



---

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

---

## COMPOSTAJE DEL DIGESTATO OBTENIDO DE UN REACTOR DE HIDRÓLISIS ANAEROBIA DE LECHO ESCURRIDO

TESIS  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

MAESTRO EN BIOTECNOLOGIA

P R E S E N T A :

**I.B.I. RUBEN ESPINOSA SALGADO**

DIRECTOR:  
DR. OSCAR ARMANDO MONROY HERMOSILLO

ASESOR:  
DR. JESÚS GERARDO SAUCEDO CASTAÑEDA

México D.F. 18-julio-2016

La Maestría en Biotecnología de la Universidad Autónoma Metropolitana está incluida en el Padrón Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del CONACyT, con la referencia 001465.

Para la realización de los estudios de maestría el sustentante contó con el apoyo del CONACyT a través de la beca 570209.

El jurado designado por la  
División de Ciencias Biológicas y de la Salud  
de la unidad Itzapalpa aprobó la tesis que presentó

**RUBÉN ESPINOSA SALGADO**

El día 18 de julio del 2016

**Comité Tutorial:**

Director: Dr. Oscar Armando Monroy Hermosillo

Asesor: Dr. Jesús Gerardo Saucedo Castañeda

**Miembros del Jurado:**

Presidente: Florino Ramírez Vives

Secretario: Jesús Gerardo Saucedo Castañeda

Vocal: Carlos Ortiz Castilla Aráuz

Vocal: Hernán Lora Lara



The image shows four handwritten signatures on horizontal lines. The first signature is 'Florino Ramírez Vives', the second is 'Jesús Gerardo Saucedo Castañeda', the third is 'Carlos Ortiz Castilla Aráuz', and the fourth is 'Hernán Lora Lara'.

## Resumen

A partir de la hidrólisis de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en un reactor de hidrólisis anaerobia de lecho escurrido (RHALE) se obtienen: un lixiviado rico en materia orgánica soluble que se destina a la producción de metano en un reactor de lecho de lodos anaerobios (UASB, Rodríguez *et al.* 2015) y un residuo sólido, llamado digestato, que requiere ser acondicionado como biosólido, es decir, un abono orgánico libre de olores, con un adecuado balance de relación C:N, con pH neutro y capaz de retener humedad.

La relación C:N de la materia orgánica a compostear se debe encontrar en un rango de 25-35 (López, 2010). Por debajo de este rango se acumula  $\text{NH}_4^+$  que con valores altos de pH se disocia en  $\text{NH}_3$  (Jiang *et al.* 2011), mientras que con valores superiores de relación C:N se tiene un proceso deficiente debido a la baja disponibilidad de nitrógeno para la síntesis enzimática (Bueno *et al.* 2008). Dada la baja C:N del digestato ( $16.13 \pm 2.79$ ) es necesario acondicionarlo mezclándolo con materia orgánica de bajo contenido en nitrógeno. Para facilitar la aereación es necesario agregar un material que aumente la porosidad de la masa en composteo y permita el paso del aire evitando la generación de zonas anaerobias.

Para determinar la mezcla que permita obtener la zona de operación de mayor degradación de materia orgánica se realizó un experimento basado en un diseño de mezclas simplex centroide acoplado con la metodología de superficie de respuesta con diez tratamientos (proporciones distintas de digestato, FORSU y aserrín) con 9 días de composteo. Los datos experimentales fueron ajustados al modelo de Scheffé para construir un modelo de degradación de materia orgánica en función de las fracciones en base seca de los componentes. Se encontró que la zona de mayor degradación de materia está compuesta por proporciones de mezcla con 0.28-0.42,

0.48-0.62, 0.10-0.12 para FORSU, digestato y aserrín respectivamente. Dos mezclas dentro de la zona de operación y una fuera se probaron en un reactor de 95.4 L diseñado y construido para medir la producción de CO<sub>2</sub>, degradación de materia orgánica y temperatura. Se hicieron tres corridas con 35.25, 22.8 y 20 kg de mezcla de residuos siguiendo el proceso hasta su terminación en 12 días.

Se concluyó que trabajando con mezclas ubicadas en la zona de operación determinada es posible degradar hasta 35% de materia y el biosólido producido puede ser utilizado como mejorador de suelos, mientras que fuera de la zona de operación la eficiencia de degradación de materia orgánica es menor al 10%.

La temperatura del reactor no alcanzó valores por arriba de los 40 °C debido a posibles pérdidas de calor hacia el exterior, no obstante mejorando el aislamiento del reactor se puede corregir esta deficiencia.

En los primeros dos días de composteo en el reactor se registra el periodo de mayor actividad metabólica sin presentarse etapa de adaptación.

## Contenido

	Resumen	iii
	Índice de tablas	vii
	Índice de figuras	viii
	Abreviaturas	ix
	 Introducción	
1.1	Justificación	2
1.2	Objetivos	4
1.2.1	Objetivo general	4
1.2.2	Objetivos particulares	5
1.3	Revisión bibliográfica	5
1.3.1	Problemas ocasionados por la generación y acumulación de FORSU	5
1.3.2	Digestión anaerobia de residuos orgánicos	6
1.3.3	Compostaje	9
1.3.4	Materiales complementarios	11
1.3.5	Sistemas de compostaje	12
1.3.6	Factores que afectan el compostaje	14
1.3.6.1	Oxígeno	14
1.3.6.2	Temperatura	14
1.3.6.3	Humedad	14
1.3.6.4	Relación C:N	15
1.3.6.5	pH	15
1.3.7	Microbiología del compost	16
1.3.7.1	Bacterias	16
1.3.7.2	Hongos	16
1.3.7.3	Actinomicetos	17
1.3.8	Estabilidad y madurez	17
1.3.9	Calidad de la composta	18
1.3.10	Clasificación de los tipos de compost	18
1.3.11	Diseño de mezclas simplex centroe	19
1.4	Hipótesis	20
	 Material y métodos	
2.1	Material biológico	22
2.2	Material para el composteo con distintas mezclas	22
2.3	Diseño del reactor	22
2.4	Toma de muestras	24
2.5	Medición de temperatura	24
2.6	Medición de CO <sub>2</sub>	24

2.7	Medición de pH	25
2.8	Contenido de humedad y materia seca	25
2.9	Contenido de materia orgánica	25
2.10	Contenido en carbono y nitrógeno	26
2.11	Índice de germinación	26
2.12	Análisis estadístico	27
Resultados y discusión		
3.1.1	Diseño de la composición de las mezclas experimentales	29
3.1.2	Grado de reducción y calor de combustión	29
3.1.3	Determinación del área de experimentación	31
3.1.4	Superficie de respuesta para la pérdida de materia orgánica	32
3.1.5	Superficie de respuesta para la relación C:N final	36
3.1.6	Comprobación de la zona de operación	37
3.1.7	Determinación del factor energético	37
3.2	Pruebas a nivel planta piloto	38
3.2.1	Eficiencia de degradación de la materia orgánica	39
3.2.2	Evolución del pH	39
3.2.3	Pérdida de materia orgánica	40
3.2.4	Producción de CO <sub>2</sub>	40
3.2.5	Correlación entre CO <sub>2</sub> producido y materia orgánica perdida	42
3.2.6	Determinación de la fórmula general y el rendimiento teórico	43
3.2.7	Medición de temperatura	43
3.2.8	Pruebas de fitotoxicidad	45
4.	Conclusiones y perspectivas	
4.1	Conclusiones	48
4.2	Recomendaciones	48
4.3	Perspectivas	49
	Referencias.	50
	Anexo 1 Análisis elemental para FORSU, digestato y aserrín	59
	Anexo 2 Estadísticos de colinealidad	60
	Anexo 3 Datos estimados con los modelos desarrollados para construir las superficies de respuesta	62
	Anexo 4. Análisis gravimétrico	67
	Anexo 5 Análisis de tendencia de Temperatura en el proceso de compostaje a nivel planta piloto. Prueba 1 (a y b), prueba 2 (c y d), prueba 3 (e y f)	69
	Anexo 6 Datos empleados para determinar el índice de germinación	70

## Índice de tablas

1.1	Tratamientos del digestato. Fuente: Scheets <i>et al.</i> 2015	9
1.2	Principales sistemas de compostaje: Fuente Sierra y Rojas 2003	13
1.3	Características de los tipos de composta (NADF-020-AMBT-2011)	19
3.1	Análisis elemental de los componentes de la mezcla.	29
3.2	Valores estimados de la relación C:N de los tratamientos del diseño de mezclas y eficiencias de degradación de materia orgánica.	32
3.3	Eficiencia de degradación de materia orgánica y composición de los puntos probados dentro de la zona de operación	37
3.4	Determinación del factor energético (FE) de las pruebas del diseño de mezclas	37
3.5	Características de las mezclas utilizadas en las pruebas a nivel planta piloto	39
3.6	Producción de CO <sub>2</sub> y materia orgánica acumulados en los experimentos realizados en el reactor.	42
3.7	Correlaciones entre producción de CO <sub>2</sub> y pérdida de materia orgánica	42
3.8	Ecuaciones de la tendencia de la variable temperatura en las pruebas realizadas a nivel planta piloto.	44
3.9	Eficiencia de degradación (%), producción de CO <sub>2</sub> e índice de germinación de las pruebas realizadas a nivel planta piloto.	45

## Índice de figuras

1.1	Planta de tratamiento de FORSU de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, los productos principales son biogás y un biosólido.	4
1.2	Etapas del proceso de compostaje. Adaptación de Costa, 1991.	11
1.3	Diagrama de reactor vertical. Fuente: Renteria-Tamayo, 2015	13
2.1	Esquema del diseño del reactor de compostaje. También se muestran las vistas frontal, lateral y posterior del reactor.	23
3.1	Diagrama ternario de los componentes digestato-FORSU-aserrín. Se incluye el área de experimentación, así como las mezclas empleadas en los 10 tratamientos del diseño de mezclas simplex centroide.	31
3.2	Superficies de respuesta (a,c y e) y gráficos de contornos (b,d y f) de la degradación de materia orgánica en función de los tres componentes de la mezcla: digestato, FORSU y aserrín.	34
3.3	Superficies de respuesta y gráficas de contornos de la relación C:N en función de las fracciones de los tres componentes de la mezcla: digestato, FORSU y aserrín	36
3.4	Fotografías del digestato (izquierda) y del producto después de 12 días de proceso aerobio (derecha).	38
3.5	Evolución de temperatura, producción de CO <sub>2</sub> y pérdida de materia orgánica en el compostaje de digestato, FORSU y aserrín de pino. Prueba 1(a y b), prueba 2 (c y d) y prueba 3 (e y f). Las líneas punteadas de color azul corresponden a la temperatura externa, las líneas rojas a la temperatura interna y las de color negro representan las tasas de producción de CO <sub>2</sub> . Del lado derecho los puntos rojos se refieren a la materia orgánica perdida y las líneas de color negro al acumulado de CO <sub>2</sub> .	41
3.6	Fresnos sembrados con la composta producida.	46

## Abreviaturas

CH <sub>4</sub>	Metano
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	Glucosa
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	Etanol
CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup>	Acetato
CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> COO <sup>-</sup>	Propionato
CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> COO <sup>-</sup>	Butirato
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Bicarbonato
CO <sub>2</sub>	Bióxido de carbono
DA	Digestión anaerobia
FIV	Factor de inflación de la varianza
FORSU	Fracción orgánica de residuos sólidos urbanos
H <sub>2</sub>	Hidrógeno molecular
H <sub>2</sub> O	Agua
H <sub>2</sub> S	Ácido sulfhídrico
IG	Índice de germinación
MO	Materia orgánica
N <sub>2</sub>	Nitrógeno molecular
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Amonio
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitrato
RHALE	Reactor de hidrólisis anaerobia de lecho escurrido
SEMARNAT	Secretaria de medioambiente y recursos naturales
UASB	Reactor anaerobio de flujo ascendente (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)
USDA	United States Department of Agriculture

# Capítulo 1

# Introducción

## 1.1 Justificación

En la Ciudad de México se generan diariamente aproximadamente 6,715 T de FORSU, siendo 1,690 T confinados en plantas de compostaje (Texcoco y en las delegaciones Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Iztapalapa, Milpa Alta y Xochimilco) y el resto en rellenos sanitarios (La Cañada, Cuautitlán, El Milagro, Tepotzotlán y Cuautla, Flores *et al.* 2012).

La digestión anaerobia es un proceso de reducción de la materia, donde el carbono orgánico es transformado en biogás (principalmente metano y dióxido de carbono) y un semisólido parcialmente estabilizado (digestato). Este proceso es realizado de manera simbiótica por diferentes grupos de bacterias (Ziemiński & Frąc, 2012).

El compostaje puede definirse como la descomposición microbiana aeróbica de la materia orgánica, en condiciones que permiten el desarrollo de temperaturas termófilas como resultado del calor producido por las reacciones biológicas, dando lugar a un producto final estabilizado e higienizado (inactivación de semillas de maleza, patógenos y helmintos), conocido como composta. El compostaje es por lo tanto un procedimiento microbiológico basado en la actividad de diversas bacterias, actinomicetos y hongos. El principal producto es rico en humus y nutrientes tales como nitrógeno y fósforo. Las reacción producen  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_4^+$  y calor. El desprendimiento de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  puede ascender a la mitad del peso de los materiales iniciales, reduciendo así el volumen y la masa del producto final (Matsinhe, 2011).

Los beneficios de la composta sobre el suelo son físicos (aumentar la permeabilidad del suelo, evitar la erosión, y mantener la humedad) y biológicos (mejorar la capacidad de absorción de nitrógeno de plantas, así como el aumento de la capacidad de absorción de los componentes naturales de la tierra, debido a la presencia de numerosas colonias bacterianas y de

microorganismos saprófitos que confieren al suelo resistencia a la colonización por microorganismos patógenos (Sharma *et al.* 1997).

Ambas tecnologías se pueden emplear de forma combinada, donde en primer lugar la FORSU es sometida a un proceso anaerobio obteniendo 30% como digestato y  $34 \text{ kg CH}_4 / T_{\text{FORSU}}$ . Si en las plantas de compostaje de la Ciudad de México se reciben 1,690 T de FORSU diariamente, con esta tecnología se estaría produciendo 57.46 T de  $\text{CH}_4$  y 507 T de digestato para ser composteados, aumentando la capacidad de procesamiento de FORSU de las plantas de compostaje.

El tratamiento biotecnológico de la FORSU permite obtener materiales útiles (combustibles, biosólidos para la agricultura, etc.). La hidrólisis anaerobia de la FORSU efectuada en un reactor de hidrólisis de lecho escurrido (RHALE), produce un lixiviado con un alto contenido de ácidos orgánicos volátiles utilizados para la producción de biogás en un reactor UASB. Por otro lado el digestato producido corresponde al 30% de la FORSU cuya composición se muestra en la Tabla 3.1, tiene un olor desagradable y presenta características (alta biodegradabilidad, fitotoxicidad, microorganismos patógenos, excesiva humedad) que impiden su uso directo como mejorador del suelo (Abdullahi *et al.* 2008), por lo que es necesario compostearlo cerrando así el ciclo de operación de la planta de tratamiento de la FORSU (Figura 1.1).

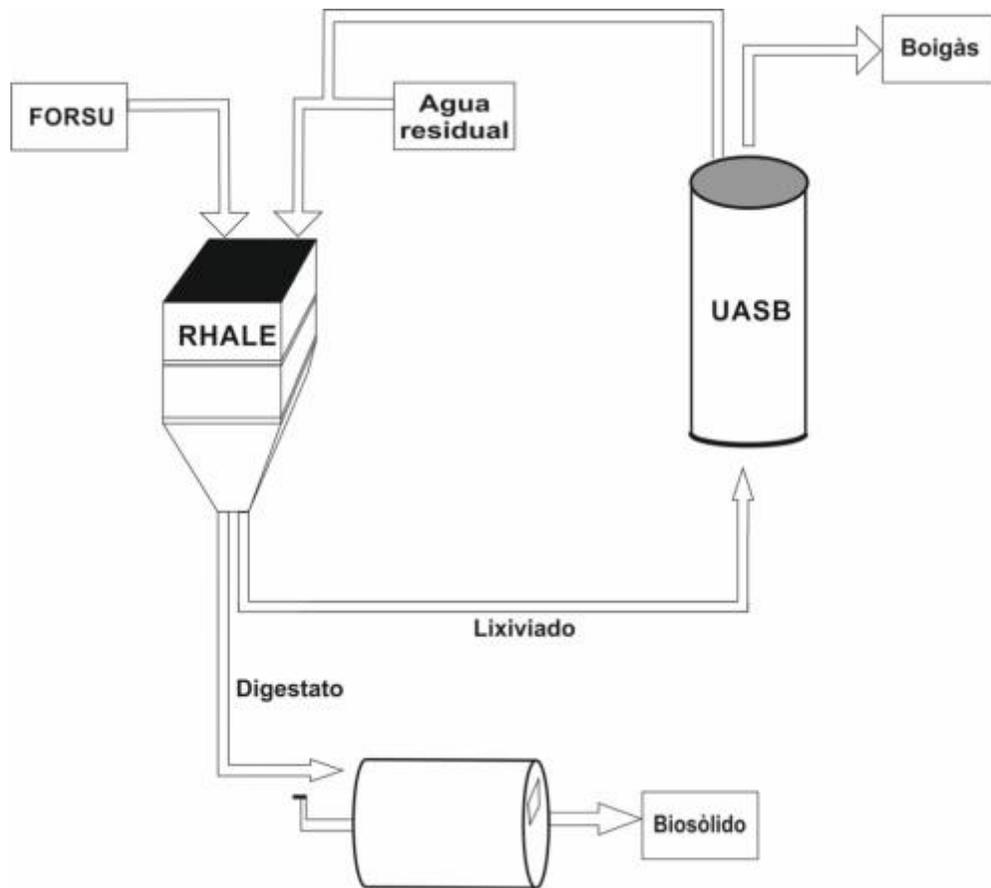


Figura 1.1 Planta de tratamiento de FORSU de la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Iztapalapa, los productos principales son biogás y un biosólido.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo general

Compostear el digestato junto con materiales que modifiquen sus propiedades de tal forma que permitan la producción de un biosólido que cumpla con las características de composta de acuerdo a la NADF-020-AMBT-2011.

### 1.2.2 Objetivos particulares

- Definir los materiales complementarios que permitan tener una mezcla adecuada para el compostaje del digestato.
- Diseñar y operar un reactor a nivel planta piloto para tratar 40 kg de digestato.
- Determinar la mezcla de componentes óptima para lograr la mayor reducción de materia orgánica.
- Clasificar el biosólido obtenido caracterizando sus propiedades (relación C:N, humedad, pH, contenido de materia orgánica e índice de germinación).

### 1.3 Revisión bibliográfica

#### 1.3.1 Problemas ocasionados por la generación y acumulación de FORSU

La acumulación de residuos como consecuencia del desarrollo económico y del aumento poblacional, tiene consecuencias ambientales que repercuten en la salud humana y en los ecosistemas (SEMARNAT, 2006). Dentro de los principales efectos se encuentran:

- Generación de contaminantes y de gases de efecto invernadero.

La descomposición de residuos genera gases. Dentro de estos se encuentran: monóxido y bióxido de carbono, metano, ácido sulfhídrico, y compuestos orgánicos volátiles.

- Contaminación de los suelos y cuerpos de agua.

La transformación de los residuos sólidos y su contacto con el agua producen lixiviados que pueden contaminar mantos acuíferos.

- Proliferación de fauna nociva y transmisora de enfermedades.

### 1.3.2 Digestión anaerobia de residuos orgánicos

La digestión anaerobia es una alternativa para el tratamiento de residuos orgánicos con una recuperación de energía en forma de biogás, la composición típica del biogás es CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, y en menor proporción N<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S (Demirbas *et al.* 2012). Durante este proceso entre 20-90% de la alimentación de materia orgánica es degradada. El producto residual es un digestato usualmente utilizado como fertilizante (Möller, 2012).

Las etapas principales son: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

**Hidrólisis.** Los polímeros no solubles son degradados a monómeros y dímeros susceptibles de ser empleados como fuente de carbono y energía (azúcares, aminoácidos y ácidos grasos). Esta etapa se realiza mediante enzimas extracelulares (amilasas, proteasas, lipasas). La velocidad de la hidrólisis depende de parámetros como: tamaño de partícula, pH, producción de enzimas y la difusión y adsorción de las enzimas sobre las partículas a ser digeridas. La adición de compuestos químicos para acelerar este paso se ha encontrado satisfactorio, reduciendo el tiempo de la digestión y mejorando el rendimiento de producción de metano (Ziemiński & Frąç, 2012). Reacciones de hidrólisis:

Lípidos → Ácidos grasos

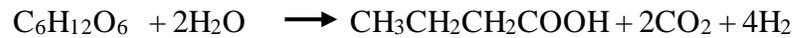
Polisacáridos → Monosacáridos + Disacáridos

Proteínas → Aminoácidos

Ácidos nucleicos → Purinas y pirimidinas

**Acidogénesis.** Durante esta fase las bacterias transforman los compuestos solubles en: ácidos y alcoholes alifáticos de cadena corta, aldehídos, dióxido de carbono e hidrógeno. Los principales ácidos producidos son acético, propiónico, butírico y también etanol. Algunos de los

microorganismos involucrados en esta etapa son: *syntrophobacter wolina*, *syntrophobacter wolfei*, *clostridium spp.*, *peptococcus anaerobus*, *lactobacillus* y *actinomycetes* (Verma, 2002, Zinder, 1984).



Acetogénesis. los ácidos y alcoholes que provienen de la acidogénesis se van transformando por la acción de bacterias en ácido acético, hidrogeno y dióxido de carbono.



Metanogénesis. Consiste en la transformación de compuestos orgánicos en dióxido de carbono y metano, o bien, la formación de metano a partir de dióxido de carbono e hidrógeno (Ziemiński & Fraç, 2012). Dentro de las bacterias metanogénicas se incluyen *methanobacterium*, *methanobacillus*, *methanococcus* y *Methanosarcina*. Las principales reacciones de esta etapa se muestran a continuación (Verma, 2002):



El proceso de digestión anaerobia realizado en dos reactores uno para las reacciones de hidrólisis y acetogénesis y otro para la metanogénesis, permite controlar las condiciones de modo que cada población microbiana se desarrolle bajo condiciones óptimas (Rodríguez *et al.* 2015).

El digestato presenta una relación C:N baja y humedad superior al 85%, su composición depende del sustrato alimentado en la digestión anaerobia y de las condiciones de operación, temperatura y tiempo de retención (Ziemiński *et al.*, 2012). Está compuesto por biopolímeros, moléculas del tipo esteroide y lignina, considerados como los precursores de ácidos húmicos. además de presentar alta estabilidad biológica similar a la de la composta (Tambone, 2010).

Se han propuesto varias metodologías para el tratamiento del digestato (Rhel *et al.* 2011). En donde se da un pretratamiento para eliminar parte de humedad por métodos mecánicos. Posteriormente el material es secado en cintas transportadoras con aire caliente; en tambores rotatorios; o con luz solar en invernaderos de lámina de policarbonato. El producto final tiene un uso directo sobre el suelo o es mezclado con almidón y cal formando pellets fertilizantes.

En otras metodologías el digestato es decantado, la parte sólida es almacenada y aplicada en el campo sin un tratamiento adicional, mientras que la parte líquida es evaporada para separar el agua y otros materiales con ayuda de una corriente de vapor, en este proceso se adiciona ácido sulfúrico para liberar  $\text{CO}_2$  y transformar el  $\text{NH}_3$  en  $\text{NH}_4^+$ . El concentrado es empleado como nutriente en fermentaciones. También es utilizado un tratamiento fisicoquímico donde la fase sólida es retirada de la líquida. Posteriormente la fase líquida es separada por ultrafiltración por una membrana, donde el permeado es tratado por ósmosis inversa y el retentado puede ser utilizado como agua de riego en sistemas agrícolas (Masse *et al.* 2007). La Tabla 1.1 resume algunas ventajas y desventajas del uso del digestato.

Tabla 1.1 Tratamientos del digestato. Fuente: Sheets *et al.* 2015.

Tratamiento	Ventajas	Desventajas
Reutilizado como inóculo en la digestión anaerobia	Contiene microorganismos aclimatados al proceso de digestión anaerobia disminuyendo la fase lag del proceso.	Acumulación de nitrógeno y otros metabolitos que pueden inhibir la actividad microbiana. El volumen total del digestato no disminuye.
Compostaje	Remoción de patógenos, reducción de materia y producción de composta	Largos tiempos de tratamiento. Emisión de gases
Fibras de digestión anaerobia para combustibles	Producción de biocombustible	Necesidad de un pretratamiento y una alta demanda de energía.
Lecho para ganado	Completo rehúso de la fibra	Contaminación microbiana, riesgo a la salud animal
Fibras para la construcción de materiales	Rehúso completo de las fibras, valor agregado	Necesidad de pretratamiento, alta demanda de energía

Si el digestato es tratado bajo condiciones aerobias, disminuye su fitotoxicidad y puede ser empleado como mejorador de suelos, tal es el caso de la investigación realizada por Abdullahi *et al.* en 2008 donde evaluaron el compostaje del digestato obtenido de un reactor en lote a escala laboratorio alimentado con residuos de alimentos y residuos verdes en la misma proporción. La digestión anaerobia se realizó durante 15 días, posteriormente el reactor fue aireado intermitentemente por 5 horas diariamente durante 5 semanas, obteniendo un material estabilizado.

### 1.3.3 Compostaje

El compostaje es un proceso de oxidación aerobia de la materia orgánica realizado por diversas comunidades de bacterias, hongos y actinomicetos. Durante el proceso, el carbono orgánico es transformado en CO<sub>2</sub>; asimilado por las comunidades microbianas; y parte es transformado en humus. El nitrógeno orgánico es mineralizado a NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, los cuales son asimilados por los microorganismos o son empleados para la síntesis de ácidos húmicos (Kuo *et al.* 2004). Las

sustancias húmicas están formadas por materia orgánica sin organización celular que vista en el microscopio tiene un aspecto amorfo, complejo, macromolecular y polimérico. Se clasifican de acuerdo a su solubilidad en huminas, ácidos fúlvicos y ácidos húmicos (Melo, 2006):

- Las huminas son sustancias insolubles a cualquier pH, sus pesos moleculares varían entre 100,000 a 1,000,000, en el suelo funcionan como un sistema de intercambio catiónico.
- Los ácidos fúlvicos son sustancias complejas de peso molecular relativamente bajo (1,000 a 10,000 g mol<sup>-1</sup>), con grandes cantidades de grupos carboxilos, hidroxilos, aminas, anillos aromáticos y cadenas alifáticas. solubles en agua a pH ácido o básico.
- Los ácidos húmicos comprenden una mezcla de cadenas alifáticas y anillos aromáticos. Su peso molecular varía de 10,000 a 100,000 g mol<sup>-1</sup> se caracterizan por ser solubles en agua en pH alcalino e insolubles en pH ácido (Pettit, 2004).

El compostaje se realiza con un pretratamiento donde el exceso de humedad, así como la eliminación de fibra en suspensión son retirados.

En general se puede dividir en cuatro etapas (Figura 1.2): Etapa inicial. durante la cual se descomponen los materiales fácilmente degradables. Etapa termofílica una etapa de alta actividad metabólica donde polímeros como celulosa y materiales similares son degradados. Etapa de estabilización y por último una etapa de maduración caracterizada por una necesidad de oxígeno baja, y procesos biológicos lentos, esta etapa es realizada por microorganismos que sintetizan sustancias húmicas (Sharma *et al.*1997).

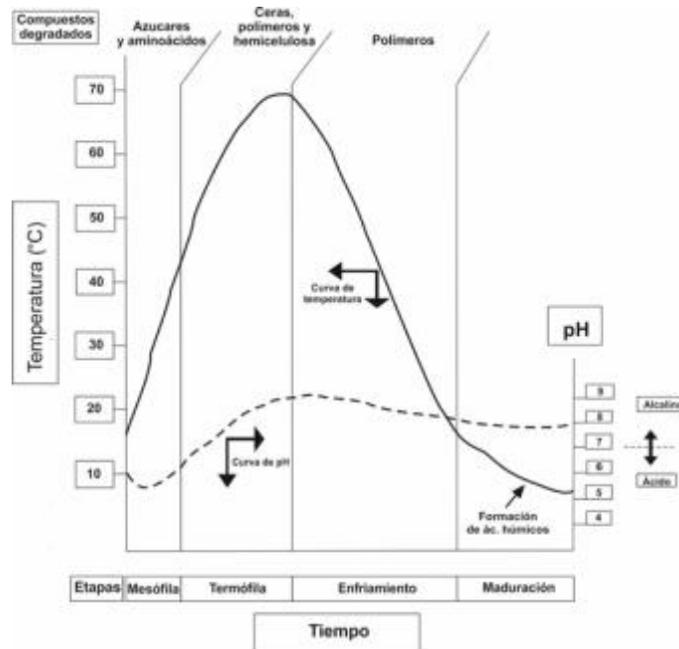


Figura 1.2 Etapas del proceso de compostaje. Adaptación de Costa, 1991.

Una mezcla de compostaje típica se constituye de los siguientes componentes (USDA, 2007):

- Sustrato: el material a ser estabilizado.
- Materiales complementarios: un material biodegradable empleado para ajustar la humedad, modificar el pH, balancear la relación C:N.
- Un agente de carga: materiales que proporcionan estructura y porosidad a la mezcla.

### 1.3.4 Materiales complementarios

Existen materiales que se agregan al sustrato para incrementar la porosidad para una mejor circulación del aire, o bien, aumentar la cantidad de compuestos orgánicos biodegradables e incrementar la energía disponible de la mezcla. Un agente de volumen es un material orgánico o inorgánico de suficiente tamaño como para proporcionar soporte estructural y proporcionar un volumen de aire dentro de la matriz de compostaje. El aserrín de madera, cáscaras de

cacahuete, ramas de árboles, son algunos ejemplos (Haug, 1993). En el caso del compostaje del digestato de residuos porcinos se ha encontrado que la caña de maíz como agente de carga en una proporción del 20% da los mejores resultados (Bustamante *et al.* 2013).

Los iniciadores o inóculos consisten en enzimas y microorganismos que son agregados a la mezcla inicial de compostaje, generalmente representan un 10% de la mezcla a compostear (USDA, 2007).

### 1.3.5 Sistemas de compostaje

En general los sistemas de compostaje pueden ser clasificados en dos categorías: sistemas abiertos y cerrados (tabla 1.2). Los abiertos requieren de menor equipo y costo. No obstante, regularmente ocupan un mayor espacio y se tiene un menor control del proceso. Por otro lado, los sistemas cerrados ocupan un espacio menor, y se tiene un mejor control del proceso, pero la infraestructura implica una inversión mayor (De Bertoldi *et al.* 1985).

Las pilas son sistemas abiertos donde los residuos se amontonan sobre el suelo procurando no comprimirlos demasiado. Dentro de estos sistemas se encuentran: pilas estáticas donde el aire fluye de manera natural, pilas con aireación forzada en las que el aire es suministrado por succión o insuflado y finalmente pilas con volteo donde el material es removido periódicamente (Haug, 1993). Como ejemplo de este tipo de sistemas se menciona el compostaje de un digestato obtenido de la DA de un purín porcino mezclado con caña de maíz como materia estructurante. El proceso se realizó en pilas con forma trapezoidal (1.5 x 2 x 2m) durante 132 días (Bustamante *et al.* 2013).

Los sistemas cerrados donde los residuos son confinados en un reactor, pueden ser de dos tipos: reactores verticales (figura 1.3) y horizontales. El reactor consta principalmente de un tambor giratorio o estático y un sistema de suministro de aire (Lázaro, 2014).

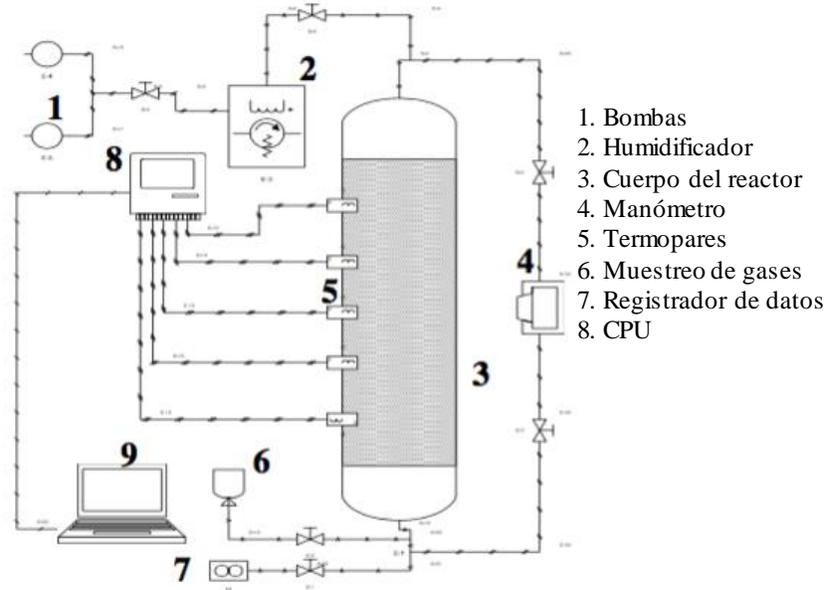


Figura 1.3 Diagrama de reactor vertical. Fuente: Renteria Tamayo, 2013

Tabla 1.2. Principales sistemas de compostaje: Fuente: Sierra y Rojas 2003

<b>Sistemas abiertos</b>	
Apilamiento Estático	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Con aire por succión</li> <li>• Con aire soplado</li> <li>• Ventilación alternante (succión y soplado)</li> </ul>	
Apilamiento con volteo	
Apilamiento con volteo y aireación forzada	
<b>Sistemas cerrados</b>	
Reactores verticales	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Continuos</li> <li>• Discontinuos</li> </ul>	
Reactores horizontales	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estáticos sin agitación</li> <li>• Estáticos con agitación</li> <li>• Con rotación</li> </ul>	

### 1.3.6 Factores que afectan el compostaje.

La duración del proceso de compostaje depende de varios factores: calidad de la composta, el tamaño de partícula, disposición de la pila, aireación, humedad y población biológica activa por mencionar algunos (Carriello M. y col., 2007).

#### 1.3.6.1 Oxigenación

El consumo de oxígeno está altamente relacionado con la actividad microbiana, encontrando que la mayor cantidad se requiere durante la fase inicial como consecuencia del crecimiento, por el contrario durante la fase de estabilización la demanda de oxígeno disminuye. El oxígeno es empleado como aceptor final de electrones para la respiración aerobia y también en la oxidación de algunas moléculas (De Bertoldi *et al.* 1985). En un reactor vertical de 60 L existe una alta tasa de degradación de materia orgánica se obtiene con velocidades de aireación de  $0.4 \text{ L min}^{-1} \text{ kgMO}^{-1}$  (Kulku *et al.* 2003).

#### 1.3.6.2 Temperatura

La temperatura es uno de los más importantes parámetros de operación. Las variaciones de temperatura son el resultado del calor generado por los microorganismos y el calor perdido por convección, conducción, evaporación y radiación. Con el propósito de inactivar y matar patógenos es necesario mantener altas temperaturas ( $< 55 \text{ }^\circ\text{C}$ ) durante 3 días (Sauer *et al.* 2009).

#### 1.3.6.3 Humedad

Este factor facilita la movilización de los microorganismos y como consecuencia favorece la descomposición de la materia; además proporciona mejores condiciones para la fijación de

nitrógeno. Con valores de humedad bajos, la propagación de los microorganismos es restringida, y por otro lado se favorece la volatilización del nitrógeno (Hubbe, Nazhad, & Sánchez, 2010). La humedad idónea para el crecimiento de los microorganismos se encuentra entre el 50-70%. La actividad biológica decrece con valores inferiores al 30%, por otro lado, valores superiores al 70%, el agua puede desplazar el aire en los espacios libres entre las partículas, reduciendo la transferencia de oxígeno. El exceso de humedad se corrige incrementando la aireación (Álvarez, 2010).

#### 1.3.6.4 Relación C:N

La relación C:N, se refiere a la relación másica de carbono a nitrógeno que contiene un material. El carbono es utilizado por los microorganismos como parte de su estructura, o bien como fuente de energía, mientras que el nitrógeno es empleado en la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos principalmente. Si hay nitrógeno en exceso, se elimina en forma de amoníaco generando malos olores (Haug, 1993). Si la C:N del material es alta, el proceso será lento debido a la limitación de nitrógeno para el crecimiento microbiano. Por lo anterior es recomendable tener una C:N inicial en un rango de 25-35(López, 2010).

#### 1.3.6.5 pH

En la fase inicial hay un descenso en el pH, dado que hay una elevada producción de ácidos orgánicos y CO<sub>2</sub>, este descenso proporciona las condiciones adecuadas para el crecimiento de hongos cuyo sustrato principal es lignina y celulosa. Como resultado de la degradación de materia orgánica las aminas procedentes de las proteínas y bases nitrogenadas forman amoníaco

y alcalinizan el sistema. Al final del proceso el pH se mantiene en valores cercanos a la neutralidad (Álvarez, 2010).

### 1.3.7 Microbiología de la composta

Los tipos predominantes de microorganismos presentes en un sistema de compostaje son: bacterias, hongos y actinomicetos. Dado que las condiciones del sistema son variables a través del tiempo existe una sucesión de poblaciones microbianas. La capacidad de los microorganismos para asimilar materia orgánica dependerá principalmente de su capacidad de producir enzimas para la degradación de los sustratos, para aquellos sustratos complejos serán necesarios varios complejos enzimáticos, es por ello que los microorganismos actúan de forma sinérgica para poder asimilar estas moléculas (Matsinhe, 2011).

#### 1.3.7.1 Bacterias.

Las bacterias pueden ser clasificadas en tres tipos conforme a su temperatura óptima de crecimiento: psicrófilas (< 20 °C), mesófilas (20 a 45 °C) y termófilas (45 a 80 °C). Las bacterias son las encargadas de consumir hidratos de carbono y proteínas fácilmente degradables (Bambara, 2013). En consecuencia son las responsables de la mayor parte de la descomposición inicial, de la generación de calor y el incremento de la temperatura. Se ha detectado en compostaje 122 especies distintas de bacterias (Ryckeboer *et al.* 2003).

#### 1.3.7.2 Hongos

Estos microorganismos prevalecen en las etapas mesófilas, en parte porque son los encargados de descomponer los compuestos más complejos como celulosa y lignina (Bambara, 2013). Se

ha llegado a detectar hasta 408 especies de hongos (Ryckeboer *et al.* 2003). En pilas de compostaje las siguientes especies han sido identificadas: *Aspergillus* spp, *Microsporium* spp, *Trichophyton* spp, *Yeast* sp, *Mucor* sp, *Penicillium* sp, *Rhizopus* sp, *Fusarium* sp, *Cladosporium* sp, *Curvularia* sp (Rouhullah *et al.* 2011).

#### 1.3.7.3 Actinomicetos

Este grupo de bacterias con características similares a los hongos, prevalecen cuando está por terminar la etapa activa y están relacionados de manera importante en la conversión de nitrógeno para ser asimilado por plantas (Bambara, 2013). En cuanto a las especies reportadas para este tipo de microorganismos se encuentran: *Streptomyces* sp., *Thermomonospora curvata*, *T. chromogena*, *Thermomonospora* sp, *T. Alba* y *Thermomobifida fusca* (Ramírez, 2003).

#### 1.3.8 Estabilidad y madurez

La estabilidad de la composta está determinada por la velocidad de la actividad biológica. Frecuentemente se expresa y se mide en función del oxígeno consumido; del CO<sub>2</sub> producido; o por la liberación de calor como resultado de la actividad metabólica. El test Solvita<sup>®</sup> es ampliamente utilizado para medir la evolución de CO<sub>2</sub> de una composta.

La estabilidad es importante para diferenciar si el producto es apto para depositar en vertederos de aquel que puede ser empleado como mejorador del suelo. Una composta no estabilizado provoca una limitación de oxígeno en el suelo teniendo un efecto negativo sobre la rizósfera. Además, como producto de la respiración se produce ácido carbónico, disminuyendo el pH provocando un aumento en la biodisponibilidad de metales pesados teniendo un efecto negativo en el crecimiento de las plantas (Iglesias, 2014).

La madurez se refiere al grado de biodegradación de la composta, donde está libre de compuestos fitotóxicos que inhiben el crecimiento de las plantas o tienen efectos adversos sobre ellas. La aplicación de una composta inmadura con una elevada relación C:N ocasiona una limitación por nitrógeno y como consecuencia existe competencia por el nitrógeno entre microorganismos y plantas. El efecto de los compuestos fitotóxicos sobre plantas y semillas se debe a la emisión de amoníaco, óxido de etileno y ácidos orgánicos de bajo peso molecular (Iglesias, 2014). El índice de germinación de *Lepidum sativum* o *Raphanus sativus* es el bioensayo más común empleado para evaluar la madurez de una composta.

#### 1.3.9 Calidad de la composta

La calidad de la composta involucra parámetros físicos que tienen que ver con la granulometría, la capacidad de retención de agua, humedad, presencia de partículas extrañas y olor; químicos dentro de los cuales se encuentran el contenido y estabilidad de la materia orgánica, contenido y velocidad de mineralización de nutrientes vegetales y la presencia de contaminantes inorgánicos u orgánicos. Por último los aspectos físicos donde principalmente se considera la presencia de semillas de malas hierbas así como patógenos (Soliva *et al.* 2004).

#### 1.3.10 Clasificación de los tipos de composta

En la Ciudad de México se establecen tres tipos de composta de acuerdo a los usos que se les puede dar conforme a sus características, las del tipo A son recomendadas para viveros y sustitutos de tierra para macetas, las del tipo B para agricultura ecológica y reforestación, por último las del tipo C utilizadas para paisaje, áreas verdes urbanas y reforestación (NADF-020-

AMBT-2011) En la Tabla 1.3 se enlistan los principales parámetros de clasificación de composta en la Ciudad de México.

Tabla 1.3 Características de los diferentes tipos de composta (NADF-020-AMBT-2011)

Parámetro	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Humedad (% en peso)	25-35		25-45
pH	6.5-7.5	6.5-8	
Materia orgánica (%MS)	> 20		> 25
Relación C/N	< 15	< 20	< 25
Fitotoxicidad (%)	IG ≥ 85	IG ≥ 75	IG ≥ 60
Granulometría	≤ 10 mm	≤ 30 mm	

### 1.3.11 Diseño de mezclas simplex centroide

Los experimentos con mezclas a diferencia de otros diseños involucran factores que son dependientes, es decir, que si en el experimento se utilizan tres componentes, la suma de sus fracciones equivale a la unidad y su representación gráfica es un triángulo equilátero cuyos vértices corresponden a los componentes puros. Los diseños simplex son útiles para estudiar los efectos de los componentes de una mezcla sobre la variable respuesta y encontrar la mejor combinación de componentes de la mezcla (Montgomery, 2004).

Aguilera *et al.* 2001 emplearon un diseño de mezclas simplex centroide acoplado con superficie de respuesta para estudiar la biodegradabilidad de un suelo contaminado con hidrocarburos en un biorreactor de lecho empacado, por medio de un proceso de compostaje encontrando que una mezcla de 15% de suelo contaminado, 25% de bagazo de caña de azúcar y 60% de agua dio el valor más alto de actividad de agua y porosidad, el cual corresponde a un 40% de biodegradabilidad en 150 h de compostaje.

#### 1.4 Hipótesis

- El digestato es un material que puede ser estabilizado mediante compostaje.
- La FORSU y el aserrín complementarán las características del digestato para su compostaje.
- El biosólido producido tendrá las propiedades necesarias para ser usado como fertilizante.

# Capítulo 2

# Material y métodos

### 2.1 Material biológico

Para la realización de esta investigación, se utilizó el digestato del RHALE de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, la FORSU fue recolectada de los puestos ambulantes de los alrededores del campus universitario, el aserrín empleado fue comprado en un centro comercial, y el iniciador se obtuvo de la planta de compostaje Bordo-Poniente.

### 2.2 Material para el composteo con distintas mezclas.

En esta etapa se utilizaron como unidades experimentales frascos de vidrio con capacidad de 1.4 L provistos de una tapa de hule acoplada a dos tubos para la entrada y salida de gases, en la parte inferior se colocó una malla de acero para retener la mezcla. Cada unidad experimental se alimentó con 650-740 g de una mezcla de digestato, FORSU y aserrín. Se incubó a una temperatura controlada de 35 °C usando un recirculador Perkin Elmer Polystat 12104-00. El aire fue suministrado a un flujo de  $0.5 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{MSI}}^{-1}$ , siendo alimentado desde la parte inferior. El tiempo de operación fue de 9 días. Este experimento se realizó dos veces trabajando con composiciones diferentes de digestato y de FORSU y se utilizó como iniciador una composta proveniente de la planta Bordo Poniente representando el 5% del total de la mezcla.

### 2.3 Diseño del reactor

Se diseñó y construyó un reactor de agitación horizontal de 95.4 L (longitud = 60 cm, diámetro = 45 cm) en acero al carbón galvanizado (Figura 2.1). Fue montado sobre una báscula con capacidad de 300 kg para monitorear la pérdida de peso diariamente. Dos termopares tipo *J* son introducidos en tubos perforados (1) para monitorear la temperatura interna del proceso. Uno de los costados es desmontable para facilitar la recolección del producto (2). En la parte inferior

hay una salida para la recuperación de lixiviados. Cuenta con agitadores de turbina de palas (3) montadas sobre un eje para agitar manualmente (4). La mezcla es retenida sobre una malla de acero (5). En la parte inferior se encuentra el distribuidor de aire (6). La extracción de lixiviados se realiza por una salida ubicada en la parte inferior (7). En ambos lados cuenta con tapas de 20 x 15 cm por donde se extraen las muestras (8). La salida de gases se ubica en la parte superior en un costado del reactor (9).

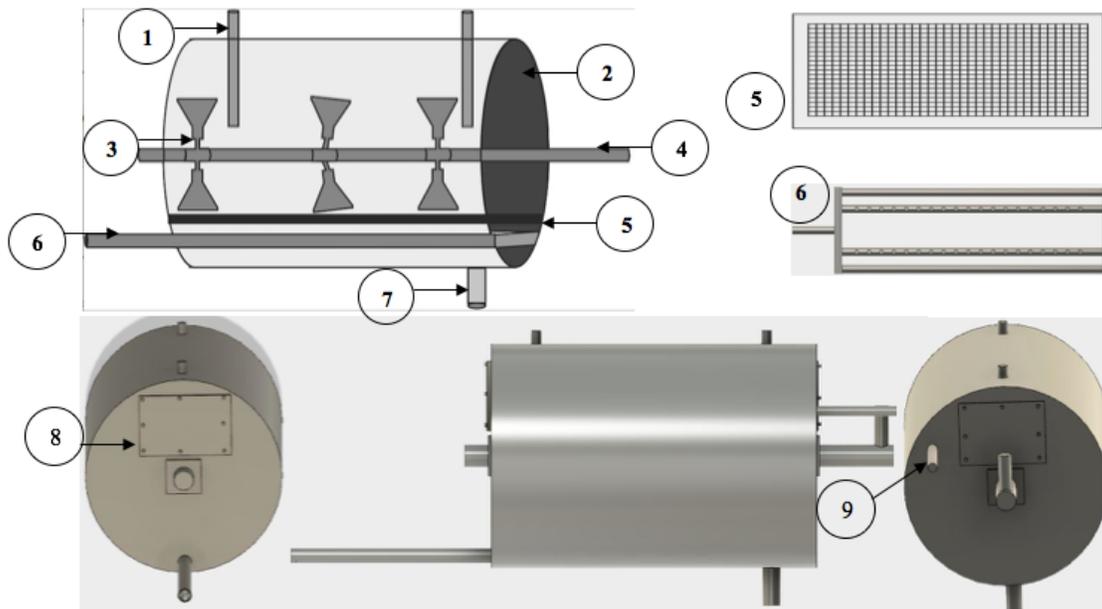


Figura 2.1. Esquema del diseño del reactor horizontal de compostaje. También se muestran las vistas frontal, lateral y posterior del reactor.

1. Tubo para termopar	4. Eje de agitación	7. Salida de lixiviados
2. Cuerpo del reactor	5. Malla de retención	8. Tapa desmontable
3. Paleta de agitación	6. Tubo de suministro de aire	9. Salida de gases

#### 2.4 Toma de muestra

Para la fermentación realizada en frascos la toma de muestra se hizo al principio y al final del experimento empleando entre 50 y 60 g de material en bolsas de plástico. Para el caso de los experimentos realizados en el reactor a nivel planta piloto fueron tomadas entre 50 y 70 g de muestra en cada lado del reactor, tomando material en distintos puntos. El análisis de las muestras se realizó el mismo día de la toma de muestra.

#### 2.5 Medición de temperatura

La temperatura se midió a través de dos termopares tipo *J* y la temperatura externa con un termistor interno en el módulo de adquisición de datos. Las lecturas se recopilaron automáticamente cada 20 min mediante la interfaz de adquisición de datos myPCLab® marca NOVUS.

#### 2.6 Medición de CO<sub>2</sub>

El efluente de gases se hizo pasar a través de una columna empacada con sílica-gel para deshidratarlo, antes de llegar al detector infrarrojo de CO<sub>2</sub> (%). Las mediciones se realizaron cada 20 min y los resultados se expresan como g CO<sub>2</sub> h<sup>-1</sup>g<sub>MSI</sub><sup>-1</sup>. Estos datos se integraron para obtener la producción total de CO<sub>2</sub>(g). Los datos de CO<sub>2</sub> (%) son transformados mediante la siguiente expresión que determina la tasa de formación de CO<sub>2</sub>:

$$\frac{dCO_2}{dt} = \frac{(\%CO_2) \times f \times a \times 273.15 \times b}{kg_{MSI} \times 22.4 \times T_{externa}} = \frac{gCO_2}{hkg_{MSI}}$$

Donde:

$\frac{dCO_2}{dt}$  = tasa instantánea de producción de CO<sub>2</sub> (g CO<sub>2</sub> h<sup>-1</sup> g<sup>-1</sup>MSI)

%CO<sub>2</sub> = CO<sub>2</sub> en la salida del reactor (%)

*f* = Flujo en la salida del reactor (L h<sup>-1</sup>)

$a$  = Factor de corrección de la presión atmosférica a la altura de la Ciudad de México/P atmosférica en condiciones estándar de los gases (0.7697).

$b$  = Peso molecular del CO<sub>2</sub> (44 g mol<sup>-1</sup>)

$kg_{MSI}$  = Materia seca inicial (kg)

22.4 = Volumen normal de un gas a 1 atmósfera de presión y a 273.15 K (Lmol<sup>-1</sup>)

### 2.7 Medición de pH

5 g de muestra fueron adicionados a 10 ml de agua destilada y se agitaron durante 30 min. Se dejó reposar la suspensión durante 15 min. Posteriormente se calibró el potenciómetro HANNA HI 255 y se inició la medición de las muestras lavando el electrodo con agua destilada antes de cada lectura. Se registró el pH al momento en que la lectura se estabilizó.

### 2.8 Contenido de humedad y materia seca

La determinación de humedad se realizó de la forma siguiente (US Department of Agriculture and Council, 2001) : La muestra húmeda ( $P_o$ ) fue pesada en un crisol de porcelana previamente tarado ( $T$ ) en una balanza de precisión. Posteriormente se sometieron a secado a 105 °C hasta tener peso constante. La muestra fue enfriada en el desecador para después ser pesada ( $P_f$ ). El porcentaje de humedad ( $\%H$ ) y porcentaje de materia seca ( $\%MS$ ) fueron determinados según las siguientes ecuaciones:

$$\%H = \frac{P_o - P_f}{P_o - T} \times 100 \quad \text{y} \quad \%MS = 100 - \%H$$

### 2.9 Contenido de materia orgánica

La muestra seca ( $P_f$ ) fue colocada en la estufa durante 60 min a  $550 \pm 25$  °C, después el crisol caliente fue puesto en un desecador hasta que se enfrió, para ser pesado en la balanza ( $P_c$ ). La determinación de porcentaje de MO se realizó a partir de la siguiente expresión:

$$\%MO = \frac{P_f - P_c}{P_f}$$

### 2.10 Contenido en carbono y nitrógeno

La determinación de carbono y nitrógeno se realizó en un analizador elemental Series II 2400 CHNS/O (Perkin Elmer, Boston, USA). Este análisis consiste en la oxidación de la muestra en una atmósfera de oxígeno puro, donde son producidos CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y N<sub>2</sub>, los cuales son identificados mediante un detector de conductividad térmica, utilizando helio como acarreador. La calibración se realizó con un estándar de acetanilida (C<sub>8</sub>H<sub>9</sub>NO). La muestra fresca fue colocada sobre una charola de aluminio y secada en una estufa a 60 °C, una vez seca fue molida para reducir el tamaño de partícula. Por último se tamizó en malla 100 y se pesaron entre 2 y 3 mg en cápsulas de estaño en una microbalanza de alta precisión. Los resultados se expresaron en porcentaje referido a la materia seca de la muestra.

### 2.11 Índice de germinación

Un volumen de 50 mL de agua destilada se adicionó a 5 g de composta fresca y se agitó durante una hora y se filtró. Una alícuota de 5 mL de esta suspensión se colocó en cajas Petri conteniendo dos piezas de papel filtro. Un total de 20 semillas de rábano (*Raphanus sativus*) fueron distribuidas sobre el papel filtro e incubadas a la oscuridad a 33±2 °C durante 48 h. Se empleó agua destilada como control del tratamiento. El procedimiento se realizó por triplicado para cada muestra. Se midió la longitud de las raíces y la tasa de germinación. El índice de germinación (IG) se calculó de la siguiente manera:

$$IG(\%) = \frac{N_S * \bar{L}_R}{(N_S * \bar{L}_R)^*} \times 100$$

$N_s$  = Número de semillas germinadas,  $L_R$  = promedio de la longitud de la raíz del tratamiento (mm), \* indica el control.

### 2.12 Análisis estadístico

Para la determinación de la zona de operación se utilizó un diseño de experimentos con mezclas simplex centroide acoplado con superficie de respuesta. El modelo estadístico para analizar este tipo de diseño de experimentos ha sido propuesto por Scheffé, 1963 donde la ecuación polinomial general es la siguiente:

$$E(y) = \sum_{i=1}^p \beta_i x_i + \sum_{i=1}^p \sum_{i < j}^p \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^p \sum_{i < j}^p \sum_{j < k}^p \beta_{ijk} x_i x_j x_k \quad (1)$$

Para la variable temperatura en las pruebas a nivel planta piloto se utilizó el análisis de series de tiempo. Una serie de tiempo se refiere al conjunto de observaciones sobre una variable que es espaciada en el tiempo. Las series de tiempo son la suma de tres componentes: tendencia, estacionalidad y una variación aleatoria, en este caso se realizó el estudio de la tendencia puesto que está relacionada con la media (Irgoin, 2011) dando información acerca de cómo crece o decrece la temperatura a través del tiempo.

# **Capitulo 3**

## **Resultados y discusión**

3.1.1Diseño de la composición de las mezclas experimentales

El análisis de los componentes se muestran en la Tabla 3.1, de acuerdo a los resultados, se concluyó que se debía aumentar la C:N y reducir la humedad del digestato para permitir el paso de aire, esto se logró adicionando materiales complementarios como FORSU fresca (residuos de fruta) y un agente de volumen como el aserrín. El análisis de estos componentes se muestra en el anexo 1.

El aserrín es un agente de volumen muy común utilizado en el compostaje (Batham *et al.* 2013). Se han reportado trabajos como el de Rodríguez *et al.* (2012) donde evaluaron el compostaje de lodos de agua residual doméstica comparando diferentes agentes de volumen encontrando que el mejor son las virutas de aserrín. De igual manera Banegas *et al.* (2007) obtuvieron buenos resultados en el compostaje de lodos aerobios y anaerobios utilizando aserrín como agente de volumen en una proporción 1:1.

Para aumentar la actividad metabólica del proceso se adiciona FORSU fresca que proporcione materiales de fácil asimilación y que favorezcan el incremento de la temperatura del proceso, así como balancear la relación C:N de la mezcla. De todo lo anterior mencionado se llegó a la propuesta de emplear digestato, aserrín y FORSU en la mezcla de residuos a ser compostados.

Tabla 3.1. Análisis elemental de los componentes de la mezcla

Componente	C	H	N	Relación C:N
Digestato	42.7±5.7	6.6 ± 1.1	2.7 ± 0.3	16.0 ± 2.8
FORSU	42.28 ± 2.73	6.42 ± 1.24	1.87 ± 5.083	23.23 ± 2.66
Aserrín	45.44 ± 2.96	5.98 ± 0.17	0.59 ± 0.08	77.01

3.1.2 Grado de reducción y calor de combustión

La cantidad de oxígeno requerido para llevar a cabo la oxidación completa de un compuesto orgánico es una medida del grado de reducción, así como la energía del compuesto (Spoehr & Milner,1949).

La relación de oxígeno, carbono, e hidrógeno para su completa oxidación a bióxido de carbono y agua está expresada por:

$$\frac{O_2}{C} = \frac{32}{12} = 2.664 \quad \text{y} \quad \frac{O}{H_2O} = \frac{16}{2.016} = 7.936$$

El grado de reducción se expresa en relación con el compuesto más reducido de carbono, el metano el cual contiene 74.84% de carbono y 25.13% de hidrógeno, su grado de reducción es:

$$(74.84 \times 2.664) + (25.13 \times 7.936) = 398.9$$

La fórmula general para calcular el grado de reducción ( $R$ ) esta expresada por:

$$R = \frac{[(\%C \times 2.664) + (\%H \times 7.936) - \%O] \times 100}{398.9}$$

(2)

De donde se obtiene que  $R$  tiene un valor de 26.44%, 30.22% y 29.73% para digestato, aserrín y FORSU, respectivamente. Este valor es usado en la siguiente expresión para estimar el calor de reacción de la materia.

$$H_{rx} = (127)R + 400$$

Obteniendo calores de reacción de 4 202 kcal/kg<sub>MSI</sub> para digestato, 4 237 kcal/kg<sub>MSI</sub> para aserrín y 4,175 kcal/kg<sub>MSI</sub> para FORSU.

Ha sido reportado que el calor de reacción para un lodo crudo de agua residual es de 3,190 kcal/kg, mientras que para su digestato es de 2,570 kcal/kg, (Ayorinde, 1991) mostrando una pérdida en el grado de reducción y como consecuencia una disminución en su cantidad de energía, resultado del metabolismo microbiano. En este trabajo los valores obtenidos tuvieron entre si un valor similar (4,272 kcal/kg para digestato y 4,175 kcal/kg para FORSU) indicando

que en las primeras etapas de la digestión anaerobia el material no perdió energía, es decir, la materia solo fue transformada a compuestos de menor peso molecular, mostrando evidencia de que el digestato requiere un segundo proceso para su estabilización.

### 3.1.3 Determinación del área de experimentación

Las posibles combinaciones de las mezclas que se pueden generar con los 3 componentes se muestra gráficamente en un diagrama ternario donde cada lado del triángulo equilátero representa a cada componente teniendo una escala de 0 a 1.

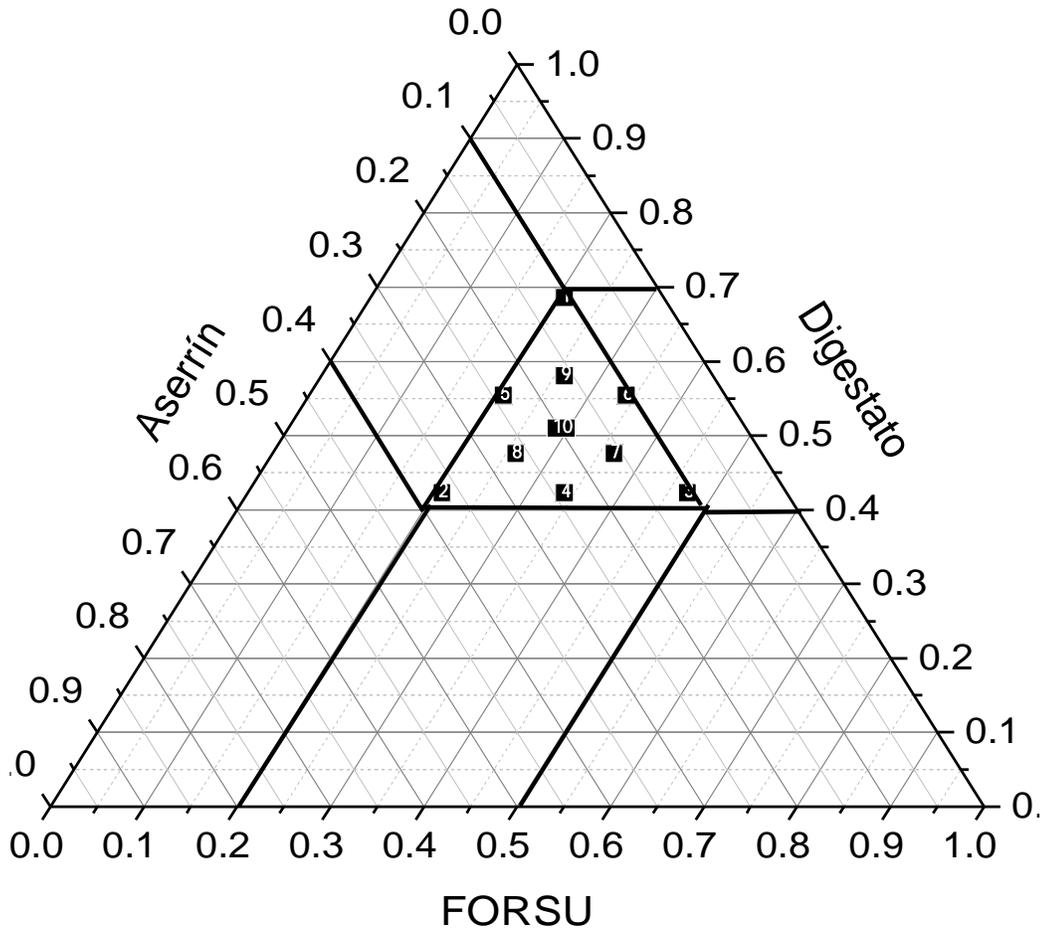


Figura 3.1 Diagrama ternario de los componentes digestato-FORSU-aserrín. Se incluye el área de experimentación, así como las mezclas empleadas en los 10 tratamientos del diseño de mezclas simplex centroide.

Dado que el valor de la relación C:N reportada para el proceso de compostaje se encuentra en un rango de 25-35 y conforme a las propiedades de los componentes de la mezcla (Tabla 3.1) se eligieron diez tratamientos (Figura 3.1), dando mezclas con relación C:N cercanas a esta condición (Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Valores estimados de la relación C:N de los tratamientos del diseño de mezclas y eficiencias de degradación de materia orgánica

<b>Tratamiento</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>Relación C:N</b>	24.1	38.9	25.6	32.2	31.5	24.85	27.95	28.00	27.4	29.7
<b>Eficiencia *(%)</b>	13.83	9.53	18.54	17.33	13.53	27.66	18.47	19.92	24.36	2.31
	13.10	21.20	34.11	35.46	17.22	38.23	17.44	18.93	33.38	0.77

-\*Eficiencia de degradación de materia seca.

### 3.1.4 Superficie de respuesta para la pérdida de materia orgánica

En la Tabla 3.2 se presenta también la eficiencia de degradación de materia orgánica con dos lotes distintos de FORSU y digestato. Los datos experimentales fueron ajustados a este modelo mediante el software IBM SPSS statistics 18. Los resultados son presentados en las ecuaciones 3 y 4 donde los coeficientes de correlación fueron de 0.90 y 0.87, respectivamente. Lo que indica que los modelos representan significativamente la pérdida de materia orgánica en función de las fracciones de los tres componentes de la mezcla. Considerando todos los datos (ambos lotes) se construyó un solo modelo mostrado en la ecuación 5 con un coeficiente de correlación de 0.85.

$$E = -148.25F - 10.51D + 181.08A + 438.58FD - 8.545FA - 357.624AD \tag{3}$$

$$E = -233.54F + 7.432D + 576.86A + 629.29FD + 108.287FA - 1272.53AD \tag{4}$$

$$E = -193.884F - 2.293D + 379.59A + 539.71FD + 54.132FA - 815.05AD \quad (5)$$

Donde:

*F*: Fracción de FORSU

*D*: Fracción de digestato

*A*: Fracción de aserrín

*E*: Eficiencia de materia orgánica perdida (%)

Para evaluar el ajuste de los modelos se utilizó como criterio el factor de inflación de la varianza (FIV) que aporta información acerca de la multicolinealidad de la regresión. Si  $FIV < 10$  los problemas de colinealidad son bajos, si  $100 < FIV < 1,000$  implica una colinealidad moderada y con  $FIV > 1,000$  la colinealidad es severa. La multicolinealidad influye sobre la capacidad de estimar los coeficientes y entre sus causas principales está el uso de modelos sobredefinidos y en el caso del diseño de mezclas a que la suma de las fracciones es 1 (Ortega *et al.* 2014). En el anexo 2 se muestra el análisis estadístico de los modelos.

Las superficies de respuesta de los modelos se presenta en la figura 3.2. Se aprecia en ambos casos una zona de máxima y mínima eficiencia de degradación de materia (figuras 3.2a y 3.2c). La zona de operación se muestra en la gráfica de contornos (figuras 3.2b y 3.2d) ubicada en el lado derecho del triángulo en color naranja y rojo.

En cuanto al modelo con todos los datos, la zona de máxima eficiencia de degradación está compuesta por los siguientes rangos de fracciones en base seca: 0.48-0.62 para digestato, 0.28-0.42 para FORSU y 0.10-0.12 para aserrín, durante 9 días de proceso (Figura 3.2f). De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis de superficie de respuesta, en la zona de operación de máxima degradación se obtienen porcentajes de degradación alrededor del 30% después de 9 días.

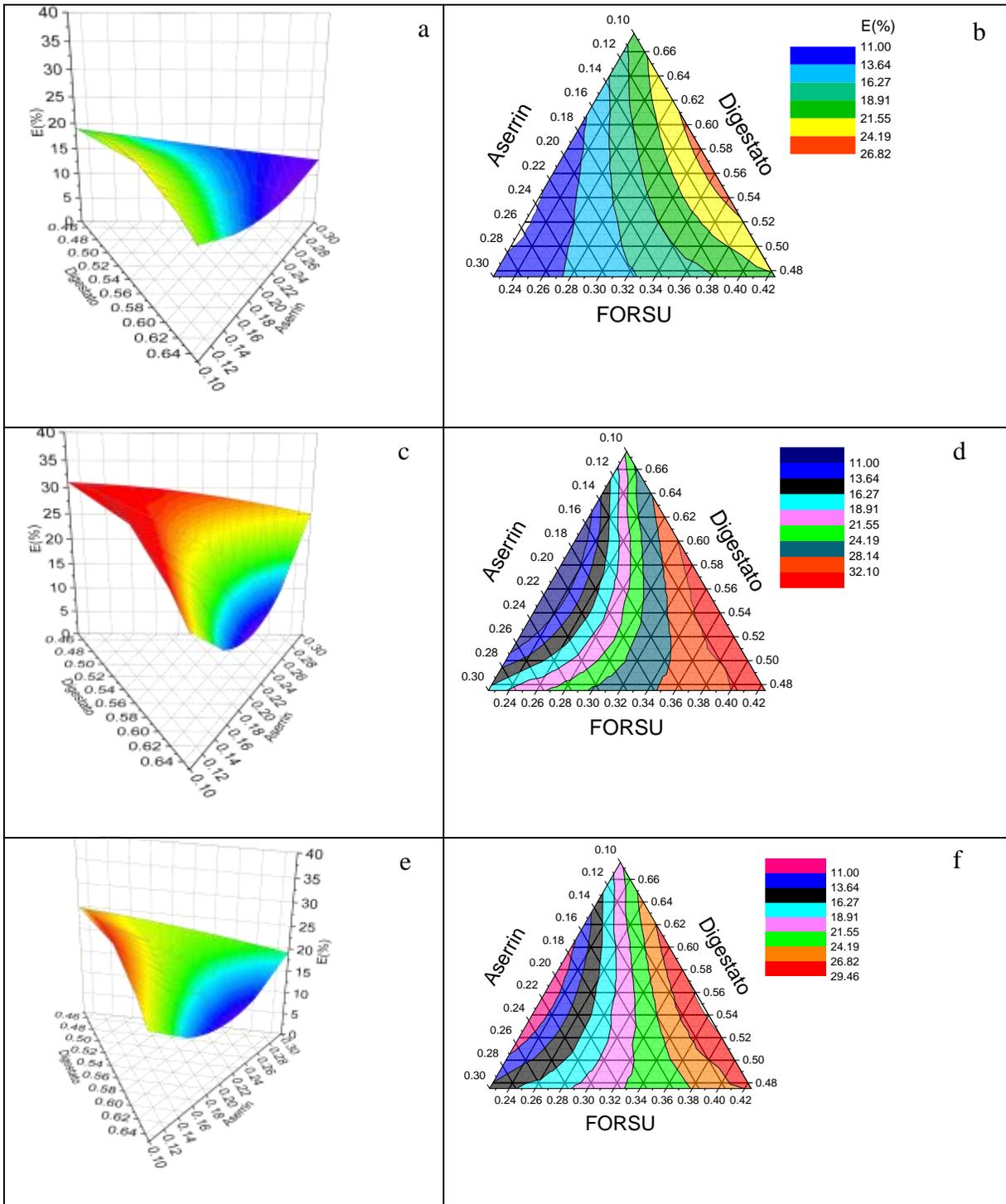


Figura 3.2 Superficies de respuesta (a, c y e), y gráficas de contornos (b, d y f) de la degradación de materia orgánica en función de las fracciones de los tres componentes de la mezcla: digestato, FORSU y aserrín.

El aserrín como agente de carga con fracciones superiores a 0.12 en las mezclas estudiadas disminuye la eficiencia de degradación de materia, lo anterior ha sido atribuido a una baja tasa de degradación, permaneciendo la mayor parte al final (Banegas *et al.* 2006). La naturaleza y la proporción del agente de volumen afecta las velocidades de reacción y la calidad de la composta final. En este sentido, hay estudios que demuestran que el aserrín no es degradado dentro de los primeros 14 días de compostaje (Tang and Katayama, 2005).

En cuanto al digestato, una fracción de 0.62 corresponde a la máxima mineralización dentro de la zona de operación. A diferencia de otros trabajos (Tambone *et al.* 2010; Koenig, 2014; Bustamante *et al.* 2012) donde se utilizan digestatos provenientes de la etapa metanogénica que contienen compuestos de difícil degradación, el digestato de esta investigación al ser un producto de la etapa de acidogénesis de la digestión anaerobia, se encuentra parcialmente degradado, y por lo tanto rico en compuestos de fácil asimilación, como consecuencia la eficiencia de degradación de materia se ve favorecida al tener una mezcla cuya fracción de digestato sea la dominante.

La FORSU fue utilizada como un material complementario con el objetivo de proporcionar a la mezcla compuestos fácilmente asimilables y que permitiera que las bacterias en la etapa inicial tuvieran el sustrato suficiente para reproducirse y alcanzar la temperatura termófila (mayor a 45°C) en los primeros días de proceso. No obstante, los resultados indican que este componente presentó compuestos menos asimilables que el digestato, obteniendo una fracción de 0.48 como la máxima dentro de la zona de operación.

3.1.5 Superficie de respuesta de la relación C:N

Como análisis complementario para determinar la zona de operación se realizó el análisis tomando como variable respuesta la relación C:N al final del proceso (ver anexos 2 y 3). La ecuación del modelo se presenta a continuación:

$$C:N = 80.8F + 34D - 34A + 539.71FD - 221.5FA + 32.2AD \tag{6}$$

La zona de operación (Figura 3.3) está delimitada por las siguientes fracciones en base seca: 0.25-0.4 de FORSU, 0.5-0.65 de digestato y 0.1-0.11 de aserrín.

Dentro de la zona en color gris (Figura 3.3) se obtienen los valores más bajos de relación C:N como consecuencia de una mayor pérdida de carbono orgánico, mientras que las zonas en color amarillo, naranja y rojo corresponden a zonas donde la actividad metabólica fue baja coincidiendo con los resultados obtenidos de la eficiencia de degradación de materia

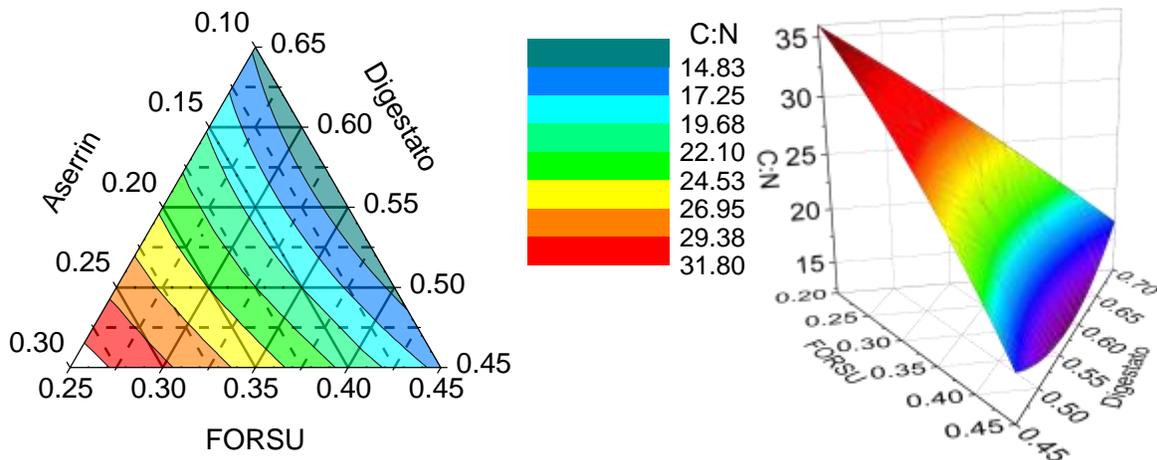


Figura 3.3 Superficies de respuesta y gráficas de contornos de la relación C:N en función de las fracciones de los tres componentes de la mezcla: digestato, FORSU y aserrín

3.1.6 Comprobación de la zona de operación

Dentro de esta zona se eligieron 3 mezclas (Tabla 3.4) para evaluar la eficiencia de degradación de materia orgánica dentro de la zona de operación, obteniendo porcentajes de degradación en un rango de  $32 \pm 2.4\%$

Tabla 3.3. Eficiencia de degradación de materia orgánica (%) y composición de los puntos probados dentro de la zona de operación.

Mezcla	FORSU	Digestato	Aserrín	Eficiencia (%)	
1	0.37	0.53	0.1	34.73	31.76
2	0.32	0.58	0.1	15.12*	30.97
3	0.37	0.47	0.16	35.05	29.47

3.1.7 Determinación del factor energético

El factor energético (*FE*) es el resultado del producto entre temperatura (*T*) en K, el tiempo de exposición (*t*) en h, y la constante de gases *R* ( $8.314 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) y es una medida de la cantidad de energía a la que se expone un material para ser termodegradado (Roe, 2015). En la tabla 3.5 se muestra el *FE* durante los 9 días que duraron los ensayos a  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Tabla 3.4 Determinación del factor energético (FE) al que se sometieron los tratamientos del diseño de mezclas

Tiempo (h)	Factor energético ( $\text{kJh}^{-1}\text{mol}^{-1}$ )	Tiempo (h)	Factor energético ( $\text{kJh}^{-1}\text{mol}^{-1}$ )
12	3.70	120	36.98
24	7.40	132	40.68
36	11.09	144	44.37
48	14.79	156	48.07
60	18.49	168	51.77
72	22.19	180	55.47
84	25.88	192	59.16
96	29.58	204	62.86
108	33.28	216	66.56

Al ser un proceso de respiración aerobia principalmente la materia orgánica se transformó en  $\text{CO}_2$ , por lo tanto bajo una  $T$  constante de  $35^\circ\text{C}$  se suministraron  $66.56 \text{ kJh}^{-1}\text{molCO}_2^{-1}$  que corresponde a la energía utilizada para degradar la mezcla de residuos orgánicos y considerando que es la misma energía suministrada para todos los sistemas en la zona de operación es evidente que la degradación de las mezclas depende del balance entre sus componentes y no de la energía suministrada por fuentes externas.

### 3.2 Pruebas a nivel planta piloto

Se realizaron tres corridas a nivel planta piloto durante 12 días, solo la primera estuvo ubicada fuera de la zona de operación ( $D = 0.53$ ,  $F = 0.28$  y  $A = 0.19$ ) alimentando el reactor con 35.25 kg. Dado que se observó compactación en la mezcla, se decidió operar las siguientes pruebas con una cantidad menor de material. El segundo ensayo se alimentó al reactor con 22.8 kg y se ubicó dentro del área de operación ( $D = 0.62$ ,  $F = 0.28$  y  $A = 0.10$ ). Finalmente la tercera prueba ubicada también dentro de la zona de operación ( $D = 0.53$ ,  $F = 0.36$  y  $A = 0.11$ ), se ensayó con 20 kg de material. Las composiciones de las mezclas se muestran en la Tabla 3.5. Al término de los experimentos el producto obtenido tuvo un aspecto oscuro y no presentó olor desagradable (Figura 3.4).



Figura 3.4. Fotografías del digestato (izquierda) y del producto después de 12 días de proceso aerobio (derecha).

Tabla 3.5. Características de las mezclas utilizadas en las pruebas a nivel planta piloto.

Prueba	Humedad (%)		pH		Materia seca (kg)		Materia orgánica (%)		Relación C:N
	inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Final
1*	79	71	4.5	7.6	7.66	6.86	90	85	-
2	82	82	4.6	7.7	3.54	2.29	93	79	13.58
3	83	79	4.9	7.5	3.81	3.03	85	70	15.18

\* Valores obtenidos después de 17 días de proceso.

### 3.2.1 Eficiencia de degradación de la materia orgánica

La mezcla 1 al encontrarse en un punto lejano al de la zona de operación tuvo un porcentaje de degradación bajo (8.8%). Las mezclas 2 y 3 presentaron la mayor eficiencia de pérdida de materia orgánica (35.5% y 20.4%, respectivamente), valores esperados con el modelo usado en la zona de operación

### 3.2.2 Evolución del pH

Los valores de pH en los tres casos partieron de valores ácidos y en el transcurso del proceso con la producción de compuestos de carácter básico llegó a alcanzar un valor cercano a la neutralidad.

Al principio las mezclas presentaron un pH ácido debido a la presencia de ácidos orgánicos como acético y láctico, posteriormente se hizo presente el sistema ácido-base  $\text{NH}_4^+ - \text{NH}_3$  como consecuencia de la degradación de proteínas cuyo  $\text{pK}_a$  es de 9.24 a 25 °C (Weast *et al.* 1989-1990). Al final del proceso el pH alcanzó un valor cercano al neutro debido al sistema ácido-

base  $\text{HCO}_3^- - \text{CO}_3^{2-}$  con dos constantes de disociación cuyos valores  $\text{pK}_a$  son 6.35 y 10.33 a 25 °C (Weast *et al.* 1989-1990).

### 3.2.3 Pérdida de materia orgánica

La cantidad de materia orgánica es un parámetro a evaluar dentro de la calidad de una composta, y se refiere a la cantidad de carbono orgánico. La Tabla 3.5 muestra que los porcentajes de MO disminuyeron como consecuencia del metabolismo microbiano. Se observa que la prueba 1 presentó la menor pérdida, mientras que las pruebas 2 y 3 sufrieron una pérdida similar de materia orgánica. Cabe señalar que la prueba 1 con una fracción de aserrín de 0.19, tuvo la menor degradación debido a que como se ha mencionado, este compuesto es degradado después del tiempo empleado en el proceso. En los 3 casos el producto final podría tener un uso como mejorador de suelos dado que se ha reportado un contenido máximo de materia orgánica para uso en agricultura de hasta 80.1% en composta. (Fuchs *et al.* 2008).

### 3.2.4 Producción de $\text{CO}_2$

Conforme a lo observado en el transcurso del proceso en el primer día se obtiene la mayor tasa de producción de  $\text{CO}_2$  (Figura 3.5), siendo la segunda prueba (Figuras 3.5b y 3.5c) donde se registró una mayor producción (1,420.52 g  $\text{CO}_2$ ). En la prueba 1 se obtuvo una baja producción dado que se encuentra fuera de la zona de operación, donde con fracciones de aserrín superiores a 0.125 se obtienen bajas eficiencias de degradación de materia orgánica.

La producción total de  $\text{CO}_2$  en los tres casos resultó mayor que la degradación de materia orgánica, debiéndose este resultado probablemente a un error experimental.

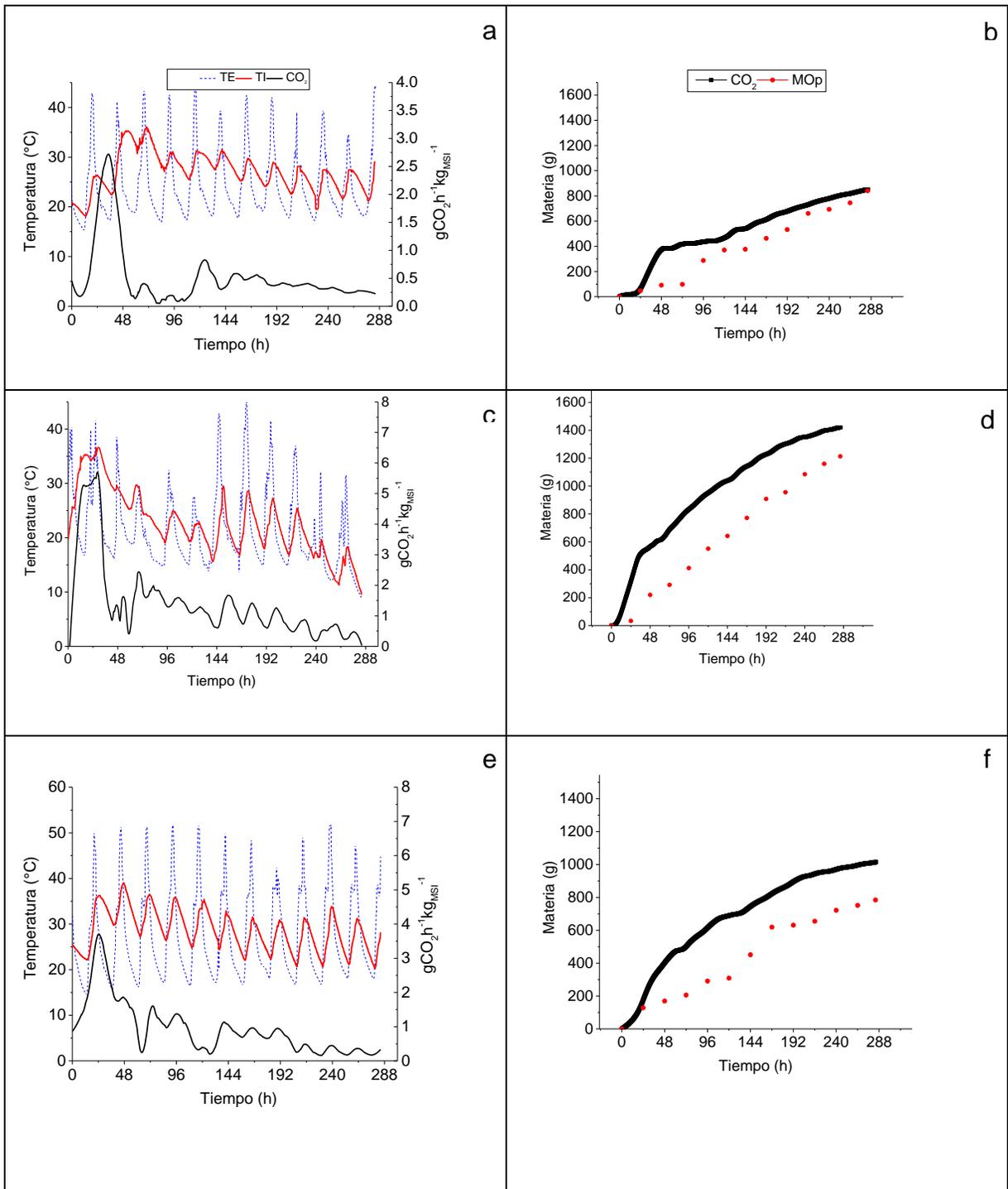


Figura 3.5. Evolución de temperatura, producción de CO<sub>2</sub> y pérdida de materia orgánica en el compostaje de digestato, FORSU y aserrín de pino. Prueba 1(a y b), prueba 2 (c y d) y prueba 3 (e y f). Las líneas punteadas de color azul corresponden a la temperatura externa, las líneas rojas a la temperatura interna y las de color negro representan las tasas de producción de CO<sub>2</sub>. Del lado derecho los puntos rojos se refieren a la materia orgánica pérdida y las líneas de color negro al acumulado de CO<sub>2</sub>.

3.2.5 Correlación entre CO<sub>2</sub> producido y materia orgánica perdida

En la figura 3.5 se observa que existe una correlación lineal entre la pérdida de materia orgánica y la producción de CO<sub>2</sub>, debido a que la degradación de la materia orgánica indica el nivel de la actividad microbiana, así como también lo es la producción de CO<sub>2</sub>. A continuación se presentan las correlaciones obtenidas en las pruebas ensayadas, donde los coeficientes de correlación corroboran lo antes mencionado logrando establecer una relación entre estas dos variables

Tabla 3.6. Producción de CO<sub>2</sub> y materia orgánica acumulados en los experimentos realizados en el reactor

TIEMPO (h)	Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3	
	g CO <sub>2</sub> /kgMSI	MO perdida (g)	g CO <sub>2</sub> /kgMSI	MO perdida (g)	g CO <sub>2</sub> /kgMSI	MO perdida (g)
0	0	0	0	0	0	0
24	8.42	47.09	89.19	33.42	46.38	128.30
48	48.71	91.65	159.79	219.57	105.41	169.26
72	54.51	98.44	194.37	291.81	131.39	205.69
96	56.94	287.77	235.19	412.33	161.15	291.03
120	60.92	370.74	268.36	551.13	180.56	308.74
144	70.48	377.06	293.23	642.50	195.20	450.57
168	79.98	463.47	322.35	771.83	215.56	618.63
192	88.43	532.85	346.63	907.91	234.66	630.58
216	95.42	661.14	367.63	955.84	247.19	654.64
240	101.78	693.68	381.59	1085.19	254.42	721.27
264	106.82	745.09	394.32	1159.79	261.17	751.27
284	110.96	849.35	400.85	1213.36	265.96	783.92

A través de la aplicación de una regresión lineal en el software IBM SPSS statistics 18 se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 3.7 Correlaciones entre producción de CO<sub>2</sub> y pérdida de materia orgánica.

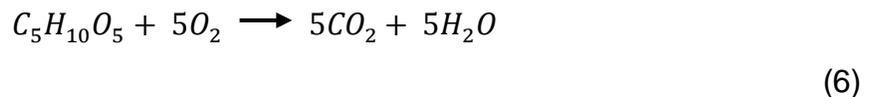
PRUEBA	Y	R <sup>2</sup>
1	1.16	0.95
2	1.35	0.96
3	1.43	0.97

$$CO_2 (kg) = Y * MS_{perdida}$$

donde Y es el rendimiento (kgCO<sub>2</sub>/kgMS<sub>perdida</sub>)

### 3.2.6 Determinación de la fórmula general y el rendimiento teórico

Se determinó la fórmula química para la mezcla 2 tomando en cuenta las fracciones utilizadas, así como la composición elemental de cada componente, es decir, la mezcla con una fracción de 0.32 de FORSU, 0.58 de digestato y 0.1 de aserrín contiene 37.2% de carbono, 3.1% de hidrógeno y 59.63% de oxígeno y con base a la ecuación estequiométrica (6), se determinó que el rendimiento teórico  $Y_{CO_2/sustrato} = 1.46 \text{ g}_{CO_2/sustrato}$ . Conforme al análisis gravimétrico se degradaron 1,215.35 g de materia orgánica, considerando que principalmente es transformada en  $CO_2$ , los datos experimentales muestran que se produjeron 1,420.49 g de  $CO_2$ , por lo tanto el rendimiento experimental es de 1.17 y el error relativo de estos ensayos corresponde al 20%. Al llevar a cabo esta reacción se producirían teóricamente 2,443kcal/kg<sub>MSI</sub>



### 3.2.7 Medición de temperatura

A lo largo del proceso se observan oscilaciones en la temperatura, donde los valores más altos corresponden a lecturas registradas durante el día, mientras que los valores mínimos se tomaron en el transcurso de la noche. Cabe mencionar que estas variaciones se debieron a que los experimentos se realizaron en un invernadero trabajando bajo condiciones reales de operación. En ninguna de las pruebas se logró alcanzar la temperatura termófila, obteniendo valores cercanos a los 30 °C. En la prueba 1 se observa que los valores más altos ocurren durante el segundo y tercer día a diferencia de las pruebas 2 y 3 donde ocurre en el primero (Figuras 3.4a, 3.4c y 3.4e). No se obtuvo un valor elevado porque se utilizó un reactor de 94 L alimentando con una cantidad baja de material (35 kg), siendo que en otros trabajos se han obtenido temperaturas de hasta 55 °C en un reactor alimentado con 101.1 kg de sustrato. Lo anterior

indica que el calor producido es proporcional a la cantidad de sustrato empleado, (Edsel, 2010). En relación a esto, el compostaje de un digestato proveniente de la digestión anaerobia de FORSU realizado en pilas estáticas muestra que es posible alcanzar temperaturas por encima de los 50 °C después de 30 días, ya sea solo o mezclándolo con residuos de poda y de alimentos.

Por otro lado, el tipo de aislante empleado (espuma de poliuretano 2.85 cm de espesor) pudo dar lugar a pérdidas de calor a los alrededores, dado que trabajando bajo condiciones similares pero con un reactor perfectamente aislado con doble pared llena de agua, se han alcanzado temperaturas de hasta 70 °C (Frank-White *et al.* 2014). Este tipo de deficiencia ha podido solucionarse a través del suministro de aire caliente en el reactor (Villaseñor *et al.* 2012). A partir de las 192 h puede observarse que la actividad disminuye notablemente mostrando una tasa de producción de CO<sub>2</sub> baja y temperaturas con valores mínimos muy cercanos a la temperatura externa del reactor, indicando una actividad metabólica baja.

Por otro, lado se realizó un análisis mediante series de tiempo, a la temperatura. El análisis se realizó separando la etapa de calentamiento y enfriamiento, las ecuaciones de las tendencias obtenidas se muestran en la tabla 9 y su representación gráfica en el anexo 4.

Tabla 3.8. Ecuaciones de las tendencias de la variable temperatura en las pruebas realizadas a nivel planta piloto

Prueba	Etapa de calentamiento		Etapa de enfriamiento	
	Temperatura externa	Temperatura interna	Temperatura externa	Temperatura interna
1	$9 \times 10^{-5}x + 0.7985$	$0.0002x + 0.6531$	$3 \times 10^{-6}x + 0.9642$	$-2 \times 10^{-5}x + 1.2159$
2	$2 \times 10^{-5}x + 0.9455$	$0.0003x + 0.7783$	$-1 \times 10^{-5}x + 1.2159$	$-4 \times 10^{-5}x + 1.3821$
3	$0.0002x + 0.6991$	$0.0002x + 0.753$	$4 \times 10^{-6}x + 0.9578$	$-2 \times 10^{-5}x + 1.2011$

Los resultados de la prueba 1 muestran en la etapa de calentamiento, que la pendiente de la tendencia para la temperatura exterior es menor a la temperatura interna mostrando evidencia que dicha diferencia se debe al calor metabólico producido dentro del reactor. En cuanto a la etapa de enfriamiento, en el exterior del reactor, la temperatura muestra una tendencia de aumento, mientras que en el interior del sistema como consecuencia de la disminución de la actividad biológica, la tendencia de la temperatura es decreciente. Un resultado similar se observó en las pruebas 2 y 3. También se puede observar que en la prueba 2 la tendencia de la temperatura externa de enfriamiento, es decreciente acentuando el decremento en la tendencia de la temperatura interna.

### 3.2.8 Pruebas de fitotoxicidad

En cuanto a lo obtenido del índice de germinación las compostas 1 y 2 podrían utilizarse en viveros y como sustitutos de tierra para macetas, mientras que la 3 está en el límite de ser usada de igual manera, por lo que podría ser empleada en reforestación.

Tabla 3.9 Eficiencia de degradación(%), producción de CO<sub>2</sub> (g/kg<sub>MSI</sub>) e índice de germinación (%) de las pruebas realizadas a nivel planta piloto.

Prueba	E (%)	CO <sub>2</sub> (g/kg <sub>MSI</sub> )	IG(%)
1	8.8	111	95
2	35.3	401.27	94
3	20.47	266.41	84

Como parte de la aplicación de la composta producida se propuso utilizarlo como fertilizante en árboles. El lugar donde se realizó la prueba fue en una azotea verde ubicada en la Colonia del Valle en la Ciudad de México. Se seleccionaron semillas de fresnos de hoja ancha (*Fraxinus*

*excelsior*). En la Figura 3.6 se muestran fotografías del desarrollo de las plantas. Se puede apreciar que en ambos casos hay un crecimiento favorable sin indicios de fitotoxicidad, lo que comprueba el uso de la composta como fertilizante. Sin embargo, es importante observar la planta por un periodo mayor



Figura 3.6. Fresnos sembrados con la composta producida.

# **Capitulo 4**

## **Conclusiones y recomendaciones**

#### 4.1 Conclusiones

- A pesar de no alcanzar la temperatura termófila, el producto final no presentó mal olor, fitotoxicidad, tuvo un pH adecuado, relación C:N para ser empleado como sustituto de tierra para macetas, en viveros, o en agricultura ecológica.
- Se determinó una zona de operación en función de fracciones en base seca de digestato (0.48-0.62), FORSU(0.28-0.42) y aserrín (0.1-0.12) donde se obtiene la mayor eficiencia de degradación de materia seca.
- El biosólido se obtiene en 12 días de tratamiento logrando una reducción de 35% de la masa seca inicial.
- El sistema de agitación del reactor (de paletas) no permitió compostear la cantidad de material para la que fue diseñado. Sin embargo para cargas menores a 25 kg se logra compostear el material.

#### 4.2 Recomendaciones

Reducir la humedad del digestato mediante otro método como por ejemplo centrifugación o prensado, debido a que manualmente no es posible reducir la humedad por debajo del 80%.

Emplear otro tipo de agitación que permita un mejor mezclado, puesto que se encontraron zonas donde el material no había sido mezclado adecuadamente.

Mejorar el tipo de aislante del reactor de manera que la pérdida de calor al exterior se vea reducida.

Emplear otro agente de volumen con un tamaño de partícula mayor como paja de trigo para permitir una mejor aireación del material.

#### 4.3 Perspectivas

El biosólido obtenido además de ser utilizado como mejorador de suelos tiene otras aplicaciones como la producción de enzimas. Como prueba preliminar fue comparada la actividad xilanolítica de cuatro cepas de *Trichoderma* con otros sustratos (Rastrojo de maíz, Bagazo de caña y fibra de yuca) encontrando que tanto el biosólido como el rastrojo de maíz presentan la mayor actividad (200 UI/g sustrato).

**Referencias**

Abdullahi, Y. A., Akunna, J. C., White, N. A., Hallett, P. D., & Wheatley, R. (2008). Bioresource Technology Investigating the effects of anaerobic and aerobic post-treatment on quality and stability of organic fraction of municipal solid waste as soil amendment, 99, 8631–8636. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.04.027>

Álvarez De La Puente, J.M., (2010) Manual de compostaje. Junta de Andalucía, Col. Manuales Técnicos, Andalucía.

Ayorinde, O.A., and C.M. Reynolds, Low Temperature Effects on the Design and Performance of Composting of Explosives-Contaminated Soils, U.S. Army Cold Regions Research Engineering Laboratory (USACRREL) Report CETHA-TE-CR-90059 for the U.S. Army Toxic and Hazardous Materials Agency (USATHAMA) (March 1991).

Banegas, V., Moreno, J. L., Moreno, J. I., Garcia, C., Leon, G., & Hernandez, T. (2007). Composting anaerobic and aerobic sewage sludges using two proportions of sawdust. Waste Management, 27(10), 1317-1327.

Batham, M., Gupta, R., & Tiwari, A. (2013). Implementation of Bulking Agents in Composting: A Review, 4(7). <http://doi.org/10.4172/2155-6199.1000205>

Bambara, J., & Athienitis, A. (2013). Integration of Organic Waste Recycling and Greenhouse Agriculture CCTC 2015 Paper Number 1570094359.

Bustamante MA, Restrepo AP, Albuquerque JA, Pérez-Murcia MD, Paredes C, Moral R, *et al.* Recycling of anaerobic digestates by composting: effect of the bulking agent used. *J Clean Prod* 2013; 47: v6,1–9.

Bueno Marquez, P., Diaz Blanco, M. J., Cabrera, F. (2008). Factores que afectan al proceso de compostaje. En: *Compostaje*, (eds) Moreno Casco, J. y Moral Herrero, R. Mundi-Prensa, pp. 111-140.

Costa, F.; Garcia, C.; T. Hernández, T. and Polo, A. (1991). *Residuos orgánicos urbanos. Manejo y utilización*. Ed. CSIC, Madrid.

De Bertoldi M., Vallini G., Pera A. 1985. Technological Aspects of composting including Modelling and Microbiology. En: J.K.R. Gasser (Ed.). *Composting of Agricultural and other wastes*, pp: 27-40. Elsevier Applied Science Publishers, Bruselas.

Demirbas, M. F., Balat, M., & Balat, H. (2011). Biowastes-to-biofuels. *Energy Conversion and Management*, 52(4), 1815–1828. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.10.041>

Dehghani, R., Asadi, M. A., Charkhloo, E., & Mostafaie, G. (2012). Identification of Fungal Communities in Producing Compost by Windrow Method, *Journal of Environmental Protection*, 2012 (3), 61–67.

DOF. *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos*. México. 2003 (8 de octubre).

Flores, A., Rodríguez, C., Solares, V. (2012). Informe de la situación del medio ambiente en México, compendio de estadísticas ambientales indicadores clave y de desempeño ambiental. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), México DF.

Fuchs, J. G., Berner, A., Mayer, J., Smidt, E., & Schleiss, K. (2008). Influence of compost and digestates on plant growth and health: potentials and limits. In Proceedings of the international congress CODIS 2008 (pp. 101-110). Research Institute of Organic Agriculture.

Gu, W., Zhang, F., Xu, P., Tang, S., Xie, K., Huang, X., & Huang, Q. (2011). Bioresource Technology Effects of sulphur and *Thiobacillus thioparus* on cow manure aerobic composting. *Bioresource Technology*, 102(11), 6529–6535. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.03.049>

Hubbe, M. A., Nazhad, M., & Sánchez, C. (2010). Composting as a Way to Convert Cellulosic Biomass and Organic Waste into High-Value Soil Amendments: A Review. 5(4), 2808-2854

Haug, T. R (1993). *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Lewis Publishers: Boca Raton. (1993).

Iglesias, E., (2014). Aspectos físico- químicos, bioquímicos y microbiológicos del proceso de compostaje. Evaluación de la calidad. Inst. Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca.

Irgoin, C. H. A. (2011). Análisis De Series De Tiempo. Contribuciones a la Economía,(2011-02).Jhorar, B.S.; Phogat, V., Malik E. (1991). Kinetics of composting rice straw with glue waste at different C/N ratios in a semiarid environment. *Arid Soil Rest. Rehabil.*, 5: 297-306.

Jiang, T., Schuchardt, F., Li, G., Guo, R., & Zhao, Y. (2011). Effect of C / N ratio, aeration rate and moisture content on ammonia and greenhouse gas emission during the composting. *Journal of Environmental Sciences*, 23(10), 1754–1760. [http://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60591-8](http://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60591-8)

K. J. Andersen and M. Krysell (2005), “Dry matter (DM), loss on ignition (LOI) and total organic carbon (TOC) report on an evaluation study,” Horizontal.  
<https://www.ecn.nl/docs/society/horizontal/EvaluationDM-LOI-TOC.pdf>.

Koenig, B. (2014). Comparison of Compost Efficiency of Digestate to Undigested Organic Waste from a Dry Anaerobic Digester. University of Wisconsin System, Environmental Research and Innovation center.

Kuo S, Ortiz-Escobar ME, Hue NV, Hummel RL (2004) Composting and compost utilization for agronomic and container crops. *Recent Res Devel Environ Biol* 1:451–513.

Kulcu, R., & Yaldiz, O. (2004). Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes, *Bioresource Technology* 93, 49–57.

<http://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.10.007>

Lázaro, F. J. (2014). *Producción Sostenible Del Compostaje Para El Champiñón De La Rioja Través Del Análisis Del Ciclo De Vida*. Universidad de la Rioja. 113.

López, W. (2010). Estudio del uso de residuos industriales no peligrosos a través del proceso de compostaje y su aplicación para el cultivo de maíz y frijol (Maestría). Instituto Politecnico Nacional.(32-33).

Masse L, Massé DI, Pellerin Y. The use of membranes for the treatment of manure: a critical literature review. *Biosyst Eng* 2007;98:371–80.

Martínez, L. N., Miranda, B. H., Alvarado, R. P., & Hernandez, C. B. (2013). Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México 2013. Anual, Secretaria de Medio Ambiente de Gobierno del Distrito Federal, México.

Matsinhe, C. D. C. (2011). Studies on the influence of organic waste biodegradability in the composting process.

Melo, L. L. (2006). Análisis y caracterización de ácidos fúlvicos y su interacción con algunos metales pesados. Trabajo de Investigación. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Pachuca de Soto, Hidalgo.

Möller, K. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review, (3), 242–257. <http://doi.org/10.1002/elsc.201100085>

Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y análisis de experimentos* (Segunda Edición ed.). (R. P. García, Trad.) D.F.: Limusa Wiley.

Noyola, L., Hernández, B., Ayala, C. Paredes, R., Soto, A. (2014). *Inventario de Residuos Sólidos CDMX-2014*. Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México. México D.F.

Ortega-Pérez, D. C., Bustamante-Rua, M. O., Gutiérrez-Rôa, D. F., & Correa-Espinal, A. A. (2015). Mixture experiments in industrial formulations. *Dyna*, 82(189), 149-156.

Pettit, R. E. (2004). *Organic matter, humus, humate, humic acid, fulvic acid and humin: Their importance in soil fertility and plant health*. CTI Research.

Phillip, E. A. (2010). *The Design and Construction of a Pilot-Scale Compost Reactor for the Study of Gas Emissions from Compost under Different Physical Conditions* (Doctoral dissertation, McGill University).

Pimentel, R. I., Pérez, C. S., Hermosillo, C. O., & Vives, F. R. (09 de 2015). Producción de metano a partir de la mezcla del lixiviado de residuos sólidos urbanos y el agua residual municipal. *Rev. Cubana Quím.*, 27(3), 243-251.

Ram, P., & Mar, J. (2003). Degradación enzimática de celulosa por actinomicetos termófilos: aislamiento, caracterización y determinación de la actividad celulolítica, 10(1), 67-77.

Rehl, T., & Müller, J. (2011). Resources , Conservation and Recycling Life cycle assessment of biogas digestate processing technologies. “*Resources, Conservation & Recycling*,” 56(1), 92–104. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.08.007>

Roe, W. (2016) Degradación de películas de polietileno oxo-biodegradables sometidas a composteo y termo-oxidación. (Doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México.

Rodríguez, R. I., Rodríguez, S., Monroy O., & Ramírez, F. (2015). Effect of organic loading rate on the performance of two-stage anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). *Water science and technology* 72.3. <http://doi.org/10.2166/wst.2015.223>

Ryckeboer, J., Mergaert, J., Coosemans, J., Deprins, K. Swings, J. (2003). Microbiological aspects of biowaste during composting in a monitored compost bin. *J. Appl. Microbiol.* 94:127-133.

Semarnat. Bases para Legislar la Prevención y Gestión Integral de Residuos. México. 2006.

Sauer, T. J., & Richard, T. L. (2009). Determination of thermal properties of composting bulking materials, (April 2016). <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.056>

Sharma VK, Caudatelli M, Fortuna F, Cornacchia G (1997). Processing of urban and agro-industrial residues by aerobic composting: review. *Energy Convers Manag*;38:453–78.

Sheets, J. P., Yang, L., Ge, X., Wang, Z., & Li, Y. (2015). Beyond land application : Emerging technologies for the treatment and reuse of anaerobically digested agricultural and food waste. *Waste Management*, 44, 94–115. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.037>

Sierra, C.; Rojas, C. 2003. La materia orgánica y su efecto en las características físico-químicas y biológicas del suelo. *Serie Remehue*, 71: 5-22.

Soliva, M., & Marga, L. (2004). *Calidad del compost: Influencia del tipo de materiales tratados y de las condiciones del proceso*. Barcelona.

Spoehr, H. A. & Milner, H. W. (1949). The chemical composition of chlorella; Effect of environmental conditions. 24 120.

Tang, J.C., Inoue, Y., Yasuta, T., Yoshida, S., Katayama, A., 2003. Chemical and microbial properties of various compost products. *Soil Sci. Plant Nutr.* 49, 273–280.

Tambone, F., Scaglia, B., Imporzano, G. D., Schievano, A., Orzi, V., Salati, S., & Adani, F. (2010). Chemosphere Assessing amendment and fertilizing properties of digestates from anaerobic digestion through a comparative study with digested sludge and compost. *Chemosphere*, 81(5), 577–583. <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.08.034>

U.S. Department of Agriculture and U.S. Composting Council. 2001. Test methods for the examination of composting and compost. Edaphos International, Houston, TX.

USDA, N. (2007). National Engineering Handbook.

Verma, Sh., (2002). Anaerobic Digestion of Biodegradable Organics in Municipal Solid Wastes. Department of Earth and Environmental Engineering, Foundation School of Engineering and Applied Science, Columbia University.

Weast, R. C., Lide, D. R., Astle, M. J. & Beyer, W. H. 1989-1990. CRC handbook of chemistry and physics. CRC Press, Boca Raton, Florida

Ziemiński, K., & Frąc, M. (03 de 2012). Methane fermentation process as anaerobic digestion of biomass: Transformations, stages and microorganisms. *African Journal of Biotechnology*, 11(18), 4126-4130

Zinder, S. y Koch, M. (1984) "Non-acetoclastic methanogenesis from acetate: acetate oxidation by a thermophilic syntrophic co culture", *Arch. Microbiology*, 138: 263-272

## Análisis elemental para FORSU, digestato y aserrín

Muestra	Peso (mg)	PRÁCTICOS			CORREGIDOS		
		C	H	N	C	H	N
Digestato1	2.585	43.08	6.48	2.25	43.10	6.64	2.22
	2.579	44.02	6.61	2.31	44.04	6.77	2.27
	3.147	42.6	6.51	2.22	42.62	6.67	2.19
Digestato2	2.408	40.64	5.38	2.39	40.66	5.51	2.35
	2.453	40.16	5.16	2.41	40.18	5.29	2.37
	2.314	40.61	5.27	2.43	40.63	5.40	2.39
Digestato3	2.835	51.64	7.44	2.97	51.67	7.62	2.92
	2.512	51.49	7.44	2.98	51.52	7.62	2.93
	2.447	52.17	7.56	3.06	52.20	7.75	3.01
Digestato4	2.587	53.72	7.7	2.88	53.75	7.89	2.84
	2.096	54.2	7.5	3	0.40	7.68	2.95
	2.439	54.18	7.63	2.94	54.21	7.82	2.89
Digestato5	2.388	43.56	5.9	3.04	43.58	6.05	2.99
	2.127	40.04	5.3	2.92	40.06	5.43	2.87
	2.25	41.24	5.5	3.01	41.26	5.64	2.96
FORSU1	2.375	39.91	6.17	1.96	39.93	6.32	1.93
	2.807	38.23	6.39	1.87	38.25	6.55	1.84
	2.183	39.25	6.18	1.97	39.27	6.33	1.94
FORSU2	2.572	45.57	6.25	1.61	45.59	6.40	1.59
	2.599	45.69	5.81	1.62	45.71	5.95	1.59
	2.084	41.25	6.18	1.97	41.27	6.33	1.94
FORSU3	2.483	43.25	6.24	1.85	43.27	6.39	1.82
	2.365	43.92	6.37	1.89	43.94	6.53	1.86
	2.086	43.25	6.18	1.97	43.27	6.33	1.94
Aserrín	2.709	42.01	5.94	0.58	42.03	6.09	0.57
	2.151	47.36	5.65	0.69	47.38	5.79	0.68
	2.937	46.87	5.93	0.54	46.89	6.08	0.53

Se obtuvo para acetanilida: %C = 71.06, %H= 6.66 y %N = 10.52

Estadísticos de colinealidad

<b>Modelo de la ecuación 3</b>			
<b>Modelo</b>	<b>Coefficientes</b>		<b>FIV</b>
I	D	30.616	1.000
II	D	14.981	8.170
	F	30.665	8.170
III	D	17.506	9.745
	F	32.619	8.449
	A	-11.629	4.097
IV	D	-15.616	90.661
	F	-84.208	306.626
	A	17.789	11.922
	FD	308.411	554.096
V	D	-10.099	97.457
	F	-149.521	588.736
	A	181.127	742.139
	FD	439.259	856.011
	AD	-361.749	885.048
VI	D	-10.506	134.432
	F	-148.245	696.694
	A	181.079	742.204
	FD	438.580	864.177
	AD	-357.624	1000.473
	FA	-8.545	140.574
VII	D	-22.942	364.631
	F	-183.802	1254.041
	A	31.026	4850.286
	FD	542.248	2127.516
	AD	-1.870	6706.359
	FA	688.158	6352.025
	FDA	-1547.943	7515.280

<b>Modelo de la ecuación. 4</b>			
<b>Modelo</b>	<b>Coefficientes</b>		<b>FIV</b>
I	D	41.527	1.000
II	D	4.935	8.170
	F	71.771	8.170
III	D	3.909	9.745
	F	70.976	8.449
	A	4.726	4.097
IV	D	-29.778	78.884
	F	-47.970	263.772
	A	35.417	11.132
	FD	311.542	471.929
V	D	1.203	95.767
	F	-217.184	412.952
	A	570.331	628.101
	FD	622.346	607.531
	AD	-1205.418	780.775
VI	D	7.423	140.572
	F	-233.536	504.671
	A	576.861	634.156
	FD	629.286	611.982
	AD	-1272.529	940.122
	FA	108.284	119.188
VII	D	-96.863	467.483
	F	-409.771	781.199
	A	-488.204	4814.087
	FD	1281.366	1632.014
	AD	1422.931	7611.823
	FA	4434.273	5056.585
	FDA	-10475.998	7084.317

<b>Modelo de la ecuación 5</b>			
<b>Modelo</b>	<b>Coefficientes</b>		<b>FIV</b>
I	D	36.071	1.000
II	D	9.958	8.170
	F	51.218	8.170
III	D	10.707	9.745
	F	51.798	8.449
	A	-3.451	4.097
IV	D	-25.488	78.884
	F	-76.005	263.772
	A	29.525	11.132
	FD	334.738	471.929
V	D	-5.402	95.767
	F	-185.710	412.952
	A	376.320	628.101
	FD	536.239	607.531
	AD	-781.497	780.775
VI	D	-2.293	140.572
	F	-193.884	504.671
	A	379.585	634.156
	FD	539.708	611.982
	AD	-815.047	940.122
	FA	54.132	119.188
VII	D	-55.015	467.483
	F	-282.980	781.199
	A	-158.861	4814.087
	FD	869.369	1632.014
	AD	547.648	7611.823
	FA	2241.146	5056.585
	FDA	-5296.163	7084.317

<b>Modelo de la ecuación 6</b>			
<b>Modelo</b>	<b>Coefficientes</b>		<b>FIV</b>
I	D	18.592	1
II	D	13.615	8.17
	F	9.761	8.17
III	D	8.767	9.745
	F	6.008	8.449
	A	22.338	4.097
IV	D	16.364	65.091
	F	-0.105	19.066
	A	80.904	407.291
	FD	-140.439	572.892
V	D	28.933	97.457
	F	96.787	588.736
	A	-34.566	742.139
	FD	83.843	885.048
	AD	-230.01	856.011
VI	D	34.019	134.432
	F	80.817	696.694
	A	-33.958	742.204
	FD	32.208	1000.473
	AD	-221.505	864.177
	FA	106.958	140.574
VII	D	29.771	364.631
	F	68.67	1254.041
	A	-85.222	4850.286
	FD	153.746	6706.359
	AD	-186.088	2127.516
	FA	344.977	6352.025
	FDA	-528.834	7515.28

Datos estimados con los modelos desarrollados para construir las superficies de respuesta

<b>FORSU</b>	<b>Digestato</b>	<b>Aserrín</b>	<b>Lote 1 E(%)</b>	<b>Lote 2 E(%)</b>	<b>Modelo general E(%)</b>	<b>C:N</b>
0.2	0.45	0.35	11.55	22.33	17.04	35.98
0.21	0.45	0.34	11.83	22.94	17.48	35.46
0.22	0.45	0.33	12.11	23.52	17.90	34.91
0.23	0.45	0.32	12.39	24.08	18.32	34.35
0.24	0.45	0.31	12.67	24.62	18.72	33.76
0.25	0.45	0.3	12.95	25.14	19.12	33.15
0.26	0.45	0.29	13.24	25.64	19.50	32.52
0.27	0.45	0.28	13.53	26.12	19.87	31.87
0.28	0.45	0.27	13.82	26.57	20.24	31.20
0.29	0.45	0.26	14.11	27.00	20.59	30.50
0.3	0.45	0.25	14.40	27.41	20.93	29.79
0.31	0.45	0.24	14.70	27.80	21.26	29.05
0.32	0.45	0.23	14.99	28.17	21.57	28.29
0.33	0.45	0.22	15.29	28.52	21.88	27.51
0.34	0.45	0.21	15.59	28.84	22.18	26.71
0.35	0.45	0.2	15.89	29.14	22.46	25.88
0.36	0.45	0.19	16.20	29.42	22.74	25.04
0.37	0.45	0.18	16.50	29.68	23.00	24.17
0.38	0.45	0.17	16.81	29.92	23.26	23.29
0.39	0.45	0.16	17.12	30.14	23.50	22.38
0.4	0.45	0.15	17.43	30.33	23.73	21.45
0.41	0.45	0.14	17.74	30.50	23.95	20.50
0.42	0.45	0.13	18.05	30.66	24.16	19.53
0.43	0.45	0.12	18.37	30.78	24.36	18.53
0.44	0.45	0.11	18.69	30.89	24.55	17.52
0.45	0.45	0.1	19.00	30.98	24.73	16.48
0.2	0.7	0.1	17.30	17.37	17.17	16.76
0.2	0.69	0.11	16.21	14.51	15.20	17.60
0.2	0.68	0.12	15.20	11.91	13.41	18.44
0.2	0.67	0.13	14.25	9.57	11.77	19.28
0.2	0.66	0.14	13.38	7.47	10.30	20.10
0.2	0.65	0.15	12.57	5.64	8.99	20.92
0.2	0.64	0.16	11.84	4.05	7.84	21.74
0.2	0.63	0.17	11.18	2.73	6.86	22.54
0.2	0.62	0.18	10.60	1.65	6.04	23.35
0.2	0.61	0.19	10.08	0.83	5.38	24.14
0.2	0.6	0.2	9.64	0.27	4.89	24.93
0.2	0.59	0.21	9.26	-0.04	4.56	25.71

0.2	0.58	0.22	8.96	-0.10	4.39	26.49
0.2	0.57	0.23	8.73	0.10	4.38	27.26
0.2	0.56	0.24	8.57	0.55	4.54	28.02
0.2	0.55	0.25	8.49	1.26	4.86	28.77
0.2	0.54	0.26	8.47	2.22	5.35	29.52
0.2	0.53	0.27	8.53	3.44	5.99	30.27
0.2	0.52	0.28	8.65	4.91	6.80	31.00
0.2	0.51	0.29	8.85	6.63	7.78	31.73
0.2	0.5	0.3	9.12	8.61	8.91	32.46
0.2	0.49	0.31	9.47	10.85	10.21	33.18
0.2	0.48	0.32	9.88	13.34	11.67	33.89
0.2	0.47	0.33	10.36	16.08	13.30	34.59
0.2	0.46	0.34	10.92	19.08	15.09	35.29
0.2	0.45	0.35	11.55	22.33	17.04	35.98
0.45	0.45	0.1	19.00	30.98	24.73	16.48
0.44	0.46	0.1	19.99	31.94	25.72	15.96
0.43	0.47	0.1	20.89	32.78	26.61	15.48
0.42	0.48	0.1	21.70	33.50	27.38	15.05
0.41	0.49	0.1	22.42	34.09	28.05	14.66
0.4	0.5	0.1	23.05	34.55	28.61	14.32
0.39	0.51	0.1	23.60	34.89	29.07	14.02
0.38	0.52	0.1	24.05	35.10	29.41	13.77
0.37	0.53	0.1	24.42	35.18	29.65	13.56
0.36	0.54	0.1	24.71	35.14	29.78	13.39
0.35	0.55	0.1	24.90	34.97	29.80	13.27
0.34	0.56	0.1	25.01	34.68	29.71	13.19
0.33	0.57	0.1	25.03	34.26	29.52	13.16
0.32	0.58	0.1	24.96	33.72	29.21	13.17
0.31	0.59	0.1	24.80	33.05	28.80	13.22
0.3	0.6	0.1	24.56	32.25	28.29	13.32
0.29	0.61	0.1	24.23	31.33	27.66	13.47
0.28	0.62	0.1	23.81	30.28	26.93	13.65
0.27	0.63	0.1	23.30	29.11	26.08	13.89
0.26	0.64	0.1	22.71	27.81	25.13	14.16
0.25	0.65	0.1	22.03	26.38	24.07	14.49
0.24	0.66	0.1	21.26	24.83	22.91	14.85
0.23	0.67	0.1	20.40	23.16	21.63	15.26
0.22	0.68	0.1	19.46	21.35	20.25	15.71
0.21	0.69	0.1	18.42	19.42	18.76	16.21
0.2	0.7	0.1	17.30	17.37	17.17	16.76
0.25	0.5	0.25	12.54	15.91	14.24	28.73

0.26	0.5	0.24	13.23	17.30	15.28	27.92
0.27	0.5	0.23	13.92	18.68	16.30	27.08
0.28	0.5	0.22	14.61	20.03	17.31	26.23
0.29	0.5	0.21	15.31	21.36	18.31	25.35
0.3	0.5	0.2	16.00	22.66	19.30	24.46
0.31	0.5	0.19	16.70	23.95	20.28	23.54
0.32	0.5	0.18	17.40	25.21	21.25	22.60
0.33	0.5	0.17	18.10	26.46	22.21	21.64
0.34	0.5	0.16	18.80	27.68	23.16	20.66
0.35	0.5	0.15	19.50	28.88	24.09	19.66
0.34	0.51	0.15	19.66	28.21	23.84	19.43
0.33	0.52	0.15	19.72	27.42	23.48	19.25
0.32	0.53	0.15	19.70	26.50	23.02	19.11
0.31	0.54	0.15	19.59	25.45	22.44	19.02
0.3	0.55	0.15	19.39	24.28	21.76	18.97
0.29	0.56	0.15	19.10	22.98	20.97	18.97
0.28	0.57	0.15	18.73	21.56	20.07	19.01
0.27	0.58	0.15	18.26	20.01	19.06	19.09
0.26	0.59	0.15	17.71	18.33	17.95	19.22
0.25	0.6	0.15	17.08	16.53	16.72	19.39
0.25	0.59	0.16	16.30	15.32	15.74	20.36
0.25	0.58	0.17	15.60	14.37	14.92	21.31
0.25	0.57	0.18	14.97	13.67	14.27	22.26
0.25	0.56	0.19	14.40	13.23	13.78	23.20
0.25	0.55	0.2	13.92	13.04	13.45	24.14
0.25	0.54	0.21	13.50	13.10	13.28	25.07
0.25	0.53	0.22	13.15	13.42	13.28	25.99
0.25	0.52	0.23	12.88	14.00	13.44	26.91
0.25	0.51	0.24	12.67	14.83	13.76	27.82
0.25	0.5	0.25	12.54	15.91	14.24	28.73
0.28	0.53	0.19	16.09	19.19	17.60	22.92
0.36	0.54	0.1	24.71	35.14	29.78	13.39
0.37	0.53	0.1	24.42	35.18	29.65	13.56
0.38	0.52	0.1	24.05	35.10	29.41	13.77
0.39	0.51	0.1	23.60	34.89	29.07	14.02
0.4	0.5	0.1	23.05	34.55	28.61	14.32
0.41	0.49	0.1	22.42	34.09	28.05	14.66
0.42	0.48	0.1	21.70	33.50	27.38	15.05

## Análisis gravimétrico

## Prueba 1.

## Inicial

Peso del crisol (g)	M + crisol (g)	Crisol+MS a 105°C (g)	C+ M calcinada a 550°C (g)	M húmeda (g)	M seca (g)	Cenizas (g)	H (%)	ST (%)	SV (%)	% Cenizas (SF)
51.9339	82.0603	58.3347	52.5404	30.13	6.40	0.61	79	21	91	9
55.8789	81.3325	60.7080	56.4169	25.45	4.83	0.54	81	19	89	11
73.7633	100.3286	79.6156	74.3036	26.57	5.85	0.54	78	22	91	9
Promedio							79	21	90	10

## Final

Peso del crisol (g)	M + crisol (g)	Crisol+MS a 105°C (g)	C+ M calcinada a 550°C (g)	M húmeda (g)	M seca (g)	Cenizas (g)	H (%)	ST (%)	SV (%)	% Cenizas (SF)
56.7054	69.0586	60.0381	57.1735	12.35	3.33	0.47	73	27	86	14
51.9313	71.9371	57.8207	52.884	20.01	5.89	0.95	71	29	84	16
55.8766	73.3621	61.0306	56.6871	17.49	5.15	0.81	71	29	84	16
Promedio							71	29	85	15

## Prueba 2.

## Inicial

Peso del crisol (g)	M + crisol (g)	Crisol+MS a 105°C (g)	C+ M calcinada a 550°C (g)	M húmeda (g)	M seca (g)	Cenizas (g)	H (%)	ST (%)	SV (%)	% Cenizas (SF)
51.3767	62.6326	53.4199	51.5307	11.26	2.04	0.15	82	18	92	8
49.1147	65.7941	52.1565	49.3364	16.63	3.04	0.22	82	18	93	7
Promedio							82	18	93	7

## Final

Peso del crisol (g)	M + crisol (g)	Crisol+MS a 105°C (g)	C+ M calcinada a 550°C (g)	M húmeda (g)	M seca (g)	Cenizas (g)	H (%)	ST (%)	SV (%)	% Cenizas (SF)
31.1636	47.2819	34.1620	31.7797	16.12	3.00	0.62	81	19	79	21
34.9309	43.0110	36.4015	35.2509	8.08	1.47	0.32	82	18	78	22
Promedio							82	18	79	21

## Prueba 3

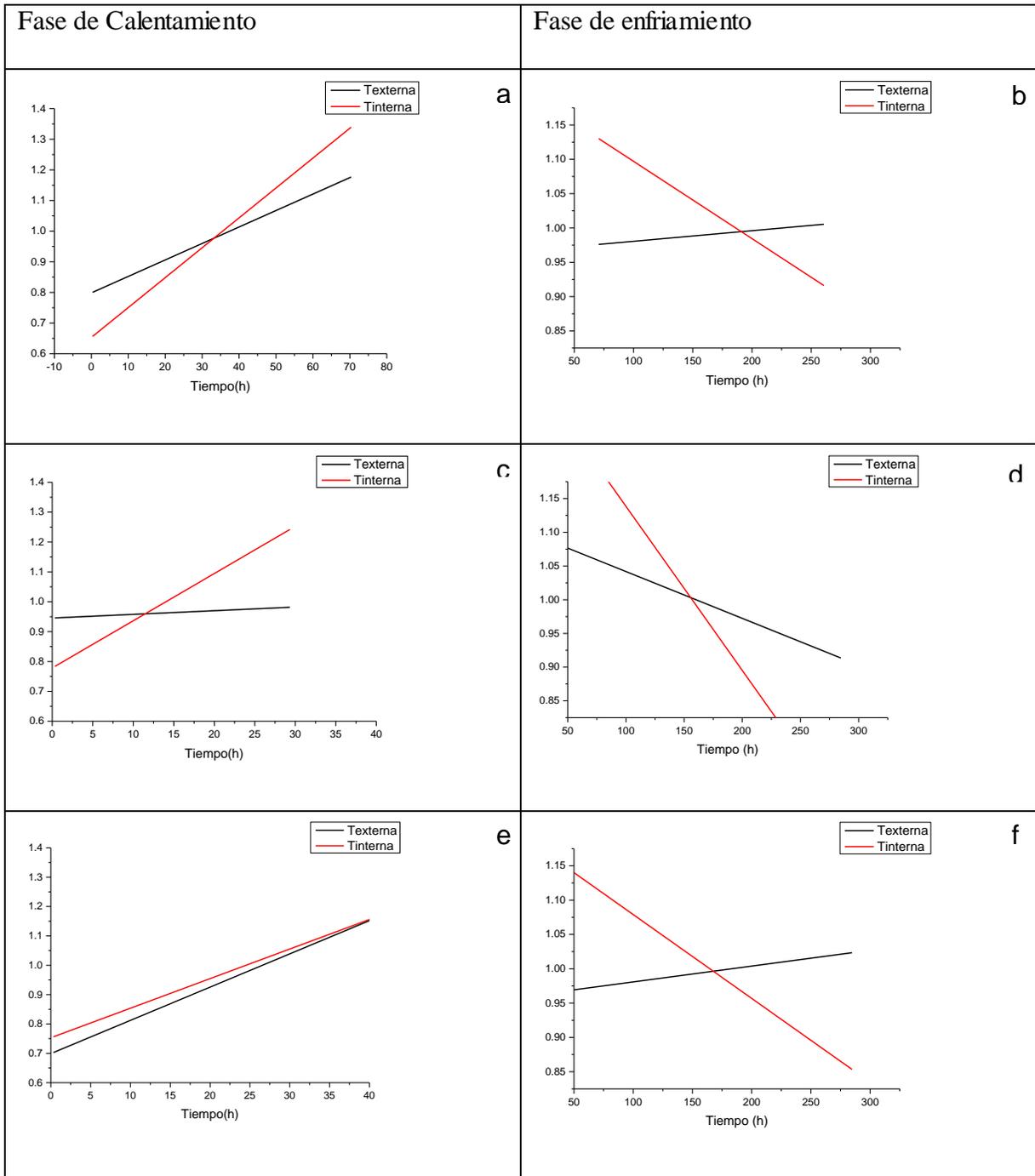
## Inicial

Peso del crisol (g)	M + crisol (g)	Crisol+MS a 105°C (g)	C+ M calcinada a 550°C (g)	M húmeda (g)	M seca (g)	Cenizas (g)	H (%)	ST (%)	SV (%)	% Cenizas (SF)
38.9589	64.3083	42.9720	39.5973	25.35	4.01	0.64	84	16	84	16
36.9494	52.1002	39.5988	37.3147	15.15	2.65	0.37	83	17	86	14
Promedio							83	17	85	15

## Final

Peso del crisol (g)	M + crisol (g)	Crisol+MS a 105°C (g)	C+ M calcinada a 550°C (g)	M húmeda (g)	M seca (g)	Cenizas (g)	H (%)	ST (%)	SV (%)	% Cenizas (SF)
34.9309	50.9045	38.3432	36.0802	15.97	3.41	1.15	79	21	66	34
36.4375	51.8185	39.7416	37.3396	15.38	3.30	0.90	79	21	73	27
Promedio							79	21	70	30

Análisis de tendencia de la Temperatura en el proceso de compostaje a escala piloto. prueba 1 (a y b), prueba 2 (c y d), prueba 3 (e y f).



Datos empleados para determinar el índice de germinación

Semilla	Prueba 1			Prueba 2			Prueba 3			Control		
1	0.67	1.41	2.04	1.45	1.12	1.21	1.03	1.22	1.13	1.2	1.1	0.86
2	1.52	1.19	1.3	1.03	1.12	0.95	1.47	0.73	1.8	1.54	0.95	0.48
3	0.58	1.14	1.45	1.42	1.66	1.14	0.98	1.43	1.1	0.93	0.96	0.32
4	0.89	1.59	1.33	1.56	1.36	1.04	1.24	0.83	1.52	1.3	0.53	2.1
5	0.6	0.14	1.02	0.62	1.08	1.11	0.96	0.9	0.74	2.07	1.12	1.02
6	0.75	0.96	0.65	1.11	1.29	1.87	0.68	0.63	1.1	0.84	1.6	1.78
7	1.36	0.67	1.18	0.85	0.94	1.92	0.91	1.08	1.12	1.32	1.2	1.1
8	0.99	0.68	0.83	1.23	0.45	0.85	0.68	1.49	1.15	1.3	0.91	0.56
9	0.46	0.86	1.1	0.83	0.72	1.1	0.58	0.74	0.71	0.3	1.1	0.79
10	0.73	1.42	1.35	1.22	1.32	0.83	1.02	1.14	1.17	0.57	0.89	0.68
11	1.32	0.92	1.57	1.01	0.65	0.71	1.15	0.71	0.46	0.72	0.56	1.21
12	0.55	1.38	1.35	1.28	1.13	0.75	0.53	0.66	1.1	0.77	0.63	0.69
13	0.94	0.87	0.75	0.84	0.95	0.9	0.65	0.78	0.79	1.2	1.14	1.37
14	0.33	1.04	1.16	0.87	1.45	0.86	0.63	0.6	0.86	0.67	0.96	0.95
15	0.95	0.94	1.41	0.86	0.93	0.14	0.49	0.97	0.65	0.81	0.87	0.93
16	1.03	0.58	0.39	0.7	0.81	0.48	0.79	0.65	0.54	1.02	0.58	0.67
17	0.99	0.89	0.32	1.01	0.35	1.05	0.65	0.54	0.83	0.5	1.46	1.21
18	0.95	1.26	1.04	0.74	0.88	0.35	0.6	0.36	0.47	1.15	1.38	0.74
19	0.51		1.2		0.64	0.67	0.3	0.44	0.59	0.47	1.92	1.78
20	1.11				0.37				0.68	0.7		0.96
Promedio	0.86	1.00	1.13	1.03	0.96	0.94	0.81	0.84	0.93	0.97	1.05	1.01
Semillas germinadas	20	18	19	18	20	19	19	19	20	20	19	20
Índice de germinación	0.87	0.91	1.08	0.94	0.97	0.90	0.77	0.80	0.93			

<