



S.E.P.

S.E.S.

Tec.N.M

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

“EVALUACIÓN DE DIFERENTES TASAS DE AIREACIÓN Y DE AGENTE DE CARGA EN EL PROCESO DE DEGRADACIÓN DE BIOSÓLIDOS Y RESIDUOS SOLIDOS ORGÁNICOS”

TESIS

**PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA AMBIENTAL**

**PRESENTA:
JESÚS GUADALUPE MENDOZA DELGADO**

**No. CONTROL:
0828M0157**

**DIRECTOR:
DR. ISAÍAS DE LA ROSA GÓMEZ**


**CODIRECTOR:
Dra. MARIA DEL CONSUELO HERNÁNDEZ BERRIEL**

METEPEC, ESTADO DE MÉXICO, DICIEMBRE DE 2018


**DR. JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PRESENTE.**

Por este medio comunicamos a usted que la Comisión Revisora designada para analizar la tesis denominada "EVALUACIÓN DE DIFERENTES TASAS DE AIREACIÓN Y DE AGENTE DE CARGA EN EL PROCESO DE DEGRADACIÓN DE BIOSÓLIDOS Y RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS", que como parte de los requisitos para obtener el grado académico de Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental presenta el C. Jesús Guadalupe Mendoza Delgado, con número de control 0828M0157 para sustentar el acto de Recepción Profesional, ha dictaminado que dicho trabajo reúne las características de contenido y calidad necesario para proceder a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE



DR. ISAÍAS DE LA ROSA GÓMEZ
DIRECTOR DE TESIS



DRA. MARÍA DEL CONSUELO HERNÁNDEZ BERRIEL
CO-DIRECTORA DE TESIS



DRA. MARÍA DEL CARMEN CARREÑO DE LEÓN
REVISORA



DRA. MARÍA DEL CONSUELO MAÑÓN SALAS
REVISORA

JLGR/magj



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA
Av. Tecnológico División de Estudios de Posgrado e Investigación, C.P. 52149,
Metepec, Estado de México. Tels. Dirección (01722) 208 7205, Subd. Académica 208 7207,
Subd. de Planeación 208 7206, Subd. Administrativa 208 7208, Conmut. 208 72 00
e-mail: info@toluca.tecnm.mx, www.toluca.tecnm.mx



Meteppec, Edo. de México, 29/noviembre/2018

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN

DEPI-395-1266/2018.

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS

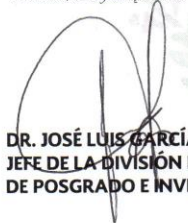
**C. JESÚS GUADALUPE MENDOZA DELGADO
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA AMBIENTAL
P R E S E N T E.**

De acuerdo con el Reglamento de Titulación del Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica de la Subsecretaría de Educación Superior de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó con respecto a su Trabajo de Tesis titulado **"EVALUACIÓN DE DIFERENTES TASAS DE AIREACIÓN Y DE AGENTE DE CARGA EN EL PROCESO DE DEGRADACIÓN DE BIOSÓLIDOS Y RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS"**, la División de Estudios de Posgrado e Investigación concede autorización para que proceda a la impresión del mismo.

Sin más por el momento, quedo de usted.

ATENTAMENTE

"Educación, Integridad y Ciencia"



**DR. JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

JLGR/magj



Av. Tecnológico s/n, Col. Agrícola Bellavista, C.P. 52149, Metepec, Estado de México.
Tels. Dirección (01722) 208 7205, Subd. Académica 208 7207,
Subd. de Planeación 208 7206, Subd. Administrativa 208 7208, Conmutador: 208 72 00
e-mail: info@toluca.tecnm.mx, www.toluca.tecnm.mx



AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT por el apoyo con la beca de manutención para ser alumno de tiempo completo.

Al COMECYT por el apoyo con la beca para impresión de esta tesis.

Al INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA por permitirme formar como un gran profesionalista dentro de sus aulas.

Al Dr. Isaías de la Rosa Gómez con especial agradecimiento, por ser una persona ejemplar dentro y fuera de la Institución, por todas las pláticas amenas, consejos y lecciones de vida, por ser un ejemplo para realizar con mucho entusiasmo las tareas que a diario requirió este proyecto, por el apoyo al ingreso del posgrado y finalmente por permitirme ser parte de su equipo de trabajo. Espero algún día lograr ser inmortal como usted.

A la Dra. María del Consuelo Hernández Berriel por las lecciones enseñadas en el camino de mi formación como investigador, sin duda me han ayudado a crecer mucho desde la licenciatura al día de hoy, así como por el apoyo con su laboratorio, materiales y equipo para llevar a cabo esta investigación.

A la Dra. María del Carmen Carreño de León por el curso impartido en posgrado, así como a la contribución con sus comentarios para mejorar este proyecto y el apoyo para continuar con mis estudios.

A la Dra. María del Consuelo Mañón Salas por todo el empeño y dedicación que a bien tuvo de sus comentarios y observaciones para mejorar la presente investigación, gracias por todo el esfuerzo, estoy seguro de que continuara siendo una excelente investigadora.

A la Dra. Beatriz Juárez Robles por el seguimiento y apoyo en las pruebas de campo, así como a quienes colaboraron en el desarrollo de este proyecto, Agustín, Giovani, Alejandro y Yael, y alumnos del PAI.

Al personal del LIIA por el apoyo en capacitación y análisis para concluir este trabajo.

DEDICATORIAS

“NO NECESITAMOS MITOS, NECESITAMOS EJEMPLOS QUE SEGUIR, EJEMPLOS DE CORAJE, DETERMINACION Y ESPERANZA. **NECESITAMOS CREER QUE ES POSIBLE GANAR.**” **AYRTON SENNA**

“CUANDO EL DINERO SE CONVIERTE EN TU PRINCIPAL MOTIVACION INMEDIATAMENTE TE VUELVES MENOS QUE AQUEL QUE ESTA ESTIMULADO POR LA PASION Y EL BIEN” **SEBASTIAN VETTEL**

“SI NO LOGRAS LA FELICIDAD CON POCO, NO LA VAS A LOGRAR CON MUCHO”, “NO COMPRAS CON PLATA, SI NO CON EL TIEMPO DE TU VIDA QUE GASTAS PARA CONSEGUIR ESA PLATA” **“PEPE” MUJICA**

A mi MADRE porque sé que aun guías mis pasos, me sigues dando consejos para ser una persona mejor, y se que donde te encuentras aun te sientes orgullosa de todos tus hijos, “La energía no se crea ni se destruye, solo se transforma”.

A mi PADRE por apoyarme en esta etapa difícil de mi vida, donde aprendí a ser mejor y a valorar muchas cosas, por que a pesar de momentos difíciles siempre me has dado palabras de aliento, es un orgullo aun tenerte junto a nosotros, te queremos mucho.

A mis ABUELOS que se esforzaron para llevarnos a la escuela desde niños, y nos dieron mucho tiempo de su vida con cariño y alegrías.

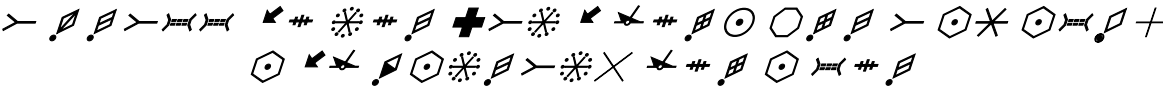
A mis HERMANOS José Luis y Adela, quienes me han apoyado en momentos difíciles y han estado cerca para darme palabras de aliento y salir adelante

A mis SOBRINOS Jorge, Toño, Iker, Sayumi, Alexei y Sandra, para que sea un ejemplo en su vida como estudiantes, se crean y sientas capaces de ganar.

A mis AMIGOS en el laboratorio Elvira, Isis y Nadia, quienes me han apoyado para desarrollar este trabajo. Con especial dedicación a Diego y Aiza, por que fue mas amena la estancia en el laboratorio con su compañía y los fines de semana de trabajo, me guardo unas amistades inigualables, gracias por su amistad.

A mis AMIGOS que he conocido a lo largo de esta vida y siempre me han motivado a seguir adelante y a ser mejor persona, que también me han dado palabras de aliento en momentos difíciles y me han visto crecer a lo largo de estos años, con mucho aprecio por creer en mi y salvarme en momentos difíciles, muchas gracias.

A mi FAMILIA tanto la de sangre como la de amistad, por los ratos alegres de convivencia, apoyo y momentos compartidos, con mucho cariño a ellos que me han admirado como un buen profesionalista y no los he defraudado, son parte de mi inspiración para seguir creciendo y ser mejor, porque estamos aquí para ser felices y apoyarnos, no para juzgarnos, muchas gracias.



RESUMEN

Se evaluó la degradación de biosólidos de una planta tratadora de aguas residuales (PTAR) de origen municipal y de residuos sólidos orgánicos (RSO). Considerando diferentes tasas de arcilla y frecuencia de aireación con el fin de lograr una composta que sirva como mejorador de suelos, obteniendo una relación Carbono/Nitrógeno (C/N) entre 8 a 14. Se prepararon cinco pilas estáticas de 100 kg por duplicado, usando 8% de lama y las siguientes proporciones de biosólido y arcilla respectivamente 62 y 30% (P1), 67 y 25% (P2), 72 y 20% (P3), 77 y 15% (P4) y 82 y 10% (P5), la frecuencia de aireación utilizada fue cada 48 horas. De las tasas evaluadas, la mejor prueba fue la P4. Considerando esta prueba, se prepararon tres pilas (P6, P7 y P8) de 100 kg cada una con 77% de biosólido, 15% de arcilla y 8% de lama, utilizando una frecuencia de aireación de 24, 48 y 72 horas. En una segunda parte se llevó a cabo la degradación de biosólidos y residuos sólidos orgánicos (RSO), se prepararon tres pilas estáticas de 100 kg por duplicado, usando como variables fijas: 8% de lama, 15 % arcilla y las siguientes proporciones de biosólido y RSO respectivamente: 40 y 37% (P9), 35 y 42% (P10) y 30 y 47%; la mejor prueba en cuanto a parámetros de calidad fue la P10 por obtener la mejor relación C/N. En una tercera etapa, se evaluaron dos iniciadores; urea y Bocashi. Se prepararon cuatro pilas estáticas de 100 kg por duplicado, usando 8% de lama, 15% arcilla, 30% biosólidos y las siguientes proporciones de RSO y urea respectivamente 43 y 4% (P1), 45 y 2% (P2), 46 y 1% (P14) y 46.5 y 0.5% (P15). Finalmente se utilizó Bocashi para hacer un comparativo con la urea. Se prepararon cuatro pilas estáticas de 100 kg por duplicado, usando 8% de lama, 15% arcilla, 30% biosólidos y las siguientes proporciones de RSO y Bocashi respectivamente: 32 y 15% (P16), 37 y 10% (P17), 42 y 5% (P18) y 44.5 y 2.5% (P19). Durante los procesos de degradación se monitorearon los parámetros de temperatura, pH y humedad. La composta obtenida de las pruebas se encuentra catalogado como excelente de acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT-2002 y se alcanzaron temperaturas superiores a 55°C, adecuadas para la eliminación de microorganismos patógenos de acuerdo a la NTEA-006-RS-2006.

ABSTRACT

The degradation of biosolids from a wastewater treatment plant (WTP) of municipal origin and organic solid waste (RSO) was evaluated. Considering different rates of clay and frequency of aeration in order to achieve a compost that serves as a soil improver, obtaining a Carbon / Nitrogen (C / N) ratio between 8 and 14. Five 100 kg static piles were prepared in duplicate, using 8% of lama and the following proportions of biosolids and clay respectively 62 and 30% (P1), 67 and 25% (P2), 72 and 20% (P3), 77 and 15% (P4) and 82 and 10% (P5), the frequency of aeration used was every 48 hours. Of the rates assessed, the best test was P4. Considering this test, three piles (P6, P7 and P8) of 100 kg each were prepared with 77% of biosolids, 15% of clay and 8% of slats, using an aeration frequency of 24, 48 and 72 hours. In a second part the degradation of biosolids and organic solid waste (RSO) was carried out, three 100 kg static piles were prepared in duplicate, using as fixed variables: 8% of slat, 15% clay and the following proportions of biosolids and RSO respectively: 40 and 37% (P9), 35 and 42% (P10) and 30 and 47%; The best test in terms of quality parameters was P10 for obtaining the best C / N ratio. In a third stage, two primers were evaluated; urea and Bocashi. Four static 100 kg stacks were prepared in duplicate, using 8% slat, 15% clay, 30% biosolids and the following proportions of RSO and urea respectively 43 and 4% (P1), 45 and 2% (P2), 46 and 1% (P14) and 46.5 and 0.5% (P15). Finally Bocashi was used to make a comparison with urea. Four static 100 kg stacks were prepared in duplicate, using 8% slat, 15% clay, 30% biosolids and the following proportions of RSO and Bocashi respectively: 32 and 15% (P16), 37 and 10% (P17), 42 and 5% (P18) and 44.5 and 2.5% (P19). During the degradation process the parameters of temperature, pH and humidity were monitored. The compost obtained from the tests is cataloged as excellent according to NOM-004-SEMARNAT-2002 and temperatures above 55 °C were reached, suitable for the elimination of pathogenic microorganisms according to NTEA-006-RS-2006.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	vii
ABSTRACT	viii
INDICE DE FIGURAS.....	xi
INDICE DE TABLAS.....	xii
INTRODUCCION.....	1
1. FUNDAMENTOS	3
1.1 COMPOSTA	3
1.1.1 Métodos de compostaje.....	4
1.1.2 Fases del proceso de compostaje.....	6
1.1.3 Composición fisicoquímica.....	7
1.1.4 Preparación de composta aeróbica.....	10
1.1.5 Parámetros del Proceso.....	11
1.1.6 Parámetros de calidad	14
1.2 BIOSOLIDOS.....	18
1.2.1 Clasificación de los biosólidos.....	19
1.2.2 Composición fisicoquímica y biológica de biosólidos	20
1.2.3 Biosólidos en México	21
1.2.4 Disposición de biosólidos	22
1.2.5 Beneficios	23
1.2.6 Riesgos.....	24
1.2.7 Normatividad.....	25
1.3 LOS RESIDUOS SOLIDOS URBANOS Y SU FRACCION ORGANICA	27
1.4 ARCILLAS	28
1.4.1 Función.....	29
1.4.2 Clasificación.....	30
1.4.3 Caracterización	31
1.5 LAMA.....	32
1.5.1 Producción y composición	32
1.5.2 Clasificación.....	34
1.6 MICROORGANISMOS EN EL PROCESO DE COMPOSTAJE	36
1.7 INICIADORES EN EL PROCESO DE COMPOSTAJE.....	37
1.7.1 Urea como iniciador	37

1.7.2 Bocashi como iniciador	38
2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	40
2.1 INSPECCION DE MATERIALES	42
2.2 ACONDICIONAMIENTO DE MATERIALES.....	42
2.2.1 Biosólidos	42
2.2.2 Arcilla.....	43
2.2.3 Lama.....	43
2.2.4 RSO.....	44
2.3 COMPOSTAJE DE PILAS	45
2.3.1 Monitoreo e inspección de pruebas.....	46
2.3.2 Preparación de mezclas para pilas de compostaje	46
2.3.3 Muestreo.....	49
2.3.4 Análisis de calidad del producto terminado	49
3. RESULTADOS	51
3.1 INSPECCION DE MATERIALES	51
3.2 ACONDICIONAMIENTO DE MATERIALES.....	51
3.2.1 Biosólidos	51
3.2.2 Arcilla.....	53
3.2.3 Lama.....	55
3.2.3 RSO.....	55
3.3 COMPOSTAJE	56
3.3.1 Monitoreo e inspección de pruebas.....	56
3.3.2 Medición de pH.....	57
3.3.3 Determinacion de humedad	58
3.4 ANALISIS DE CALIDAD DE LA COMPOSTA.....	76
3.4.1 Análisis microbiológico.....	76
3.4.2 Análisis fisicoquímicos	79
3.4.3 Parámetros físicos: olor, color, apariencia y volumen	87
4. CONCLUSIONES	91
5. REFERENCIAS	94

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Perfil de temperatura de una composta estática	8
Figura 1.2 Arcillas	28
Figura 2. 1 Diagrama de flujo del compostaje (primera parte).....	40
Figura 2. 2 Diagrama de flujo del compostaje (segunda parte)	41
Figura 2.3 Secado de biosólidos Figura 2.4 Molino de martillos	43
Figura 2.5 Inspección de lama.....	44
Figura 2.6 Triturado de RSO	45
Figura 2.7 Deshidratación de RSO.....	45
Figura 3.1 Difractograma de la arcilla.....	54
Figura 3.2 Dimensiones de pilas de compostaje	56
Figura 3.3 Puntos estratégicos de medición de temperatura	57
Figura 3.4 Perfiles de temperatura ensayo E1	58
Figura 3.5 Perfil de pH ensayo E1	60
Figura 3.6 Perfiles de humedad ensayo E1	61
Figura 3.7 Perfil del ensayo E2, influencia de las condiciones de aireación en pilas de compostaje	62
Figura 3.8 Perfiles de pH ensayo E2. Influencia de las condiciones de aireación en pilas de compostaje.....	64
Figura 3.9 Perfiles de humedad prueba E2. Influencia de las condiciones de aireación en pilas de compostaje	65
Figura 3.10 Perfiles de temperatura prueba E3.....	66
Figura 3.11 Perfiles de pH ensayo E3	67
Figura 3.12 Perfiles de humedad ensayo E3.....	68
Figura 3.13 Perfiles de temperatura del ensayo E4, utilizando urea como iniciador	69
Figura 3.14 Perfiles de pH del Ensayo E4.....	71
Figura 3.15 Perfiles de humedad ensayo E4.....	72
Figura 3.16 Perfiles de temperatura del ensayo E5, utilizando Bocashi como iniciador.....	73
Figura 3.17 Perfiles de pH del ensayo E5, utilizando Bocashi como iniciador	74
Figura 3.18 Perfiles de humedad del ensayo E5, utilizando Bocashi como iniciador	75
Figura 3.19 Cambios en el compostaje.	90

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)	14
Tabla 1.2 Máximos permitidos de materias inertes, en % de materia seca	15
Tabla 1.3 Características generales que debe cumplir los tipos de composta	16
Tabla 1.4 Métodos opcionales para medir estabilidad y madurez	17
Tabla 1.5 Concentraciones máximas de elementos traza en mg/kg en base seca	17
Tabla 1.6 Valores máximos permisibles para especificaciones microbiológicas...	18
Tabla 1.7 Límites máximos permisible para metales pesados en biosólidos	25
Tabla 1.8 Límites máximos permisibles, patógenos y parásitos en lodos biosólidos	26
Tabla 1.9 Componentes del estiércol en tres especies animales	32
Tabla 1.10 Producción y descomposición de diferentes tipos de estiércol y lama	34
Tabla 2.1 Variables de control de proceso.....	46
Tabla 2.2 E1 Ensayo con biosólidos, arcillas y lama	47
Tabla 2.3 Ensayo E2, variación en las condiciones de aireación.....	47
Tabla 2.4 Ensayo E3 con biosólidos, RSO, arcilla y lama	48
Tabla 2.5 Ensayo E4 utilizando urea como iniciador	48
Tabla 2.6 Ensayo E5 utilizando Bocashi como iniciador	49
Tabla 2.7 Análisis de la composta	50
Tabla 3.1 Parámetros iniciales de biosólidos	52
Tabla 3.2 Concentración inicial de metales pesados en biosólidos	52
Tabla 3.3 Parámetros iniciales de arcilla	53
Tabla 3.4 Parámetros iniciales de la lama	55
Tabla 3.5 Parámetros iniciales de RSO	55
Tabla 3.6 Comparativo en el proceso de degradación ensayo E2.....	63
Tabla 3.7 Análisis microbiológico de coliformes fecales CF	77
Tabla 3.8 Caracterización de las pilas de compostaje	80
Tabla 3.9 Metales pesados en composta	83
Tabla 3.10 Apariencia final de la composta	89

INTRODUCCION

El desarrollo de las naciones produce el fenómeno del urbanismo, trayendo consigo problemas tan grandes como la generación continua y progresiva de todo tipo de residuos, sólidos, líquidos y gaseosos. La generación de biosólidos a partir del tratamiento de aguas residuales no es nueva en el mundo, ofreciendo opciones comerciales a partir de su transformación en fertilizantes agrícolas (Vélez, 2007).

La generación promedio de biosólidos para los países desarrollados es de 21.9 kg por población equivalente y por año (21.9 kg per cápita/año); en contraste con los países menos desarrollados que tienen una producción promedio 11.5 kg por población equivalente y por año (11.5 kg per cápita/año). La producción de biosólidos per cápita, se relaciona también con el número de habitantes que están conectados a un sistema de tratamiento de aguas residuales, la tecnología utilizada y el aporte de descargas industriales (Kelessidis & Stasinakis, 2012).

La producción de biosólidos de aguas residuales municipales se estima en 640 millones de toneladas al año en base seca (SEMARNAT, 2008). Se espera que esta cantidad se incremente en los próximos años debido a un programa de construcción de grandes plantas de tratamiento, siendo la principal de ellas la de la ciudad de México, actualmente en una fase avanzada de construcción.

De acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en el 2012 México generó 42 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos (RSU), lo que equivale a 115, 068 mil toneladas RSU diarias y a 1.4 kg/día per cápita, de las cuales el 16.14 % correspondieron al Estado de México, depositándose el 68.29% en sitios controlados y el resto en sitios no controlados (SEMARNAT, 2012).

A partir de la degradación de la fracción orgánica presente en los RSU, se produce una mezcla de gases (biogás), compuesta por metano y dióxido de carbono (CH_4 y CO_2), ambos gases de efecto invernadero, contribuyen al proceso de cambio

climático. Además, se presenta la emisión de dioxinas y furanos producto de la quema no controlada de residuos mezclados indiscriminadamente (Flores & García, 2014).

Ante esta situación es necesario atender la problemática ambiental que presenta la enorme producción de la fracción orgánica de los RSU, también llamada Residuos Sólidos Orgánicos (RSO) y de biosólidos, por el impacto ambiental y su manejo inadecuado, mediante el desarrollo de tecnologías que ayuden a procesar en forma eficiente y rápida estos residuos (Juárez, 2014).

El objetivo de la presente investigación es desarrollar un proceso para reducir el tiempo de compostaje de los RSO y biosólidos utilizando diferentes tasas de aireación y agentes como lama y arcilla para obtener un producto con la calidad que permita su utilización como abono orgánico.

El contenido de la tesis está formado por una fundamentación, contenido la información relacionada con el tema de investigación, así como el estado del arte. La segunda parte es la metodología en donde se detalla el procedimiento, equipos y materiales utilizados en la investigación. En la parte final de la tesis se muestran los resultados y su discusión, considerando los experimentos realizados, los datos reportados en la literatura y los límites establecidos de los parámetros de las normas oficiales mexicanas consideradas en esta investigación. Posteriormente, se mencionan las conclusiones más relevantes, así como las recomendaciones para continuar con la línea de investigación y finalmente se presentan las referencias utilizadas en el marco de la investigación.

1. FUNDAMENTOS

1.1 COMPOSTA

La NADF-020-AMBT-2011 describe como composteo al proceso de degradación bioquímica, de un sustrato orgánico, sólido y heterogéneo, en condiciones aerobias y durante el cual presenta al menos una etapa termófila (SMA, 2012). Por otro lado, Tchobanoglus *et al.* (1994) lo define como la degradación controlada de desechos sólidos orgánicos con microorganismos, hasta convertirlos en humus estable que se puede utilizar como un acondicionador del suelo.

La composta es el material orgánico que se obtiene como producto de la acción microbiana controlada sobre residuos orgánicos tales como hojas, rastrojos, zacates, cascaras, basuras orgánicas caseras, subproductos maderables (aserrín y virutas), ramas, estiércol, y residuos industriales de origen orgánico; con estos residuos, en forma separada o bien mezcladas, se forman pilas o montones, que por acción de los microorganismos dan origen a un material (materia orgánica) de gran utilidad para los suelos agrícolas, ya que mejora la estructura y la fertilidad de estos (SAGARPA, 2001).

El compostaje proporciona la posibilidad de transformar de una manera segura los residuos orgánicos en insumos para la producción agrícola. La FAO define como compostaje a la mezcla de materia orgánica en descomposición en condiciones aeróbicas que se emplea para mejorar la estructura del suelo y proporcionar nutrientes.

Sin embargo, no todos los materiales que han sido transformados aeróbicamente, son considerados composta. El proceso de compostaje incluye diferentes etapas que deben cumplirse para obtener compost de calidad. La utilización de un material que no haya finalizado correctamente el proceso de compostaje puede acarrear riesgos como (FAO, 2013):

- a) Fitotoxicidad. En un material que no haya terminado el proceso de compostaje correctamente, el nitrógeno está más en forma de amonio en lugar de nitrato. El amonio en condiciones de calor y humedad se transforma en amoniaco, creando un medio tóxico para el crecimiento de la planta y dando lugar a malos olores. Igualmente, un material sin terminar de compostar contiene compuestos químicos inestables como ácidos orgánicos que resultan tóxicos para las semillas y plantas.
- b) Bloqueo biológico del nitrógeno, también conocido como “hambre de nitrógeno”. Ocurre en materiales que no han llegado a una relación Carbono: Nitrógeno equilibrada, y que tienen material mucho más rico en carbono que en nitrógeno. Cuando se aplica al suelo, los microorganismos consumen el C presente en el material, y rápidamente incrementan el consumo de N, agotando las reservas de N en el suelo.
- c) Reducción de oxígeno radicular. Cuando se aplica al suelo un material que aún está en fase de descomposición, los microorganismos utilizarán el oxígeno presente en el suelo para continuar con el proceso, agotándolo y no dejándolo disponible para las plantas.
- d) Exceso de amonio y nitratos en las plantas y contaminación de fuentes de agua. Un material con exceso de nitrógeno en forma de amonio, tiende a perderlo por infiltración en el suelo o volatilización y contribuye a la contaminación de aguas superficiales y subterráneas. Igualmente, puede ser extraído por las plantas del cultivo, generando una acumulación excesiva de nitratos, con consecuencias negativas sobre la calidad del fruto (ablandamiento, bajo tiempo postcosecha) y la salud humana (sobre todo en las hortalizas de hoja).

1.1.1 Métodos de compostaje

Actualmente, los métodos más utilizados son agitado y estático: En el método agitado, el material que se va a fermentar se mueve periódicamente, esto con el fin de permitir la entrada de oxígeno, controlar la temperatura y mezclar el material para

que el producto sea homogéneo; mientras que el método estático, el material que se va a fermentar permanece quieto y a través del él, se inyecta aire (Jaramillo y Zapata, 2008).

a) Compostaje en hilera

Antes de formar las hileras se pretrata el material orgánico mediante trituración y cribación hasta obtener un tamaño de partícula aproximadamente de 2.5 a 7.5 cm y un contenido de humedad entre 50 a 60%, y se dispone en hileras. El ancho y alto de las hileras depende del tipo de equipamiento que se va a utilizar para voltear los residuos fermentados. Un sistema rápido de compostaje en hileras emplea normalmente de 1 a 2 m de altura y 2 a 4 m de ancho por cada hilera, el material se voltea hasta dos veces por semana mientras la temperatura se mantiene aproximadamente a 55 grados centígrados; la fermentación completa puede obtenerse en tres o cuatro semanas, después del periodo de aireación, se deja el compost para reposar durante tres o cuatro semanas más sin ser movida.

b) Pila estática aireada

Este sistema fue, originalmente desarrollado para el compostaje aerobio de biosólidos, pero se puede utilizar para fermentar una amplia variedad de residuos orgánicos, incluyendo residuos de jardín o aquellos sólidos urbanos previamente separados. La pila estática aireada consiste en una red de tuberías previamente perforadas para que entre el aire, sobre ellas se coloca la fracción orgánica procesada de los residuos, formando pilas de aproximadamente 2 a 2,5 m de altura. Para controlar los olores, se puede poner una capa de compost cribado encima de la pila recién formada.

El aire necesario tanto para la conversión biológica como para controlar la temperatura, se introduce a la pila mediante un inyector de aire. Después que el material ha sido fermentado durante un periodo de tres o cuatro semanas, se realiza el proceso de estabilización durante cuatro semanas más. Para mejorar la calidad del producto final, se realiza una trituración o cribación de la composta.

c) Sistemas de compostaje en reactor

Para este sistema se ha utilizado como reactor todo tipo de recipientes, incluyendo torres verticales, depósitos horizontales, rectangulares y circulares. Estos se pueden dividir en dos categorías importantes de reactores: flujo pistón y dinámico (lecho agitado). El tiempo de retención para los 39 sistemas en reactor varía de 1 a 2 semanas, y emplean un periodo de curado de 4 a 12 semanas después del período de fermentación activa.

1.1.2 Fases del proceso de compostaje

A continuación, se enuncian las cuatro fases del proceso de compostaje comúnmente identificados:

a) Mesófilica

Es la primera fase y se caracteriza por la presencia de bacterias y hongos, siendo las primeras quienes inician al proceso por su mayor población; ellas se multiplican y consumen los carbohidratos más fácilmente degradables, produciendo un aumento en la temperatura desde la del ambiente a más o menos 40 grados centígrados.

b) Termófilica

En esta fase la temperatura sube de 40 a 60 grados centígrados, desaparecen los organismos mesófilos, e inician la degradación los organismos termófilos. En los seis primeros días la temperatura debe llegar y mantenerse a más de 40 grados centígrados a efecto de reducción o supresión de patógenos al hombre y a las plantas de cultivo. A temperaturas muy altas, muchos microorganismos importantes para el proceso mueren y otros no crecen por estar esporulados. En ésta etapa se degradan ceras, proteínas y hemicelulosas y, escasamente la lignina y la celulosa; también se desarrollan en éstas condiciones numerosas bacterias formadoras de esporas y actinomicetos.

c) Enfriamiento

La temperatura disminuye desde la más alta alcanzada durante el proceso hasta llegar a la del ambiente, se va consumiendo el material fácilmente degradable, desaparecen los hongos termófilos y el proceso continúa gracias a los organismos esporulados y actinomicetos. Cuando se inicia la etapa de enfriamiento, los hongos termófilos que resistieron en las zonas menos calientes del proceso realizan la degradación de la celulosa.

d) Maduración

En esta etapa se genera mucho menos calor y el pH se mantiene ligeramente alcalino. En esta fase, los microorganismos mesófilos y algunos tipos de microfauna colonizan la composta que está parcialmente madura. Además, se genera una intensa competición por el alimento, la formación de antibióticos y la aparición de antagonismos. El producto en escala industrial es de unas pocas semanas a unos cuantos meses, dependiendo del tipo de material que se ha tratado, y del destino final del producto (Barrena, 2006).

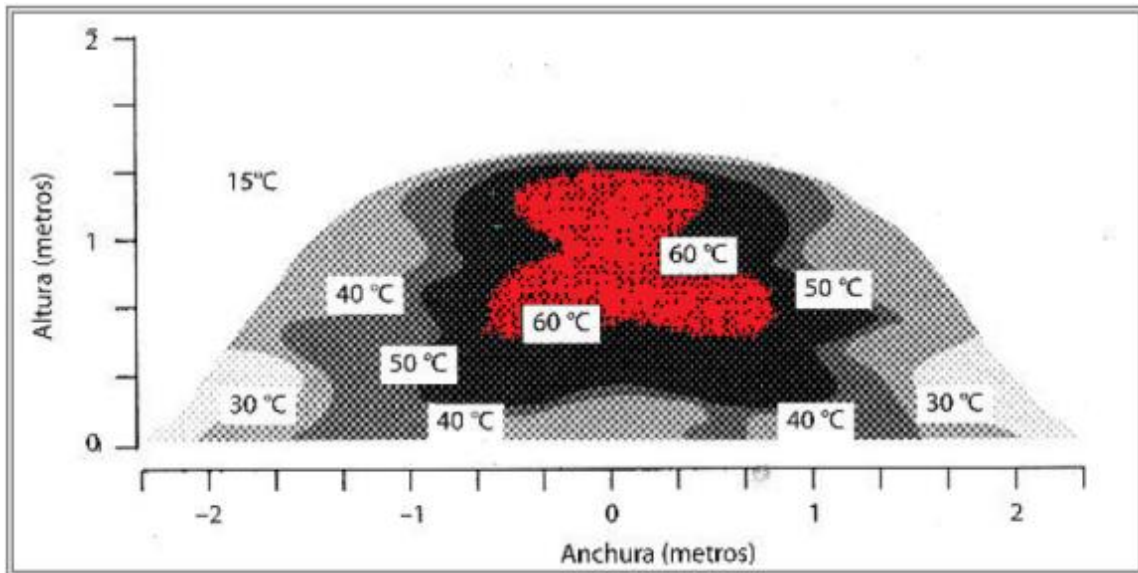
1.1.3 Composición fisicoquímica

En el proceso de compostaje, son los microorganismos los responsables de la transformación del sustrato, por lo tanto, todos aquellos factores que puedan inhibir su crecimiento y desarrollo afectarán también sobre el proceso. Los factores más importantes que intervienen este proceso biológico son: temperatura, humedad, pH, oxígeno, relación C/N y población microbiana (Jaramillo & Zapata, 2008).

a) Temperatura

Las fases mesófila y termófila del proceso, mencionadas anteriormente, tienen un intervalo óptimo de temperatura. Se ha observado que las velocidades de crecimiento se duplican aproximadamente con cada subida de 10 grados centígrados de temperatura, hasta llegar a la temperatura óptima. En la Figura 1.1 se muestra un área de color rojo, es el lugar donde se alcanzan temperaturas más altas, a partir de éste nivel se empiezan a eliminar microorganismos patógenos

dándose el proceso de sanitización ayudados adicionalmente por los antibióticos producidos por algunos microorganismos que favorecen su eliminación. Hacia los 70 °C grados centígrados se inhibe la actividad microbiana por lo que es importante la aireación del compost para disminuir la temperatura y evitar la muerte de los microorganismos. Durante estos cambios de temperatura las poblaciones bacterianas se van sucediendo unas a otras. Este ciclo se mantiene hasta el agotamiento de nutrientes, disminuyendo los microorganismos y la temperatura.



Fuente: Puerta, 2007

Figura 1.1 Perfil de temperatura de una composta estática

b) Humedad

En el compostaje es importante evitar la humedad elevada ya que cuando está muy alta, el aire de los espacios entre partículas de residuos se desplaza y el proceso pasa a ser anaerobio. Por otro lado, si la humedad es muy baja, disminuye la actividad de los microorganismos y el proceso se retarda. Se consideran niveles óptimos de humedades entre 40% - 60%, éstos dependen de los tipos de material a utilizar.

c) pH

El compostaje permite un amplio intervalo de pH (3.0 – 7.0), sin embargo, los valores óptimos están entre 5.5 y 7.0, porque las bacterias prefieren un medio casi neutro, mientras los hongos se desarrollan mejor en un medio ligeramente ácido. El valor del pH desciende ligeramente durante la etapa de enfriamiento llegando a un valor de 6 a 7 en el compost maduro.

d) Oxígeno

Los microorganismos deben disponer de oxígeno suficiente para que se dé el proceso aerobio, esto se logra mediante la aireación. Si se garantiza el oxígeno necesario para que se desarrolle el proceso, se puede obtener un compost rápido y de buena calidad, evitándose problemas de malos olores.

e) Nutrientes

Una relación C/N de 20 – 35 es la adecuada al inicio del proceso; pero si ésta relación es muy elevada, se disminuye la actividad biológica porque la materia orgánica es poco biodegradable, manifestada por lo que la lentitud del proceso, y no se deberá a la falta de nitrógeno sino a la cantidad de carbono.

f) Tamaño de partículas

El tamaño de partículas no debe ser ni muy fina ni muy gruesa, porque si es muy fina, se obtiene un producto apelmazado, lo que impide la entrada de aire al interior de la masa y no se llevará a cabo una fermentación aerobia completa. Si las partículas son muy grandes, la fermentación aeróbica tendrá lugar, solamente en la superficie de la masa triturada. Aunque el desmenuzamiento del material facilita el ataque microbiano, no se puede llegar al extremo de limitar la porosidad, es por ello que se recomienda un tamaño de partícula de 1 a 5 cm (Puerta, 2007).

1.1.4 Preparación de composta aeróbica

A continuación, se enuncian los procedimientos propuestos para la preparación en la formación y manejo de una pila de composta (FAO, 2013).

- c) Elección del área y nivelación: Esta elección se hace en función de: condiciones climáticas, distancia al área de producción de residuos, distancia al área donde se aplicará el compost final y pendiente del terreno. Es preferible un área protegida de vientos fuertes, a prudente distancia de nacimientos de agua (más de 50 metros) para evitar contaminaciones, y de poca pendiente (< 4%) para evitar problemas de lixiviados y erosión.

- b) Triturado del material y amontonamiento: El material a compostar se tritura manual o mecánicamente de preferencia en fragmentos de 10-15 cm. Se toma normalmente como unidad de tiempo la semana para amontonar material en una misma pila, antes que empiece la fase termofílica o de higienización, y así evitar la re-contaminación del material con material fresco.

- c) Aireación. Normalmente, se hace una aireación semanal durante las 3 a 4 primeras semanas, y luego pasa a ser por un periodo quincenal. Esto depende de las condiciones climáticas y de la humedad y aspecto del material que se está compostando. Se debe hacer un control de aspecto visual, olor y temperatura para decidir cuándo hacer la aireación.

- d) Controles de temperatura, humedad y pH.

- e) Comprobación que ha finalizado el compostaje (en fase de maduración): para corroborar que el compost ha entrado en fase de maduración, el material, aun húmedo no aumenta de temperatura nuevamente a pesar de que se realice el volteo.

- f) Cernido o Tamizado. Una vez se ha comprobado que el compost está maduro, se realiza un tamizado del material con el fin de eliminar los elementos gruesos y otros contaminantes (metales, vidrios, cerámicas, piedras). El tamaño del tamiz depende de la normatividad vigente en cada país; pero comúnmente es de 2 mm.

1.1.5 Parámetros del Proceso

Partiendo de las bases que en un proceso de compostaje los responsables de la transformación son los microorganismos, todos aquellos factores que pueden limitar su desarrollo serán limitantes también en el proceso. Para conseguir que esta transformación se realice en condiciones controladas (aeróbicas y termófilas) hace falta una serie de requisitos, que no son otros que los que necesitan los microorganismos para que se desarrollen (Barrena, 2006).

a) Aireación

En el proceso de composteo, el oxígeno se requiere para el metabolismo aeróbico, ligado a la oxidación de moléculas orgánicas presentes en el material por descomponer. Por ello, generalmente se requiere incrementar la aireación por medio de volteos periódicos de las pilas; con estas acciones, además de suministrar oxígeno, se disipa el calor producido dentro de la pila. Para determinar algunos intervalos en días, óptimos para realizar la aireación se consideran factores como la temperatura y la humedad; así han surgido algunas recomendaciones como la de realizar la primera aireación a los 22 días y posteriormente cada 7 o cada 15 días; sin embargo, en la práctica esta actividad se realiza cuando la temperatura se acerca a los 70 °C o cuando la humedad es mayor de 60% (SAGARPA, 2010).

b) Humedad

La humedad es un parámetro estrechamente vinculado a los microorganismos, ya que, como todos los seres vivos, usan el agua como medio de transporte de los nutrientes y elementos energéticos a través de la membrana celular. La humedad óptima para la composta se sitúa alrededor del 55%, aunque varía dependiendo del

estado físico y tamaño de las partículas, así como del sistema empleado para realizar el compostaje. Si la humedad se encuentra por debajo de 45%, disminuye la actividad microbiana, sin dar tiempo a que se completen todas las fases de degradación, causando que el producto obtenido sea biológicamente inestable. Si la humedad es demasiado alta (>60%) el agua satura los poros e interferirá la oxigenación del material. En procesos en que los principales componentes sean sustratos tales como aserrín, astillas de madera, paja y hojas secas, la necesidad de riego durante el compostaje es mayor que en los materiales más húmedos, como residuos de cocina, hortalizas, frutas y cortes de césped. El rango óptimo de humedad para compostaje es del 45% al 60% de agua en peso de material base (FAO, 2013).

Se debe conocer el contenido de humedad en los sustratos de los RSO debido a que puede afectar la evolución del proceso de transformación aerobia de la materia orgánica. Una estrategia de control de la humedad durante el proceso de compostaje es el incremento en la frecuencia de aireación de las pilas. Los resultados indican que el aumento en la frecuencia de aireación fue efectivo para reducir la humedad inicial de los sustratos, obteniendo una mayor tasa de degradación de la materia orgánica, que se refleja en un 20% menos del tiempo de duración de las fases mesofílica, termofílica y de enfriamiento, y además, en un mayor mantenimiento de las temperaturas de higienización (siete días adicionales). El incremento a la frecuencia de aireación disminuye el contenido de nutrientes (N Total, P Total, K Total) y del carbono orgánico total (COT) y por ende el valor agronómico del producto, no obstante, se favorece la disminución de sustancias fitotóxicas alcanzando un mayor índice de germinación y menores valores de conductividad eléctrica (Morales, 2012).

c) Temperatura

La actividad microbiana produce un incremento a la temperatura atribuida a las oxidaciones biológicas exotérmicas; esta fase se llama termofílica y es donde ocurre la descomposición más rápida de la materia orgánica. La temperatura óptima de la descomposición hemofílica es de 50 a 60 °C considerando la producción de CO₂; en algunas ocasiones la temperatura, por la actividad microbiana puede alcanzar hasta 76 °C, situación no deseable, debida que a temperaturas de 64 °C la pérdida de nitrógeno en forma de amoniaco es muy alta. Durante los primeros días, la temperatura se eleva de 60 a 70 °C, posteriormente se estabiliza a 40 o 50 °C; si la temperatura no aumenta, indica que hay un defecto en la aireación, baja relación Carbono/Nitrógeno (C/N) o un bajo nivel de humedad. Temperaturas elevadas, mayores de 65 °C, prolongadas, pueden ocasionar la muerte de bacterias benéficas, lo que frena la fermentación y provoca pérdidas de nitrógeno. Para sanear el material de la composta se requiere una temperatura de 60 a 65 °C; durante 2 o 3 semanas; sin embargo si el material presenta este rango de temperatura durante 5 o 6 semanas; es señal de una anomalía en el proceso y pudiera ocurrir un retraso en la estabilización de la composta. Cuando existen diferencias en el proceso de aireación y mezclas no equilibradas; generalmente hay una baja temperatura (SAGARPA, 2010).

d) pH

La secretaria del Medio Ambiente y Recursos del Distrito Federal establece (NADF-020-AMBT, 2011) en su punto 6.3.8 el rango adecuado de pH a lo largo del proceso de composteo debe estar en el intervalo de 4 a 9. El pH del compostaje depende de los materiales de origen y aia en cada fase del proceso (desde 4.5 a 8.5). En los primeros estadios del proceso, el pH se acidifica por la formación de ácidos orgánicos. En la fase termófila, debido a la conversión del amonio en amoniaco, el pH sube y se alcaliniza el medio, para finalmente estabilizarse en valores cercanos al neutro. El pH define la supervivencia de los microorganismos y cada grupo tiene pH óptimos de crecimiento y multiplicación. La mayor actividad bacteriana se

produce en pH 6.0–7.5, mientras que la mayor actividad fúngica se produce a pH 5.5-8.0. El rango ideal es de 5.8 a 7.2 (FAO, 2013).

1.1.6 Parámetros de calidad

A continuación se enuncian los parámetros más importantes a considerar para determinar la calidad de la composta como producto terminado.

a) Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)

Es importante mezclar con altas y bajas relaciones de C/N para que el nitrógeno, liberado para los materiales de baja relación de carbono-nitrógeno, pueda ser utilizado por los materiales de altas relaciones de carbono y nitrógeno, en la Tabla 1.1 se muestran los principales materiales utilizados en la composta en relación Carbono/Nitrógeno (SAGARPA, 2010).

Tabla 1.1 Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)

Material	Relación C/N
Desechos de ganado	
Orina	0.8
Estiércol almacenado (3 meses)	15 – 20
Estiércol de bobino	20 – 25
Estiércol de caballo	25
Desechos de cosecha	
Semillas de oleaginosas	3 - 15
Residuos de leguminosas	15
Alfalfa verde	15
Desechas de caña de azúcar	15 - 20
Restrojo de maíz	40 - 80
Paja de avena	50 - 150
Paja de trigo	130 - 150
Desechos vegetales	
Follaje de pino	5
Residuos frescos de jardín	12
Abonos verdes	10 - 15
Algas	19
Residuos frescos de huerto	30
Hojas secas	50 - 80
Desechos agroindustriales	
Pulpa de café seca	3
Harina de pescado	4 - 5
Harina de hueso	8
Desecho de cervecería	15
Bagazo de caña	200
Aserrín	200 - 500

Fuente: SAGARPA, 2010

b) Tamaño de partícula

La tolerancia a la presencia de material inerte en los tres tipos de composta se indica en la tabla 1.2 de acuerdo al tipo de material.

Tabla 1.2 Máximos permitidos de materias inertes, en % de materia seca

Tipo de material	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Roca	Ausente	< 3%	< 5%*
Plástico	Ausente	< 5%	< 1%*
Vidrio y Metal	Ausente	< 1%	< 2%*

*La suma de los porcentajes de impurezas físicas debe ser menor al 5%

Fuente: NADF-020-AMBT, 2011

c) Higienización e inocuidad

Como consecuencia de las elevadas temperaturas alcanzadas durante la fase termofílica, se destruyen las bacterias patógenas y parásitos presentes en los residuos de partida. En esta fase se da la higienización del material. En las fases siguientes podría ocurrir una re-contaminación del material debido a varios factores, como por ejemplo, la utilización de utensilios contaminados con material fresco, como una pala para el volteo, o añadiendo material fresco después de la fase termófila.

Una composta madura no debe contener compuestos tóxicos para las plantas o el ambiente. Así por ejemplo, la presencia de amoníaco y sulfatos (NH_3 y SO_4) en lixiviados generados por procesos de compostaje con exceso de humedad, favorecen la producción de ácido sulfhídrico y dióxido de nitrógeno (H_2S y NO_2) que junto con el metano (CH_4), son considerados gases de efecto invernadero con importantes impactos negativos en el medio ambiente, y en especial en el cambio climático (FAO, 2013).

d) Características de la composta terminada

La metodología para la determinación de cada uno de los parámetros de acuerdo a los tipos de composta y los requisitos de calidad necesarios, se especifican en la Tabla 1.3 las características que debe cumplir los tipos de composta de acuerdo a su uso recomendado por la Secretaria del Medio Ambiente y Recursos del Distrito Federal (NADF-020-AMBT, 2011).

Tabla 1.3 Características generales que debe cumplir los tipos de composta

PARAMETRO	TIPO DE COMPOSTA		
	A	B	C
Uso recomendado	Sustrato en viveros y sustitutos de tierra para maceta	Agricultura, ecología y reforestación	Paisaje, áreas verdes urbanas y reforestación
Humedad	25 - 53 %	25 - 53 %	25 - 45 % en proceso
pH	6.7 - 7.5	6.5 - 8	
Conductividad eléctrica	< 4 dS/m	< 8 dS/m	< 12 dS/m
Materia orgánica	> 20 % MS		> 25 % MS
Carbono total	Debe indicarse en la etiqueta de resultado del último análisis realizado		
Nitrógeno total % MS			
Relación C/N	< 15	< 20	< 25
Macronutrientes (NPK) en % MS	De 1% a 3% en cualquiera de ellos y suma ≤ 7%: portará la leyenda "Composta- mejorador de suelos. Si cualquiera excede 3% o la suma es mayor a 7% debe portar la leyenda "Composta para nutrición vegetal" y se indicarán las cantidades para cada macronutriente.		
Granulometría	≤ 10 mm	≤ 30	
Fitotoxicidad (IG)	IG ≥ 85%	≥ 75%	≥ 60%
Diferencia de temperatura con el ambiente media a una profundidad ≥ 50 cm	≤ 10 °C		≤ 15 °C

Fuente: NADF-020-AMBT, 2011

Los métodos opcionales para medir la estabilidad y madurez de la composta, como alternativa válida, a las pruebas de diferencia de temperatura con el ambiente y fitotoxicidad, es posible realizar la prueba de solvita con parámetros indicados en la Tabla 1.4, así como pruebas respirométricas (NADF-020-AMBT, 2011).

Tabla 1.4 Métodos opcionales para medir estabilidad y madurez

	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Indicé de madurez Solvita	7	6	5
Consumo de oxígeno	< 50	50 - 100	101 - 150
Emisiones de CO ₂	< 30	30 - 60	61 - 120

*mg/kg, MS/h

Fuente: NADF-020-AMBT, 2011

Los límites máximos permitidos de elementos de traza en mg/kg en base seca, que deben cumplir los tres tipos de composta, se especifican en tres niveles de concentración máxima permitida de elementos traza, para los tres tipos de composta especificadas en la Tabla 1.5, se aprecian en cada componente.

Tabla 1.5 Concentraciones máximas de elementos traza en mg/kg en base seca

Nivel-Tipo	As	Cd	Cr total	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Nivel 1-tipo A	0.1	0.7	70	70	0.4	25	45	200
Nivel 2-tipo B	0.7	1	70	150	0.7	60	120	500
Nivel 3-tipo C	2.0	3	250	400-500	3	100	200	1200-1800

Fuente: NADF-020-AMBT, 2011

Para la venta de composta en el Distrito Federal, ésta debe cumplir con las especificaciones microbiológicas y los procedimientos de análisis contenidos en Normas Oficiales Mexicanas, establecidas por la Secretaria de Salud y son las que se especifican en la Tabla 1.6, los microorganismos y la tolerancia aceptable.

Tabla 1.6 Valores máximos permisibles para especificaciones microbiológicas

Microorganismos	Tolerancia
Coliformes fecales	< 1000 NMP (en base seca)
Salmonella	<3 NMP (en base seca)
Huevos de Helmintos viables	1 en 4g (en base seca)

NMP: Número más probable

Fuente: NADF-020-AMBT, 2011

La evaluación de tecnologías aplicadas en la elaboración de composta para fertilizar las áreas verdes, suelos de conservación y áreas agrícolas del Distrito Federal contribuyen a la producción y utilización de abonos orgánicos y sustituyen los fertilizantes químicos, cuyo incremento de precios y efectos contaminantes y degradantes afectan adversamente tanto económica como ambientalmente a productores y a los habitantes del Distrito Federal. El cambio tecnológico con el uso de composta genera una reducción de los costos e incide favorablemente en la producción, la conservación y el impacto ambiental (Tavera *et al.*, 2010).

1.2 BIOSOLIDOS

Los biosólidos son un producto originado después de un proceso de estabilización de lodos orgánicos provenientes del tratamiento de las aguas residuales. La estabilización se realiza para reducir su nivel de patogenicidad, su poder de fermentación y su capacidad de atracción de vectores. Gracias a este proceso, el biosólido tiene aptitud para utilización agrícola y forestal, y para la recuperación de suelos degradados (Vélez, 2007).

La Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, de protección ambiental hace referencia al biosólido en el punto 3.5 y define como lodos que han sido sometidos a un proceso de estabilización y que por su contenido de materia orgánica, nutrientes y características adquiridas después de su estabilización, pueden ser susceptibles de aprovechamiento. Por lo que definimos estabilización de un biosólido como los procesos físicos, químicos y biológicos a los que se someten los lodos para acondicionarlos y de esta forma ser aprovechados o llevar

a cabo una disposición final y de esta forma evitar o reducir sus efectos contaminantes al medio ambiente.

1.2.1 Clasificación de los biosólidos

La norma EPA presenta la siguiente clasificación de los biosólidos (EPA, 2002):

- a) Biosólido Clase A: Suelen llamarse de calidad excepcional. Presentan una densidad de coliformes fecales inferior a 1000 NMP por gramo de sólidos totales o la densidad de *Salmonella* sp. es inferior a 3 NMP por 4 gramos de sólidos totales. La densidad de virus entéricos debe ser menor o igual a 1 UFC por 4 gramos de sólidos totales y los huevos viables de helmintos inferiores a 1 por 4 gramos de sólidos totales. Un biosólido con estos niveles que además tenga tratamiento para reducir vectores, no tendrá restricciones en su aplicación agraria y sólo será necesario solicitar permisos para garantizar que estas normas hayan sido cumplidas.

- b) Biosólidos Clase B: Con una densidad de coliformes fecales inferior a 2×10^6 NMP por gramo de sólidos totales o 2×10^6 UFC por gramo de sólidos totales. Este tipo de biosólidos deberá recibir tratamiento y será el que mayores restricciones presente para uso agrícola.

Además, la citada regla que rige el uso y eliminación de biosólidos establece límites cuantitativos relativos al contenido de metales presentes en ellos, normas de reducción de agentes patógenos, restricciones a los sitios de aplicación, condicionantes y supervisión de recolección de cultivos tratados, mantenimiento de registros y requerimientos de presentación de informes sobre biosólidos aplicados a la tierra, así como disposiciones similares para los que se desechan en rellenos sanitarios. Los biosólidos que se incineran tienen que satisfacer las normas relativas al contenido de metales y las disposiciones sobre emisiones que liberan al medio ambiente, incluidas las disposiciones de la Leyes de Aire Limpio.

1.2.2 Composición fisicoquímica y biológica de biosólidos

Los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales presentan tendencia a la compactación y baja porosidad que ocasionan dificultades durante el proceso de compostaje por una inadecuada aireación, lo que se puede corregir adicionando materiales de soporte para mejorar la porosidad y estructura de las pilas de compost y garantizar el ingreso del oxígeno necesario para favorecer las condiciones aerobias del proceso, las características de los lodos son consecuencia del uso que se haya dado a las aguas y de los sucesivos procesos de depuración a los que se han visto sometidos y del tratamiento que les hayan dado a los lodos para su estabilización (Kuter *et.al*, 1995).

a) Características físicas

Los lodos de origen primario y secundario se presentan en forma de un líquido que contiene partículas heterogéneas en suspensión. Su volumen representa del 0.05 al 0.5% del volumen de agua tratada para los lodos frescos, mientras que es ligeramente inferior para los lodos activados y otros procedimientos biológicos. La floculación del agua aumenta el volumen de los lodos, y sobre todo su peso, en aproximadamente un 10%. El color de los lodos varía entre el pardo y el gris, y su olor es a menudo desagradable, puesto que se trata de productos fácilmente fermentables y existe un inicio de descomposición. Los principales parámetros físicos son: contenido de materia seca, contenido de materia volátil, contenido de agua intersticial, viscosidad, carga específica, resistencia específica, compresibilidad y poder calórico.

b) Características químicas

La composición química de los biosólidos varía dependiendo de su origen y el método de tratamiento que se les proporcione. Los principales parámetros químicos son:

- **Materia orgánica:** Corresponde a la materia volátil, y varía de 60 a 85% de la materia seca.

- Elementos nutrientes: Se trata del contenido de nitrógeno total, fósforo y potasio. Son sustancias que favorecen el crecimiento de las plantas y que tienen mucha importancia para la utilización agrícola de los lodos.

c) Microcontaminantes orgánicos

Son sustancias que pueden tener una acción negativa sobre el tratamiento de los lodos y sobre su utilización en la agricultura. Se trata generalmente de productos de síntesis química que se utilizan comúnmente y que se encuentran en las aguas de desecho domésticas e industriales. Se hallan particularmente contenidos importantes de detergentes y medicinas (especialmente antibióticos que actúan sobre la flora de los lodos).

d) Microcontaminantes minerales

Los lodos contienen numerosos elementos minerales, algunos de ellos tienen una acción positiva sobre las plantas o sobre los animales (Fe, Cu, Mn, Zn), sin embargo, otros tienen una acción negativa sobre el uso posterior de las aguas negras (Pb, Cd, Hg y Ni). Resulta pues, indispensable conocer el contenido mineral de los lodos antes de su utilización en la agricultura.

1.2.3 Biosólidos en México

El tratamiento de aguas residuales se ha convertido en una prioridad dentro de las agendas políticas de México. Durante el año 2014, las 2,337 plantas en operación a lo largo del país, trataron 111.3 m³/s, es decir el 52.8% de los 211.0 m³/s recolectados a través de los sistemas de alcantarillado. En el año 2014, la industria trató 65.6 m³/s de aguas residuales, en 2,639 plantas en operación a nivel nacional. En el Estado de México se cuenta con 226 plantas en operación de las cuales tienen la capacidad de tratar 2.79 m³/s (CONAGUA, 2015).

El Programa Nacional Hídrico (PNH) 2007-2012 manifiesta el valor esencial que tiene al agua como un elemento estratégico para atender las necesidades básicas

de la población e impulsar el desarrollo de las actividades económicas del país, de acuerdo a los objetivos planeados en el PNH 2007-2012, el caudal de aguas residuales tratado se incrementó en 11.4%, llegando a un 47.5%, lo que representa un caudal tratado de 99.8 m³/s, con lo que se logró duplicar la cobertura del año 2000 al 2012 (Peña *et al.*, 2013)

1.2.4 Disposición de biosólidos

La disposición de biosólidos contempla la incineración, el vertido controlado y el vertimiento en el mar. Esta última alternativa está en vías de ser abolida por todas las legislaciones en el mundo.

Los lodos se incineran básicamente por razones de rentabilidad. Con altos costos de transporte asociados a la aplicación en la tierra, la incineración resulta económica. Algunos argumentan que este método es seguro y que no afecta al medio ambiente. El producto final de la incineración lo constituye una ceniza estéril exenta de patógenos e inodora (Gervin, 2005).

Otros, sin embargo, atacan el método argumentando que algunas sustancias no pueden ser destruidas por la incineración y que por el contrario se transforman en formas más tóxicas.

Como resultado de una evaluación de biosólidos que duro una década, la EPA concluyo que reciclar los biosólidos a la tierra era una solución ambientalmente responsable, cuando estos se usan de acuerdo con la regla de la Parte 503 (EPA, 2002). Las políticas federales que rigen el reciclamiento de los biosólidos se basan en rigurosos métodos científicos que han demostrado los beneficios de dicha operación.

Por su parte Allende (2006), menciona que Vanden Hugues es considerado una autoridad mundial en la materia y que el destaca que el contexto legislativo reseñado no significa que el esparcimiento de los lodos sea riesgoso. El sostiene

que los numerosos estudios realizados en Europa han verificado ampliamente la inocuidad de esta práctica y la eficacia agronómica de los lodos. Esto ha ido de la mano con un paulatino cambio de enfoque con respecto a los biosólidos, desde una visión que los considera como un desecho, hacia otra que los ve como un producto que puede homologarse de acuerdo a ciertas normas de calidad y trazabilidad para venderse en el mercado. Esta es una tendencia creciente que se traduce cada vez más en centros de compostaje y secado de lodos.

Con respecto a los lodos (Tchobanoglus,1994) afirma que muchos países han optado por los vertederos controlados, el vertido al mar y la incineración técnica está cuestionada, pues no parece ambientalmente segura ya que los metales pesados que suelen contener los residuos urbanos no pueden ser destruidos en la incineración. Además, algunas otras sustancias químicas como dioxinas y furanos, al volatizarse, se bioacumulan en la proteína animal de explotaciones pecuarias aledañas a los incineradores.

1.2.5 Beneficios

Especialmente los beneficios derivados de los biosólidos son usados como enmiendas al suelo, teniendo los siguientes beneficios (Santoyo, 2012):

- a) **Materia orgánica (MO):** La MO contenida en el biosólido ayuda a retener agua en el suelo, la porosidad del suelo, por lo que permite el paso del agua y aire a través del suelo, esta porosidad puede perderse a través del uso excesivo del suelo y es necesario mantenerlo rico en oxígeno.

- b) **Nitrógeno:** Es un nutriente esencial para las plantas, es absorbido como amonio y nitrato. En los biosólidos se presenta en forma de amonio, nitratos y nitrógeno orgánico. El nitrógeno del amonio y nitratos están listos para ser usados por las plantas.

- c) Fosforo: Es un nutriente básico para el crecimiento de las plantas y está presente en diferentes concentraciones.
- d) Micronutrientes: Se incluyen diferentes sales y metales como el Nitrógeno, Fosforo, Potasio, Cobre y Zinc necesarios para el crecimiento de las plantas y presentes en los biosólidos en diferentes cantidades.

1.2.6 Riesgos

El aprovechamiento de los lodos procedentes de Procesos de Tratamientos de Agua Residuales (PTARs) para la obtención de cultivos causa preocupación en lo que respecta a la contaminación ambiental y sanitaria. Dentro de este contexto se entiende como contaminante a una sustancia orgánica, inorgánica, una combinación de ambos tipos u organismos patógenos que después de su descarga a través de diversas vías de exposición o asimilación puede causar la muerte, enfermedades, mutaciones genéticas, entre otros.

- a) Micro contaminantes: Los lodos contienen en poca cantidad, varios productos que pueden ser tóxicos para las plantas, presentar inconvenientes o ser peligrosos para el hombre a través de las plantas. Estos micro contaminantes pueden ser orgánicos y minerales, como los metales pesados Cd, Pb y Hg (Cuevas & Walter, 2004).
- b) Microorganismos patógenos: Los biosólidos contienen un gran número de gérmenes inofensivos; pero junto con estos, están concentrados microorganismos de origen fecal que son *a priori*, dañinos para el hombre y los animales. Es necesario que los biosólidos sean especialmente tratados o desinfectados para destruir a los organismos patógenos, que se presentan en concentraciones significativas de bacterias, virus y parásitos (Santoyo, 2012).

1.2.7 Normatividad

Gran porcentaje de residuos sólidos generados en el Estado de México están compuestos de residuos orgánicos, principalmente de restos de alimentos, de mercados, de las actividades de poda de parques y jardines, forestales u agroindustriales, todos ellos materia prima para la producción de mejoradores de suelo, la Norma Técnica Estatal Ambiental (NTEA-006-SMA-RS, 2006) tiene por objeto establecer los requisitos para la producción de mejoradores de suelo elaborados a partir de residuos orgánicos.

Para su aprovechamiento como mejorador de suelo y fertilizantes, los biosólidos deben ser declarados “residuos no peligrosos” para el ambiente (NOM-052-SEMARNAT, 2005) con base al análisis CRETIB (corrosividad, explosividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y biológico-infecciosos) de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) se la SEMARNAT.

Por tal motivo, en México la norma NOM-004-SEMARNAT-2002 establece límites máximos permisibles para metales pesados, patógenos y parásitos en lodos residuales y biosólidos. Para efectos de esta norma los biosólidos se clasifican en tipo: excelente y bueno en función de su contenido de metales pesados, como se muestra en la Tabla 1.7 límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos en mg/kg en base seca de acuerdo a la normatividad mexicana vigente.

Tabla 1.7 Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos

CONTAMINANTE (Determinados en forma total)	Excelentes mg/kg en base seca	BUENOS mg/kg en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1 200	3 000
Cobre	1 500	4 300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2 800	7 500

Fuente: SEMARNAT, 2002

Los biosólidos se clasifican en: A, B y C en función de su contenido patógeno y parásitos. Definiendo patógenos como microorganismos capaces de causar enfermedades, si está presente, en cantidades suficientes y en condiciones favorables; definiendo parásitos como el microorganismo animal o vegetal que vive sobre o dentro de un huésped.

Los límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos se muestran en la Tabla 1.8, así como su aprovechamiento se establece en función a su tipo y clase para disposición final y de acuerdo al indicador bacteriológico de contaminación (NOM-004-SEMARNAT, 2002).

Tabla 1.8 Límites máximos permisibles, patógenos y parásitos en lodos biosólidos

CLASE	INDICADOR BACTERIOLOGICO DE CONTAMINACIÓN	PATÓGENOS	PARÁSITOS	APROVECHAMIENTO
	Coliformes fecales NMP/g en base seca	<i>Salmonella sp</i> NMP/g en base seca	Huevos de helmintos/g en base seca	
A Excelente	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 1 *	Uso urbano con contacto público directo
B Excelente o Bueno	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 10	Uso urbano sin contacto público directo
C Excelente o Bueno	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35	Usos forestales Mejoramientos de suelos Usos agrícolas

*Huevos de helmintos viables, NMP número más probable

Fuente: SEMARNAT, 2002

En México, la aplicación de biosólidos en terrenos con fines agrícolas y mejoradores de suelos se sujetará a lo establecido en la Ley Federal de la Sanidad y conforme a la normatividad vigente NOM-004-SEMARNAT-2002, el uso en terrenos en zonas

declaradas como áreas naturales protegidas, solo podrá realizarse con previa autorización de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

1.3 LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y SU FRACCIÓN ORGÁNICA

De acuerdo a información del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), de los 41 062.530 toneladas de residuos sólidos urbanos (RSU) generados en México en el año 2012, se reciclaron el 4.8%, 63.6% se dispusieron apropiadamente en rellenos sanitarios (RESA) conforme a la NOM-083-SEMARNAT-2003, 8.3% se dispusieron en sitios de tierra controlados y el 23.2% se dispuso en sitios no controlados (tiraderos a cielo abierto). El Estado de México es uno de los estados con mayor población del país y de acuerdo a los datos reportados por el INEGI (2013) en 2012 se generaron 18,624 t/día. Dicho estado cuenta con 13 RESA donde se dispusieron en 2012, 96 798.12 t/año, en sitios controlados se dispone el 16.49%, en plantas de tratamiento 8.6% y el 7.1% se disponen en sitios no controlados.

De acuerdo al compendio de estadísticas ambientales 2012, en México en 2011 el 47.6% de los RSU correspondió a residuos inorgánicos, además de papel, cartón y productos de papel, con lo que la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos que está compuesta por residuos de comida, residuos de jardinería y materiales orgánicos similares fue de 52.4% (INEGI, 2012; DOF, 2004; SEDESOL, 2012; SEMARNAT, 2013).

Si bien los RSU están constituidos por un conjunto heterogéneo de materiales, dividen su composición en dos categorías básicas (OPDS, 2010).

- a) Residuos Orgánicos: Restos de materiales resultantes de la elaboración de comidas, así como sus restos vegetales y animales (huesos, verduras, frutas, cascara). Se descomponen rápidamente, con fuertes olores, y son fuente de proliferación bacteriana. Atraen a roedores, insectos y también a los animales

domésticos (gatos, perros) que, además de romper las bolsas, son vectores de enfermedades.

- b) Residuos Inorgánicos: Restos de elementos que no son fruto directo de la naturaleza si no de la industrialización de recursos naturales (plásticos, vidrio, papeles, latas, textiles). Proviene mayormente del desperdicio de envases, embalajes característicos, de la presentación de productos comerciales.

1.4 ARCILLAS

Las arcillas son un suelo o roca sedimentaria, está constituida por agregados de silicato de aluminio hidratados, procedentes de la descomposición de rocas que contienen feldespato, como el granito. Presentan diversas coloraciones como se aprecia en la Figura 1.2, según las impurezas que contiene, desde el rojo anaranjado, hasta el blanco cuando es pura.



Figura 1.2 Arcillas

Físicamente se considera un coloide, de partículas extremadamente pequeñas y superficies lisas. El diámetro de las partículas de la arcilla es inferior a 0.002 mm. En la fracción textural de la arcilla puede haber partículas no minerales, los fitolitos. Químicamente es un silicato hidratado de alúmina, cuya fórmula es: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Figura 1.3).

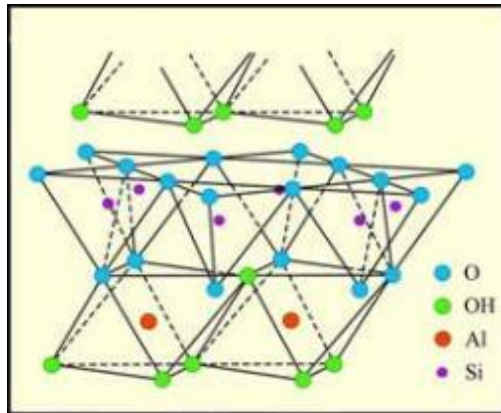


Figura 1.3 Estructura de la arcilla

La arcilla se caracteriza por adquirir plasticidad al ser mezclada con agua. La arcilla endurecida mediante la acción del fuego fue la primera cerámica elaborada por los seres humanos, y aun es uno de los materiales más baratos y de uso más amplio. Ladrillos, utensilios de cocina, objetos de arte e incluso instrumentos musicales como la ocarina son elaborados con arcilla (Franco, 2010).

1.4.1 Función

En general las arcillas pueden absorber proteínas, el ADN y el ARN a través de intercambio catiónico, interacciones electrostáticas, de interacción hidrófoba/hidrófila, intercambio de ligandos, enlaces de hidrogeno y fuerzas de Van der Waals. La adsorción varía con las características de estructura, la superficie y la carga de los minerales de arcilla, las proteínas y los ácidos nucleicos, así como de las condiciones para la adsorción (temperatura, pH). Sin embargo, todavía es necesario conseguir la comprensión profunda de como varios factores afectan la adsorción (Juárez, 2014).

Las arcillas es el componente mineral dominante que influye en los microorganismos de la mayor parte de los suelos. La arcilla se considera como una sustancia mineral plástica compuesta principalmente por silicatos de aluminio hidratados. Las partículas de arcilla tienen un diámetro de 0.002 mm o inferior siendo su tamaño similar al de los microbios o incluso más reducido. Presentan un alto nivel de dispersión y una elevada superficie por masa unitaria. Las arcillas son

muy reactivas químicamente en vista de que estas partículas son pequeñas en ocasiones se condensan firmemente limitando el espacio de los poros. Las arcillas influyen en la actividad microbiana modificando las características físicas y químicas del hábitat microbiano. Por otra parte, su superficie presenta una interacción directa de los microorganismos (Franco, 2010).

1.4.2 Clasificación

Las arcillas se pueden clasificar o agrupar desde varios y distintos puntos de vista:

- a) Por su hallazgo en estado natural
- b) Por su plasticidad
- c) Por su porosidad y color
- d) Por su punto de fusión

Las distintas arcillas se formaron, primero a partir de la descomposición de las formaciones rocosas y, por la acción de distintos factores, presión tectónica, movimientos sísmicos, distintos tipos de erosión, entre otros; y segundo por la adquisición, durante el viaje hasta su lugar de sedimentación, de diferentes impurezas de origen mineral; por lo tanto, dependiendo de las características de la roca de origen, existen innumerables tipos de arcillas, cada una de las cuales posee propiedades particulares.

El proceso de sedimentación duro millones de años. Los lechos de arcilla se encuentran, e casi todos los terrenos, a flor de tierra o a pocos metros de la superficie, aunque no todos son útiles para el ceramista. Atendiendo a su formación existen dos tipos o clases de arcillas: primarias y secundarias.

a) Arcillas primarias

Las hallamos en los lugares en los que se encuentran las rocas de las que proceden. Siendo sus principales características de ser de color blanco o tirando al gris, poco

plásticas y muy puras, por lo que no son muy útiles, en su estado primario, para el ceramista.

b) Arcillas secundarias

Son las que se han formado a lo largo de los años separándose de las rocas de origen y sedimentándose, en ocasiones a unas distancias considerables. Sus características principales son: tienen colores muy diversos, según su composición, desde el rojo al negro, pasando por el amarillo y el gris; en contra de las arcillas primarias, están resultan muy plásticas por lo que resultan fáciles de trabajar y es con la que la mayoría de los ceramistas están identificados y familiarizados. También se les conoce con el nombre de margas (Franco, 2010).

1.4.3 Caracterización

Las arcillas aparecen en todo tipo de formación rocosa, desde la más antigua hasta la más reciente, y en formaciones ígneas y sedimentarias de todo tipo; como consecuencia de ello, sus características físicas, químicas y mineralógicas varían ampliamente, incluso entre las capas de un mismo depósito arcilloso. Por tanto, en cualquier industria cerámica el control de calidad de los productos empieza por la caracterización y control de calidad de sus arcillas.

La distribución granulométrica es otra variable de suma importancia, dado que de ello va a depender el grado de empaquetamiento de las partículas y, por tanto, las propiedades físico-mecánicas de los cerámicos (porosidad, absorción de agua, resistencia a la flexión, entre otros). Por otro lado, la distribución granulométrica permite predecir el carácter plástico o desgrasante de la arcilla, teniendo en cuenta que el material arcilloso tiene tamaños de partículas pequeños, del orden de unas pocas micras, mientras que la fracción desgrasante o arenosa tiene un tamaño de partícula mucho mayor. La caracterización de las arcillas también debe comprender su análisis térmico, como termogravimétrico, análisis térmico diferencial y calorimetría diferencial de barrido. La gran importancia de estos análisis radica en

que gracias a ellos se pueden predecir diversos fenómenos térmicos que tienen lugar durante la cocción de las arcillas, tales como cristalización de ases, reacciones en estado sólido, deshidratación, fusión, oxidación, entre otros (Juárez, 2014).

1.5 LAMA

Tanto el estiércol como las purinas son una mezcla de las heces de los animales con los orines y la lama. El estiércol es aquel material que puede ser manejado y almacenado como sólido, mientras que las purinas lo son como líquidos. El estiércol también contiene aserrín, virutas de madera, papel de periódico o productos químicos, suele incluir restos de los animales del ganado, así como agua, procedente de los bebederos, de la limpieza de los establos o de lluvia, y todo tipo de materiales que pueden entrar en un establo (Martínez, 2008).

Esta mezcla está constituida por materiales ricos en nitrógeno (orina y excremento) y por productos ricos en carbono (paja, aserrín) son un alto contenido en celulosa y lignina (Almansa & Fernández, 2003).

El contenido de materia seca, nitrógeno y elementos inorgánicos (en porcentaje) en los excrementos de distintas especies animales se describen en la tabla 1.9 (Salazar & Fortis, 2010).

Tabla 1.9 Componentes del estiércol en tres especies animales

Clase de Ganado	Materia Seca	N	P ₂ S ₅	K ₂ O	CaO	Mg	SO ₄
Vacuno	16	0.29	0.17	0.1	0.35	0.1	0.04
Equino	24	0.44	0.35	0.35	0.15	0.1	0.06
Porcino	18	0.6	0.41	0.41	0.09	0.1	0.04

Fuente: Salazar, 2003

1.5.1 Producción y composición

Como ya se ha dicho son muchos los elementos que pueden entrar a formar parte del estiércol y, por lo tanto, es difícil fijar tanto la cantidad que se produce como las características de composición de este. Es por ello que se van a dar unos valores

generales. Son muy variados los factores que influyen en la cantidad producida y en el contenido de nutrientes del estiércol, pero entre ellos podemos destacar:

- a) Tipo de ganado: Tanto la cantidad como los nutrientes presentes en el estiércol varían tanto con la especie como como dentro de esta con el tipo de ganado.
- b) Alimentación: La dieta que se suministra al ganado depende tanto del tipo de ganado como del destino del animal. La dieta no es igual para un animal destinado al engorde que para un animal que está en crecimiento para reposición: esto hace que varíe tanto la cantidad de estiércol producido como el contenido en nitrógeno, fosforo y potasio.
- c) Condiciones ambientales: Hay que considerar factores tales como la adición de agua bien de lluvia o de limpieza, si se compacta o no y si contiene desperdicios
- d) Duración y condiciones de almacenado: El almacenamiento es básico, sobre todo para evitar las posibles pérdidas de nutrientes.

El aporte de los nutrientes en la lama teniendo en cuenta todo lo anterior, no es fácil determinar el nitrógeno, fosforo, y potasio que se aplica a una tierra cuando se esparce el estiércol. Para resolver este problema se ha propuesto transformar el contenido de los distintos nutrientes a unidades estándar de ganado, se muestra en la tabla 1.10 las cantidades en kilogramos y gramos de estiércol de acuerdo a la producción, de materia seca, materia orgánica, nitrógeno y algunos otros componentes (Martínez, 2008).

Tabla 1.10 Producción y descomposición de diferentes tipos de estiércol y lama

Estiércol	Producción (g/kg)	Materia Seca (g/kg)	Materia Orgánica (g/kg)	Nitrógeno		Fosforo		Potasio	
				(g/kg)	kg	(g/kg)	kg	(g/kg)	Kg
Purín de ganado vacuno (1)	20.2	95	68	4.4	89	0.9	18	4.2	85
Purina de cerdo (2)	1.6	80	63	7.0	11.2	2.1	3.4	3.3	5.30
Purina de gallina (3)	80	160	115	9.0	0.72	4.1	0.33	3.7	0.30
Gallinaza (3)	40	322	230	12.5	0.50	8.2	0.33	7.5	0.30
Gallinaza (4)	7	560	460	23.0	0.16	9.2	0.06	13.3	0.09
Purín de ternero (5)	2.2	20	15	3.0	6.6	0.6	1.3	2.0	4.4

(1) Vaca adulta en un año, (2) Plaza porcina= 2.2 animales por año, (3) Una gallina ponedora por año, (4) Plaza de cerdo por año, (5) Plaza de ternero= 2.2terrenos por año.

Fuente: Martínez, 1995

En el estiércol fresco tanto el contenido de materia orgánica y su estabilidad, son parámetros importantes que considerar. Al incrementar la actividad de los microorganismos, estos incorporan a su biomasa el nitrógeno mineral disponible para cubrir sus necesidades provocando una fuerte inmovilización del este, traducido en una falta de nitrógeno para los cultivos en los que es aplicado (Almansa & Fernández, 2003).

1.5.2 Clasificación

El estiércol, desde que se genera hasta que es utilizado, puede sufrir una serie de pérdidas en el contenido de nutrientes vegetales, que se pueden clasificar en tres tipos:

- a) Pérdidas gaseosas: El estiércol contiene elementos que pueden volatilizarse y que si no se almacenan de una forma adecuada se pierden. Estas pérdidas pueden suponer un 10 por 100 de nitrógeno.
- b) Pérdidas por lavado: El estiércol suele almacenarse al aire libre y, por lo tanto, al llover, el agua puede arrastrar los componentes nutritivos. Por estas vías se puede perder un 20 por 100 del nitrógeno, un 5 por 100 del fosforo y más de 35 por 100 del potasio.

- c) Perdidas por filtración: Estas pérdidas se producen cuando los líquidos del interior de la pila de estiércol pasan al suelo. Para que no se produzcan estas pérdidas, se sugiere que el estiércol se almacene sobre una superficie de hormigón, que se compacte y se cubra para evitar el lavado por la lluvia.

El estiércol de ganadería, la composta de origen vegetal, humus de lombriz, abonos verdes y restos vegetales que pueden enterrarse tras finalizar el cultivo. Cuando se realicen aportes de estiércol de ganado, es importante conocer su procedencia. Aunque actualmente se permiten los estiércoles de ganado extensivo no ecológico, se deberá garantizar que no son de ganadería intensiva y que han sufrido un proceso de estabilización mediante descomposición biológica aerobia de seis meses como mínimo. Le siguen en importancia los estiércoles de ganado (vacuno, porcino, ovino, caprino, equino), los excrementos de murciélago, guano, gallinaza, la palomina, los purines o deyecciones solidas o liquidas junto con el agua de limpieza. Los residuos urbanos (de recogida no selectiva) y lodos de depuradoras, debido a que suelen presentar altos niveles de metales pesados no se aceptan para la fertilización ecológica (González & Palomares, 2008).

Es necesario tener en cuenta que las cantidades de estiércol empleadas no deben superar las 170 UF/Nitrógeno, por lo que es importante conocer el contenido de nutrientes de los estiércoles.

El fertilizante más utilizado en la agricultura ecológica es la composta, que es un abono natural producido a partir de restos de materia orgánica, generalmente resultado de un proceso de producción propia del agricultor. También se usa el compost industrial y el compost casero; el vermicomposta (humus de lombriz), entre otros. La composta se produce mediante un proceso de estabilización mediante descomposición biológica aeróbica (incluyendo una fase termofílica) de diferentes materiales orgánicos o mezclas de los mismos (González & Palomares, 2008).

1.6 MICROORGANISMOS EN EL PROCESO DE COMPOSTAJE

Durante el proceso de compostaje, se lleva a cabo una compleja sucesión de poblaciones de microorganismos capaces de degradar o descomponer una materia orgánica compleja. La descripción de los microorganismos que intervienen en el proceso de compostaje es complicada, debido a que las poblaciones y las comunidades varían continuamente en función de la evolución de la temperatura, disponibilidad de nutrientes, concentración de oxígeno, contenido de agua, pH, acumulación de compuestos antibióticos, etc. La temperatura es un indicador de la actividad microbiana anterior y, así mismo, un indicador de la tasa de actividad actual.

El ecosistema del compostaje se limita a si mismo cuando la acumulación de calor es excesiva. A medida que se va elevando la temperatura, las poblaciones microbianas son reemplazadas por otras mejor adaptadas, y cada una de ellas posee una duración limitada. En el caso de realizarse una correcta continua aireación, la fase termófila continúa hasta que la producción de calor es inferior a la disipación de este, debido al agotamiento de los compuestos fácilmente metabolizables. Una amplia diversidad de microorganismos conforme las poblaciones mixtas del proceso de compostaje. Las más importantes son bacterias, actinomicetos y hongos filamentosos.

Las bacterias son las más numerosas en el proceso de compostaje, y constituyen entre el 80% y el 90% de los microorganismos existentes en la composta. Se trata de un grupo de gran diversidad metabólica, que utilizan un amplio rango de enzimas que degradan químicamente una gran variedad de compuestos orgánicos. Dentro de este tipo de microorganismos, se puede destacar el grupo de las *Pseudomonas fluorescentes*, constituido por algunas especies de bacterias asociadas a procesos de biocontrol de patógenos de plantas y a procesos de estimulación del desarrollo radicular (Mesas & Alegre, 2011).

Las bacterias aparecieron en todas etapas del compostaje con predominio de los bacilos (correspondiendo a los géneros *Bacillus* y *Pseudomonas*), sobre los cocos (del género *Micrococcus*). En los cinco primeros días del proceso, antes del pico de temperatura, las cepas aisladas sobre el total de la población mostraron predominio de microorganismos con actividad tanto amilolítica (55%) como lipolítica (63%) alcanzando un 24% la actividad celulolítica (De Carlo *et al.*, 2001).

1.7 INICIADORES EN EL PROCESO DE COMPOSTAJE

Uno de los aditivos incorporados al proceso de compostaje son los activadores (IBTA, 1995; Jiménez, 1998), que son un suministro de azúcares, nitrógeno, cepas seleccionadas de bacterias u otros microorganismos, enzimas, plantas medicinales y preparados biodinámicos. Todos estos aditivos incrementan la población de microorganismos en los primeros días y aceleran dicho proceso permitiendo disminuir el tiempo de compostaje (Smith & Dalzell, 1991).

Dentro de las prácticas más comunes en la elaboración de mejoradores de suelo y abonos orgánicos es la incorporación de composta ya estabilizada, como una manera de proveer una carga microbiana inicial (NRAES, 1992). Dependiendo del material que se va a compostar, es necesaria la adición de iniciadores de la descomposición, así como también de compuestos que corrijan la relación C/N, de manera que los microorganismos encuentren las condiciones óptimas para realizar la descomposición del material orgánico (Contreras, 1996).

1.7.1 Urea como iniciador

La urea, es un compuesto químico cristalino, incoloro, con un punto de fusión de 132.7°C. Se encuentra abundantemente en la orina. Es el principal producto terminal del metabolismo proteico en el hombre y en los mamíferos. Debido a su alto contenido en nitrógeno, la urea preparada comercialmente se utiliza en la fabricación de fertilizantes agrícolas. La urea se utiliza también como estabilizador en explosivos de nitrocelulosa y es un componente básico de resinas preparadas sintéticamente. Para corregir las relaciones C/N iniciales, en aquellos materiales que

presentan esta relación muy elevada, es posible la adición de urea u otros fertilizantes nitrogenados (NRAES, 1992).

En el proceso de compostaje la adición de urea ocasiona una disminución de los valores de la relación carbono/ nitrógeno (C/N) al comienzo del proceso (Salétes et ál., 2004; Torres et ál., 2004), hecho que podría agilizar el inicio de los procesos de descomposición. Sin embargo, Schuchardt *et ál.* (2002) y Salétes *et ál.* (2004) encontraron que la adición de urea no agiliza por sí sola el compostaje, ya que ésta es en gran medida volatilizada a causa de los altos incrementos de temperatura al empezar el proceso, los cuales pueden llegar a cerca de los 70°C.

1.7.2 Bocashi como iniciador

Bocashi es una palabra japonesa que significa “materia orgánica fermentada”. Es una fermentación de materiales de origen animal o vegetal, en un proceso aeróbico. Su uso aumenta la cantidad de microorganismos en el suelo, así como mejora sus características físicas y suple a las plantas con nutrientes (Shintani *et al.*, 2000). El abono orgánico tipo Bocashi se puede elaborar con materiales locales, por lo que se pueden hacer variaciones de acuerdo a la materia prima disponible en la región (De Luna & Vázquez, 2009).

La elaboración de los abonos orgánicos fermentados como el Bocashi se puede entender como un proceso de semi descomposición aeróbica (con presencia de oxígeno) de residuos orgánicos, por medio de poblaciones de microorganismos que existen en los propios residuos en condiciones controladas y que producen un material parcialmente estable, de lenta descomposición y que son capaces de fertilizar a las plantas y al mismo tiempo nutrir al suelo. Debido a la gran cantidad de microorganismos que contiene, el Bocashi muestra una intensa actividad biológica, lo cual se aprecia durante su elaboración, mediante el volteo diario (Ángel, 2004), cuando se presenta una alta velocidad de fermentación aeróbica. Si bien es cierto que los contenidos totales de macronutrientes son bajos en comparación con los fertilizantes minerales, la relación entre los elementos es balanceada y puede

ser modificada de acuerdo a las proporciones y los materiales que el agricultor utilice en la elaboración y la calidad del proceso realizado (Restrepo, 2010).

Al respecto, De Luna y Vázquez (2009) señalan que la ventaja de este abono es que con las dosis que se utilizan, suministran a la planta los microelementos en forma soluble y en un microambiente de pH biológicamente favorable para la absorción (6.5 a 7.0). Otro beneficio lo representa el hecho de que los microorganismos benéficos presentes compiten por microespacios y energía con los patógenos que hay en la zona radicular de la planta. La forma ideal para evaluar la calidad de un compostaje es medir su efecto sobre el crecimiento y la producción de los cultivos (Bissala & Payne, 2006).

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se detallará la metodología experimental empleada durante el proceso de compostaje, durante el desarrollo de este trabajo, indicando en cada uno de los casos, los ensayos e instrumentos analíticos utilizados en cada experiencia, para la recolección de datos experimentales, que posteriormente serán analizados en el capítulo de resultados.

En la Figura 2.1 se muestra el diagrama correspondiente al presente proyecto de investigación.

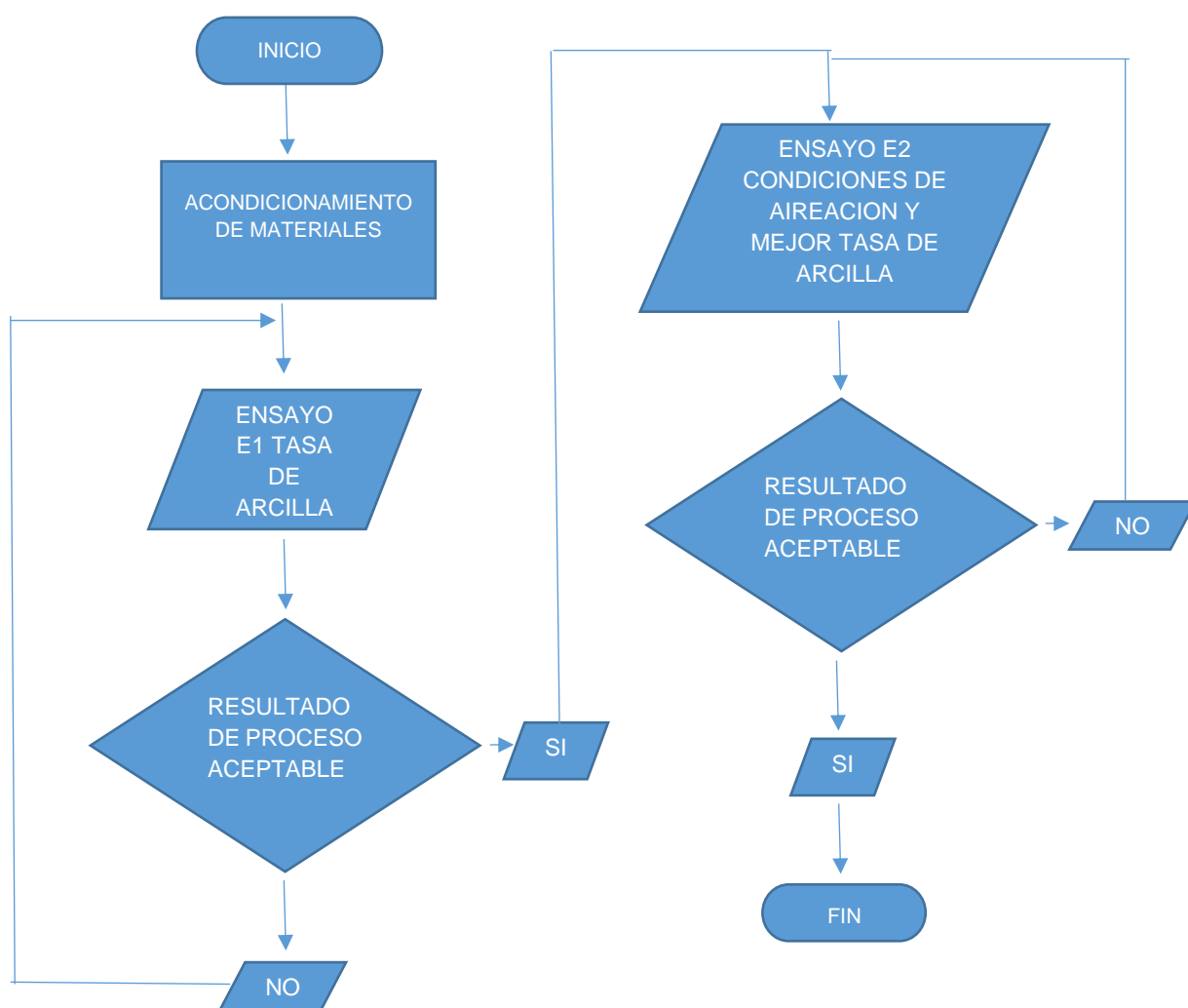


Figura 2. 1 Diagrama de flujo del compostaje (primera parte)

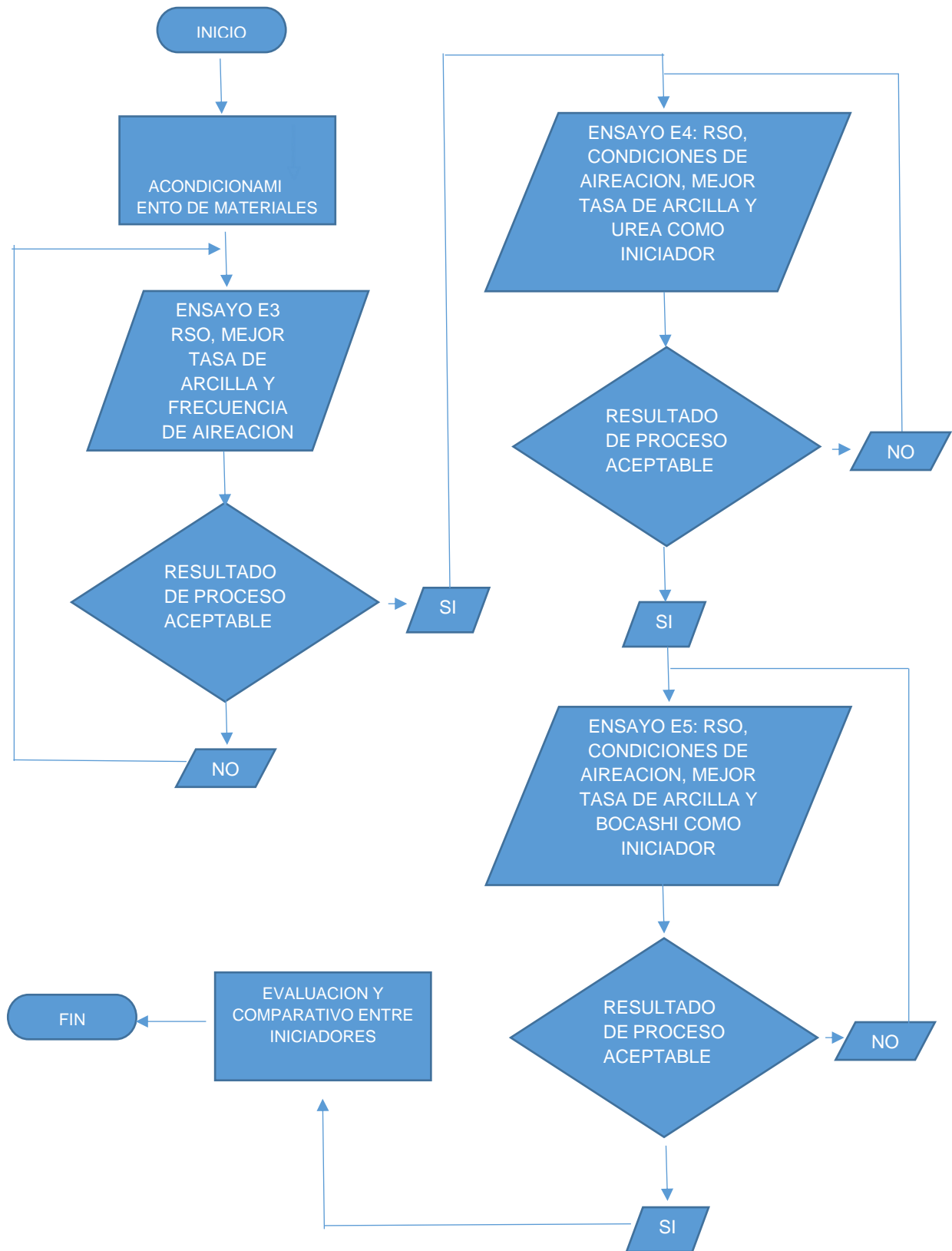


Figura 2. 2 Diagrama de flujo del compostaje (segunda parte)

2.1 INSPECCION DE MATERIALES

El ingreso de los materiales al Instituto Tecnológico de Toluca, se verificaron, realizando una inspección visual y la cantidad correcta en cuanto a peso de biosólido, arcilla y lama, así como su asignación al centro de Compostaje de la institución.

2.2 ACONDICIONAMIENTO DE MATERIALES

2.2.1 Biosólidos

Los biosólidos se obtuvieron de una Planta tratadora de aguas residuales de origen municipal, que procesa las aguas residuales del municipio de Toluca, ubicada en el valle de Toluca, de color negro y sin olor, indicando un proceso completo de oxidación, de aspecto semisólido, presentando 80 % de humedad.

Los lodos se acondicionarán de la siguiente manera con los procesos de secado, triturado y cribado:

a) Deshidratación: Este proceso se realizó térmicamente por medio de radiación solar colocando una capa de aproximadamente 2 cm de espesor sobre una película de polietileno de color negro, aireando manualmente con una frecuencia de cada 24 horas hasta obtener una humedad en base húmeda (Hbh) de $35\% \pm 5\%$, obteniendo un material amorfo aglomerado.

b) Triturado y cribado. Se usará un molino de martillos marca Ingar para reducir el tamaño de partícula, cribando simultáneamente con malla de 2 mm de diámetro integrada al molino, obteniendo gránulos y polvo.



Figura 2.3 Secado de biosólidos



Figura 2.4 Molino de martillos

2.2.2 Arcilla

El material arcilloso procede de las minas de materiales ubicadas en el municipio de Calimaya, Estado de México.

Se realizó una separación del material mediante una criba malla 2.0, con el propósito de eliminar impurezas como piedras, plásticos, terrones y vidrios, y tener uniformidad en el tamaño de partícula.

a) Difracción de rayos X (DRX)

El difractograma de los minerales arcillosos se obtuvieron y se compararon con diferentes patrones de difracción de rayos X correspondientes a la biblioteca JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards, por sus siglas en inglés) para identificar las principales fases cristalinas que los componen. A partir de un lote de 1 tonelada de arcilla se tomaron 20 muestras aleatorias de 1 kg, en un área plana horizontal y techada se colocaron estos 20kg de los cuales se realizaron 4 cuarteos sucesivos, hasta conformar una muestra compuesta de 6.25 g, la cual fue molturada en un mortero de ágata obteniendo 5g de muestra para su análisis (Juárez, 2014). Para tal efecto se utilizó un difractómetro Siemes D500, acoplado a un tubo de rayos X con ánodo de cobre.

2.2.3 Lama

La lama utilizada fue de origen equino, a la cual se le realizó una inspección visual (Figura 2.5) con el fin de retirar el material extraño de gran tamaño como piedras, plásticos, entre otros, que pudieron mezclarse en su manejo y transportación. Se le

realizaron análisis de calidad determinando MO, COT, N, relación C/N, humedad y pH, con el objeto de conocer el aporte en dichos componentes al proceso.



Figura 2.5 Inspección de lama

2.2.4 RSO

Los RSS se recolectaron de la cafetería del Instituto Tecnológico de Toluca, que en principalmente generaba cascaras de naranja con una producción diaria entre 90 y 120 kg de residuos, únicamente se retiraron bolsas de polietileno, vasos de plástico y popotes que pudieran incluir las bolsas recolectadas.

a) Trituración: Una vez separados los residuos de elementos extraños, fueron triturados para reducir su tamaño en un molino de martillos con cuchillas integradas, obteniéndose una pasta de residuos con una humedad de $45 \pm 5\%$. Se presentan en la Figura 2.6 el resultado del triturado.



Figura 2.6 Triturado de RSO

b) Secado: Se deshidrataron mediante escurrimiento en una criba con tamaño de malla de 10mm durante 24 horas, logrando de esta forma una humedad final de $25\pm 5\%$. En la Figura 2.7 se muestra el proceso de secado



Figura 2.7 Deshidratación de RSO

2.3 COMPOSTAJE DE PILAS

Una vez preparados los materiales se realizaron las pruebas de compostaje E1 y E2. El ensayo E1 consistió en un testigo y 5 pruebas con biosólidos, arcilla y lama variando las composiciones de biosólidos y arcilla y manteniendo un peso constante en las pruebas de 8% de lama. Los resultados obtenidos de la prueba E1 permitieron determinar la composición de las pilas para la prueba E2, una vez

conocidas las composiciones en peso para la prueba E2 se variaron las frecuencias de aireación, cada 24, 48 y 72 horas. Todas las pruebas fueron realizadas por duplicado.

2.3.1 Monitoreo e inspección de pruebas

Con el fin de evaluar el comportamiento del proceso y tener un control se realizó la medición de las variables: temperatura, humedad, pH, aireación y adición de agua, las cuales se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Variables de control de proceso

Variable de proceso	Frecuencia	Método de medición
Temperatura	C / 24 h	Termómetro digital
Humedad	C / 24 h	Termogravimétrico
pH	C / 24 h	Potenciómetro
Aireación	C / 24, 48 o 72 h	Manual
Adición de agua	C / 48 h	Capacidad de un cilindro de 18 L

2.3.2 Preparación de mezclas para pilas de compostaje

Para la preparación de las mezclas para las pilas se realizó el pesado de cada uno de los materiales de acuerdo a las proporciones establecidas en cada prueba, las cuales se mencionan a continuación

a) Ensayo E1: Determinación de la tasa de arcilla

Se prepararon pilas de 100 kg por duplicado con un total de 5 pruebas y un testigo en muestras variables de biosólidos, arcilla y 8% lama, con las proporciones indicadas en la Tabla 2.2. La arcilla como componente acelerador del tiempo de proceso y lama como material favorecedor del crecimiento microbiano. Se presentan las medias con sus respectivas desviaciones estándar de cada prueba, las cuales se identificaron como se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2. 2 E1 Ensayo con biosólidos, arcillas y lama

Prueba	Biosólido	Arcilla	Lama
Testigo A	100%	0%	0%
P1	62%	30%	8%
P2	67%	25%	8%
P3	72%	20%	8%
P4	77%	15%	8%
P5	82%	10%	8%

b) Ensayo E2: Mejores condiciones para aireación de las pilas de compostaje

Se prepararon pilas de 100 kg por duplicado con un total de 3 pruebas en 77% biosólidos, 15% arcilla y 8% lama, con las frecuencias de aireación mostradas en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Ensayo E2, variación en las condiciones de aireación

No. De días	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
P6			✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓
P7			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
P8			✓			✓			✓			✓			✓

c) Ensayo E3: Compostaje de biosólidos, RSO, arcilla y lama

Se prepararon pilas de 100 kg por duplicado con un total de 3 pruebas y un testigo de acuerdo a las composiciones mostradas en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Ensayo E3 con biosólidos, RSO, arcilla y lama

Componente	Testigo O	P9	P10	P11
Arcilla %	0	15	15	15
RSO %	50	37	42	47
Biosólido %	50	40	35	30
Lama %	0	8	8	8

d) Ensayo E4: Implementación de urea como iniciador

Se prepararon pilas de 100 kg por duplicado con un total de cuatro pruebas de acuerdo a las composiciones mostradas en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Ensayo E4 utilizando urea como iniciador

Componente	P12	P13	P14	P15
Arcilla %	15	15	15	15
RSO %	43	45	46	46.5
Urea %	4	2	1	0.5
Biosólido %	30	30	30	30
Lama %	8	8	8	8

e) Ensayo E5: Implementación de Bocashi como iniciador

Posteriormente se utilizó un iniciador para las últimas pruebas, se prepararon pilas de 100 kg por duplicado con un total de cuatro pruebas de acuerdo a las composiciones mostradas en la Tabla 2.6, esta prueba permitió hacer un comparativo en el tiempo de compostaje respecto a la prueba de urea y determinar que iniciador es mejor.

Tabla 2.6 Ensayo E5 utilizando Bocashi como iniciador

Componente	P16	P17	P18	P19
Arcilla %	15	15	15	15
RSO %	32	37	42	44.5
Bocashi %	15	10	5	2.5
Biosólido %	30	30	30	30
lana %	8	8	8	8

2.3.3 Muestreo

Para llevar a cabo los análisis de los materiales iniciales y del producto al finalizar el proceso de degradación, se llevó a cabo siguiendo el procedimiento establecido en el método de cuarteo de las normas NOM-004-SEMARNAT-2002 lodos y biosólidos, especificaciones y límites máximos de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final y la NTEA-006-SMA-RS-2006 que establece los requisitos para la producción de los mejoradores de suelos elaborados a partir de residuos orgánicos (SEMARNAT, 2002; SMA, 2006) donde se describe el procedimiento en el punto 5.4.1 de dicha norma, preparación de la muestra para el mejorador orgánico. Consistió en tomar 10 muestras de 1 kg distribuidos y mezclados al azar del lote del producto final, mismas que se mezclaron uniformemente entre sí, para extraer 1000g de producto (muestra compuesta). En el laboratorio se procedió a su secado térmico a temperatura ambiente, disgregando terrones, una vez seco se tamizó en malla de 2mm (tamiz numero 10). Las muestras fueron almacenadas en envases de polietileno limpios. Para análisis microbiológico se procedió directamente a los análisis correspondientes a los anexos II, III, IV y V de la norma, utilizando el material fresco y sin tamizar.

2.3.4 Análisis de calidad del producto terminado

El proceso de compostaje finalizó cuando las temperaturas de las pilas llegaron a valores cercanos a la temperatura ambiente o menor a 25°C de forma constante y el valor del pH se encontró entre valores de 7 y 8. Con el fin de evaluar la calidad

de la composta se efectuaron determinaciones analíticas conforme a la normatividad mexicana, con la metodología mencionada en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Análisis de la composta

VARIABLE	UNIDAD	METODO DE MEDICIÓN	NORMATIVIDAD
FISICOQUIMICOS			N/A
Humedad	% Hbh	Termogravimétrico (Analizador electrónico)	
pH	---	En solución acuosa	NMX-FF-109-SCF-2008 Lombricomposta. Especificaciones y método de prueba.
MO. COT	%	Método Walkley y Black modificado	NMX-AA-'21-SEMARNAT-2000 Especificación de suelo, estudio, muestreo y análisis.
NTK	%	Digestión-destilación de Kjeldhal	NMX-FF-109-SCF-2008 Lombricomposta. Especificaciones y método de prueba.
Relación C/N	----	NA Cálculo matemático	NMX-AA-067-1985. Determinación de la relación C/N
Fósforo, Potasio y Sodio	%	Espectrofotometría de absorción atómica	NTEA-006-SMA-RS-2006
Metales pesados: Pb, Cd, Hg y Cr	mg/kg en bs	Absorción atómica	Que establece los requisitos para la mejora del suelo elaborados a partir de residuos orgánicos.
MICROBIOLÓGICOS			
Coliformes fecales	UFC/g	Filtración membrana por	NOM-006-SMA-RS-2006. Que establece los requisitos para la producción de los mejoradores de suelo elaborados a partir de residuos orgánicos
Huevos helminto	HH/g bs	Bailenger modificado	

Fuente: SCFI, 2008

3. RESULTADOS

El desarrollo de la presente investigación se llevó a cabo en la planta piloto de compostaje del Instituto Tecnológico de Toluca, se observaron los cambios que presentaron las pilas de compostaje, como es el color, olor, tamaño y textura; se monitorearon las variables de control de proceso (%humedad, temperatura, pH) y finalmente mediante la realización de los análisis de calidad (relación C/N, COT, NTK, P, K, Ca, Cu, Zn, Cd, Pb y Ni) se observó la estabilidad del producto final así como la concordancia y el cumplimiento con la normatividad mexicana vigente. En la primera etapa se montaron las pilas correspondientes a la prueba E1 y E2, dando seguimiento al proceso, posteriormente en la segunda etapa se efectuaron los ensayos E3, E4 y E5 hasta la fase de maduración.

3.1 INSPECCION DE MATERIALES

El análisis de la calidad de los materiales que se utilizaron para el montado de las pilas se acondicionó previamente conforme a lo descrito en la sección 2.1 de la parte experimental.

3.2 ACONDICIONAMIENTO DE MATERIALES

3.2.1 Biosólidos

Una vez seco y triturado el biosólido, se tomó una muestra compuesta en base a la norma oficial mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, y se procedió a realizar los análisis de calidad fisicoquímicos y microbiológicos, para conocer las condiciones iniciales del material, para posteriormente hacer un comparativo al final del proceso de degradación. A continuación, se presenta la Tabla 3.1 donde se muestran los parámetros iniciales de los biosólidos.

Tabla 3.1 Parámetros iniciales de biosólidos

PARAMETRO	MO (%)	COT (%)	N (%)	C/N (%)	K/Na (%)	HUMEDAD	pH	MICROBIOLOGÍA	
								CF	HH
BIOSÓLIDO (1)	20.38	11.82	1.99	5.91	5.0	10 ± 3	7.8	930 (UFC/ mL)	<1(NHH/g)
BIOSÓLIDO (2)	19.88	10.24	2.06	4.97	4.86	10 ± 3	7.6	< 3 (UFC/ mL)	<1(NHH/g)

En base a los resultados microbiológicos y de acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT-2002 los biosólidos utilizados en el proceso de compostaje se encuentran catalogados como clase A como excelentes (para usos urbanos con contacto directo con el público durante su aplicación, usos forestales, mejoramiento de suelos y usos agrícolas). En la Tabla 3.2 se muestran los resultados del análisis de metales pesados. Como se observa, conforme a este parámetro se encuentra catalogado como un lodo excelente.

Tabla 3.2 Concentración inicial de metales pesados en biosólidos

PARÁMETRO	RESULTADO mg/kg (Biosólidos 1)	RESULTADO mg/kg (Biosólidos 2)	LIMITE MÁXIMOS PERMISIBLES NOM-004-SEMARNAT-2002	
			EXCELENTE	BUENO
Cadmio	< 0.05	< 0.05	39	85
Cromo	< 0.05	< 0.05	1 200	3 000
Cobre	65.09	64.32	1 500	4 300
Plomo	< 0.1	20.79	300	840
Mercurio	< 0.001	< 0.001	17	57
Niquel	9.29	10.78	420	420
Zinc	297.06	288.8	2 800	7 500

3.2.2 Arcilla

En la Tabla 3.3 se muestran los resultados de los parámetros analizados a la arcilla

Tabla 3.3 Parámetros iniciales de arcilla

PARAMETRO	MO (%)	COT (%)	N (%)	C/N (%)	HUMEDAD (%)	pH
ARCILLA	1.56	0.91	0.055	16.4	8.0	6.5

a) Difracción de rayos X (DRX)

Las muestras problema de la arcilla fueron analizadas en un barrido 2θ en el eje de las abscisas (ángulo de Bragg), desde 5° hasta 60° y en el eje de las ordenadas la intensidad (fotones por segundo). Del difractograma obtenido, se encontraron las fases mineralógicas: cuarzo, minerales de Illita $(\text{Na,K})\text{Al}_2(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})(\text{OH})_2$ y K-Na-Mg-Fe-Al-Si-O-H₂O (Tipo 2:1), así como el feldespato calcosódico, albita $\text{Na}(\text{Bi}_3\text{Al})\text{O}_8$, de acuerdo a las tarjetas JCPDS (00-005-0490), (00-020-0042), (00-009-0334) Y (00-010-0393). Se observa la superposición de los picos de cuarzo y de illita en el pico de reflexión a 26.6° y 28° respectivamente, incrementando notablemente su intensidad (Juárez, 2014).

Se observa en la Figura 3.1 que los picos están bien definidos, lo cual indica que el material tiene cierto grado de cristalinidad, la reflexión principal está en un ángulo de $2\theta = 28^\circ$ el cual corresponde a la albita, también se aprecia el segundo y el tercer pico principal de la albita, por lo que se infiere que el material es una albita que presenta impurezas, cuarzo e illita.

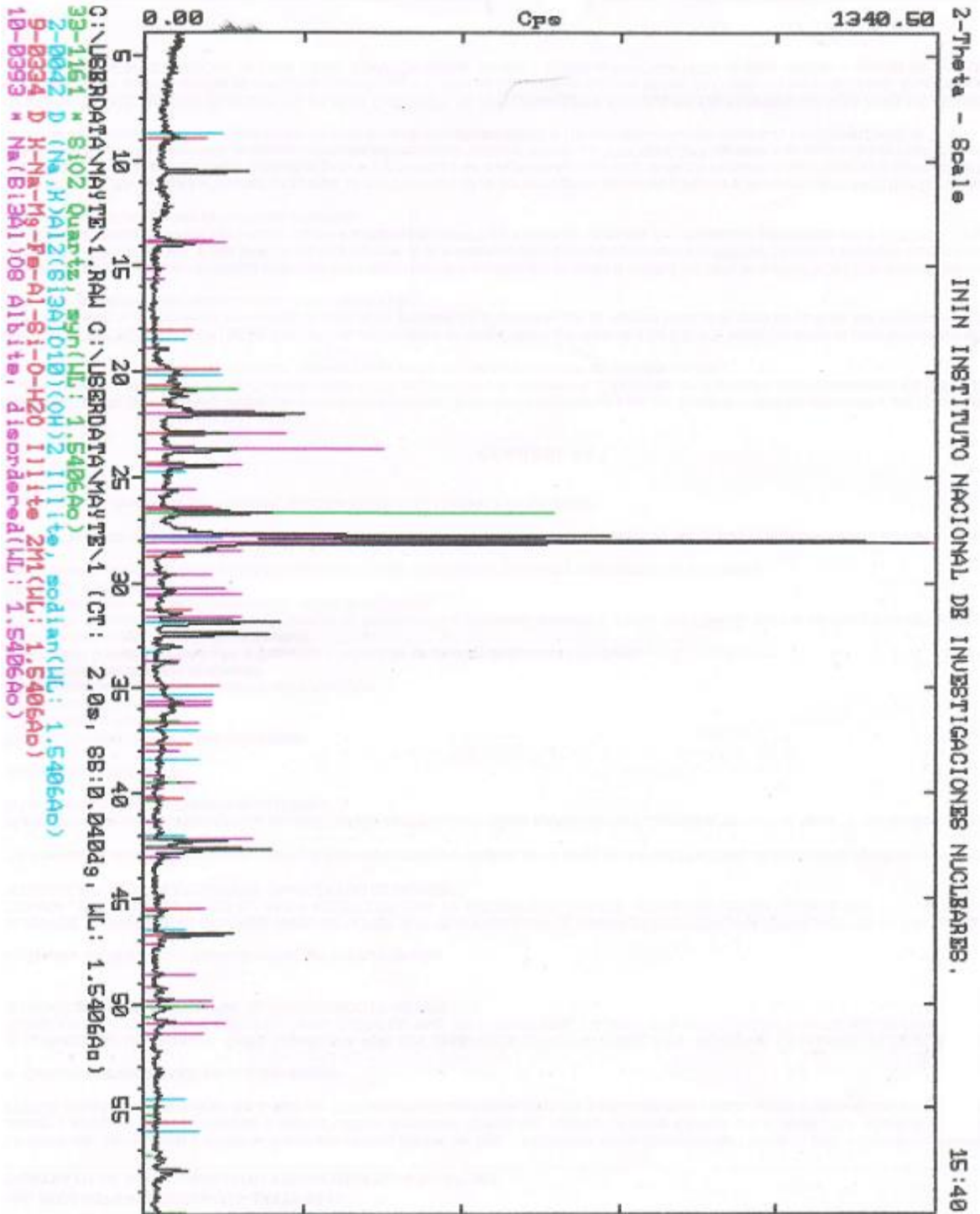


Figura 3.1 Difractograma de la arcilla

3.2.3 Lama

A continuación, se presentan los análisis fisicoquímicos que se llevaron a cabo para la lama, los cuales se muestran en la Tabla 3.4. Debido a su origen y a que contiene virutas este material es rico en celulosa, por la cual se explica el alto contenido en materia orgánica.

Tabla 3.4 Parámetros iniciales de la lama

PARAMETRO	MO (%)	COT (%)	N (%)	C/N (%)	HUMEDAD (%)	pH
LAMA	30.22	17.52	1.1	15.84	15.9	9.2

Existen investigaciones de compostaje utilizando lama como el de Juárez (2014), que indica que la lama puede contener CF, aun así, el contenido inicial no es mayor al del contenido de CF en biosólidos. A pesar de que el biosólidos ya se encuentre considerado como clase A para contacto directo con el público, se espera que las condiciones de operación ayuden a reducir aún más el contenido de CF en la composta terminada.

3.2.3 RSO

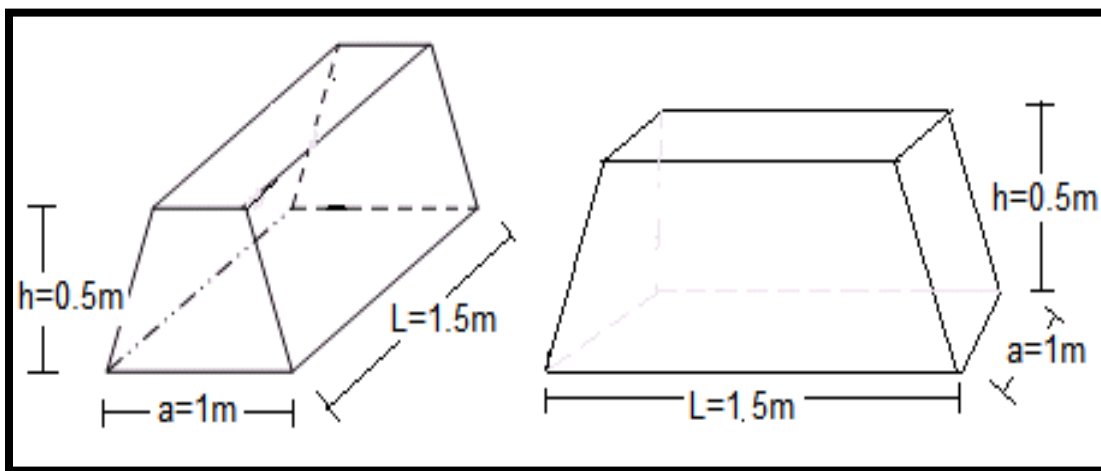
A los RSO se les determino un análisis fisicoquímico de pH y % de humedad, ya que son factores que influyen en el proceso de compostaje, es de suma importancia monitorearlos antes y durante el proceso de compostaje. Los resultados se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Parámetros iniciales de RSO

PARAMETRO	MO (%)	COT (%)	N (%)	C/N (%)	HUMEDAD (%)	pH
RSO	38.22	22.16	1.20	18.36	25+5	6.3

3.3 COMPOSTAJE

Una vez analizados los parámetros iniciales de los componentes para el proceso de compostaje, se procedió a pesar las cantidades de los materiales para cada una de las mezclas de acuerdo a lo descrito en la Tabla 2.2, posteriormente se llevó a cabo el montado de las pilas de compostaje de acuerdo a las dimensiones descritas en la Figura 3.2 y siguiendo las recomendaciones sugeridas y consideradas en base a experiencias pasadas en el preparado de pilas dentro de la planta de compostaje (Juárez, 2014; Ballesteros, 2016).



Fuente: Juárez, 2014

Figura 3.2 Dimensiones de pilas de compostaje

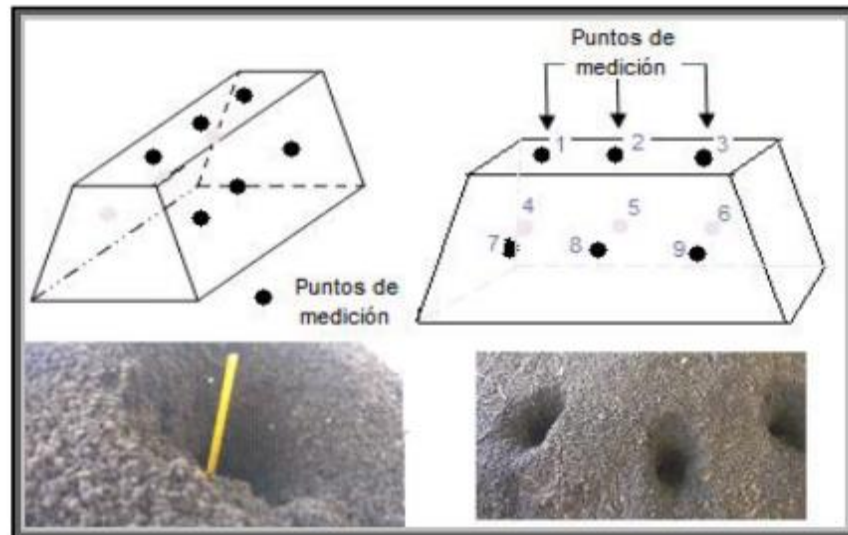
Una vez montadas las pilas se inició el monitoreo del proceso mediante las variables de control: temperatura, pH y % de humedad de acuerdo a lo establecido en la Tabla 2.4.

3.3.1 Monitoreo e inspección de pruebas

En esta primera etapa se montaron los ensayos E1 y E2, a los cuales se les tomó temperatura *in situ*, utilizando un termómetro digital marca Hanna modelo HI98509-1 con un rango de 120 °C, se midió en nueve puntos equidistantes, en el estrato superior, medio y bajo de la pila como se muestra en la Figura 3.3, se consideran las medias aritméticas de las nueve temperaturas. Cuando las pruebas alcanzaron

temperaturas menores o iguales a la temperatura ambiente de manera estable se finalizaron las mediciones, dado que la actividad microbiana en este punto se reduce al mínimo.

Dejando la composta un tiempo de 10 días para la maduración, en donde la sucesión microbiana corresponde a los actinomicetos para, utilizando la poca materia orgánica, terminar la mineralización y sanitizar la composta por la elaboración de algunos antibióticos



Fuente: Juárez, 2014

Figura 3.3 Puntos estratégicos de medición de temperatura

De acuerdo con la NTEA-006-RS-2006 para una adecuada sanitización del material (eliminar larvas, huevecillos, semillas y microorganismos patógenos), se requieren periodos entre cuatro días consecutivos con temperaturas superiores a 55°C ó doce días consecutivos con temperaturas superiores a 45°C (zona termófila).

3.3.2 Medición de pH

Para cada prueba se tomó una muestra compuesta de acuerdo a la NTEA-006-SMA-RS-2006, posteriormente se prepararon 10 g de muestra y 50 mL de agua desionizada conforme a la NMX-FF-109-SCFI-2007 humus de lombriz

(lombricomposta) especificaciones y métodos de prueba; se mantuvo en agitación durante 20 minutos y posteriormente se procedió a la medición potenciométrica en el equipo previamente calibrado SPARK modelo PS-2008A.

3.3.3 Determinación de humedad

Cuando los ingredientes se encontraban previamente acordonados y pesados, se procedió a llevar a cabo el mezclado, debido a que la mayor parte de los materiales se encontraban secos, se adicionó agua para lograr una mezcla homogénea de todos los componentes, así como para evitar desprendimiento de polvos y formación de grumos, se adicono agua manualmente.

a) Ensayos E1: Biosólidos, arcilla y lama

En las Figura 3.4 se muestran los perfiles de temperatura del ensayo E1, reportando los promedios de las réplicas de cada proporción

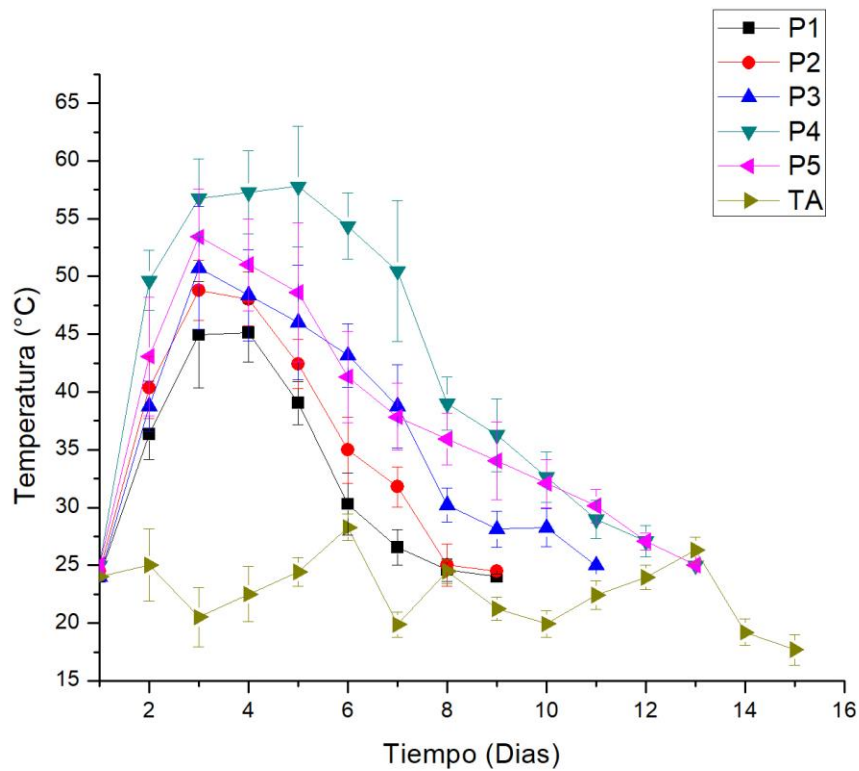


Figura 3.4 Perfiles de temperatura ensayo E1

Como se muestra en la gráfica, las pruebas alcanzaron temperaturas por encima de los 45°C en todos los casos. La prueba P1 registró una temperatura máxima 45°C durante dos días, en la fase termofila; la P2 alcanzó una temperatura máxima de 48.7°C, mantuvo temperaturas mayores a 45°C durante dos días con una media de 48.4°C en la fase termofílica, durando dos días; la P3 durante dos días mantuvo valores superiores a 45°C, con una temperatura máxima de 50.7°C, en la fase termofílica, con una media de 48.3°C.

La P4 se mantuvo en temperaturas mayores a 55°C durante tres días con una media de 57.3°C y a temperaturas mayores a 45°C durante seis días, de acuerdo a lo indicado en la NTEA-006-SMA-RS-2006 la cual especifica temperaturas mayores a 45°C durante 12 días consecutivos ó bien temperaturas mayores a 55°C durante tres días consecutivos; esta prueba presentó las mejores condiciones de proceso. Para el caso de la pila P5 se mantuvo en temperaturas mayores a 45°C durante tres días, alcanzando dos días de valores superiores a 50°C con una media de 52.2 °C y temperaturas termofilas de tres días con una media de 51°C. Estos datos concuerdan con lo reportado por Juárez (2014), que alcanzó temperaturas superiores a 55°C en todas sus pruebas de compostaje de biosólidos.

Se observa que el testigo no presentó aumento de temperatura, indicando que la pila testigo no tuvo degradación o fue mínima a la mostrada en las pilas con las diferentes mezclas de arcilla y lama; de esta forma se demuestra que no es factible degradar únicamente biosólido, por otro lado las diferentes mezclas propuestas presentan un tiempo de proceso de degradación de 9 a 13 días. Los parámetros de aireación para esta prueba fueron cada 48 horas.

Posteriormente el ensayo E2 consiste en la variación a la frecuencia de aireación y observar el comportamiento del proceso, esperando mejores resultados con esta variación.

En la Figura 3.5 se muestran los perfiles de pH de los ensayos durante el proceso

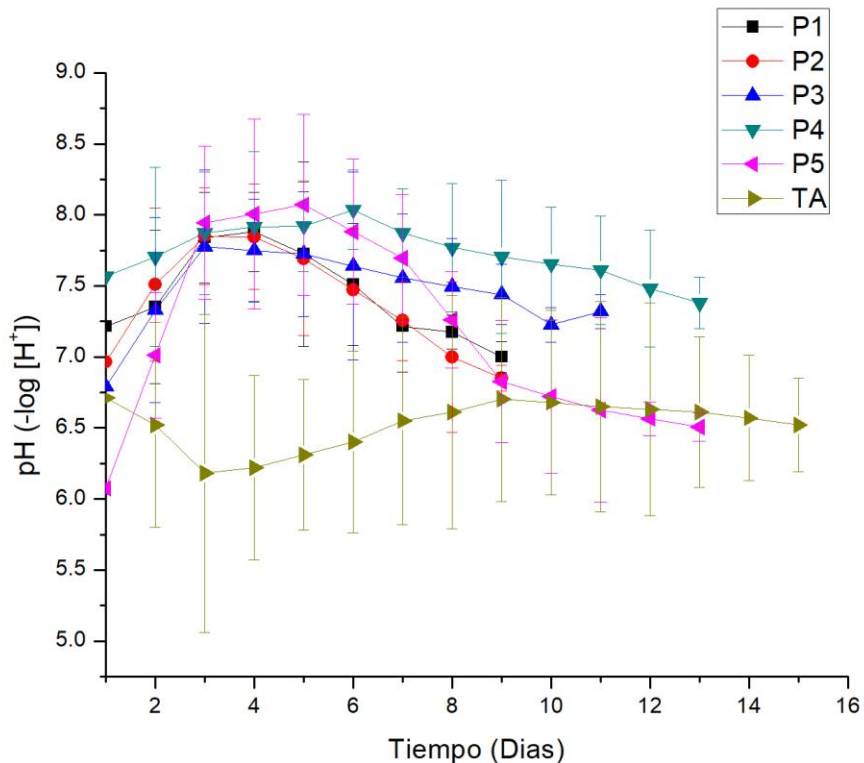


Figura 3.5 Perfil de pH ensayo E1

La Figura 3.5 muestra que los valores de pH tienden a estar entre 6.0 y 7.6 al inicio, posteriormente después de tres días los niveles de pH se elevan hasta valores de 8.0, permaneciendo en estos valores durante la fase termófila, en esta etapa los valores más altos de pH fueron de 7.8 a 8.0. Los rangos de pH concuerdan por lo reportado por Juárez (2014) y Ballesteros (2016), con un rango de pH entre 7 y 9.

A partir del día 7, el pH descendió para las pilas P1, P2 y P5 a valores de 6.8, en general las pilas al finalizar el proceso de compostaje se encontraron dentro de los rangos de neutralidad.

Para el testigo A no se observan muchos cambios, debido a la poca acción de los microorganismos en el proceso de degradación, de igual forma mantuvo un pH neutro.

En la Figura 3.6 se muestran los perfiles de humedad para la prueba E1.

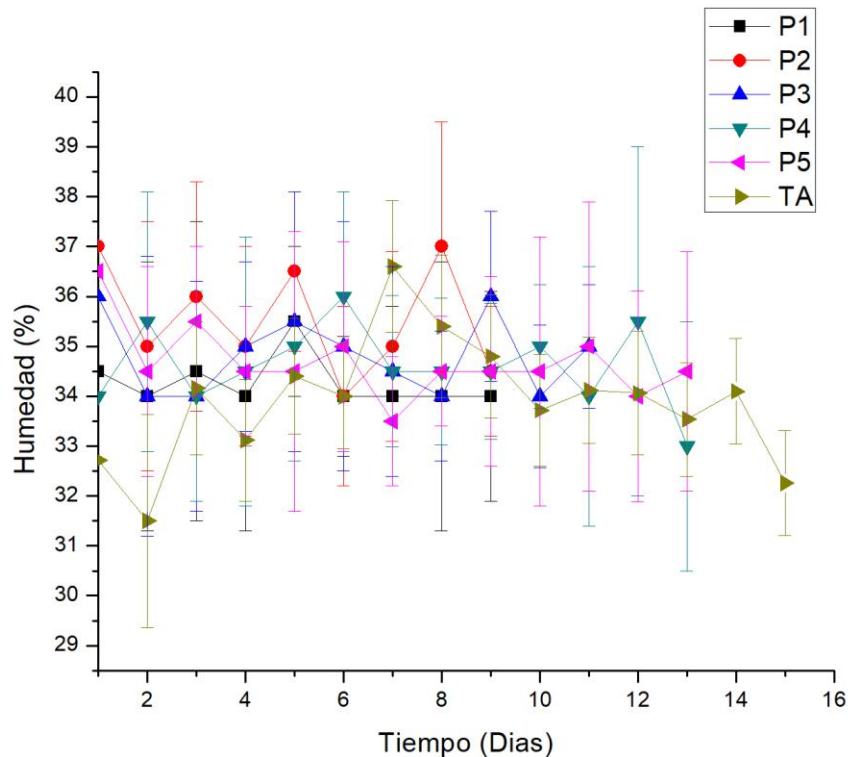


Figura 3.6 Perfiles de humedad ensayo E1

Los valores al inicio de contenido de humedad de cada pila a compostar se encontraron dentro de los valores de 34.5 y 37.0%, en la etapa termófila se tuvieron humedades desde 34 a 37%, finalizando en valores entre 30.8 y 33% para el producto como se muestra en la Figura 3.6. Juárez (2014) llevo a cabo el compostaje de biosólidos con un intervalo de 31.6 y 39.5% de humedad, mientras que Ballesteros (2016) utilizo intervalos de humedad de 34.9% y 39.9%.

Con las observaciones de las pruebas de perfiles de temperatura, pH y el porcentaje de humedad se considera que la prueba P4 presenta las mejores condiciones de proceso de degradación, las pruebas E2 se llevaran a cabo con 77% biosólido, 15% arcilla y 8% de lama.

b) Ensayo E2: Determinación de la influencia de las condiciones de aireación en pilas de compostaje

La Figura 3.7 muestra los perfiles de temperatura que presentaron los ensayos E2

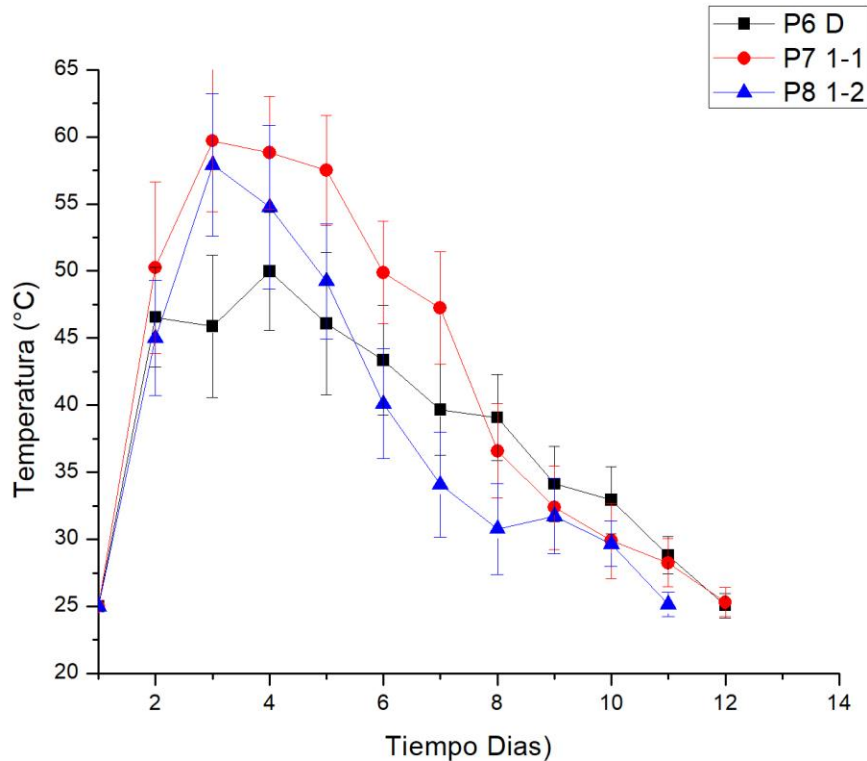


Figura 3.7 Perfil del ensayo E2, influencia de las condiciones de aireación en pilas de compostaje

En esta prueba se consideró una variación en la frecuencia de aireación de acuerdo a la Tabla 3.2 y de acuerdo a la mejor proporción de materiales, resultado de la prueba E1. Para el caso de la P6 presento temperaturas mayores a 45°C durante 3 días y una temperatura máxima de 49.9°C en el cuarto día y finalizando el proceso de compostaje en 12 días. Para la pila P7 registró una temperatura máxima de 59.5°C al tercer día y seis días en la fase termófila con una media de 53.9°C, para la pila P8 presento una temperatura máxima de 57.9°C al tercer día, y tres días consecutivos en la fase termófila con una media de 53.9°C. El proceso de compostaje finalizó en 12 días para la pila P6 y P8, mientras que para la pila P7

termino en 11 días. Siendo mejor la prueba 7, cuya frecuencia de aireación fue diario.

La Tabla 3.6 muestra un comparativo de las tres pruebas en cuanto al inicio y final de los parámetros de COT y NTK, se observa que la pila P8 muestra la mayor disminución en cuanto al COT y la segunda disminución para NTK, debido a que la variación en la frecuencia de aireación tiene por objetivo lograr una mayor degradación, se muestra que la P8 cumple con la mejor condición de degradación, para la prueba E3 se considerara una frecuencia de aireación cada 72 horas.

Tabla 3.6 Comparativo en el proceso de degradación ensayo E2

PARAMETRO	COT INICIO (%)	COT FINAL (%)	NTK INICIO (%)	NTK FINAL (%)	C/N INICIO (%)	C/N FINAL (%)
P6	11.73	9.73	1.59	1.23	7.34	7.84
P7	11.47	9.41	1.51	1.08	7.56	8.65
P8	11.27	8.83	1.54	1.15	7.28	7.66

A continuación, se presentan en la Figura 3.7 el perfil de pH del ensayo E2.

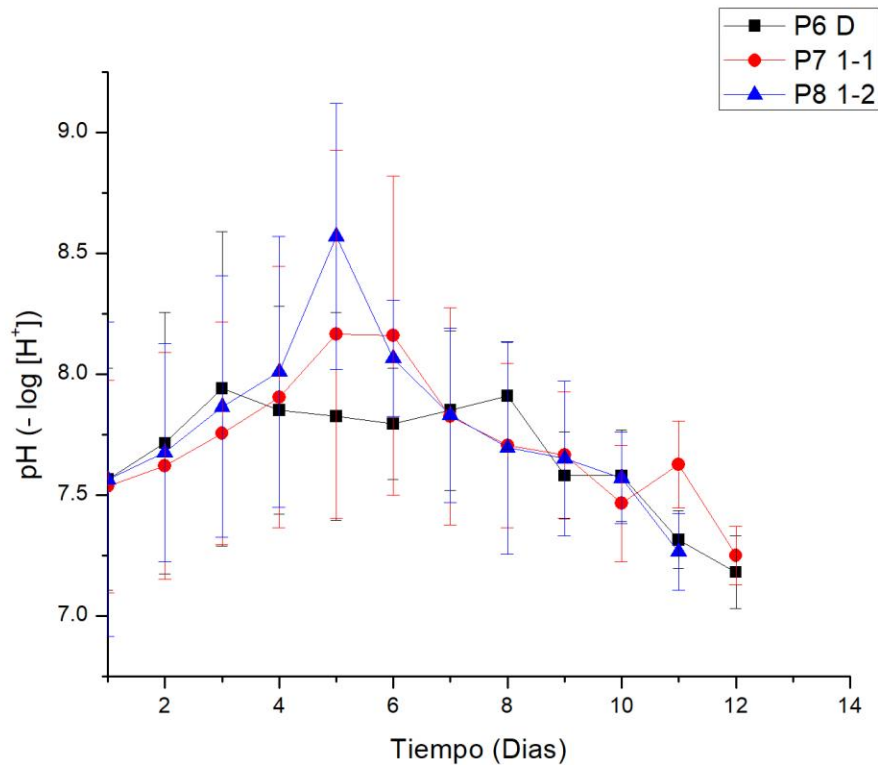


Figura 3.8 Perfiles de pH ensayo E2. influencia de las condiciones de aireación en pilas de compostaje

En general, las tres pilas presentan valores similares de 7.5 al inicio del proceso, la pila P6 alcanzo un pH maximo de 7.9 al tercer día y finalizo con un valor de 7.2, la pila P7 alcanzo valores de pH de 8.1 durante dos dias. La pila P8 presento un valor maximo de 8.5 lo cual se le atribuye a la mineralizacion de compuestos organicos nitrogenados, al finalizar el proceso de compostaje las pilas presentaron un pH practicamente neutro.

Suler y col (1977) establecieron una relación entre los cambios de pH y la aireación de la mezcla, concluyendo que un compostaje con la aireación adecuada conduce a productos finales con un pH entre 7 y 8; valores más bajos del pH son indicativos de fenómenos anaeróbicos y de que el material aún no está maduro. Posteriormente estos mismos autores estudiaron las relaciones pH-aireación-microorganismos existentes en el proceso, y dedujeron que la degradación orgánica se inhibe a pH

bajos, por lo que si el pH se mantiene por encima de 7.5 durante el proceso es síntoma de una buena descomposición.

En la Figura 3.9 se muestran los perfiles de humedad para la prueba E2.

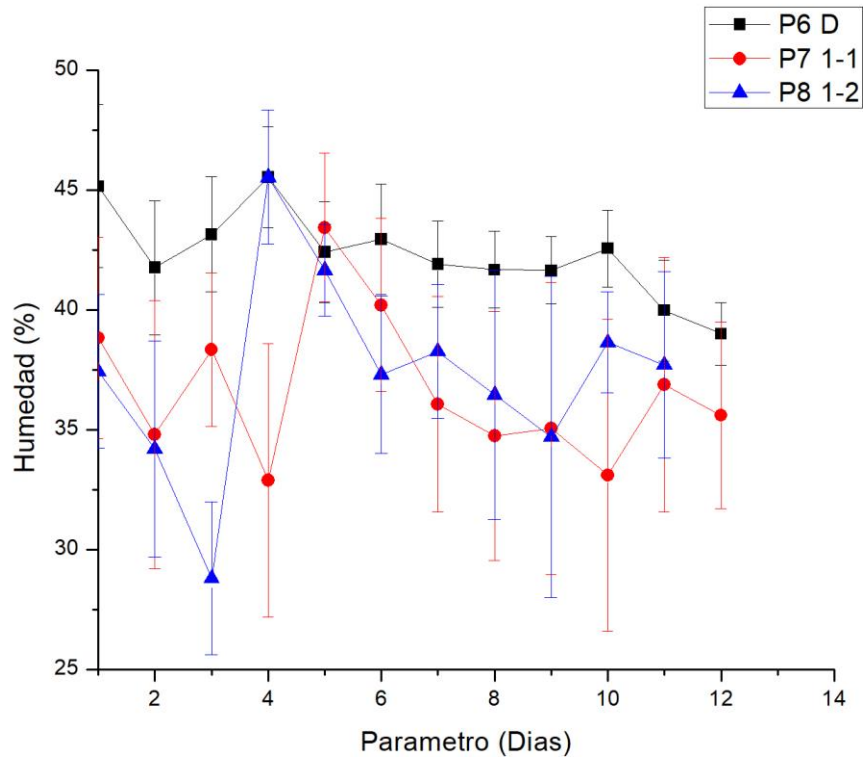


Figura 3.9 Perfiles de humedad prueba E2. influencia de las condiciones de aireación en pilas de compostaje

Al inicio de las pruebas, el contenido de humedad se encontró dentro del rango de 37.4 a 45.1%, durante la etapa termófila se presentó una humedad de 34.2 hasta 34.7% y dependiendo de las condiciones de aireación se presentaron incrementos o decrementos en el porcentaje de humedad.

Analizando estas condiciones para la prueba E2, se deduce que la mejor frecuencia de aireación para las pilas de compostaje es cada 72 horas, al finalizar las pruebas se cuenta con el dato de la mejor taza de arcilla y las mejores condiciones de aireación.

c) Ensayo E3: Compostaje de biosólidos, RSO, arcilla y lama

La Figura 3.10 muestra los perfiles de temperatura para el ensayo E3

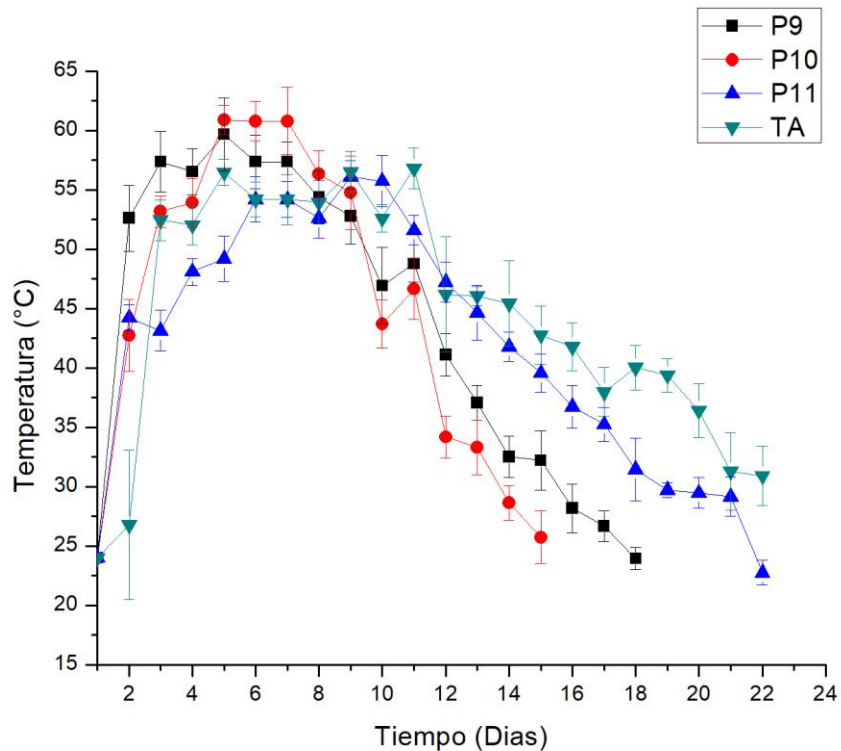


Figura 3.10 Perfiles de temperatura preueba E3

Como se muestra en la gráfica, en todos los casos presentan temperaturas mayores a 45 °C, para el caso de la P9 al segundo día alcanzo temperaturas de 52.5 °C y cinco días consecutivos por encima de los 55°C, el proceso de compostaje para esta prueba fue de 18 días; la P10 presento valores superiores a los 55°C a partir del día cinco y alcanzo las mejores temperaturas de este ensayo con valores mayores a 60°C durante tres días consecutivos, el proceso de compostaje de esta prueba finalizo en 15 días, esta prueba presenta las mejores temperaturas de operación para el cumplimiento a la NTEA-006-SMA-RS-2006 para la sanitización del producto final, y el menor tiempo de degradación; la P11 presento temperaturas en la fase termófila por nueve días y valores superiores a 55°C durante dos días consecutivos con una media de 55.9°C, el tiempo de compostaje de esta prueba fue de 22 días. Los datos presentados para el compostaje de RSO y biosólidos en el

ensayo E3 son mejores en comparación por lo reportado por Juárez (2014) y Ballesteros (2016), ya que las mejores temperaturas registradas son de 58°C y 50°C respectivamente.

El Testigo A conformado por 50% de biosólidos y 50% de RSO alcanzo temperaturas superiores a 45°C durante 12 días consecutivos y en el día 4, 8 y 10 temperaturas mayores a 55°C con una media de 56.59°C, el proceso de compostaje de esta prueba fue de 31 días, lo cual muestra la importancia de la adición de sustratos como es la arcilla y lama para lograr una degradación en un tiempo menor, así como lograr un mejor aspecto de la composta.

La Figura 3.11 muestra los perfiles de pH del ensayo E3

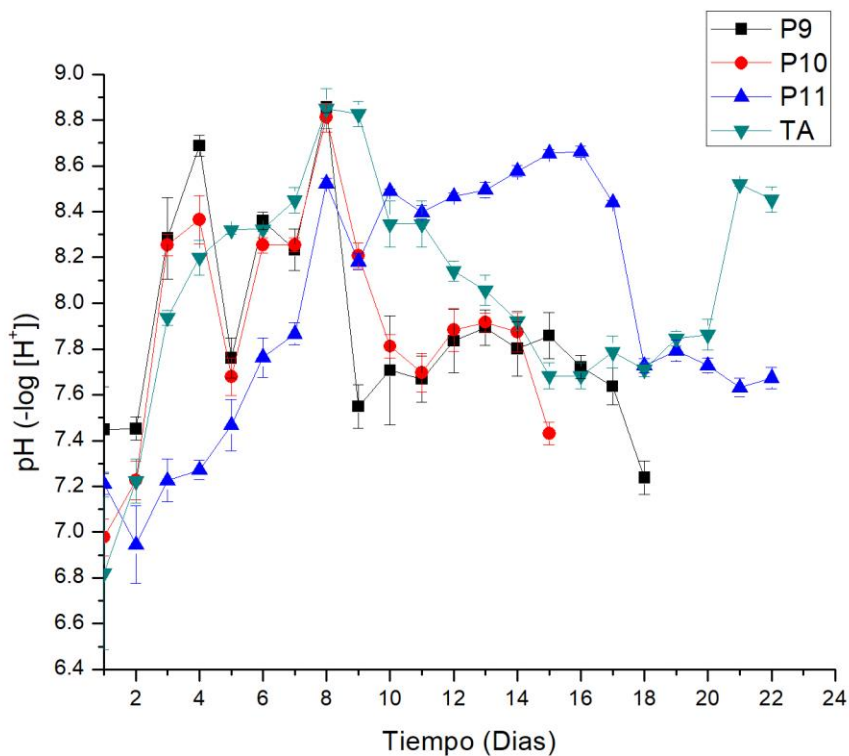


Figura 3.11 Perfiles de pH ensayo E3

Las pruebas P9 y P10 presentan un comportamiento similar presentando valores de pH entre 7.4 y 6.97 al inicio del proceso de compostaje, para el caso de la P11 presento un descenso en el pH en el día 1 de valores de 7.21 a 6.94, estos datos concuerdan con lo reportado por Juárez (2014), y por lo reportado por otros autores (López *et. al*, 2014; Heeredan *et. al*, 2001) que llevaron a cabo pruebas de degradación de residuos agrícolas, entre ellos paja de trigo, bagazo de caña y cascara de naranja. El aumento del pH de un sustrato orgánico se debe a la actividad de microorganismos que descomponen la materia orgánica y por liberación de iones hidroxilo en el medio, mientras que la disminución del pH es causada por la volatilización de amoniaco (Roca *et. al*, 2009).

La Figura 3.12 muestra los perfiles de humedad del ensayo E3

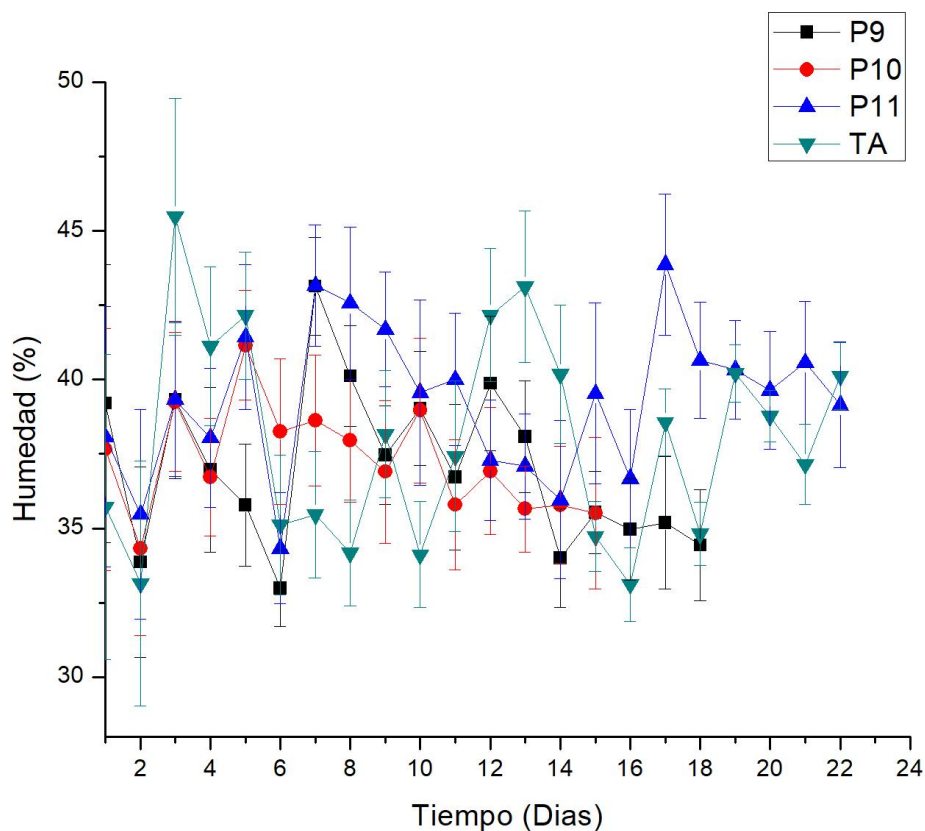


Figura 3.12 Perfiles de humedad ensayo E3

Las pruebas presentaron una humedad inicial de 39.2%, 57.6 y 38.07% para la P9, P10 y P11 respectivamente, procurando durante el periodo de compostaje que las pruebas se encontraran entre un rango de 30% a 45% de humedad, cuando el contenido de humedad está por debajo del 30% en peso fresco las reacciones biológicas de una pila de composta se retardara considerablemente, cuando el contenido de humedad es demasiado alto por encima del 70% los espacios entre las partículas del material se saturan de agua impidiendo el movimiento del aire dentro de la pila (Dalzell *et.al*, 1991).

D) Ensayo E4: Compostaje de biosólidos, RSO, arcilla y lama utilizando urea como iniciador

La Figura 3.13 muestra los perfiles de temperatura del ensayo E4

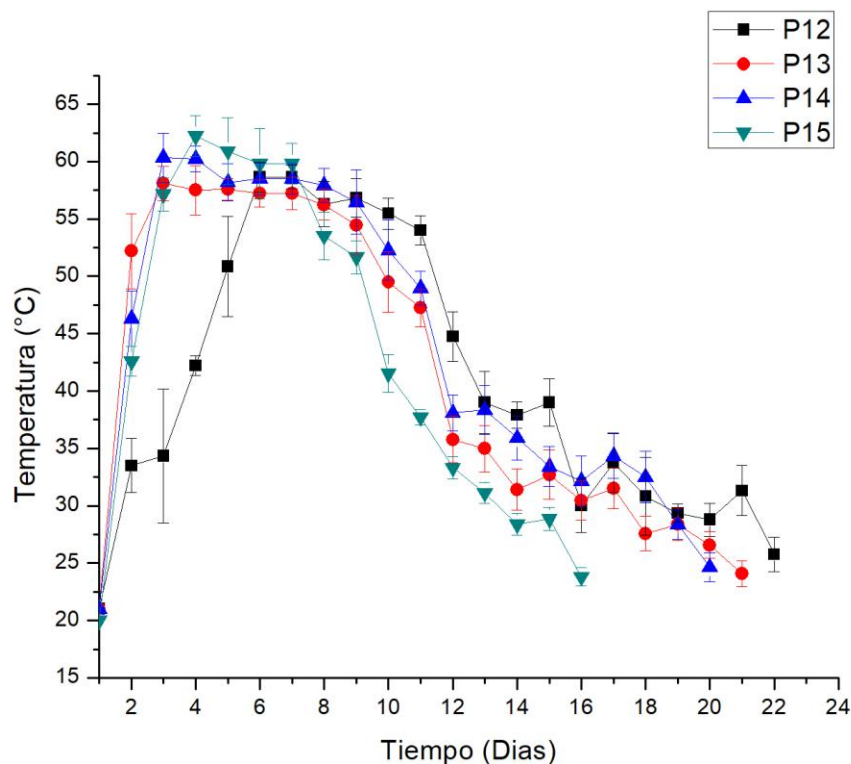


Figura 3.13 Perfiles de temperatura del ensayo E4, utilizando urea como iniciador

Para estas pruebas se muestra que el porcentaje de urea utilizado para el proceso de compostaje fue inversamente proporcional a las mayores temperaturas alcanzadas en menor tiempo, para el caso de la prueba P12 la etapa termofílica comenzó a partir del día cinco, alcanzando un valor máximo de 58.6°C al día seis y permaneciendo en temperaturas mayores a 55°C durante cinco días consecutivos con una media de 57.1°C, el proceso de compostaje para esta prueba fue de 22 días; para la prueba P13 presento el mejor incremento de temperatura al día siguiente del proceso de compostaje con un valor de 52.1°C y manteniendo temperaturas mayores a 55°C durante siete días consecutivos con una media de 56.5°C, el proceso de compostaje para esta prueba fue de 21 días ;la prueba P14 presento una mejora considerable respecto a la P12 y P13, alcanzo temperaturas mayores de 60°C durante dos días y temperaturas mayores a 55°C durante siete días con una media de 58.5°C, el proceso de compostaje para esta prueba fue de 20 días; la P15 fue la prueba que presento los mejores resultados en el proceso de compostaje, alcanzando en el día tres una temperatura de 57.1 °C y en el día cuatro presento las temperaturas más altas reportadas en la presente investigación de 62.2 °C y manteniendo temperaturas mayores a 55 °C durante cinco días consecutivos con una media de 59.9 °C, el proceso de compostaje para esta prueba fue de 16 días.

De acuerdo a los datos mostrados en la Figura 3.13 las pruebas cumplen con la adecuada sanitización para la eliminación de microorganismos patógenos, es importante señalar que las proporciones de materiales utilizadas para el Ensayo E4 son similares a las proporciones de materiales de la prueba P11 del Ensayo E3, la cual presenta las peores condiciones de operación, con lo cual se demuestra que la urea cumple adecuadamente el propósito de su implementación como iniciador y mejora el proceso de compostaje, ya que la prueba P14 muestra el menor tiempo de compostaje en 16 días.

La Figura 3.14 muestra los perfiles de pH del Ensayo E4

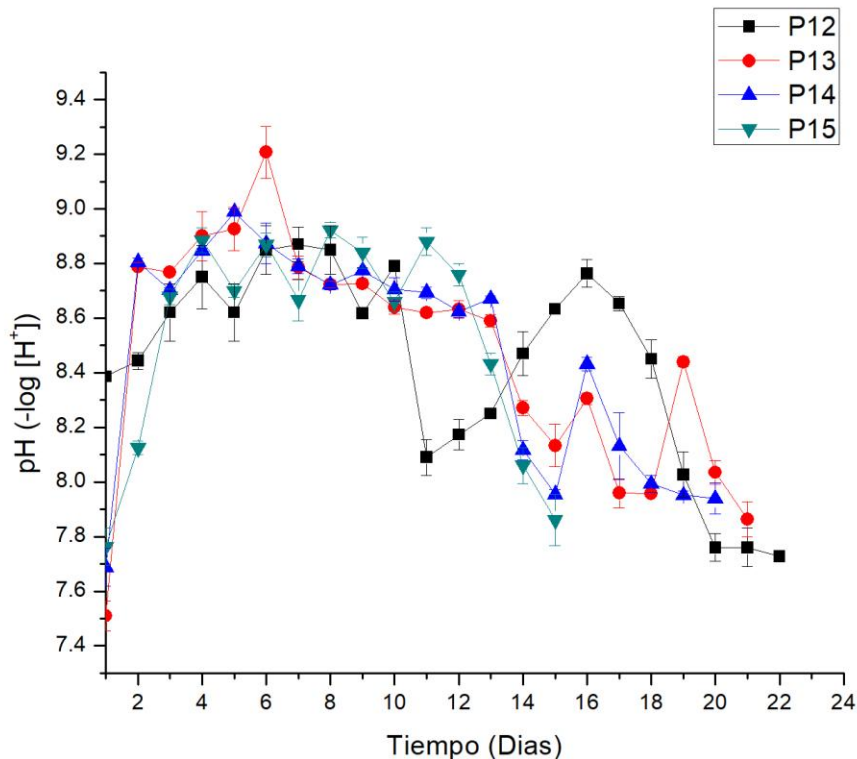


Figura 3.14 Perfiles de pH del Ensayo E4

La Figura 3.14 muestra que la prueba P12 se muestra un pH básico ya que se implementó 4% de urea como iniciador lo cual incremento considerablemente el pH al inicio del proceso de compostaje en comparación a las pruebas P13 y P14, un pH inicial de 8.0 unidades puede afectar el proceso, debido a que un pH básico puede incidir adversamente en la actividad metabólica de los microorganismos (Sunberg & Jönsson 2008; Carrillo, 2003).

Para las pruebas P13 y P14 la adición de urea fue menor, lo que permitió tener un pH neutro al inicio de proceso de compostaje, para el caso de la prueba P13 alcanzo un valor máximo de pH de 9.2 y la prueba P12 registro un valor máximo de 9. La prueba P14 se encontró dentro de rangos más bajos de pH respecto a las demás pruebas, el valor más alto encontrado fue de 8.9, estos resultados se deben a que solo se adiciono un 0.5% en peso de urea, el proceso de la transformación de la

materia orgánica se favorece con valores de pH cercanos a la neutralidad (Hamoda *et. al*, 1998), al finalizar el proceso de compostaje todas las pruebas presentaron un pH neutro.

La Figura 3.15 muestra los perfiles de humedad del ensayo E4

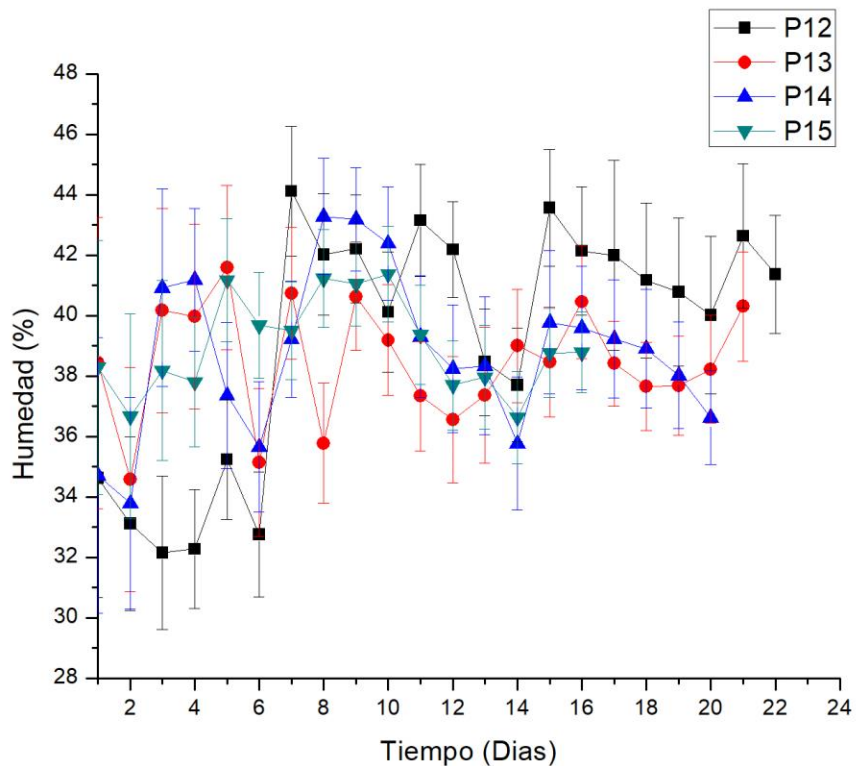


Figura 3.15 Perfiles de humedad ensayo E4

Para este ensayo se observó que las pilas presentaban una disminución de agua al día dos, para el caso de la prueba P13 fue quien presento la mayor disminución de humedad con un 3% de reducción al día dos, en base a las investigaciones previas estudiadas en el centro de compostaje (Juárez, 2014; Ballesteros, 2016), la preparación de pilas preparadas con biosólidos y RSO requiere una humedad entre 45% y 30% para obtener buenas condiciones de operación. Al mantener la humedad requerida dentro del proceso de descomposición se permitió que hubiese actividad microbiana y suficiente cantidad de aire entre las partículas de materia orgánica. Para que haya una buena descomposición hay que mantener una humedad estable,

controlada por lo que se necesita una buena aireación para el desarrollo de los microorganismos (Vansintjan & Vega, 1992).

E) Ensayo E5: Compostaje de biosólidos, RSO, arcilla y lama utilizando Bocashi como iniciador

La Figura 3.16 muestra los perfiles de temperatura del ensayo E5

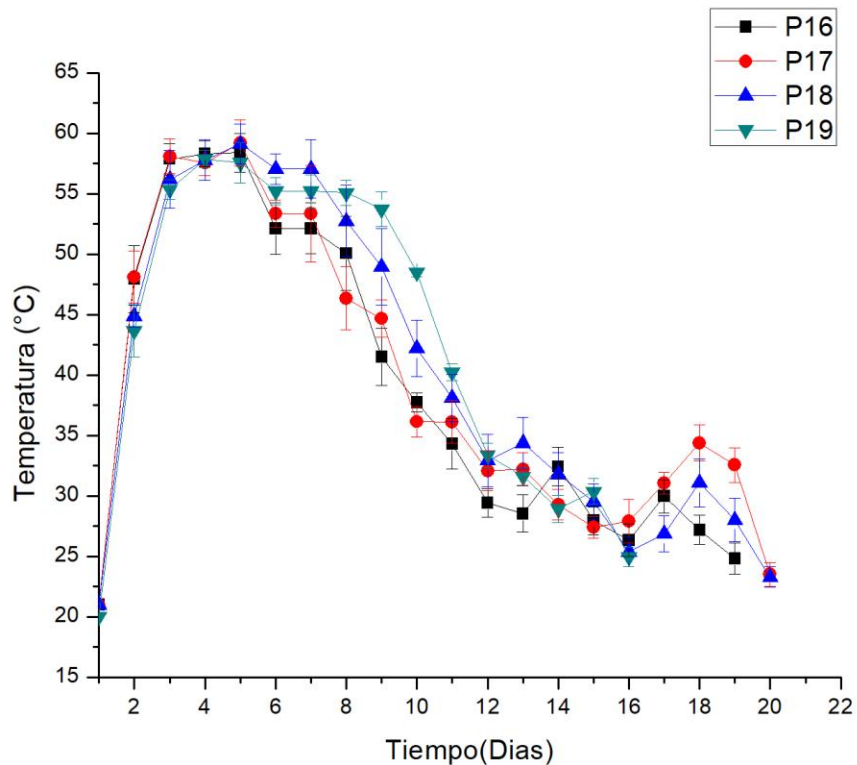


Figura 3.16 Perfiles de temperatura del ensayo E5, utilizando Bocashi como iniciador

La Figura 3.16 muestra los resultados en la implementación de Bocashi como iniciador, se observan datos muy similares en los primeros seis días para las cuatro pruebas, a partir del día siete son más notorias las variaciones. Para el caso de la P16 alcanza la temperatura máxima en el día cinco con un valor de 58.3 °C, presenta temperaturas en la fase termofílica desde el día dos y mantiene temperaturas mayores a 55 °C durante tres días consecutivos con una media de 58.1 °C, el proceso de compostaje para esta prueba fue de 19 días; la prueba P17

presenta el mejor incremento de temperatura al día dos con un valor de 48.1 °C y tres días en temperaturas superiores a 55 °C con una media de 58.2 °C, el proceso de compostaje para esta prueba finalizó en 20 días; la prueba P18 presenta temperaturas en la fase termofílica a partir del día tres y cinco días consecutivos en temperaturas superiores a 55 °C con una media de 57.4 °C, la prueba finalizó en 20 días; la prueba P19 presenta temperaturas en la fase termofílica a partir del día tres y seis días consecutivos a temperaturas superiores a 55 °C con una media de 56 °C, el proceso de compostaje para esta prueba fue de 16 días.

La Figura 3.17 muestra los perfiles de pH del ensayo E5

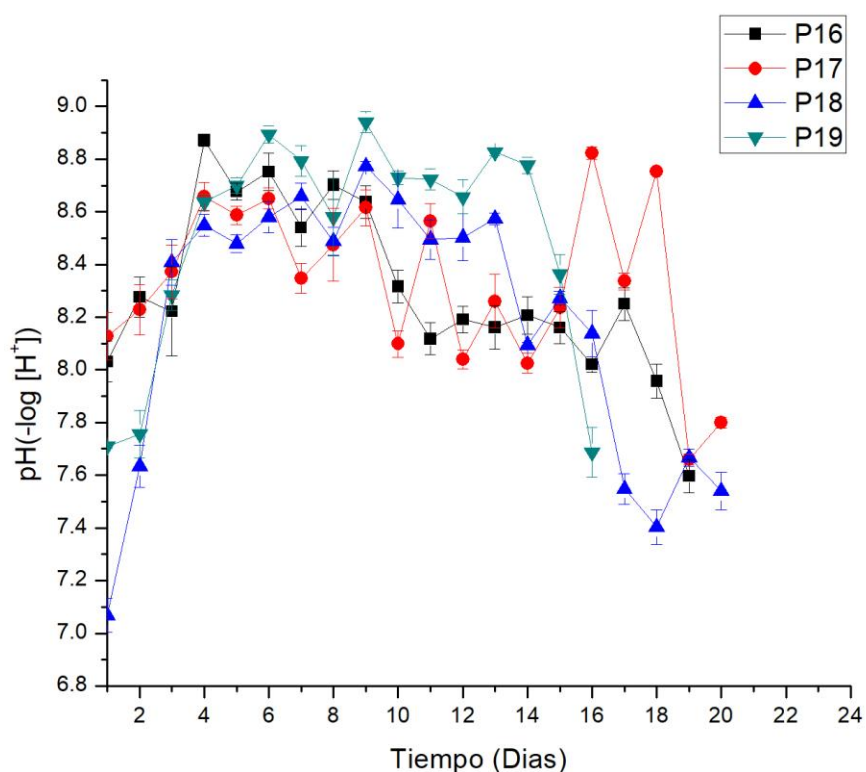


Figura 3.17 Perfiles de pH del ensayo E5, utilizando Bocashi como iniciador

La Figura 3.17 muestra que para el caso de las pruebas P16 y P17 comienzan con un pH básico, esto es debido a que presentan las mayores proporciones de Bocashi en las pilas de 15% y 10% respectivamente, dado que el Bocashi es un abono orgánico parcialmente degradado cuyo pH se encuentra en 9, debido a que es

elaborado con gallinaza, la cual presenta algunos nutrientes principales como fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, hierro, zinc, cobre y boro; pero el que mayor concentración presenta es nitrógeno con 1 a 1.3 mg/kg (Restrepo, 1998).

La prueba P18 y P19 presentan al inicio un pH cercano al neutro ya que cuenta con proporciones más bajas de Bocashi con un 5% y 2.5% respectivamente. Durante el proceso de compostaje los rangos de pH se mantuvieron en un rango adecuado para la supervivencia de los microorganismos según lo refiere Tchobanoglous (1994). El pH es de suma importancia para la retención de las bacterias en la composta ya que algunos microorganismos tales como bacterias y actinomicetos se desarrollan mejor en un pH neutro y ligeramente alcalino (Julca *et al*, 2006).

La Figura 3.18 muestra los perfiles de humedad del Ensayo E5

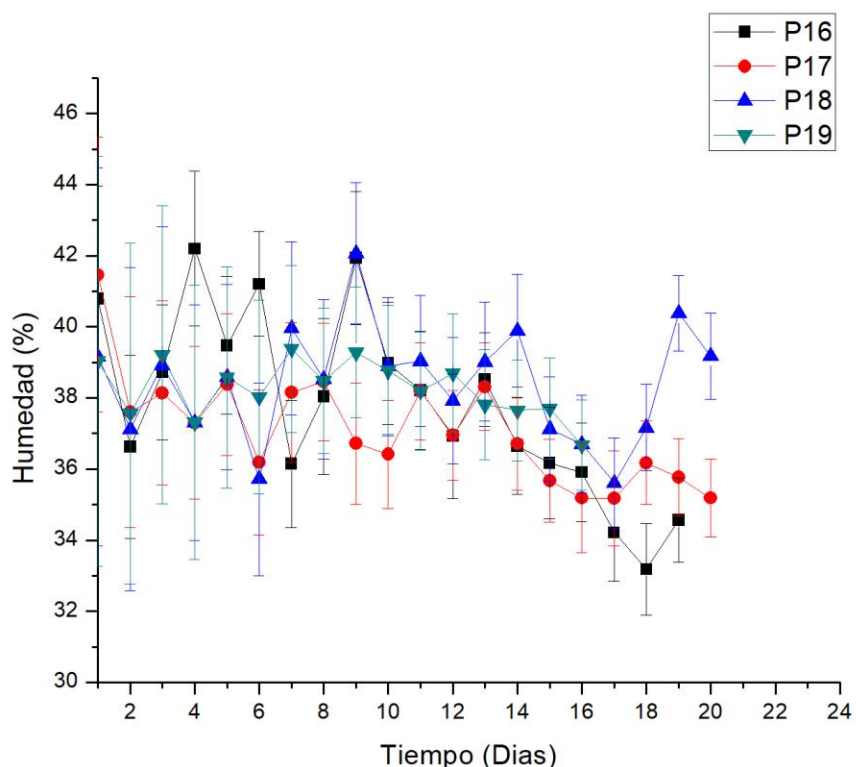


Figura 3.18 Perfiles de humedad del ensayo E5, utilizando Bocashi como iniciador

Se determinó la humedad cada 24 horas, la Figura 3.15 presenta la dinámica de esta, en general las pilas se mantuvieron en un intervalo considerable de humedad, durante el desarrollo de las pruebas se observó que cuando la humedad se encuentra por debajo del 30% no se presenta actividad microbiana para el proceso de degradación, la humedad se mantuvo en porcentajes adecuados para la sobrevivencia de los microorganismos (Cariello *et al*, 2007; Barrón, 2015).

3.4 ANALISIS DE CALIDAD DE LA COMPOSTA

Para la presente investigación, los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos a considerar en el producto terminado fueron: MO, COT, relación C/N, la relación K/Na y el NPK, que van dirigidos a evaluar el nivel de impurezas y contaminantes. La finalidad de estos parámetros es verificar el contenido de MO, los nutrientes presentes en el producto final, la presencia de metales pesados y microorganismos patógenos.

3.4.1 Análisis microbiológico

Los biosólidos antes del compostaje presentan bacterias y microorganismos patógenos (Fernandes & de Souza), para evaluar la calidad de estos ensayos se Coliformes Fecales (CF), con la finalidad de demostrar la inocuidad del producto final. En la Tabla 3.5 se mostraron los resultados de los análisis en el producto, la Tabla 3.7 en comparación con la normatividad correspondiente: NOM-004-SEMARNAT-2002 y la NTEA-006-SMA-RS-2006.

Tabla 3.7 Análisis microbiológico de coliformes fecales CF

PARAMETRO	MUESTRA	UNIDADES	RESULTADO	NOM-004-SEMARNTA-2002			NTEA-006-SMA-RS-2006 ≤ 1 000
				CLASE A < 1000	CLASE B < 1000	CLASE C < 2 000 000	
COLIFORMES FECALES	P1	UFC/gr en base seca	0	x			x
	P2		0	x			x
	P3		320	x			x
	P4		0	x			x
	P5		4	x			x
	P6		100	x			x
	P7		0	x			x
	P8		40	x			x
	P9		10	x			x
	P10		3	x			x
	P11		300	x			x
	TA		600	x			x
	P12		360	x			x
	P13		30	x			x
	P14		10	x			x
	P15		0	x			x
	P16		0	x			x
	P17		500	x			x
	P18		6	x			x
P19	0	x			x		

Fuente: SEMARNAT 2002. SMA 2006

Para los análisis microbiológicos se realizó la siembra de las muestras con las siguientes diluciones: 10^0 , 10^{-2} y 10^{-3} . Los resultados mostraron crecimiento de colonias color verde metálico para el caso de CT y color azul para el caso de CF, en las pruebas donde se presentan colonias como la P3 y P5, a pesar de ser una cuenta microbiana menor, no presenta temperaturas mayores a 55°C y debido al tiempo de degradación no es posible mantener 12 días a 45°C , el mismo caso para la P6 y en la prueba P8 faltó un día de proceso a 55°C .

En base a la NOM-004-SEMARNAT-2002 las compostas resultantes se encuentran dentro de especificación y catalogadas como clase A (para usos urbanos con contacto directo durante su aplicación y los establecidos para clase B y C).

Para la NTEA-006SMA-RS-2006 se encuentran dentro del límite establecido ≤ 1 000 UFC/gr en base seca de acuerdo con esta norma catalogada como mejorador de suelo. Hasta el momento los ensayos cumplen con la NOM-004-SEMARNAT-2002 y la norma NTEA-006-SMA-RS-2006.

Uno de los métodos propuestos para el control de estos biofertilizantes es el empleo de elevadas temperaturas. Cuando el compost es calentado a temperaturas de 38 °C durante 15 días tiene lugar una disminución considerable del número de microorganismos patógenos, a la vez que está ocurriendo la digestión mesófila de los compuestos orgánicos obteniéndose como producto CO₂, metano y amonio. Esta etapa mesófila destruye el 99.9 % de los patógenos. En la fase termófila (55 °C) se logra eliminar el 99.99% de los mismos y de esta forma se pasteuriza el material (The Biosolids Report, 2000).

Los organismos patógenos causantes de enfermedades pueden pertenecer a cualquiera de los principales tipos de microorganismos, bacterias, actinomicetos, hongos y protozoos. La mayor parte de estos organismos patógenos prefieren temperaturas por debajo de los 42 ° C ya que normalmente viven a la temperatura corporal del ser humano y animales o a temperatura ambiente de las plantas. La mayor parte morirá si se exponen durante un tiempo a condiciones más severas que las de su ambiente habitual (Dalzell *et. al*, 1991).

Sin embargo, no podemos confiar ciegamente en que el propio proceso elimina la totalidad de los patógenos, puesto que investigaciones realizadas indican que algunos patógenos tienen un umbral térmico más alto que otros como por ejemplo el virus de la Hepatitis A. Además, el tiempo y la temperatura necesaria para eliminar o reducir los peligros microbianos en la composta u otras materias orgánicas puede

variar según el clima de la región y las prácticas concretas de gestión ambiental aplicadas en cada caso (FAO, 2000). Lyon (2000) planteó que los organismos patógenos pueden sobrevivir hasta 60 días en la composta.

Teniendo en cuenta estos aspectos, los análisis microbiológicos constituyen un elemento importante para determinar la calidad sanitaria de estos productos. La densidad de coliformes fecales es utilizada como un indicador de la presencia potencial de bacterias patógenas (EPA; 1992). Las muestras que contengan menos de 1000 coliformes fecales por gramo de peso seco de compost indica que todos los microorganismos patógenos han sido destruidos (Yanko, 1988). Las pruebas cuentan con las especificaciones necesarias de temperatura que marca la NTEA-006-SMA-RS-2006, sin embargo, aún se encuentra presencia de CF, Juárez (2014) logro una adecuada sanitización en sus pruebas de compostaje, ya que únicamente en una pila se encontraba presencia de CF.

3.4.2 Análisis fisicoquímicos

Los resultados de los análisis fisicoquímicos se muestran en la Tabla 3.8 comparados con la normatividad mexicana aplicable.

Tabla 3.8 Caracterización de las pilas de compostaje

NORMA		NTEA-006-SMA-RS-2006		NMX-FF-109-SCFI-2007	NTEA-006-SMA-RS-2006	
PARAMETRO		MO (%)	COT (%)	N (%)	C/N (%)	pH
ESPECIFICACION		>15	NA*	1-4%	< 12%	6.5-8.0
PRUEBA E1	TESTIGO A	10.32	5.98	1.38	4.33	6.52
	P1	10.39	6.02	0.32	18.35	7
	P2	10.32	5.98	0.48	12.43	6.85
	P3	11.97	6.94	0.54	12.75	7.32
	P4	15.55	9.02	0.77	11.69	7.38
	P5	17.34	10.05	0.64	15.63	6.5
PRUEBA E2	P6	16.78	9.73	1.23	7.91	7.18
	P7	16.23	9.41	1.08	8.71	7.25
	P8	15.23	8.83	1.15	7.67	7.26
PRUEBA E3	P9	13.26	7.68	1.44	5.29	7.23
	P10	14.12	8.18	1.52	5.39	7.43
	P11	10.3	5.97	1.05	5.64	7.67
	TA	23.79	13.8	3.14	4.38	7.14
PRUEBA E4	P12	15.33	8.89	1.61	5.51	7.72
	P13	12.95	7.51	1.31	5.47	7.86
	P14	13.59	7.88	1.41	5.65	7.93
	P15	18.2	10.55	2.18	4.81	7.91
PRUEBA E5	P16	15.99	9.27	1.55	7.61	7.59
	P17	15.5	8.99	1.41	5.92	7.78
	P18	13.7	8.49	1.21	5.13	7.54
	P19	13.17	7.64	1.07	5.34	7.68

*NA: No aplica (No se tiene límite establecido en la norma citada).

Fuente: SCFI, 2008; SEMARNAT, 2002; SMA, 2006

La relación C/N se considera como la información más sencilla sobre la capacidad de mineralización de un material orgánico, ya que los contenidos de carbono y nitrógeno son esenciales para la vida y la reproducción de los microorganismos. Cuando la relación C/N es menor de 20 se presentará una mayor velocidad y magnitud de descomposición, por el contrario, si la relación C/N es mayor de 25 el

proceso de descomposición es lento lo que genera inmovilización de N por parte de los microorganismos (Feral et al. 2003; Cerrato et al. 2007).

En términos generales el compostaje se puede definir como una biotécnica donde es posible ejercer un control sobre los procesos de biodegradación de la materia orgánica (Lizarazo, 2008). Lo característico de estos compuestos es que son identificables por la química orgánica (proteínas y aminoácidos, hidratos de carbono simples y compuestos, resinas, grasas, ligninas y otros), estas sustancias se consideran como fuentes de nutrientes para las plantas y los organismos del suelo cuando se descomponen por medio de un proceso conocido como mineralización, igualmente, se les atribuyen actividades estimulantes e inhibitoras de crecimiento de las plantas, con la producción de antibióticos y vitaminas (Zapata, 2007).

De otra parte, en una pila de material en compostaje, lo deseable es que prevalezcan los metabolismos respiratorios de tipo aerobio, tratando de minimizar los procesos fermentativos y las respiraciones anaerobias, ya que los productos finales de este tipo de metabolismo no son adecuados para su aplicación agronómica y conducen a la pérdida de nutrientes; teniendo en cuenta además que la fermentación no es sinónimo de transformación orgánica mediante procesos aerobios.

Otra medida de la calidad consiste en la caracterización química de la composta generalmente basada en dos criterios: valor agronómico y contenido de metales pesados. Primero debe ser evaluado el contenido de N, P, K, y elementos traza (Cu, Zn, Mn, Fe, Co, Mo), el segundo por el contenido de metales pesados; Sin embargo, muchos países establecen unas especificaciones diferentes para las condiciones de la composta (Leone, 2007).

En el ensayo E1 se observa que las mejores pruebas fueron la P3 y P4 donde el porcentaje de MO fue de 9.02% y 10.05% respectivamente. En la prueba E2 la mejor prueba fue la P8 con 8.83% y 1.15% de N, ya que el objetivo de la prueba era

determinar la frecuencia de aireación que presentara la mayor degradación posible durante el proceso de compostaje y la P8 es quien presenta el menor porcentaje de MO.

Al finalizar los primeros dos ensayos del trabajo, se deduce que las pilas de interés para continuar con el ensayo E3, son del ensayo E1 la pila P4 por las condiciones de proceso que presento en cuanto a temperatura de operación y del ensayo E2 la pila P8 por los mejores parámetros de degradación de MO.

En el ensayo E3 la mejor prueba fue la P10, ya que presenta las mejores condiciones de proceso en cuanto a temperatura y pH, así como el menor tiempo de operación que fue de 15 días.

Los resultados del ensayo E4 muestran que la prueba P15 presenta las mejores condiciones de proceso en cuanto a temperatura y pH, así como la mejor degradación de MO y el menor tiempo de operación que fue de 16 días, la implementación de urea como iniciador mejoro los resultados de operación de las pilas de compostaje a bajas cantidades como fue 1% y 0.5% respecto a las pilas de compostaje de RSO.

El ensayo E5 muestra que la prueba P19 presenta seis días consecutivos en condiciones óptimas para la sanitización, un pH no tan variable y finalizando en un valor cercano al neutro, así como la mejor degradación en cuanto a nitrógeno, así como un tiempo de operación de 16 días.

a) Análisis de metales pesados P4, P8, P11, P15 y p18

El análisis de metales pesados es importante para dar cumplimiento a las normas vigentes en México, para utilizar el biosólido en el proceso de compostaje y utilizarse como un mejorador de suelos y en agricultura. Para la presente investigación se consideraron las normas mexicanas NOM-004-SEMARNAT- 2002 y la NTEA-006-SMA-RS-2006 como parámetros de referencia.

En la Tabla 3.9 se muestran los resultados de la composta de todos los ensayos. Se analizaron los metales Pb, Cu, Cd y Zn debido a que son los que se encuentra con mayor frecuencia en los biosólidos de las PTAR municipales, por su gran movilidad en los ecosistemas y su tendencia a bioacumularse y biomagnificarse. La concentración de los metales en la composta, en las cinco pruebas realizadas se encuentra dentro de especificación de acuerdo a las normas NTEA-006-SMA-RS-2006 y NOM-004-SEMARNAT-2002.

Tabla 3.9 Metales pesados en composta

PARAMETRO			METALES PESADOS					P %	K/Na	NPK
			Pb (mg/Kg)	Cu (mg/Kg)	Cd (mg/Kg)	Zn (mg/Kg)	Ni (mg/Kg)			
LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES	NTEA-006-SMA-RS-2006		5	30	1	90	5	> 0.1	> 2.5	< 5
	NOM-004-SEMARNAT-2002	EXCELENTES	300	1 500	39	2 800	420	-	-	-
		BUENOS	840	4 300	85	7 500	420	-	-	-
PRUEBA	E1	P4	8	16	ND*	ND*	12	0.27	0	1.04
	E2	P8	14	62	ND*	440	16	0.21	1.34	1.47
	E3	P11	111.2	120.8	4.8	205.6	38.4	0.26	1.36	1.77
	E4	P15	63.2	128	4.8	206.4	3.79	0.20	0.97	3.32
	E5	P19	50.4	69.6	6.4	208	36	0.38	1.66	2.73

K/Na: relación Potasio-Sodio; NPK: relación Nitrógeno-Fosforo-Potasio; * ND: No detectable.

Fuente: SEMARNAT, 2002; SMA, 2006

La Tabla 3.9 muestra que en general, en los ensayos se observa, que las concentraciones de los metales analizados no rebasan las concentraciones máximas permitidas por la norma NOM-004-SEMARNAT-2002, siendo catalogados como excelentes, por otra parte para la NTEA-006-SMA-RS-2006 la concentración de Pb no cumple para las pruebas, para el caso de Cu no se cumple la norma en la P8, P11, P15 y P19, para el Cd no se detectó presencia de este metal en las pruebas P4 y P8 mientras que en el resto no cumplen, para el caso de Zn únicamente cumple la P4 y en el Ni no se cumple con la norma para todas las pruebas. Los datos reportados son similares a los presentados por Ballesteros (2016), a excepción del Zn, Pb y Cd, en su investigación presenta concentraciones de Zn entre 355 y 515

mg/Kg al final de sus pruebas de compostaje, mientras que para el caso del Pb reporta concentraciones entre 38 y 41 mg/Kg que es más bajo a lo aquí reportado, para el caso del Cd se identifica presencia del metal y en el estudio anterior no fue cuantificable.

Por otra parte, Juárez (2014) presenta una baja concentración en cuanto a Pb y Cd, para el caso del Pb reporta la máxima concentración de 2.4 mg/Kg y del Cd <1 mg/Kg. Juárez (2014) demostró que tanto el cromo (Cr) como el mercurio (Hg) se encuentran en bajas concentraciones dado el origen de los biosólidos utilizados y se cumplen perfectamente con las NTEA-006-SMA-RS-2006 Y la NOM-004-SEMARNAT-2002, por lo que para la presente investigación estos dos metales no se determinaron.

Se han encontrado diversos estudios de compostaje de biosólidos con otros sustratos, entre los más comunes los restos de poda. La composta con restos de poda y biosólidos presentó altas concentraciones solubles de potasio, sodio, nitratos y cloruros como es la tendencia de los materiales que contienen lodos de depuradora (Merrington *et. al*, 2003).

Utria y colaboradores (2006) evaluaron la descomposición química y biológica de los lodos del tratamiento de aguas residuales urbanas, procedentes de en una planta depuradora de aguas residuales. En él se evidenció que estos residuos orgánicos presentan niveles de, fósforo (P) y calcio (Ca) relativamente altos, y los niveles de magnesio (Mg) y potasio (K) se presentan en concentraciones bajas; en todos los casos los contenidos de estos son comparables con los abonos orgánicos más utilizados en la agricultura cubana y similares a los encontrados en otros biosólidos a nivel internacional. Los contenidos de metales pesados se encuentran en niveles inferiores a los máximos permisibles establecidos por las leyes de varios países para ser aplicados en la agricultura.

Por lo general la composta contiene grandes cantidades de macro y micronutrientes disponibles para las plantas. Sin embargo, es importante determinar el contenido de nutrientes a través de un laboratorio certificado que se especialice en análisis de composta. Los abonos orgánicos han sido catalogados principalmente como enmiendas o mejoradores de suelo. Una de las principales preguntas que siempre se ha generado con respecto a estos materiales, es con relación a su capacidad de suplemento de nutrimentos a los cultivos. Se sabe que esta propiedad depende del grado de mineralización de los materiales y está en función no solo de las propiedades de la materia prima y del proceso de fabricación, sino también de las condiciones imperantes en el campo para su consecuente descomposición (Evanylo *et al*, 2008; Meléndez, 2003; Bertsch, 2003).

Dentro de las metodologías disponibles para abonos orgánicos, la más utilizada es el análisis del contenido de nutrimentos totales, la cual brinda una aproximación de la riqueza total de nutrimentos de cualquier material; pese a ello, las cantidades resultantes no son necesariamente las que están disponibles para las plantas, ya que no indica el plazo de su liberación (Meléndez 2003). Para la presente investigación se evaluó el índice NPK, ya que es el que más comúnmente es utilizado en los fertilizantes, así también se tomó en consideración la relación K/Na, debido a que no se encuentran datos en la literatura para ser comparados, únicamente se siguen las consideraciones de las normas vigentes, donde el índice NPK es recomendable sea más bajo que 4 y la relación K/Na mayor a 2.5.

Dentro de las metodologías disponibles para abonos orgánicos, la más utilizada es el análisis del contenido de nutrimentos totales, la cual brinda una aproximación de la riqueza total de nutrimentos de cualquier material; pese a ello, las cantidades resultantes no son necesariamente las que están disponibles para las plantas, ya que no indica el plazo de su liberación (Meléndez 2003). Otras metodologías como los bioensayos han sido también propuestas para evaluar la capacidad de suplemento de los abonos orgánicos. La mejor prueba debería involucrar el crecimiento de plantas indicadoras en el sustrato orgánico, aunque este análisis

resulta poco práctico para su uso rutinario ya que requiere de varios meses para realizarse (Vandevivere y Ramírez 1995a y 1995b; Alvarado & Briceño 2002; Schweizer *et. al*, 2003).

Barenque, (1991) Menciona que el nitrógeno es absorbido por las plantas en forma de nitrato (NO_3) y amonio (NH_4). Generalmente se entiende que el amonio es absorbido y utilizado primeramente por las plantas jóvenes. Mientras que el nitrato es la forma principal para utilizarlo durante el periodo largo de desarrollo. El nitrógeno tiene numerosas funciones en la planta. El ion NO_3 sufre transformaciones después esto es absorbido y reducido a la forma amino. Entonces es utilizado en forma de aminoácidos. Los aminoácidos son esenciales para la formación de proteínas y son considerados estos componentes de estos. En adición a aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos y bases nitrogenadas, el nitrógeno es también componente de compuestos de otras plantas incluyendo nucleótidos, amidas y aminas. Por lo tanto, el N juega un papel clave en muchas reacciones metabólicas.

Adams, (1986). Menciona que el fósforo se considera como un elemento nutritivo mayor igual que el N y K, sin embargo, en la mayoría de las plantas se presenta en menores cantidades que estos. El fósforo es absorbido por las plantas en cualquiera de las formas como ion orto fosfato monovalente (HPO_4) o como ion orto fosfato divalente (H_2PO_4). El ion absorbido es determinado por el pH del suelo. Cuando el nitrógeno y el fósforo son físicamente y químicamente asociados al suelo, la absorción del fósforo aumenta. El fósforo es un constituyente de compuestos de la planta tal como enzimas, proteínas y es un componente estructural de fosfoproteínas, fosfolípidos y ácidos nucleicos, por lo tanto, juega un papel importante en la vida de las plantas e importante también en el crecimiento reproductivo, la división celular, síntesis de azúcar, grasas y proteínas.

El potasio es absorbido como K^+ . La forma asimilable para las plantas del total del potasio es generalmente pequeña. A diferencia de otros elementos no forma parte de los componentes de la planta. Sus funciones son más bien de naturaleza catalítica. El potasio se enlaza iónicamente al piruvato quinasa que es esencial en la respiración y en el metabolismo de carbohidratos. Es un constituyente de la fotosíntesis bajo condiciones de baja intensidad (Bidwell, 1979; Tisdale & Nelson, 1991; Wallace, 1961).

Devlin (1980), menciona que en la planta este elemento es requerido para turgencia de esta y mantiene el potencial osmótico de las células. Esta regulación osmótica indica el papel que juega el potasio en relación con el agua de la planta, retención de agua en tejidos y transporte de largas distancias de agua y asimilados en el floema y xilema. Este también tiene funciones en la estabilización de pH en la célula. El Potasio se requiere a la vez para producción de fosfato de alta energía (ATP). Parece que actúa como activador o catalizador de enzimas que intervienen en la síntesis de ciertas uniones peptídicas. En las regiones meristemáticas que son las más activas de la planta como yemas, hojas tiernas y extremos de raíces se concentra más este elemento. Esta acción en las células tiene efecto en el desarrollo normal de las mismas, por lo tanto, aumenta la resistencia al alojamiento de plagas y enfermedades.

3.4.3 Parámetros físicos: olor, color, apariencia y volumen

Los aspectos relativos a la calidad de la composta pueden abordarse desde una doble perspectiva: legal o agronómica. La evaluación de la calidad dependerá en gran medida del criterio o punto de vista de partida, desde el propio concepto de composta, que admite diferentes definiciones. La calidad de la composta no es un concepto absoluto, sino que depende de los usos a que se destine. Puede definirse como “la capacidad o aptitud de la composta para satisfacer las necesidades de las plantas, con un mínimo impacto ambiental y sin riesgo para la salud pública” (Ansorena *et.al*, 2014).

Se han propuesto diversos criterios (físicos, químicos y biológicos) para estimar la madurez del compost, pero ninguno de ellos es operativo aisladamente, para su aplicación a todo tipo de materiales. Por tanto, es imprescindible la utilización combinada de diversos parámetros indicadores de la actividad microbiana durante el compostaje y de la “humificación” del material (López & Sainz, 2011). Señalan además que los métodos propuestos para la evaluación del grado de madurez pueden agruparse en cinco tipos, según la naturaleza del parámetro que evalúan:

- a) Parámetros sensoriales de la madurez (test o criterios de tipo físico): olor, color y granulometría.
- b) Evolución de parámetros de la biomasa microbiana: temperatura, emisión de CO₂, consumo de O₂, y actividad deshidrogenasa.
- c) Estudio de la materia orgánica: índice de degradabilidad, lípidos extraíbles, carbono soluble (C_w) y absorbancia a 460 y 660 de extractos pirofosfato.
- d) Indicadores químicos de la madurez: relación ácidos fúlvicos/ácidos húmicos (AH/AF), ratio entre carbono orgánico total y nitrógeno orgánico total (Cot/Not), ratio entre C y N solubles (C_w/N_w), relación entre capacidad de intercambio catiónico y Cot (CIC/Cot), y ratio N-NH₄⁺ /NNO₃⁻ .
- e) Métodos biológicos (test de fitotoxicidad): germinación y/o crecimiento de berro, cebada u otras especies.

Se presentan en la Tabla 3.10 los aspectos que presenta la apariencia final de las pilas de composta de la presente investigación.

Tabla 3.10 Apariencia final de la composta

PARÁMETRO	OBSERVACIÓN
Textura	Granular fina
Color	Marrón similar a tierra
Apariencia	Porosa
Peso	Reducción entre 30 y 45%
Olor	Tierra húmeda (Actinomicetos)

El color cambió del negro característico de los biosólidos a color marrón, tanto para las pilas de biosólidos como las de RSO, lo que indica la estabilidad del producto, al igual el olor de los biosólidos y RSO fueron desapareciendo gradualmente, no se percibieron aromas azufrados (compuestos reducidos de azufre) causados por degradación anaerobia, al final se percibió un olor a suelo húmedo, característico al que producen los *Streptomyces* al contacto con el agua, lo que indica un adecuado funcionamiento del proceso y estabilidad en el producto (Juárez, 2014). La emanación de olores es mucho más intensa si el proceso de fermentación se da en forma anaerobia, es decir en presencia del oxígeno. El proceso anaeróbico, además de producir mal olor, exhala gases peligrosos y no siempre se encuentra un producto correctamente estabilizado. Asegurar la circulación de aire y de humedad conveniente es para garantizar que el proceso permanezca aerobio, reduciendo así la emanación de olores desagradables. De acuerdo a Rubinoff (2001) para conservar la composta es necesario mantener una temperatura húmeda y caliente para que este bien, las características físicas deben estar compuestas por un color café oscuro, no debe presentar más del 10% de restos del material original ni malos olores y consistencia polvosa.

Las imágenes de la Figura 3.18 muestran el cambio que ocurrió en los materiales, la Figura 3.18a) corresponde a la P14 recién hecha. La Figura 3.18 b) es el último día de maduración de la misma prueba.

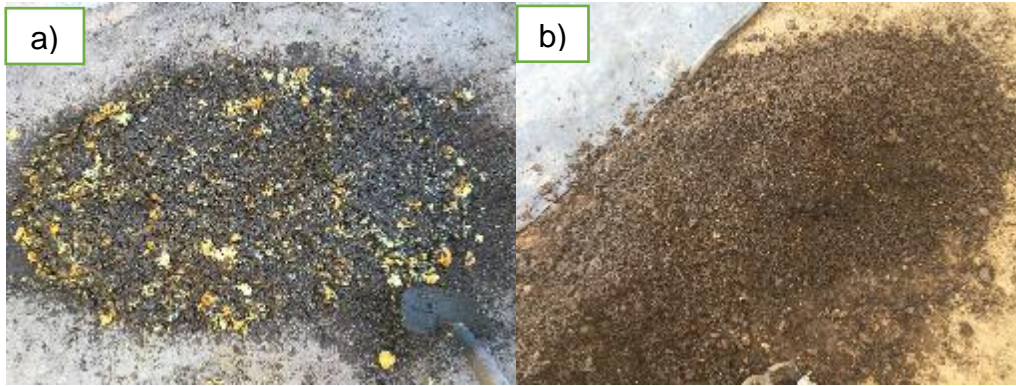


Figura 3.19 Cambios en el compostaje. a) Inicio: color negro, mezcla heterogénea, textura granular gruesa; b) termino: color marrón oscuro, mezcla más homogénea, apariencia porosa

Esto indica que hubo una fuerte población de microorganismos benéficos para que se diera una buena descomposición de las diferentes mezclas orgánicas. Es evidente también señalar que se encontraron poblaciones de microorganismos que ayudan a la descomposición de los materiales orgánicos. Antes de ser víctimas de los microbios del suelo, los restos vegetales y animales son atacados, descompuestos y digeridos por animales más evolucionados y visibles a simple vista que pertenecen a los grupos de artrópodos (insectos, arañas, crustáceos y miriápodos) y al grupo de los anélidos, entre ellos los gusanos de tierra (Castillo *et al*, 2002).

4. CONCLUSIONES

En los ensayos realizados se logró finalizar el proceso de compostaje en un tiempo de 9 a 22 días. Las diferentes tasas de arcilla y biosólido, la variación de la tasa de aireación, el acondicionamiento previo de los materiales y la implementación de iniciadores aceleran el proceso de compostaje.

De los ensayos realizados el ensayo E1 la mejor proporción de materiales para el compostaje de biosólidos, fue de 77% biosólidos, 15% arcilla y 8% lama, bajo estas condiciones se obtuvieron los mejores resultados en el control de las variables de proceso y en la calidad del producto, el proceso de esta prueba finalizó en 13 días.

Para la prueba E2, utilizando las mejores proporciones de materiales de la prueba E1: 77% de biosólidos, 15% de arcilla y 8% de lama, la mejor frecuencia de aireación fue cada 72 horas, ya que presentó el menor porcentaje de MO en la composta, el proceso de esta prueba finalizó en 11 días.

Para la prueba E3 se utilizó la frecuencia de aireación cada 48 horas, la mejor prueba fue la P11 con la siguiente mezcla de materiales: 47% RSO, 30% biosólidos, 15% arcilla y 8% lama, ya que presentó el menor porcentaje de MO y nitrógeno en la composta, el proceso de esta prueba finalizó en 22 días.

Para la prueba E4 se utilizó la frecuencia de aireación cada 48 horas, la mejor prueba fue la P15 con la siguiente mezcla de materiales: 46.5% RSO, 30% biosólidos, 15% arcilla, 8% lama y 0.5% urea, lo que se reflejó en la uniformidad de los perfiles de las variables de proceso, la prueba presentó los perfiles de temperatura más altos de la presente investigación, el proceso de esta prueba finalizó en 16 días.

Para la prueba E5 se utilizó la frecuencia de aireación cada 48 horas, la mejor prueba fue la P19 con la siguiente mezcla de materiales: 44.5% RSO, 30% biosólidos, 15% arcilla, 8% lama y 2.5% Bocashi, lo que se reflejó en la uniformidad de los perfiles de las variables de proceso y en la calidad del producto, el proceso de esta prueba finalizó en 16 días.

El comparativo de los ensayos E4 y E5 para determinar el mejor iniciador quien cumple mejor el objetivo es el ensayo E4, ya que se utiliza una cantidad baja de urea y es un producto más barato, la elaboración de Bocashi tarda entre 16 y 20 días y se incrementan considerablemente los costos de operación respecto a la urea.

El iniciador logró el objetivo de reducir el tiempo de compostaje de 22 a 16 días, estos datos se muestran en la P11 en comparación con la P15, ambas pilas manejan composiciones semejantes en cuanto a biosólidos y RSO y en la P15 se implementó urea, lo que se reflejó en la uniformidad de los perfiles de las variables de proceso.

En las pruebas realizadas se alcanzaron temperaturas favorables para la sanitización de la mayoría de las pruebas, aun así, se encuentra presencia de coliformes fecales en algunas pruebas, las pruebas seleccionadas se encuentran sin presencia de microorganismos patógenos. Por lo que el producto se encuentra catalogado como clase A en base a la NOM-004-SMA-2002 y da cumplimiento a la NTEA-006-SMA-RS-2006.

En cuanto a la presencia de metales pesados, la composta final de las pruebas seleccionadas de los ensayos se encuentra dentro de la categoría de excelente, de acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT-2002.

RECOMENDACIONES

Es importante considerar que entre menor sea el tamaño de partícula de los materiales a compostar se tendrá un menor tiempo en el proceso de compostaje.

Si al siguiente día de preparar la pila de composta no se observa un incremento considerable en la temperatura de operación, se recomienda airear y adicionar agua hasta lograr un intervalo de 40 a 45% de humedad en la pila.

Se recomienda implementar en las mezclas propuestas otro tipo de enmiendas orgánicas como restos de podas y hojas, así como materiales con un alto contenido en carbono y de esta forma contribuir a mejorar la relación C/N del producto final.

5. REFERENCIAS

- Adams, P. (1986). Mineral nutrition. In the tomato crop, Por Atherton, J. G. y Rudich (eds) Chapman and hall pp. 230-234.
- Adani, F., Tambone, F., Genevini, P. (2009). Effect of compost application rate on carbon degradation and retention. *Soil Waste Management*: 29, 174-179.
- ALLIENDE, E. (2006). El peso de los lodos. Chile: Induambiente, s.f. (Documento Web, ultimo acceso 10/ Diciembre/ 2016) <http://www.induambiente.cl/elpeso.htm>
- Almansa, M & Fernández, M. (2003). Velocidad de mineralización del estiércol vacuno según su estabilidad. *Residuos Ganaderos*. Páginas 30-36.
- Alvarado G & Briceño J. (2002). Metodologías recomendadas para el análisis de abonos orgánicos, pp. 89-94. In: J. Briceño, F. Chaverri, G. Alvarado, A. Gadea. *Materia orgánica: características y uso de los insumos en suelos de Costa Rica*. EUNA, Costa Rica.
- Ángel, R. S. (2004). Un enfoque de manejo integrado para el sostenimiento de la fertilidad de los suelos y la nutrición de los cultivos. Honduras: Jesús Aguilar Paz. 35 pp.
- Ansorena, J; Batalla E. y Merino, D. (2014). Evaluación de la calidad y usos del compost como componente de sustratos, enmiendas y abonos orgánicos. (Documento Web, ultimo acceso 24/ Octubre/ 2018)
- Ashraf, R., Shahid, F., & Ali, T. A. (2007). Association of fungi, bacteria and actinomycetes with different composts. *Pakistan Journal of Botany*, 39(6), Pags 2141-2151.
http://www.fraisoro.net/FraisoroAtariaDoku/Evaluacion_de_la_calidad_y_usos.pdf.

- Ballesteros-Trujillo. M. (2016). Elaboración de un mejorador de suelos a partir de residuos orgánicos, lixiviados y biosólidos. (Tesis de Maestría). Instituto Tecnológico de Toluca.
- Banco Mundial. (2012). What a Waste: A global Review of Solid Waste Management. Urban Development & Local Government Unit World Bank Journal, 28(19), 1-116.
- Barrena, R. (2006). Compostaje de residuos sólidos orgánicos. Aplicación de técnicas respirométricas en el seguimiento del proceso. Memoria de Tesis. Universitaria Autónoma de Barcelona-Escuela Universitaria Politécnica del Medio Ambiente.
- Barenque, O. 1991. Evaluación del Ácido Húmico (Humitrón) y del Fertilizante foliar (Foltrón Plus) en el sistema de conducción del tomate (*Lycopersicon esculentum* c M). Tesis de Licenciatura. UAAAN. Buenavista, Saltillo, Coahuila. México.
- Barrón F. 2013. Optimización del proceso de composta producida a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos que se generan en la ciudad de México, Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo, Instituto Politécnico Nacional, México, D.F.
- Benitez, E.; Sainz, H.; Nogales, R. (2005); Hydrolitic enzyme activities of extracted humic during the vermicomposting of lignocelulosic olive waste. *Biores. Technol.*: 96, 785-790.
- Bertsch F. (2003). Abonos orgánicos: manejo de la fracción orgánica y de los aspectos biológicos del suelo, p. 133. In: G. Meléndez, E. Molina (eds). *Fertilizantes: características y manejo*. ACCS, Costa Rica.
- Bidwell, R.G.S. (1986). *Fisiología Vegetal*. Primera edición en español. A.G.T. Editor, S.A. México, D.F.

- Bissala, Y. Y.; Payne, W. (2006). Effect of the pit floor material on compost quality in Semiarid West Africa. *Soil. Sci. Soc. Am.*, vol. 70, pp. 1140–1444. ISSN: 0361-5995 (print), ISSN: 0361- 5995 (online).
- Cariello M., Castañeda L., Riobo I., González J. (2007). Inoculante de microorganismos endógenos para acelerar el proceso compostaje de residuos sólidos urbanos. Universidad Nacional de Entre Ríos. Argentina.
- Carrillo, L. (2003). Actividad microbiana. *Microbiología Agrícola*. Capítulo 3 (Documento web, ultimo acceso 08/Junio/2018)
<http://www.bio-nica.info/biblioteca/Carrillo2003Hongos.pdf>
- Castillo, A; Eresue, M; Rodríguez, L; Rugama, J, A. (2002). Manejo integrado de la fertilidad de los suelos en Nicaragua. Managua, Nicaragua. 130 pp.
- Cerrato, M., Leblanc, H. y Kameko, C. (2007). Potencial de mineralización de nitrógeno de bokashi, compost y lombricompost producidos en la Universidad EARTH. *Revista Tierra Tropical* 3(2):183-197.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2015). Estadística del agua en México.
- CONTRERAS, A. (1996). Efecto de la adición de nitrógeno y cenizas de combustión dendroenergética en el proceso de compostización de una mezcla de cortezas de especies nativas. Tesis Ing. Forestal. Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. 73 p.
- Cuevas, G., & Walter, I. (2004). Metales pesados en maíz (*Zea mays* L.) cultivado en un suelo enmendado con diferentes dosis de composta de lodo residual. *Revista internacional de Contaminación Ambiental*, 20(2), 59-68.

Dalzell, H., A. Biddlestone, K. Gray y T. Thurairajan. (1991). Manejo del suelo: producción y uso del composte en ambientes tropicales y subtropicales. Boletín de suelos FAO (56), Roma. Italia. 177 pp.

De Carlo, E., Rosa, A., Benintende, S., Cariello, M., Castañeda, L., Figoni, E., Mascheroni, F. (2001). Estudio de la población microbiana en las etapas iniciales del compostaje. Ceres, 48, 699-715.

De Luna, V. A.; Vázquez, A. E. (2009). Elaboración de Abonos Orgánicos. México: Universidad de Guadalajara. pp. 4-12.

Devlin, M. R. (1980). Fisiología vegetal. Editorial omega S.A. 3ª edición.

DINAMA (Dirección Nacional de Medio Ambiente). (1996). "Manual de procedimientos analíticos para aguas y efluentes. (Documento Web, último acceso 27/Mayo/2017)

http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/docs/pdfs/manual_dinama.pdf

DOF (Diario Oficial de la Federación). (2002). NOM-004-SEMARNAT-2003. Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final Publicado el viernes 15 de Agosto de 2003.

DOF (Diario Oficial de la Federación). (2004). NOM-083-SEMARNAT-2003. DOF (Diario Oficial de la Federación. Establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y listados de los residuos peligrosos. Publicado el miércoles 20 de octubre de 2004.

DOF (Diario Oficial de la Federación). (2005). NOM-052-SEMARNAT-2005. Establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y listados de los residuos peligrosos. Publicado el viernes 23 de junio de 2006.

DOF (Diario Oficial de la Federación). (2015). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Publicado el miércoles 08 de octubre de 2003.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. FEDERAL REGISTER. (2002). Title 40—Protection of Environment:part 503--Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge. United States : Environmental Protection Agency.

Espinosa Hernández, V., Maldonado Torres, R., Rubiños Panta, J. E., Hernández Acosta, E., Ojeda Trejo, E., & Corlay Chee, L. (2010). Sales solubles y metals pesados en el suelo tratados con biosólidos. *Revista Champingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, XVI(2), 241-251.

Evanylo G., Sherony C., Spargo J., Starner D., Brosius M., Haering K. (2008). Soil and water environmental effects of fertilizer-manure-, and compost-based fertility practices in an organic vegetable cropping system. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 127:50-58.

FAO (2000). Inocuidad y calidad de los alimentos en relación con la agricultura orgánica. 22. Conferencia Regional de la FAO para Europa. Oporto, Portugal, 24-28 de julio 2000.

FAO. (2013). Manual de compostaje del agricultor, Experiencias en América Latina. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>

Feral, C., Epstein, H., Otter, L., Aranibar, J., Shugart, J., Macko, S. y Ramontshoz, J. (2003). Carbon and nitrogen in the soil– plant system along rainfall and landuse gradients in southern Africa. *Arid Environments* 54:327-343.

- Fernandes, F. & de Souza, S. (2001). Capítulo 2: Estabilização de lodo de esgoto. p. 29-55. En: Andreoli, C. Resíduos sólidos do saneamento: processamento e disposição final. ABES y PROSAB, Río de Janeiro, Brasil.
- Flores Martínez, Paulina., García-Rojas, Hilda R. Guerrero. "Panorama actual de la disposición de basura en el tiradero a cielo abierto de Tarímbaro, Michoacán: una visión socioeconómica". Revista Ciencia Nicolaita. 2014. 62 págs: 49-70
- Franco, F. (2010). Composteo de lodos residuales utilizando arcilla como sustrato inócuo. Instituto Tecnológico de Toluca.
- Franke-Whittle, I. H., Confalonieri, A., Insam, H., Schlegelmilch, M., & Krner. (2014). Changes in the microbial communities during co-composting of digestates. Waste Management, 34(3), 632-641.
- Hamoda, M. F., Abu Qdais, H. A., Newham, J. (1998). Evaluation of municipal solid waste composting kinetics. Resources, Conservation and Recycling, 23(4), 209-223.
- Heerden, V. I., Cronjé, C., Swart, S. H. y Kotzé, J. M. (2001). Microbial chemical and physical aspects of citrus waste composting. Bioresource Technology, 81: 71-76
- Hernández, M. E. (2014). Revalorización de los Residuos Sólidos Orgánicos y Biosólidos mediante composteo. Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Handbook, 01(722), 103-113.
- IBTA (Instituto de Tecnología Agropecuaria). (1995). Revisión de métodos para el análisis económico en el cultivo de la papa. Programa de investigación de la papa PROINPA. Convenio IBTA-CIP-COTESU. Documento de trabajo 9/95, Ed. Gram. Thiele. Cochabamba, Bolivia.

- INEGI. (2012). (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). "Estadísticas Nacionales", Desarrollo Sustentable. México, D.F.
- Isaza-Arias, G. C., Pérez-Méndez, M. A., Lainez-Canepa, J. R., C-N, G. (2009). Comparación de dos técnicas de aireación de la degradación de la materia orgánica. *Universidad y Ciencia*, 25 (3), 233-243.
- Jaramillo, Marisol. (2008). Primer simposio sobre biofábricas: Biología y aplicaciones de la célula cultivada. Medellín, marzo, 2005, p. 3-7.
- Jaramillo-Henao, Gladis & Zapata-Márquez, Liliana María. (2008). "Aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos en Colombia" (Tesis de Grado). Universidad de Antioquia.
- Jiménez, D. M. (1998). Normas de calidad del compost. Tesis de Ing. Agr. Universidad de Córdoba, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes. Córdoba, España.
- Jiménez, B. & Wang, L. (2006). "Sludge Treatment and Management. En: *Municipal Waste Water Management in Developing Countries: Principles and Engineering*". London, UK: IWA Publishing. p. 237-292.
- Juárez-Robles. B. (2014). Obtención de composta a partir de biosólidos y residuos sólidos orgánicos con una relación de carbono nitrógeno 4 y 8, y en tiempo menor a 3 meses (Tesis de Maestría). Instituto Tecnológico de Toluca.
- Julca A., Meneses L., Blas R., Bello S. (2006). "La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura" *Idesia* vol. 24 No. 1; 49-61, Chile
- Kuter, G.; Blackwood, K.; L.F. Díaz, J.; Donovan, D.; Durfee, E.; Epstein, J.; Hay, M.; Lang, T.; Richard, G.; Savage, R.; Stratton, R.; Tardy, T.; Walsh, C.; Wilber

iii; Williams, T. (1995). Biosolids Composting. Water Environment Federation, Washington. 187 p.

LEONE, A. (2007). Applicazione di compost in suoli agrari. Valutazione dell'attività biologica e monitoraggio di metalli pesanti e di alcuni microrganismi potenzialmente patogeni. Università degli studi di napoli "federico ii" dipartimento di biologia strutturale e funzionale dottorato in biologia applicata indirizzo ecologia terrestre xviii ciclo tesi di dottorato.

Lizarazo, M. (2008). Criterios de calidad en materiales orgánicos empleados como enmiendas o fertilizantes. Seminario "Calidad de los abonos orgánicos fermentados (AOF) para una eficiente nutrición vegetal". Tunja – Boyacá: Fundación Universitaria Juan de Castellanos.

López-Clemente, X. A., Robles-Pérez, C., Velasco-Velasco, V.A., Ruiz-Luna, J., Enríquez-del Valle, J.R., Rodríguez-Ortiz., G. (2014). Propiedades físicas, químicas y biológicas de tres residuos agrícolas compostados. Revista Ciencia Ergo Sum. Vol. 22, núm. 2, julio-octubre, 2015. pp 145-152.

López, M. E. y Sainz, M. J. (2011). Gestión de residuos orgánicos de uso agrícola. Servizo de Publicacións e Intercambio Científico, Universidad de Santiago de Compostela, 226 p.

Lyon, T. (2000). Proceedings of " L agriculture biologique face a son developpment _ les Enjeux futurs ", 6-8 Dec, Baden, Australia.

Merrington, G., Oliver, I., Smernik, R.J., McLaughlin, M.J. (2003). The influence of sewage sludge properties on sludge-borne metal availability. Advances in Environmental Research 8, 21-36.

Meléndez G. (2003). Fracción orgánica del suelo: residuos orgánicos y materia orgánica del suelo, p. 1. In: G. Soto, G. Meléndez, L. Uribe. (eds). Abonos orgánicos: principios, aplicaciones e impacto en la agricultura. San José, Costa Rica.

Mesas, J.M & Alegre, M. T. (2011). El papel de los microorganismos en la elaboración del vino. *Jornada Técnica: Fertilidad y Calidad del Suelo*, 2(4), 174-183.

Morales, M. R. (2012). Influencia de las frecuencias de volteo para el control de la humedad de los sustratos en el compostaje de biorresiduos de origen municipal. *Caracterización de Residuos Sólidos en la Universidad Iberoamericana, Ciudad de Mexico*, 28(1), 93-97.

NADF-020-AMBT. (2011). Norma Ambiental para el Distrito Federal. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos del Distrito Federal, 2(9).

NATURAL RESOURCE, AGRICULTURE AND ENGINEERING SERVICE (NRAES). 1992. *On-Farm composting handbook*. 187p.

Nieder, R.; Benbi, D.K. (2008). *Carbon and nitrogen in the terrestrial Environment*. Springer, pp. 430.

NTEA-006-SMA-RS. (2006). Norma Técnica Estatal Ambiental que establece los requisitos para la producción de los mejoradores de suelo elaborados a partir de residuos orgánicos.

OPDS. Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible. (2010). *Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos*. (Documento Web, último acceso 02/Abril/2017). http://www.opds.gba.gov.ar/uploaded/File/residuos_03_10.pdf

Peña, M. E. D, La, Ducci, J., & Zamora, V. (2013). Tratamiento de aguas residuales en México. Nota Técnica #IDB-TN-521, 42.

Puerta-Echeverri, Silvia. (2007). Evaluación física, química y microbiológica del proceso del compostaje de residuos sólidos urbanos, con microorganismos nativos y comerciales en el municipio de Venecia (Ant). Medellín: Tesis de Maestría en Biotecnología. p.65, 73.

Quispe, L. A. (2015). El valor potencial de los residuos sólidos orgánicos, rurales y urbanos para la sustentabilidad de la agricultura. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 6(1), 83-95.

Restrepo, R.J. (1998). La idea y el arte de elaborar los abonos orgánicos fermentados. Aportes y recomendaciones. Cali Colombia. 149 pp.

Restrepo, J. A, (2010). A, B, C de la agricultura orgánica y panes de piedra: Abonos orgánicos fermentados. 1a ed. Colombia: Feriva S.A. 86 pp. ISBN. 978-958-44-126-1.

Roca. P., Martinez, C., Mancilla, P. y Boluda, R. (2009). Composting rice straw with sewage sludge and compost effects on the soil - plant system. Chemosphere, 75: 781-787.

Rubinoff, Pamela. (2001). Que es la composta y cuáles son sus beneficios. Programa de manejo integral de recursos costeros. Universidad de Quintana Roo. Quintana Roo, México (Documento Web, último acceso 12/Noviembre/2018)

https://www.crc.uri.edu/download/UQROO_compostPamphlet.pdf

SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). (2010). Elaboración de composta. (Documento Web, último acceso 10/Diciembre/2016).

<http://www.sagarpa.gob.mx/desarrollorural/documents/fichasaapt/elaboraci%C3%B3n%20de%20composta.pdf>

Salétes, S. Siregar, S. Calimán, J.P. Liwang, T. (2004). Ligno-Cellulose Composting: Case study on monitoring oil palm residuals. *Compost Science & Utilization* Vol. 12. N° 4. 372-382.

Santoyo, E. R. (2012). Manejo y uso de biosólidos en el suelo agrícola. (Tesis de Doctorado). 13-170.

Schuchardt F, Darnoko D, Guritno P. (2002). Composting of empty oil palm fruit bunch (EFB) with simultaneous evaporation of oil mill waste water (POME). Enhancing oil palm industry development through environmentally friendly technology. En: *Proceedings of Chemistry and Technology Conference*, Nusa Dua Bali, Indonesia, July 8–12, 2002, pp. 235–243.

Schweizer S., VARGAS A., SALAS E. (2003). Caracterización de diferentes compost utilizando técnicas físicas, químicas y biológicas, pp. 66-67. In: G. Soto, P. Descamps (eds). *Memoria del I Encuentro Mesoamericano y del Caribe y III Encuentro Costarricense de Agricultores Experimentadores e Investigadores en producción orgánica*. Edit del Norte, Costa Rica.

SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social). (2012). “Dirección General de Equipamiento e Infraestructura de Zona Urbano-Marginadas”. (Documento Web, último acceso 17/Mayo/2017).

http://habitat.gob.mx/work/models/NORMATECA/Normateca/1_Menu_Principal/2_Normas/3_Historico/2013/MOE_DGEIZUM_260411.pdf

SEMARNAT (SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES).
2002. “Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final”. (Documento Web, ultima consulta 20/Mayo/2017)
<http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/documents/html/lodos.html>.

SEMARNAT (SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES).
2008. Programa Nacional para la prevención y gestión integral de los residuos 2009-2012. México, D. F. p. 174.

SEMARNAT (SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES).
2012. “Generación estimada de residuos sólidos urbanos por tipo de residuo, Compendio de Estadísticas Ambientales”. (Documento Web, ultimo acceso 17/Mayo/2017).
http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Cap7_residuos.pdf

SEMARNAT (SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES).
2013. “Inventario nacional de emisiones”. (Documento Web, ultimo acceso 15/mayo/2017)
http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/164241/2a_parte.pdf

SEMARNAT (Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2014).
Normas Mexicanas en Materia de contaminación del suelo”. (Consultado: 14 de noviembre de 2017) <http://www.semarnat.gob.mx/node/28>

SEMARNAT (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2015).
Residuos. (Documento Web, Último acceso: 14 de octubre de 2015)
http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/transparencia/transparenciafocalizada/residuos/Documents/directorio_residuos.pdf

- Senesi, N.; Plaza, C.; Brunetti, G.; Polo, A. (2007). A comparative survey of recent results on humic-like fraction in organic amendments and effects on native soil humic substances. *Soil biology and biochemistry*: 39, 1244- 1262.
- Shintani, M., Leblac, H y Tabora, P. (2000). Tecnología tradicional adaptada para una agricultura sostenible y un manejo de desechos modernos. Guía para uso práctico. 1ª ed. Guácimo (CR): Universidad EARTH. 25 pp.
- Silva Arroyave, S. M., & Correa Restrepo, F. J. (2009). Análisis de la Contaminación del Suelo: Revisión de la Normativa y Posibilidades de la Regulación Económica. *Semestre Económico*, 13–34.
- Smith, A. and P. Dalzell. (1991). Fisheries resources and management investigations in Woleai Atoll, Yap State, Federated States of Micronesia. South Pacific Commission, Noumea, New Caledonia. 46 p.
- Sodhi, G.P.S.; Beri, V.; Benbi, D.K. (2009). Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice-wheat system. *Soil and Tillage Research*: 103, 412-418.
- Suler, D.J., Finstein, S. (1977). Effect of Temperature, Aeration, and Moisture on CO₂ Formation in Bench-Scale, continuously Thermophilic Composting of Solid Waste. *Appl. Environ. Microbiol.*, 33 (2): 345-350.
- SUNDBERG, C. & JÖNSSON, H. (2008). Higher pH y faster decomposition in biowaste composting by in-creased aeration. *Waste Management*, 28, 518-526
- Tchobanoglus, G.; Theisen, H. y Vigi, S. (1994). Gestión integral de residuos sólidos Vol. 1 y 2. Madrid: McGraw Hill.

The Biosolids Report (2000). A technical bulletin prepared by the GVRD to provide B.C. medical and environmental health officers with information about biosolids. Report No1.

Tisdale, S. y W. Nelson. (1991). Fertilidad de los suelos y fertilizantes. 1a. reimpresión. Edit. Limusa UTEHA Unión Tipográfica Hispano Americana, S.A. de C.V.; México.

Torres, R. Acosta, A. Chinchilla, C. (2004). Proyecto comercial de compostaje de los desechos agroindustriales de la palma aceitera. Palmas – Vol. 25 N° Especial, Tomo II, 2004.

U. S. Environmental Protection Agency (1992). Environmental Regulations and Technology: control of pathogens and vector attraction in sewage sludge. Report No.: EPA/625/R_92_013:US. EPA. Office of Research and Development.

UN-HABITAT (PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LOS ASENTAMIENTOS HUMANOS, COMISIÓN CANADIENSE PARA EL MANEJO DE LODOS Y COMISIÓN DE ALCANTARILLADO Y LODOS RESIDUALES). 2008. Global atlas of excreta, wastewater sludge, and biosolids management: moving forward the sustainable and welcome uses of a global resource. 2a ed. New Brunswick, Canada: United Nations Human Settlements Programme. 632 p.

Utria, E., Reynaldo, I., Cabrera, A. Morales, D. Morúa, A y Álvarez, N. (2006). "Caracterización de biosólidos de aguas residuales de la estación depuradora de aguas residuales "Quibú". Cultivos, vol. 27, núm. 3, 2006, pp. 83-87 Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, La Habana, Cuba.

Vandevivere P y Ramírez C. (1995a). Control de calidad de los abonos orgánicos por medio de bioensayos, pp. 121-140. In: J. A. García, J. Nájera (eds). Simposio Centro Americano Sobre Agricultura Orgánica. UNED. Costa Rica.

Vandevivere P y Ramírez C. (1995b). Microorganismos y nutrimentos en abonos orgánicos: Bioensayo microbiano para determinar los nutrimentos disponibles en abonos orgánicos. Boletín Técnico de la Estación Experimental Fabio Baudrit M. 28(2):90-96.

Vansintjan, G y Vega, E. (1992). La materia orgánica en el suelo y la aplicación de abonos orgánicos. Managua, Nicaragua. 26 pp.

Vélez-Zuluaga, Juan Alberto. (2007). Los Biosólidos: ¿una solución o un problema? Universidad de Medellín. Revista Producción + Limpia. Vol. 2. No. 2.

Wallace, H. (1961). The diagnostic of mineral deficiencies in plants: by visual symptoms. 3a de. London.

Yanko, W.A. (1988). Occurrence of pathogens in distribution and marketing municipal sludges report, No. EPA/600/1-87/014. Also: NTIS, PB88-154273. AS: National Information Service. Spring field, VA.

ZAPATA, R. (2007). La materia orgánica como fuente de nutrientes y facilitadora de la nutrición vegetal. Seminario Taller “Relación suelo planta ambiente con la nutrición vegetal”. Tunja - Boyacá: Fundación Universitaria Juan de Castellanos.