logrados y monitoreos del proceso. Se recomienda evaluar los metales pesados y agentes patógenos, a fin de mejorar la calidad en el producto final.
- Tener en cuenta las necesidades nutricionales y requerimiento de agua de los cultivos, al momento de hacer la aplicación del compost al suelo, con el fin evitar problemas por fitotoxicidad.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

- Al-Maskri, A., Al Kharusi, L. y Al-Miqbali, H. (2010). Effects of Salinity Stress on Growth of Lettuce (*Lactuca sativa*) under Closed-recycle Nutrient Film Technique. *International Journal of Agriculture and Biology*, 1(12), 377-380
- Ansorena, J. (2016). *El Compost de Biorresiduos. Normativa, calidad y aplicaciones*. Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Aramayo, A.J. (2004). *Diagnóstico y alternativas de manejo de los residuos sólidos de cafeterías y comedores del campus UNALM* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Association of Official Agricultural Chemists (1990). *Official Methods of Analysis*. Volume I. 15th Edition. ISBN: 0-935584-42-0
- Baquero, M. (2017). *Residuos Alimentarios: Análisis y propuesta de metodología de cuantificación* (tesis de maestría). Universidad de Cantabria, España.
- Binner, E. (2017). 13° Curso Internacional de Compostaje “Fundamentos, Operación y Diseño de Planta de Compostaje”. Calidad y monitoreo del compost. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Binner, E., Méndez L. y Miyashiro V. (2016). *Gestión de residuos sólidos municipales en el Perú y en Austria: mitigación de impactos ambientales en el clima y el agua*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Bohórquez, A.; Puentes, Y.J. & Menjivar, J.C. (2014). Evaluación de la calidad del compost producido a partir de subproductos agroindustriales de caña de azúcar. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 15(1), 73-81.

- Bueno, M. (2007). *Cómo hacer un buen compost. Manual para horticultores ecológicos*. Navarra, España: La Fertilidad de la Tierra Ediciones.
- Bueno, P.; Díaz, M. & Cabrera, F. (2008). Factores que afectan el proceso de compostaje. En J. Moreno y R. Moral. (Ed.), *Compostaje* (93-110). Madrid, España: Mundiprensa.
- Cabrera, V.C. y Rossi, M.G. (2016). *Propuesta para la elaboración de compost a partir de los residuos vegetales provenientes del mantenimiento de las áreas verdes públicas del distrito de Miraflores* (tesis de pregrado) Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Cajahuanca, S.A. (2016). *Optimización del manejo de residuos orgánicos por medio de la utilización de microorganismos eficientes en el proceso de compostaje en la central hidroeléctrica Chaglla* (tesis de pregrado). Universidad de Huánuco, Perú.
- Castro, G., Daza, M.C. y Marmolejo, L.F. (2016). Evaluación de la adecuación de humedad en el compostaje de biorresiduos de origen municipal en la Planta de Manejo de Residuos Sólidos del Municipio de Versalles, Valle del Cauca. *Gestión y Ambiente*, 19(1), 179-191
- Casavilca, G.M. (2016). *Propuesta de un programa de eco-eficiencia para la reducción de residuos orgánicos en el comedor de la UNALM* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Carrasco, N. (2009). *Evaluación de tres diferentes tipos de sustratos (bagacillo, aserrín e ichu picado) en la producción de EM – Compost* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Centro Modelo de Tratamiento de Residuos CEMTRAR (2018). *Guía Práctica Evaluación de la Calidad de Compost. Materias primas, Proceso y Producto Final*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina.

- Decreto Legislativo N° 1278. Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos. Sistema Peruano de Información Jurídica, Lima, Perú, 24 de abril de 2017.
- Decreto Legislativo N° 1501, que modifica el decreto legislativo N° 1278. Diario Oficial El Peruano. Lima, Perú, 11 de mayo de 2020.
- Díaz, O.A. (2017). *Aplicación de aditivos minerales para la reducción de pérdidas de nitrógeno por volatilización durante el compostaje de pulpa de café* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- FAO Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Desarrollo. (2013). *Manual de Compostaje del Agricultor. Experiencias de América Latina*. Santiago, Chile, 112p. doi: E-ISBN 978-92-5-307845-5.
- Guerrero, M.A. (2005). *Evaluación del contenido de nutrientes y contaminantes en suelos y suelos adicionados de biosólidos y compost*. Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Golueke, C.G., Diaz, L.F. (1987). Composting and the Limiting Factors Principle. *Biocycle*, 28 (4), 22-25.
- Gootas, H.B. (1956). *Composting. Sanitary disposal and reclamation of organic wastes*. Ginebra, Suiza: World Health Organization.
- Haug, R.T. (1993). *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers.
- Instituto Colombiano Agropecuario (1972). *Guía para el Control de Plagas*. ICA.129p DB-ICA.
- Illera-Vives, M., López-Fabal, A. y López-Mosquera, M.E. (2011). Evaluación de la fitotoxicidad de un sustrato a base de compost de algas y restos de pescado. *Actas de Horticultura*, 59, 28-31.

- Jaramillo G. y Zapata, L. (2008). *Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Colombia* (tesis de pregrado). Universidad de Antioquía, Colombia.
- Jones P. y Martin M. (2003). A review of the literature on the occurrence and survival of pathogens of animals and humans in green compost. *Health IfA Oxon, UK2003*. p. 33.
- Jorge, P.A., Ortiz, L.F., Calle, J.L., Téllez, L.A., Cesare, M.F. y Visitación, L. (2018). Transformación del Nitrógeno durante el Compostaje de Bosta de Caballo. *Revista Producción + Limpia*, 13 (2), 77-88. doi: 10.22507/pml.v13n2a9
- Labrador, J., Guiberteau, A., López, L. y Reyes, J.L. (1996). *La materia orgánica en los sistemas agrícolas. Manejo y Utilización*. Recuperado en <http://www.mapa.gob.es>
- Laich, F. (octubre de 2011). El papel de los microorganismos en el proceso de Compostaje. En Instituto Canario de Investigaciones Agrarias ICIA. *Experiencias de fertilización orgánica en platanera*. Jornada Técnica: Calidad y Fertilidad del Suelo del Proyecto Biomusa, Canarias, España.
- Ley N°28611. Ley General del Ambiente. Sistema Peruano de Información Jurídica, Lima, Perú, 13 de octubre de 2005.
- Mendo, T.C. (2004). *Aprovechamiento del alga Ulva sp. en la elaboración de compost como una estrategia de gestión ambiental en la bahía de Paracas*. (tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Millar, C.E., L.M. Turk y H.D. Forth. (1975). *Fundamentos de la ciencia del suelo*. México: Continental.
- Ministerio del Ambiente MINAM (2016). *Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos 2016-2024*. Recuperado en <http://sinia.minam.gob.pe>.
- Mirabelli, E. (2008). *El Compostaje Proyectoado a la Lombricultura*. Buenos Aires, Argentina: Editorial Buenos Aires.

- Moreno, J. y Moral, R. (2011). *Compostaje*. Madrid, España: Mundiprensa.
- Navarro, G. y Navarro, S. (2013). *Química Agrícola. Química del suelo y de los nutrientes esenciales para las plantas*. Madrid, España: Mundiprensa.
- NCh 2880. Compost – Clasificación y Requisitos. Santiago de Chile: Instituto Nacional de Normalización, 22 de febrero de 2005.
- NMX AA 180 SCFI. Que establece los métodos y procedimientos para el tratamiento aerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como la información comercial y de sus parámetros de calidad de los productos finales. Ciudad de México: Dirección General de Normas, 26 de setiembre de 2018.
- NTC 5167. Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 23 de marzo de 2011.
- Ocampo, P., Robles, D. y Wu, A. (2002). *El compostaje como método de biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Ö NORM S 2200. Quality requirements of biowaste-compost. Marking of conformity. Austrian Standards Institute, 1993.
- Padilla, D.A. (2010). Evaluación de técnicas para acelerar el compostaje de rastrojo vegetal y estiércol de vacuno en el Centro Modelo de Tratamiento de Residuos de la Universidad Nacional Agraria La Molina (tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Palmero, R. (2010). *Elaboración de compost con restos vegetales por el sistema tradicional en pilas o montones*. Recuperado en <http://www.agrocabildo.org>.

- Pérez, A, Céspedes, C y Núñez, P. (2008). Caracterización física-química y biológica de enmiendas orgánicas aplicadas en la producción de cultivos en República Dominicana. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 8(4), 10-29.
- Prieto, C. (2003). *Basuras: Manejo y Transformación Práctico Económico*. Bogotá, Colombia: ECOE Ediciones.
- Rabbani, K.R., Jindal, R., Kubota, H. y Obeng, L. (1983). *Environmental sanitation reviews: composting of domestic refuse*. Environmental Sanitation Information Center. Asian Institute of Technology. Bangkok, Thailand, N° 10/11, 107 p.
- Red Española de Compostaje (2015). Ingeniería y aspectos técnicos de la estabilización aeróbica II.3. En J. Moreno, R. Moral, J.L. García-Morales, J.A. Pascual y M.P. Bernal (Ed.), *De Residuo a Recurso. El camino hacia la sostenibilidad*. Madrid, España: Mundiprensa.
- Red Española de Compostaje (2014). Residuos Urbanos I.4. En J. Moreno, R. Moral, J.L. García-Morales, J.A. Pascual y M.P. Bernal (Ed.) *De Residuo a Recurso. El camino hacia la sostenibilidad*. Madrid, España: Mundiprensa.
- Rodríguez, A.J., Robles, C.A., Ruiz, R.A., Lopez, E., Sedeño, J.E. y Rodríguez, A. (2014). Índices de germinación y elongación radical de *Lactuca sativa* en el biomonitoreo de la calidad del agua del Río Chalma. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(3), 307-316.
- Saez, A. (2000). *Optimización de los Métodos para Mejorar la Calidad del Compost de la Fracción Orgánica* (tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Sanchez-Monedero, M.A., Roig, A., Paredes, C. y Bernal, M.P. (2001). Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Bioresource Technology*, 78(3), 301-308.

- Shulze, K.L. (1962). Continuous Thermophilic Composting. *Applied. Microbiology*, 10, 108-122.
- Stoffella, P.J. y Kahn, B.A. (Ed.) (2004). Utilización de compost en los sistemas de cultivo hortícola. Madrid, España: Mundiprensa.
- Suler, D.J. y Finstein, S. (1977). Effect of temperature, aeration, and moisture on CO<sub>2</sub> formation in bench-scale, continuously thermophilic composting of solid waste. *Applied and Environmental Microbiology*, 33(2), 345-350.
- Téllez, L.A., Ortiz, L.F., Calle, J.L., Jorge, P.A., Cesaré, M.F. y Visitación, L. (2019). Estabilización de la Bosta de Caballo mediante un Proceso Aeróbico similar al Compostaje. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 85 (1).
- Tinco, J.C. y Vásquez, L.M. (2016). Compostaje con residuos de cosecha de pallar (*Phaseolus lunatus*) usando tres tipos de estiércol y microorganismos caseros efectivos (tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Zubillaga, M.S.; Branzini, A. & Lavado, R.S. (2008). Problemas de fitotoxicidad en compost. *Revista Pilquen. Sección Agronomía Año X N°9*.
- Zucconi F.; Pera, A.; Forte, M.; De Bertoli, M. (1981). Evaluating toxicity in immature compost. *Biocycle*, 22, p. 54-57.

## **VIII. ANEXOS**

## 8.1. Anexo 1: Informe de Análisis de Materia Orgánica



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA  
FACULTAD DE AGRONOMIA  
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



### INFORME DE ANALISIS DE MATERIA ORGANICA

SOLICITANTE : GABRIELA ARRIETA VELA  
 PROCEDENCIA : LIMA/ LIMA/ LA MOLINA  
 MUESTRA DE : COMPOST  
 REFERENCIA : H.R. 67494  
 FECHA : 19/03/19

Nº LAB	CLAVES	pH	C.E. dS/m	M.O. %	N %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	K <sub>2</sub> O %
226	T1	7.00	11.40	44.40	1.58	0.91	1.32
227	T2	7.07	8.70	41.82	1.67	1.22	1.04
228	T3	7.19	7.35	42.36	1.58	1.43	1.03

Nº LAB	CLAVES	CaO %	MgO %	Hd %	Na %	C %
226	T1	2.63	1.37	48.25	0.73	25.76
227	T2	2.61	1.41	41.57	0.49	24.30
228	T3	3.64	1.13	42.08	0.40	24.51

Nº LAB	CLAVES	Fe ppm	Cu ppm	Zn ppm	Mn ppm	B ppm
226	T1	10395	46	199	480	65
227	T2	13189	40	160	475	74
228	T3	11405	37	162	425	59


  
 Dr. Sady García Bendejú  
 Jefe de Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM  
 Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622  
 Celular: 946-505-254  
 e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

## 8.2. Anexo 2: Metodología de Análisis de Materia Orgánica



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA  
FACULTAD DE AGRONOMIA  
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



### Metodología de materia orgánica

**Humedad:** Diferencia de peso, gravimetría.

**Nitrógeno:** Método de Kjeldahl.

**Fósforo:** Método del azul de molibdeno. Método alternativo: Amarillo del Vanadato Molibdato.

**Potasio:** Espectrofotometría de absorción atómica.

**Calcio:** Espectrofotometría de absorción atómica.

**Magnesio:** Espectrofotometría de absorción atómica.

**Sodio:** Espectrofotometría de absorción atómica.

**Hierro:** Espectrofotometría de absorción atómica.

**Cobre:** Espectrofotometría de absorción atómica.

**Zinc:** Espectrofotometría de absorción atómica.

**Manganeso:** Espectrofotometría de absorción atómica.

**Boro:** Método colorimétrico empleando la curcumina disuelta en ácido acético glacial.

**pH:** Potenciometría. Determinación en pasta saturada.

**Conductividad eléctrica:** Medición indirecta del contenido de sales solubles en el extracto acuoso obtenido de la pasta saturada.

**Materia orgánica:** Determinación del carbono orgánico por el método de Walkley y Black o del Dicromato de potasio, mediante el cual se estima la materia orgánica así: % Corg. X 1.724 = % Materia orgánica.

**Carbono orgánico:** Método de Walkley y Black o del Dicromato de Potasio, oxidación del carbono orgánico con dicromato de potasio.

  
Dr. Sady García Bendezu  
Jefe de Laboratorio

---

Av. La Molina s/n Campus UNALM  
Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622  
Celular: 946-505-254  
e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

### 8.3. Anexo 3: Registro de mediciones de parámetros durante el compostaje

#### Evaluación de la Temperatura durante el Proceso de Compostaje

Días	Temperatura (°C)		
	T1	T2	T3
0	23	23	23
1	37	35	39
2	63	66	68
3	72	70	70
4	73	71	72
5	72	70	73
6	71	69	72
7	70	71	72
8	68	74	71
9	67	69	70
10	67	66	68
11	65	66	68
12	65	63	64
13	65	63	64
14	64	57	63
15	55	54	55
16	57	59	58
17	58	59	59
18	57	59	59
19	57	58	59
20	57	57	58
21	56	58	58
22	50	52	48
23	56	56	56
24	58	58	57
25	58	58	57
26	57	57	57
27	57	56	56
28	56	55	56
29	55	47	46
30	46	52	54
31	52	52	55
32	47	52	54
33	48	52	54
34	48	51	54
35	50	51	49
36	40	42	43
37	45	47	48
38	49	49	49
39	50	49	49
40	50	49	49
41	50	49	49
42	50	49	49
43	40	42	49
44	44	45	49
45	47	48	48
46	50	49	48
47	50	49	48

Continuación...

Días	Temperatura (°C)		
	T1	T2	T3
48	50	50	50
49	50	49	49
50	38	37	44
51	43	46	48
52	48	48	49
53	47	49	49
54	48	50	49
55	49	49	48
56	49	46	48
57	43	49	43
58	47	51	47
59	50	50	47
60	52	51	47
61	51	50	47
62	50	50	47
63	50	50	47
64	39	49	35
65	44	46	43
66	46	49	44
67	47	49	45
68	46	49	46
69	46	49	44
70	46	49	44
71	43	47	37
72	44	41	40
73	47	46	41
74	48	48	41
75	48	48	42
76	48	49	40
77	48	49	38
78	37	48	37
79	40	39	36
80	43	43	35

**Evaluación del pH durante el Proceso de Compostaje**

Semana	pH		
	T1	T2	T3
0	6.7	6.6	6.6
1	7.6	7.6	7.8
2	7.8	7.9	8.2
3	7.7	8.0	8.1
4	8.0	8.2	8.2
5	7.8	8.0	8.2
6	8.0	7.9	8.2
7	7.8	8.1	8.2
8	7.9	7.5	8.3
9	7.9	7.9	8.3
10	7.8	7.7	8.1
11	7.7	7.6	8.0
12	7.5	7.5	7.7
13	7.3	7.5	7.6

### Evaluación de la Conductividad Eléctrica durante el Proceso de Compostaje

Semana	Conductividad Eléctrica (mS/cm)		
	T1	T2	T3
0	6.2	6.1	6.1
1	6.2	5.2	4.2
2	4.8	4.0	2.2
3	5.6	3.5	2.0
4	1.9	2.4	3.1
5	2.6	2.4	2.0
6	2.5	1.4	1.1
7	1.7	2.0	2.3
8	1.9	2.4	1.8
9	2.0	1.5	1.3
10	1.8	1.7	1.5
11	2.0	1.7	1.7
12	2.2	1.8	1.8
13	2.5	1.9	2.0

### Evaluación de la Humedad Relativa durante el Proceso de Compostaje

Semana	Humedad Relativa (%)		
	T1	T2	T3
0	15	27	36
1	47	43	49
2	60	62	66
3	61	60	57
4	54	61	58
5	62	63	62
6	66	65	66
7	65	65	66
8	61	50	59
9	56	58	60
10	58	63	61
11	56	60	59
12	54	58	57
13	50	54	56

### Evaluación de la Densidad Aparente durante el Proceso de Compostaje

Semana	Densidad Aparente (Kg./m <sup>3</sup> )		
	T1	T2	T3
1	225	278	331
3	384	326	366
5	479	557	527
7	455	561	498
9	492	532	547
11	495	479	530
13	503	483	534

### Evaluación de la Capacidad de Retención de Agua durante el Proceso de Compostaje

Semana	Capacidad de Retención de Agua (%)		
	T1	T2	T3
1	42	38	38
3	53	40	39
5	39	147	150
7	117	138	131
9	131	151	174
11	215	161	175
13	191	146	112

### Evaluación del Carbono Orgánico Total durante el Proceso de Compostaje

Semana	Carbono Orgánico Total (%)		
	T1	T2	T3
1	38	36	35
2	37	33	34
3	37	33	34
4	35	33	32
5	35	32	32
6	32	34	33
7	34	31	28
8	34	31	29
9	31	29	28
10	29	26	27
11	28	26	27
12	26	25	26
13	26	24	25

### Evaluación del Nitrógeno Total durante el Proceso de Compostaje

Semana	Nitrógeno Total (%)		
	T1	T2	T3
1	1.40	1.44	1.50
2	1.59	1.37	1.48
3	1.81	1.81	1.31
4	1.85	1.49	1.43
5	1.24	1.39	1.41
6	1.57	1.56	1.45
7	1.63	1.57	1.32
8	1.41	1.34	1.45
9	1.57	1.37	1.43
10	1.77	1.52	1.48
11	1.58	1.50	1.50
12	1.72	1.45	1.43
13	1.58	1.67	1.58

### Evaluación de la Relación Carbono Nitrógeno durante el Proceso de Compostaje

Semana	Relación C:N		
	T1	T2	T3
1	26	25	27
2	23	24	23
3	20	18	26
4	19	22	22
5	28	23	23
6	20	22	22
7	21	20	21
8	24	23	20
9	20	21	19
10	16	33	18
11	18	17	18
12	15	17	18
13	16	15	16

#### 8.4. Anexo 4: Registro Fotográfico



**Construcción de las pilas de compost**



**Incorporación de rastrojos a la pila**



**Segregación de residuos de cocina**



**Pesaje de los materiales**



**Transporte de materiales hacia la pila**



**Medición y control de la temperatura**



**Ubicación de las pilas**



**Muestras para la medición de humedad relativa**



**Análisis de la capacidad de retención de agua**



**Tamizado del compost**



**Aparición de hongo tinta durante la etapa mesofila 2**



**Caracterización de rastrojos vegetales**



**Caracterización de residuos de cocina**



**Prueba de germinación de semillas**



**Prueba de crecimiento de semillas**