



**UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
FACULTAD DE BIOLOGÍA**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**“DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE RETENCIÓN ÓPTIMO PARA LA  
ESTABILIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE AGUACATE POR EL MÉTODO DE  
COMPOSTEO, MEDIANTE LA ADICIÓN DE BIOSÓLIDOS Y LIRIO.”**

**TESIS**

que para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

presenta el:

**Ing. Carlos Ernesto Aguilar Serrano**

Director de Tesis:

**Dr. Otoniel Buenrostro Delgado**

Codirector de Tesis:

**Dr. Roberto Guerra González**

*Morelia, Michoacán, febrero del 2021*

## RESUMEN

México es el principal productor de aguacate a nivel mundial, mismo que se está industrializando para producir guacamole, lo cual está generando una cantidad creciente de residuos de aguacate. En el municipio de Morelia del Estado de Michoacán, se generan alrededor de ocho toneladas al día. Para atender esta problemática ambiental, el objetivo de esta investigación fue determinar el tiempo de retención óptimo para la degradación de los residuos de aguacate por el método de composteo, adicionando biosólido y lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) como sustratos para determinar si éstos aceleran el proceso de composteo.

Para cumplir con los objetivos, se diseñó y construyó un sistema cerrado a nivel de laboratorio, con material de policloruro de vinilo (PVC) y operación manual que facilita la remoción de los residuos y su aireación. El sistema de composteo se dividió en tres secciones (lote 1, 2 y 3) para probar tres tratamientos: la cáscara, la semilla y la mezcla (cáscara, semilla y pequeñas porciones de pulpa) del aguacate. Se realizó una caracterización fisicoquímica de los residuos y se ajustó una relación Carbono/Nitrógeno de 25/1.

Durante el proceso de composteo, se midió la temperatura cada tercer día para evaluar su evolución y el tiempo de estabilización de los residuos, mismo que fue de 40 días y una degradación de la materia orgánica total para la mezcla del 47.8 %, un 47.17 % para la cáscara y un 44.92 % para la semilla. Los resultados obtenidos sugieren que los residuos utilizados optimizan el tiempo de retención de los residuos del aguacate.

**Palabras clave:** Nitrógeno, Carbono, Biodegradación, biomasa, Residuo.

## SUMMARY

Mexico is the main avocado producer worldwide, which is being industrialized to produce guacamole, which is generating a growing amount of avocado wastes. In the municipality of Morelia in the State of Michoacán, around eight tons are generated per day. To address this environmental problem, the goal of this research was to determine the optimal retention time for the degradation of avocado residues by the composting method, adding biosolids and water lily (*Eichhornia crassipes*) as substrates to determine if these accelerate the composting process.

To meet the objectives, a closed system was designed and built at laboratory scale; with polyvinyl chloride (PVC) and manual operation for facilitate the removal of waste and aeration. The composting system was divided into three sections (batch 1, 2 and 3) to test three treatments: the shell, the seed and the mixture (shell, seed and small portions of pulp) of the avocado. A physicochemical characterization of the waste was carried out and a Carbon / Nitrogen ratio of 25/1 was adjusted.

During the composting process, the temperature was measured every third day to evaluate the process and the stabilization time of the waste, which was 40 days and a degradation of the total organic matter for the mixture of 47.8%, 47.17% for the shell and 44.92% for the seed. The results obtained suggest that the residues used optimize the retention time of the avocado residues.

Keywords: Nitrogen, Carbon, Biodegradation, biomass, waste.

## **AGRADECIMIENTOS**

Doy gracias a ti mi Dios, que nunca me abandonas y me llenas de gracia; con tu ayuda, afirmo que estaré lleno de dicha, bendiciones, triunfos y prosperidad.

Doy gracias a mis padres, Arturo y Guadalupe, porque siempre me han apoyado en mis proyectos que emprendo y siempre me acompañan.

A mi esposa Dulce que siempre está para apoyarme en cada decisión que surge en mi vida, su comprensión y amor que me tiene.

Le doy gracias a mi asesor el Dr. Otoniel Buenrostro Delgado, por compartir sus expectativas y conocimientos en este trabajo de investigación.

A mi codirector el Dr. Roberto Guerra González, por su participación y apoyo en los análisis químicos, además de compartir sus conocimientos para realizar esta investigación.

Agradezco a los integrantes de la mesa sinodal, que con sus conocimientos aportados hicieron posible este trabajo de investigación: Dr. Roberto García Acevedo, Dr. Marco Antonio Martínez Cinco y al Dr. Rafael Huirache Acuña.

## **DEDICATORIA**

Este gran esfuerzo lo dedico a mi familia, con quien siempre he pasado momentos agradables e inexplicables para poder llegar a este gran logro, mi esposa Dulce quien siempre me ha amado y apoyado, mis hijas Karlita y Lupita quienes han sido y serán mi inspiración para mi superación.

A mis padres Arturo y Guadalupe les dedico este trabajo por su apoyo incondicional y darme las herramientas y valentía para llegar y lograr mis metas.

# ÍNDICE

RESUMEN .....	I
SUMMARY .....	II
AGRADECIMIENTOS .....	III
DEDICATORIA.....	IV
ÍNDICE .....	V
LISTA DE FIGURAS .....	VII
LISTA DE TABLAS.....	VIII
LISTA DE GRÁFICAS .....	IX
NOMENCLATURA .....	X
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	2
2.1 Características del aguacate.....	2
2.2 Producción del aguacate.....	2
2.3 Industrialización del aguacate .....	2
2.4 Generación de residuos de aguacate .....	3
2.5 Método de composteo aerobio.....	4
2.5.1 Digestión aerobia .....	4
2.5.2 Microbiología del proceso de composteo.....	5
2.5.2.1 Bacterias.....	6
2.5.2.2 Hongos .....	7
2.5.2.3 Actinomicetos .....	7
2.5.3 Control de patógenos.....	7
2.5.4 Parámetros óptimos del compostaje .....	9
2.5.5 Fases del composteo.....	10
2.5.5.1 Fase Mesófila. ....	10
2.5.5.2 Fase Termófila.....	10
2.5.5.3 Fase de Enfriamiento.....	11

2.5.5.4 Fase de Maduración.....	12
2.6 Métodos de composteo.....	12
2.6.1 Sistemas abiertos.....	13
2.6.1.1 Sistemas de pila móvil o de volteo mecánico.....	13
2.6.1.2 Sistemas de pila estática con ventilación forzada.....	14
2.6.2 Sistemas cerrados.....	15
3. ANTECEDENTES.....	17
4. JUSTIFICACIÓN.....	19
5. HIPÓTESIS.....	20
6. OBJETIVO GENERAL.....	20
7. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
8. METODOLOGÍA.....	21
8.1 Colecta de residuos a compostar.....	21
8.2 Caracterización fisicoquímica de residuos y sustrato.....	24
8.3 Relación Carbono/Nitrógeno (C/N).....	26
8.4 Composteo de residuos.....	27
8.4.1 Fase Experimental.....	29
8.4.2 Monitoreo de parámetros.....	34
8.4.2.1 Temperatura.....	34
8.4.2.2 Humedad.....	34
8.4.2.3 pH.....	35
8.5 Análisis fisicoquímico del compost.....	36
9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
9.2 Monitoreo de la temperatura de la biomasa en el sistema.....	42
9.3 Tiempo de residencia del proceso de composteo.....	44
9.4 Resultados de la caracterización de la composición del compost.....	46
9.5 Evaluación de la calidad de la composición fisicoquímica del compost.....	49
10. CONCLUSIONES.....	50
11. RECOMENDACIONES.....	51
BIBLIOGRAFÍA.....	52

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
Figura 1. Crecimiento de hongos en fase de enfriamiento <sup>a</sup> .	11
<sup>a</sup> Obtenido de: Román et al., (2013).	
Figura 2. Volteo mecánico <sup>b</sup>	14
<sup>b</sup> Obtenido de: Tortosa, G., (2015)	
Figura 3. Aireación forzada <sup>c</sup>	15
<sup>c</sup> Obtenido de: Tortosa, G., (2015)	
Figura 4. Compostaje en túnel <sup>d</sup>	16
<sup>d</sup> Obtenido de: Tortosa, G., (2015)	
Figura 5. Recolección de residuos de aguacate	21
Figura 6. Preparación de muestra de aguacate	22
Figura 7. Recolección de biosólido	22
Figura 8. Muestra de biosólido	23
Figura 9. Recolección de lirio acuático	23
Figura 10. Lirio acuático seco y molido	24
Figura 11. Diseño del equipo compostero	28
Figura 12. Lote 1 (mezcla, biosólido y lirio)	31
Figura 13. Lote 2 (cáscara, biosólido y lirio)	32
Figura 14. Lote 3 (semilla, biosólido y lirio)	33
Figura 15. Humedad impuesta del 60 %.	34
Figura 16. Higrómetro	35
Figura 17. Compost del lote 1	46
Figura 18. Compost del lote 2	46
Figura 19. Compost del lote 3	47

## LISTA DE CUADROS

	<b>Página</b>
Cuadro 1. Temperatura y tiempo de exposición necesario para la destrucción de algunos patógenos y parásitos comunes.	8
Cuadro 2. Parámetros que considerar para la elaboración de composta	9
Cuadro 3. Técnicas aplicadas a los parámetros de caracterización	25
Cuadro 4. Mezcla de residuos por número de lote en el sistema	29
Cuadro 5. Proporciones de residuos por lote.	32
Cuadro 6. Composición química de los residuos (% en base humedad)	37
Cuadro 7. Composición lignocelulósica de los residuos de aguacate y lirio (% en base seca).	38
Cuadro 8. Análisis bromatológico de los residuos de aguacate (% en base seca)	41
Cuadro 9. Composición química de metales del lirio (ppm en base seca)	42
Cuadro 10. Temperaturas registradas en el proceso de composteo	43
Cuadro 11. Composición Química del compost	47
Cuadro 12. Reducción de la degradación de la materia orgánica (% de Materia Orgánica en base seca)	48
Cuadro 13. Evaluación de la calidad del compost (% en base seca)	49

## LISTA DE GRÁFICAS

	<b>Página</b>
Gráfica 1. Cambios en el contenido de celulosa por tipo de residuo (% en base seca).	38
Gráfica 2. Cambios en el contenido de Hemicelulosa por tipo de residuo (% en base seca).	39
Gráfica 3. Cambios en el contenido de Lignina por tipo de residuo (% en base seca).	39
Gráfica 4. Cambios en el contenido de Extractos por tipo de residuo (% en base seca).	40
Grafica 5. Comportamiento de la temperatura por lote del compostero	45

## NOMENCLATURA

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales
C/N	Relación Carbono/Nitrógeno
C <sub>T</sub>	Carbono total
C	Carbono Orgánico
MO	Materia orgánica
MOR	Materia orgánica resistente
Mezcla	Residuo de aguacate (cáscara, Semilla y pequeñas cantidades de pulpa)
NC	Nuevas células
N <sub>TK</sub>	Nitrógeno total
Pt	Fósforo total
K	Potasio
pH	Potencial de Hidrógeno
µm	micrómetro
°C	Grados Celsius

## 1. INTRODUCCIÓN

México es el principal productor de aguacate Hass en el mundo, y en el Estado de Michoacán se encuentra más del 80% de la superficie establecida con aguacate en México (Salazar et al., 2016).

La tasa del cultivo de aguacate se ha incrementado en todo el mundo durante las últimas décadas con una producción mundial total de 4.36 millones de toneladas en 2012, el doble que en 1999 (González et al., 2014. Cit. en FAOSTAT, 2014), principalmente el aguacate se consume como fruta fresca, y en algunas ocasiones se consume como una salsa típica mexicana (guacamole).

El consumo del guacamole o guacamol (es una salsa mexicana preparada a base de aguacate y chile verde o chile pimiento. El nombre guacamole proviene del náhuatl Ahuacamolli, traducido al español, que se compone de las palabras Ahuacatl + molli) ha incrementado tanto que se está produciendo de manera industrializada. En el municipio de Morelia, del Estado de Michoacán se está realizando esta práctica industrializada, por tal razón los residuos del aguacate se están generando en demasía (residuo agropecuario), todos estos residuos terminan en el relleno sanitario del municipio. Como medida de mitigación para los residuos del aguacate es darles un tratamiento biológico, mediante el composteo o compostaje aerobio.

El compostaje aerobio es el proceso biológico más frecuentemente utilizado para la conversión de residuos orgánicos en un material húmico estable conocido como compost (Tchobanoglous et al., 1997). Para la degradación de los residuos del aguacate por composteo, es necesario conocer su composición, ya que se deben tener consideraciones importantes de diseño para el proceso de compostaje.

Estudios realizados para la degradación de los residuos del aguacate mediante el composteo, reportan la mezcla con otros residuos agropecuarios y en diferente relación para poder acelerar el proceso de degradación (González et al., 2014).

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Características del aguacate**

El aguacate es un fruto que está compuesto por diferentes tejidos, como piel (exocarpio, cascara), pulpa (mesocarpio), testa (endocarpio + tegmen) y embrión (cotiledones + eje embrionario, semilla), así como su contenido nutrimental (Salazar-García et al., 2016). Las grasas son el principal componente después del agua, su valor calórico es elevado con respecto a otras frutas, se caracteriza por el contenido de ácidos grasos insaturados siendo mayoritariamente monoinsaturados (72 % ácido oleico) las cuales reducen la tasa de colesterol total en la sangre. Es rico en vitamina E, ácido ascórbico, vitamina B6,  $\beta$ -caroteno, potasio y magnesio. Es un fruto de gran valor para la obtención de productos alimenticios, farmacéuticos, grasas, colorantes, fibras, proteínas, minerales, por su alto contenido de vitaminas A y B y ciertas vitaminas liposolubles poco frecuentes en otros frutos (Ceballos Adela y Montoya Sandra, 2013).

### **2.2 Producción del aguacate**

La producción de aguacate en México representó el 33.9 % de la producción mundial en el año de 2007, posicionándolo como el mayor productor de este fruto a escala mundial (Torres, 2009). En el año de 2017, se logró una producción de un millón 997 mil 628 toneladas de aguacate, solamente en el Estado de Michoacán, fue de un millón 541 mil 443 toneladas (SAGARPA, 2018), posicionándolo como el principal productor de aguacate en el país y se estima una derrama de 750 millones de pesos, la creación de 40 mil empleos permanentes, 9 millones de jornales al año y 60 mil empleos estacionales ligados a actividades indirectas (Echánove, 2008). México exporta cerca del 60% de su producción a los Estados Unidos de América, el cual representa el 75% de las importaciones de este país (Torres, 2009).

### **2.3 Industrialización del aguacate**

El aguacate se procesa a escala industrial y doméstica, extrayendo principalmente aceite el cual contiene hasta un 25 % y en segundo el guacamole, utilizando

únicamente la pulpa del aguacate, la cáscara y semilla son desechadas como residuos.

El aceite de aguacate es extraído por diversos métodos fisicoquímicos como: obtención por prensada, por extracción con disolventes, por centrifugación, por hidrólisis alcalina (Martínez, 1998). La producción de aceite de aguacate en México es lenta, por la poca demanda centrada en el mercado de la producción farmacéutica y cosmética, pero un incremento en la industria alimenticia, donde se utiliza el aceite para la cocina (ANIAME, 2002).

Además de la extracción del aceite, también se procesa como guacamole, este puede ser a escala doméstica o industrializada, como es el caso de la empresa Simplot (congeladora y empacadora, S.A. de C.V.) ubicada en el municipio de Morelia, Michoacán.

Simplot es una empresa dedicada al procesamiento del aguacate en guacamole, utilizando aguacate Hass de la región aguacatera de Michoacán y Nayarit. El 100% de su producción es de exportación a diversas partes del mundo, teniendo el principal país como EUA.

México, el país líder en la producción de aguacate, el 5% de la producción en el 2008 estaban destinada a la transformación (principalmente para el guacamole), resultando un a cantidad total de aproximadamente 20,000 ton de residuos generados (Dorantes et al., 2012).

#### **2.4 Generación de residuos de aguacate**

Grandes cantidades de residuos líquidos y sólidos se producen en el procesamiento de frutas y verduras que juntos pueden dar cuenta de 93 % de todos los residuos generados por la industria de procesamiento de alimentos (Hang, 2004). Los residuos de aguacate, residuos orgánicos, comprenden la cascara, la semilla y pequeñas cantidades de pulpa. De acuerdo con la Ley general de prevención y gestión integral de los residuos (LGPGIR), por la gran

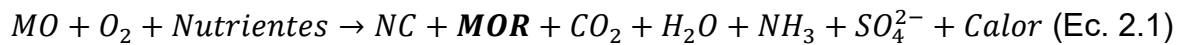
cantidad de estos residuos agropecuarios, son considerados residuos de manejo especial (PROFEPA, 2016). Los residuos orgánicos pueden ser procesados para su degradación con diversos métodos, uno de estos es el método de composteo.

## **2.5 Método de composteo aerobio**

El compostaje aerobio es el proceso biológico más frecuentemente utilizado para la conversión de residuos orgánicos en un material húmico estable conocido como compost (Tchobanoglous et al., 1997). La transformación ocurre básicamente en sustancias solubles como azúcares, almidones, aminoácidos y ácidos orgánicos, así como en sustancias fibrosas (hemicelulosa, celulosa, lignina, lignocelulosa), grasas y proteínas (nutrientes), (Jiménez, 2001).

### **2.5.1 Digestión aerobia**

De acuerdo con Tchobanoglous et al. (1997), la transformación aerobia general de los residuos orgánicos puede describirse con la ecuación 2.1.



Donde:

*MO= materia orgánica*

*O<sub>2</sub>= oxígeno*

*NC= nuevas células*

*MOR= materia orgánica resistente*

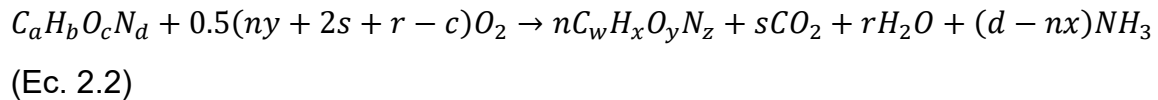
*CO<sub>2</sub>= dióxido de carbono*

*H<sub>2</sub>O= agua*

*NH<sub>3</sub>= amoníaco*

*SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> = sulfato*

Si la materia orgánica en los residuos sólidos se representa (sobre una base molar) como  $C_aH_bO_cN_d$ , entonces no se considera la producción de nuevas células y de sulfato, y la composición del material resistente se representa (sobre una masa molar) como  $C_wH_xO_yN_z$ . En este caso la cantidad de oxígeno requerido para la estabilización aerobia de la fracción orgánica biodegradable de los residuos puede estimarse utilizando la ecuación 2.2:

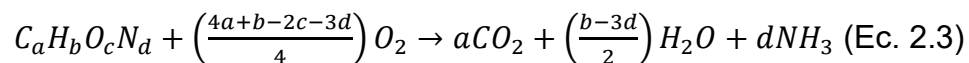


Donde:

$$r = 0.5[b - nx - 3(d - nx)]$$

$$s = a - nw$$

Los términos  $C_aH_bO_cN_d$  y  $C_wH_xO_yN_z$  representan la composición molar empírica del material orgánico inicialmente presente y en la conclusión del proceso. Si se produce la conversión completa, la expresión corresponde a la ecuación 2.3:



En muchos casos el amoníaco ( $NH_3$ ), producido a partir de la oxidación de la materia orgánica carbonosa, se oxida todavía más para formar nitrato,  $NO_3^-$  (proceso conocido como nitrificación).

### 2.5.2 Microbiología del proceso de composteo

Durante los años 30's y 40's se demostró que cada organismo tiene una función específica (Buenrostro, 1992), tal es el caso del proceso de compostaje aerobio, donde participa un amplio consorcio de microorganismo que degradan la materia

orgánica hasta transformarla en CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y formar compuestos recalcitrantes como los ácidos húmicos y fúlvicos (Márquez, 2011). Este consorcio microbiano está formado por una amplia diversidad de hongos, bacterias, actinomicetos. En las fases primarias del proceso de compostaje, las más predominantes son las bacterias mesofílicas. Después de subir las temperaturas en el compost, predominan las bacterias termofílicas, que conducen a hongos termofílicas que aparecen después de 5 ó 10 días. En las últimas etapas, o periodo de maduración, aparecen mohos y actinomicetos. Los microorganismos aerobios, que utilizan oxígeno, se alimentan de materia orgánica y desarrollan tejido celular a partir de nitrógeno, fósforo, algo de carbono y otros nutrientes necesarios. Gran parte del carbono sirve como fuente de energía para los microorganismos, el cual oxidan y lo expulsan como dióxido de carbono (Tchobanoglous et al., 1997).

Los microorganismos se agrupan en dos categorías: *procariotas* (no presentan núcleo ni organelos) y *eucariotas* (presenta núcleo y otros organelos). En la primera está el dominio de las *archaeas* y las *bacterias*, mientras que en la segunda se encuentran el dominio de las *Eukarya* (hongos, algas y protozoarios) (Montaño et al., 2010; Zita, A., 2020).

#### 2.5.2.1 Bacterias

La descripción de las bacterias pertenece por la indicación de sus características morfológicas, esto es, si se trata de un coco, un bacilo, o un espirilo, si presentan cápsula, si las células presentan cápsulas, si las células están aisladas u ordenadas en grupos, si disponen de flagelos y cómo se insertan, y si forman endosporas (Hans & Zaborosch, 1997). Se han descrito 45, 000 especies de bacterias en general, aunque se han pronosticado de tres a diez millones de especies bacterianas (Montaño et al., 2010). En el proceso de compostaje las bacterias son las más numerosas y constituyen entre el 80% y el 90 % de los microorganismos existentes en la composta. El desempeño de las bacterias en el composteo trata de una gran diversidad metabólica, que utilizan un amplio rango

de enzimas que degradan químicamente una gran variedad de compuestos orgánicos (Laich, 2011)

#### 2.5.2.2 Hongos

Son organismos eucariotas y presentan en común con las plantas la posesión de pared celular, no presentan pigmento fotosintético y son heterótrofos, crecen en condiciones aerobias y obtienen la energía por la oxidación de la materia orgánica (Hans & Zaborosch, 1997). Se han descrito en general alrededor de 70,000 especies de hongos (Montaño et al., 2010). Los hongos filamentosos pueden estar implicados en el proceso del composteo participando en la degradación de la materia orgánica lignocelulolítica, también se encuentran en el suelo como parte de la microbiota (Laich, 2011).

#### 2.5.2.3 Actinomicetos

Los actinomicetos son Gram positivos, habitan preferentemente los suelos y son un grupo de organismos que están relacionados con las bacterias corineformes y las micobacterias (Hans & Zaborosch, 1997). Durante el proceso de composteo son relevantes, debido a la capacidad enzimática para degradar compuestos orgánicos resistentes como la celulosa y lignina, también son tolerantes a las temperaturas que alcanza el composteo y es un grupo de microorganismos que abundante en el composteo (Laich, 2011)

#### 2.5.3 Control de patógenos

La destrucción de organismos patógenos es un elemento importante de diseño en el proceso de compostaje, porque afectará al perfil de temperatura y al proceso de aireación. La tasa de mortalidad de los patógenos está en función del tiempo y de la temperatura. Por ejemplo, la especie bacteriana *Salmonella sp* puede ser destruida en 15 ó 20 minutos cuando se expone a temperaturas de 60°C, o en una hora a 55°C. En el cuadro 1 se pone en manifiesto que la mayoría de patógenos serán destruidos rápidamente cuando todas las partes de la pila del compost están sometidas a una temperatura de aproximadamente 55°C.

Cuadro 1. Temperatura y tiempo de exposición necesario para la destrucción de algunos patógenos y parásitos comunes.

<b>Organismo</b>	<b>Observaciones</b>
<i>Salmonella typhosa</i>	Sin crecimiento por encima de 46°C; muerte dentro de 30 minutos a 55-60°C y dentro de 20 minutos a 60°C; destruida en poco tiempo en un ambiente de compost.
<i>Salmonella sp.</i>	Muerte dentro de 1 hora a 55°C y dentro de 15-20 minutos a 60°C.
<i>Shigella sp.</i>	Muerte dentro de 1 hora a 55°C.
<i>Escherichia coli</i>	La mayoría muere dentro de 1 hora a 55°C y dentro de 15 a 20 minutos a 60°C.
<i>Entamoeba histolytica</i> <i>cysts</i>	Muere dentro de pocos minutos a 45°C y dentro de pocos segundos a 55°C.
<i>Taenia saginata</i>	Muere dentro de pocos minutos a 55°C.
<i>Trichinella spiralis larva</i>	Muere rápidamente a 55°C e instantáneamente a 60°C.
<i>Brucella abortus</i> o <i>Br. suis</i>	Muere dentro de 3 minutos a 62-63°C y dentro de 1 hora a 55°C.
<i>Micrococcus pyogenes</i> <i>var. aureos</i>	Muere dentro de 10 minutos a 50°C.
<i>Streptococcus pyogenes</i>	Muere dentro de 10 minutos a 54°C.
<i>Mycobacterium tuberculosis var. hominis</i>	Muere dentro de 15-20 minutos a 66°C o después de calentamiento momentáneo a 67°C.
<i>Corynebacterium diphtheriae</i>	Muere dentro de 45 minutos a 55°C.
<i>Nacator americanus</i>	Muere dentro de 50 minutos a 45°C.
<i>Ascaris lumbricoides</i> <i>huevos</i>	Muere en menos de 1 hora a temperatura por encima de 50°C.

Tomado de: Tchobanoglous et al., (1997).

#### 2.5.4 Parámetros óptimos del compostaje

Para llevar a cabo la degradación biológica aerobia de los residuos orgánicos, se deben tomar en cuenta las principales consideraciones de diseño y funcionamiento del proceso de compostaje (ver cuadro 2).

Cuadro 2. Parámetros que considerar para la elaboración de composta

PARÁMETRO	RÁNGO
Tamaño de partícula de los residuos	Menor de 20 mm
Inóculo	Inóculo con residuos sólidos parcialmente descompuestos, también se puede adicionar lodos de plantas de tratamiento biológico de agua residual.
pH	Mantenerlo por debajo de 8.5.
Oxigenación	Aire con una concentración mínima del 50% del oxígeno inicial.
Contenido de humedad	50% a 60%, con un óptimo de 55%
Temperatura	En la etapa mesofílica entre los 45° y 55°C, en la termofílica de los 55° y 60°C.
C/N	Relación de 20 a 30.

Fuente: Elaborado a partir de Jiménez, (2001); Tchobanoglous et al., (1997).

El factor ambiental más importante del compostaje es la relación carbono/nitrógeno (relación C/N). En el cuadro 2 muestra esta relación, pero otros autores manejan diferentes relaciones, como una relación de 20 a 25 (Tchobanoglous et al., 1997), Jiménez et al. (2016), dicen que, para llevar a cabo una adecuada degradación de la materia orgánica los microorganismos requieren de 20 a 30 unidades de carbono para eliminar una de nitrógeno.

### **2.5.5 Fases del composteo**

Al descomponer el carbono y nitrógeno de la materia orgánica inicial, los microorganismos desprenden calor medible a través de las variaciones de temperatura a lo largo del tiempo. Las fases del composteo están en función de la evolución de la temperatura (Román et al., 2013).

#### *2.5.5.1 Fase Mesófila.*

El material inicial comienza el proceso de compostaje a temperatura ambiente y en pocos días (e incluso en horas), la temperatura aumenta hasta los 45°C. Este aumento de temperatura es debido a la actividad microbiana, ya que en esta fase los microorganismos degradan las macromoléculas como proteínas y carbohidratos generando calor. La descomposición de compuestos solubles, como azúcares, produce ácidos orgánicos y, por tanto, el pH puede bajar (hasta cerca de 4.0 o 4.5). Esta fase dura pocos días (entre dos y ocho días) (Román et al., 2013).

#### *2.5.5.2 Fase Termófila.*

Cuando el material alcanza temperaturas mayores que los 45°C, los microorganismos que se desarrollan a temperaturas medias (microorganismos mesófilos) son reemplazados por aquellos que crecen a mayores temperaturas, en su mayoría bacterias (bacterias termófilas), que actúan facilitando la degradación de fuentes más complejas de Carbono, como la celulosa y la lignina.

Estos microorganismos actúan transformando el nitrógeno en amoníaco por lo que el pH del sistema se incrementa. En especial, a partir de los 60 °C aparecen las bacterias que producen esporas y actinomicetos, que son las encargadas de descomponer hemicelulosa y otros compuestos de carbono complejos. Esta fase puede durar desde unos días hasta meses, según el material de partida, las condiciones climáticas del lugar.

Esta fase también recibe el nombre de fase de higienización ya que el calor generado destruye bacterias y contaminantes de origen fecal como *Escherichia coli* y *Salmonella sp.* Esta fase es importante pues las temperaturas por encima de los 55°C eliminan los quistes y huevos de helminto, esporas de hongos fitopatógenos y semillas de malezas que pueden encontrarse en el material de partida, dando lugar a un producto higienizado (Román et al., 2013).

#### 2.5.5.3 Fase de Enfriamiento.

Agotadas las fuentes de carbono y, en especial el nitrógeno en el material en compostaje, la temperatura desciende nuevamente hasta los 40-45°C. Durante esta fase, continúa la degradación de polímeros como la celulosa, y aparecen algunos hongos visibles a simple vista (Figura 1). Al bajar de 40 °C, los organismos mesófilos reinician su actividad y el pH del medio desciende levemente, aunque en general el pH se mantiene ligeramente alcalino. Esta fase de enfriamiento requiere de varias semanas y puede confundirse con la fase de maduración (Román et al., 2013).



Figura 1. Crecimiento de hongos en fase de enfriamiento <sup>a</sup>.

<sup>a</sup> Obtenido de: Román et al., (2013).

#### *2.5.5.4 Fase de Maduración.*

Durante la fase de maduración la diversidad y el número de actinomicetos y de hongos filamentosos capaces de degradar polímeros complejos (lignina, hemicelulosa, celulosa), se incrementa significativamente y las bacterias mesofílicas que estuvieron inactivas durante la fase termofílica y que resistieron las altas temperaturas, vuelven a estar metabólicamente activas y son capaces de recolonizar el sustrato (Laich, 2011). Este período puede demorar meses a temperatura ambiente, durante los cuales se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización de compuestos carbonados para la formación de ácidos húmicos y fúlvicos (Román et al., 2013).

## **2.6 Métodos de composteo**

Existen diferentes métodos o sistemas de compostaje, desde métodos sencillos hasta sistemas tecnológicamente muy complejos y automatizados, que permiten el tratamiento de un gran volumen de residuos orgánicos. En general, el diseño y las características de los sistemas de compostaje dependen de factores como el tiempo del proceso necesario, el espacio requerido, el gasto energético o la seguridad de higiene de la planta de tratamiento.

El compostaje se basa en procesos espontáneos sometidos a los ciclos biológicos de los microorganismos, es difícil acortar artificialmente los periodos mínimos necesarios para que tales procesos se sucedan y completen. Los sistemas de compostaje se pueden clasificar en dos tipos, abiertos (al aire libre) y cerrados (confinados en un recinto controlado):

### 1. Sistemas abiertos:

- Pila móvil (volteo mecánico del material que permite la oxigenación)
- Pila estática (sin volteo del material, la oxigenación se hace por aireación forzada)

### 2. Sistemas cerrados

- Sistemas dinámicos (volteo del material) o estáticos (sin volteo del material)
- Reactores horizontales, verticales, y en túnel.

### **2.6.1 Sistemas abiertos**

Son los más utilizados por su sencillez y viabilidad técnica y económica. Consiste en colocar los sustratos a compostar en montones o pilas (puede estar protegido o al aire libre).

#### **2.6.1.1 Sistemas de pila móvil o de volteo mecánico.**

Necesitan un mayor espacio debido a la necesidad de mover la masa durante los volteos. Al estar sometidos a una aireación periódica, no mantienen un nivel de oxigenación constante por lo que el proceso evoluciona de manera lenta que en los sistemas con ventilación. Estos sistemas no permiten el control efectivo de la temperatura y se consideran menos efectivos que los de pila estática en la destrucción de patógenos. El volteo mejora progresivamente la mezcla de los componentes del sustrato, homogeniza el material, lo que distribuye los microorganismos. También el volteo puede influir positivamente sobre la estructura física de la mezcla y las condiciones de aireación, aumentando su porosidad en aquellos sistemas en los que la ventilación forzada no es eficaz por la mala distribución del aire en el interior del sistema, generalmente, muestran menos pérdidas de agua los sistemas con volteo (Tortosa, G., 2015).



Figura 2. Volteo mecánico <sup>b</sup>

<sup>b</sup> Obtenido de: Tortosa, G., (2015)

#### 2.6.1.2 Sistemas de pila estática con ventilación forzada

En los métodos de pila estática con ventilación forzada, el material es apilado de igual forma que en el sistema de pila móvil, una vez formada la pila de compostaje éste no se moverá del sitio, la aireación del sistema se realiza suministrando aire a presión. Estos sistemas suelen operar a temperaturas elevadas y tienen el inconveniente de la falta de homogeneización del material (Tortosa, G., 2015).



Figura 3. Aireación forzada <sup>o</sup>  
<sup>o</sup>Obtenido de: Tortosa, G., (2015)

### **2.6.2 Sistemas cerrados**

Los sistemas cerrados permiten un mayor control de las condiciones del proceso y de las emisiones, pero presentan como mayor inconveniente elevado costo de inversión y operación. En los sistemas estáticos no existe mezcla del material durante el proceso, mientras que en los dinámicos sí existe mezcla. Los procesos en túnel, son sistemas cerrados con ventilación controlada y sistema de medición automatizado y tecnificado que puede incluir sistemas de mezcla interna. (Tortosa, G., 2015)



Figura 4. Compostaje en túnel <sup>d</sup>  
<sup>d</sup>Tomado de: Tortosa, G., (2015)

### 3. ANTECEDENTES

A finales del siglo XIX, el composteo se utilizó principalmente en Estos Unidos de América, como una manera de tratar los residuos humanos en las poblaciones que no contaban con un sistema de alcantarillado, y hasta la primera mitad del siglo XX fue que Albert Howard sistematizó el compostaje (sistema Indore) y lo valoró como una técnica higiénica de tratar residuos orgánicos con el resultado de la producción del compost (Soliva et al., 2008). El composteo se ha utilizado también como una técnica para tratar residuos orgánicos peligrosos, Velasco, A. & Volke, T. (2003), realizaron un estudio del composteo como una alternativa tecnológica para la remediación de suelos contaminados en México, aplicándose para tratar suelos y sedimentos contaminados por compuestos orgánicos biodegradables y se ha usado con éxito para la remediación de suelos contaminados por pentaclorofenol (PCP), gasolinas, hidrocarburos totales del petróleo (HTP) con limitaciones en la concentración para su tratamiento no mayor de 50,000 ppm e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). Se ha demostrado también, que es posible reducir la concentración y toxicidad de algunos explosivos como el trinitrotolueno (TNT) hasta niveles aceptables.

Vicencio-de la rosa et al., (2011), desarrollaron un estudio para la producción de composta y vermicomposta con lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales del rastro municipal de la ciudad de Durango, en México. Comenzaron con 75 m<sup>3</sup> de biosólido y se obtuvo una producción de 10.9 toneladas de composta en 150 días, con una calidad nutrimental del 2.06 % de N, 0.16 % de P y 0.13 % de K, con un costo de producción de 0.04 dólares por Kg. En cuanto a la vermicomposta, se produjeron 12.5 ton en 210 días con una calidad nutrimental menor a la de la composta, 1.4 % de N, 0.12 % de P y 0.15% de K, con un costo de producción de 0.096 dólares por kg, donde la ganancia por la venta del producto sería menor. Y Consideran que, si la producción de la lombriz sea para la venta, la vermicomposta resulta ser el mejor sistema en cuanto a ganancias monetarias.

La generación de residuos de aguacate está incrementando en relación a su producción y demanda en el mercado a nivel mundial, en algunos países se han realizado algunos trabajos para tratar estos residuos, tal es el caso de González et al., (2014), donde realizaron una evaluación de la composición para el rendimiento del compost derivado de los residuos de producción de guacamole, estudiando la viabilidad por composteo los residuos de producción de guacamole (GR) con residuos de poda de jardín (PW) como agente de carga, la experimentación consistió utilizando tres diferentes proporciones GR:PW, 2:1, 1:2 y 1:7, donde midieron la evolución de la temperatura, la consistencia, la materia orgánica y la relación C/N, el proceso tardó siete meses, y dejando tres meses más de maduración, teniendo un tiempo de composteo de diez meses. Concluyeron que la proporción 1:2 pareció ser la mejor, en cuanto a la evolución del proceso.

Jiménez et al., (2016), realizaron ensayos orientados al composteo de lirio acuático y lodo residual (biosólido). Utilizando diversos materiales de enmienda como el aserrín, cáscaras de plátano y residuo de piña, con el objetivo de acelerar el proceso de composteo y evaluar con diferentes partes y presentaciones del lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) (seco, triturado raíz y hojas) dado el contenido de lignina frente al proceso. Los resultados mostraron una alta resistencia a la biodegradabilidad en el composteo por parte del lirio acuático, es especial la parte de la raíz.

#### 4. JUSTIFICACIÓN

México es el principal productor de aguacate Hass en el mundo, y en el Estado de Michoacán se encuentra más del 80% de la superficie establecida con aguacate en México (Salazar et al., 2016).

En el año de 2017, se logró una producción de un millón 997 mil 628 toneladas de aguacate, de esta producción para Michoacán, fue de un millón 541 mil 443 toneladas (SAGARPA, 2018), en el de 2008, se procesó el 5 % de la producción nacional y el 30 % del peso del aguacate es cáscara y semilla (González et al., 2014).

La generación de los residuos del aguacate se ha incrementado actualmente en el Estado de Michoacán, generando un problema ambiental, debido a las altas demandas que tiene el producto procesado de manera industrializado. La industrialización del aguacate tiene como consecuencia la generación de sus residuos (cáscara, semilla y pequeñas cantidades de pulpa de aguacate), tal es el caso de la producción del guacamole en el municipio de Morelia del Estado de Michoacán, donde se producen alrededor de 8 ton/día de residuos de aguacate en temporada de producción.

Para reducir la cantidad de residuos de aguacate, como mediada de mitigación en esta investigación, se pretende evaluar su degradación por el método de composteo, utilizando otros residuos que también son problemática ambiental. Como lo es el lodo que proviene de la planta tratadora de agua residual del municipio de Morelia (biosólido), donde se generan alrededor de 75 ton/día. Otro material orgánico que puede ayudar para el composteo es el lirio acuático (*Eichhornia crassipes*), ya que está considerado entre las 100 especies más invasoras del mundo (Jiménez et al., 2016).

De esta manera se realizarán ensayos orientados al composteo de materiales que presentan una problemática ambiental.

## **5. HIPÓTESIS**

El composteo es un proceso factible para la degradación de los residuos de aguacate, pero que lleva mucho tiempo para la estabilización de éste. Por lo que, la adición de otros sustratos cómo el biosólido y el residuo del lirio acuático pueden disminuir el tiempo de retención del proceso.

## **6. OBJETIVO GENERAL**

Determinar el tiempo de retención eficiente para la estabilización de residuos de aguacate, mediante el composteo adicionándole biosólido y lirio acuático.

## **7. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar la relación C/N, de los residuos del aguacate y sustratos para el composteo.
- Controlar parámetros en el sistema para acelerar el proceso de degradación de los residuos.
- Probar diferentes proporciones de sustratos en el composteo.

## 8. METODOLOGÍA

### 8.1 Colecta de residuos a compostar

#### 8.1.1 Colecta del residuo de aguacate

Los residuos de aguacate se recabaron de la empresa Simplot (ver figura 5), posteriormente se trasladaron a las instalaciones de la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo (UMSNH). Se clasificaron en cáscara, semilla y mezcla (cáscara, semilla y pequeñas cantidades de pulpa), se molieron y secaron para su análisis fisicoquímico (ver figura 6).



Figura 5. Recolección de residuos de aguacate



Figura 6. Preparación de muestra de aguacate

### 8.1.2 Colecta del biosólido

El biosólido se colectó de la planta tratadora de aguas residuales de la comunidad de Atapaneo del municipio de Morelia (ver figura 7), se trasladó a la UMSNH, para su preparación para el proceso de composteo y los análisis fisicoquímico (ver figura 8). Una vez recolectado el biosólido se refrigeró y congeló para poderlo almacenar en lo que se preparaba para su caracterización.



Figura 7. Recolecta de biosólido



Figura 8. Muestra de biosólido

### 8.1.3 Colecta de lirio acuático

El lirio acuático se colectó de la presa Malpaís del municipio de Queréndaro, Michoacán (ver figura 9), ya que esta presa está plagada de lirio acuático, se trasladó la muestra de lirio a la UMSNH, se secó y se molió (ver figura 10) para su posterior caracterización y composteo.



Figura 9. Recolecta de lirio acuático



Figura 10. Lirio acuático seco y molido

## **8.2 Caracterización fisicoquímica de residuos y sustrato**

Una vez teniendo los residuos, con una pequeña parte de éstos, se realizaron los análisis fisicoquímicos mencionados anteriormente (ver cuadro 3).

Cuadro 3. Técnicas aplicadas a los parámetros de caracterización

Parámetro	Técnica de medición
Determinación de Humedad	NMX-AA-16-1984 (SECOFI, 1984)
Determinación de Nitrógeno total en residuos y sustratos	NMX-AA-24-1984 Digestión
Determinación de cenizas	Standard Methods, 1989 Calcinación
Determinación de Materia Orgánica	Standard Methods, 1989 Calcinación
Determinación de Carbono orgánico en residuos y sustratos	$C = (%MO)(0.58)$ <i>donde:</i> (Ec .8.1) <i>0.58 = constante dada por Jackson</i>
Determinación de pH	NMX-AA-25-1984 Potenciómetro
Determinación de la relación Carbono/Nitrógeno (C/N)	NMX-AA-67-1985 $(C / N) = \frac{(%C)}{%N}$ <i>Donde:</i> (Ec. 8.2) <i>%C = porcentaje de Carbono Orgánico</i> <i>%N = porcentaje de Nitrógeno</i> (DOF, 1985)
Determinación de Holocelulosa	Método de Clorito (Wise et al., 1946)

### 8.3 Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)

Para determinar la relación Carbono/Nitrógeno se utilizó la técnica descrita en la norma mexicana NMX-AA-67-1985 (DOF, 1985).

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis químico en base seca de todos los residuos (ver cuadro 6), se calculó la relación carbono/Nitrógeno (C/N) para cada residuo (mezcla, cáscara, semilla, biosólido y lirio).

La relación C/N para cada residuo se calculó con la ecuación 8.2:

*Mezcla*

$$\%C = 50.58$$

$$\%N = 0.92$$

$$C / N = \frac{50.58}{0.92} = 54.97$$

*Cáscara*

$$C = 51.75\%$$

$$N = 0.61\%$$

$$C / N = \frac{51.75}{0.61} = 84.83$$

*Semilla*

$$C = 50.07\%$$

$$N = 0.87\%$$

$$C / N = \frac{50.07}{0.87} = 57.55$$

*Biosólido*

$$C = 47.25\%$$

$$N = 1.02\%$$

$$C / N = \frac{47.25}{1.02} = 46.32$$

*Lirio*

$$C = 48.3\%$$

$$N = 2.12\%$$

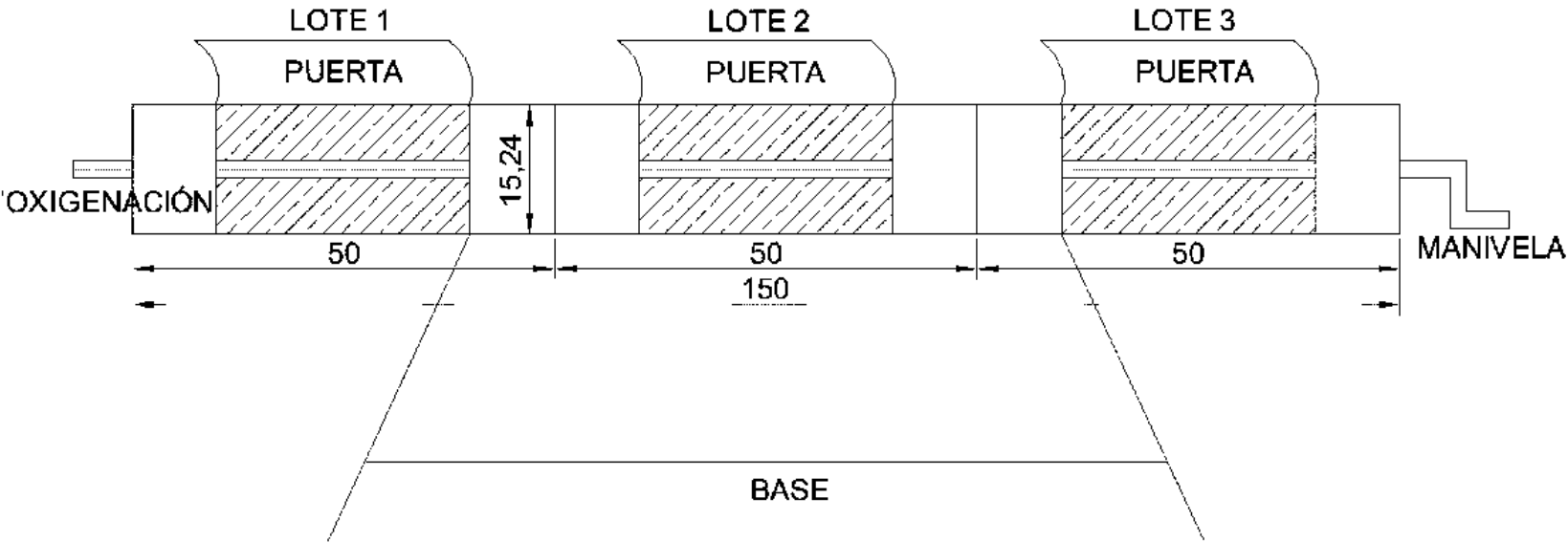
$$C / N = \frac{48.3}{2.12} = 22.78$$

## **8.4 Composteo de residuos**

### **8.4.1 Diseño del compostero**

Para llevar a cabo el composteo se diseñó y construyó un sistema cerrado a escala de laboratorio que facilite la manipulación de los residuos durante el composteo, este equipo compostero se construyó con material de PVC y un soporte metálico, teniendo el siguiente diseño como se aprecia en la figura 11.

# COMPOSTERO



<b>ESPECIFICACIONES:</b> DISEÑO DE COMPOSTERO PARA EXPERIMENTACIÓN EN LA UMSNH.	<b>ACOTACIÓN:</b> cm
	<b>ESCALA:</b> 1:410

Figura 11. Diseño del equipo compostero

El material utilizado para la construcción del equipo compostero es el siguiente:

- Tubo de PVC de 6"
- Tubo de PVC hidráulico de 1.5"
- Tubo de PVC hidráulico de 2"
- Codo de PVC hidráulico de 1.5"
- Pegamento para PVC
- Tornillos de 1/8"
- Material metálico, ángulo de 1"
- Material metálico, varilla cuadrada de 1/2"

La herramienta que se utilizó para la construcción del compostero es la siguiente:

- Esmeril pulidor manual.
- Planta soldadora
- Cegueta
- Desarmador
- Lija

#### 8.4.1 Fase Experimental

La experimentación del composteo constó de tres tratamientos (ver Cuadro 4), uno por cada lote del compostero diseñado, atendiendo principalmente la cáscara, la semilla y la mezcla. Se ajustó una relación C/N de 25/1, con ayuda del biosólido y lirio, obteniendo las proporciones adecuadas para esta relación C/N de 25/1.

Cuadro 4. Mezcla de residuos por número de lote en el sistema

Número de Lote	Tratamiento
1	Mezcla, biosólido y lirio
2	Cáscara, biosólido y lirio
3	Semilla, biosólido y lirio

Las cantidades de masa de cada residuo para el composteo se calcularon con su relación de C/N. Se realizó el siguiente balance para cada lote del compostero.

Para el lote 1 del compostero se mezclaron los residuos de mezcla, biosólido y lirio (Ecuación 8.4).

*Lote 1*

$$\text{Mezcla} + \text{Biosólido} + \text{Lirio} = C / N \rightarrow 25$$

$$54.97(0.24) + 46.32(0.19) + 22.78(0.132) = 25$$

$$0.24 + 0.19 + 0.132 = 0.562$$

*% Mezcla*

$$0.562 - 100\%$$

$$0.24 - \underline{42.70\%}$$

(Ec. 8.4)

*% Biosólido*

$$0.562 - 100\%$$

$$0.19 - \underline{33.8\%}$$

*% Lirio*

$$0.562 - 100\%$$

$$0.132 - \underline{23.48\%}$$

En los cálculos para el lote 1 tenemos que se agregó un 42.7% de mezcla, un 33.8% de biosólido y un 23.48% de lirio. Se preparó 1 Kg de residuo para compostar, con la siguiente composición: 427 g de mezcla, 338 g de biosólido y 235 g de lirio seco (véase figura 12).



Figura 12. Lote 1 (mezcla, biosólido y lirio)

Para el lote 2 se mezclaron residuos de cáscara, biosólido y lirio (Ecuación 8.5).

*Lote 2*

$$\text{Cáscara} + \text{Biosólido} + \text{Lirio} = C / N \rightarrow 25$$

$$84.83(0.15) + 46.32(0.21) + 22.78(0.112) = 25$$

$$0.15 + 0.21 + 0.112 = 0.472$$

% *Cáscara*

$$0.472 - 100\%$$

$$0.15 - \underline{31.77\%} \quad (\text{Ec. 8.5})$$

% *Biosólido*

$$0.472 - 100\%$$

$$0.21 - \underline{44.49\%}$$

% *Lirio*

$$0.472 - 100\%$$

$$0.112 - \underline{23.72\%}$$

En los cálculos del lote 2 tenemos que se agregó un 31.77% de cáscara, un 44.49% de biosólido y un 23.72% de lirio. Se preparó 1 Kg de residuo para compostar atendiendo las proporciones calculadas, 318 g de cáscara, 445 g de

biosólido y 237 g de lirio seco, con una humedad establecida del 60 % (véase figura 13).



Figura 13. Lote 2 (cáscara, biosólido y lirio)

Para el lote 3 se mezclaron residuos de semilla, biosólido y lirio (Ecuación 8.6).

*Lote3*

$$\text{Semilla} + \text{Biosólido} + \text{Lirio} = C / N \rightarrow 25$$

$$57.55(0.22) + 46.32(0.197) + 22.78(0.141) = 25$$

$$0.22 + 0.197 + 0.141 = 0.558$$

*% Semilla*

$$0.558 - 100\%$$

$$0.22 - \underline{39.42\%} \quad (\text{Ec. 8.6})$$

*% Biosólido*

$$0.558 - 100\%$$

$$0.197 - \underline{35.30\%}$$

*% Lirio*

$$0.558 - 100\%$$

$$0.144 - \underline{25.26\%}$$

En los cálculos del lote 3 se agregó un 39.42% de semilla, un 35.3% de biosólido y un 25.26% de lirio. Se preparó 1 Kg de residuo para compostar con las

proporciones obtenidas de cada residuo, 394 g de semilla, 353 g de biosólido y 253 g de lirio seco, con una humedad relativa establecida del 60 % (véase figura 14)



Figura 14. Lote 3 (semilla, biosólido y lirio)

El cuadro 5 nos muestra las proporciones en porciento de masa de cada residuo que se agregó para cumplir con el balance de la relación C/N en cada lote del compostero.

Cuadro 5. Proporciones de residuos por lote.

<b>Lote</b>	<b>Mezcla</b>	<b>Cáscara</b>	<b>Semilla</b>	<b>Biosólido</b>	<b>Lirio</b>
1	42.70 %			33.80%	23.48%
2		31.77%		44.49%	23.72%
3			39.42%	35.30%	25.26%

## 8.4.2 Monitoreo de parámetros

### 8.4.2.1 Temperatura

La temperatura es uno de los parámetros más importantes a controlar durante el experimento. Se monitoreó cada tercer día, durante el proceso del composteo que fueron 70 días, hasta observar la fase del enfriamiento, cuando comienza a descender la temperatura.

### 8.4.2.2 Humedad

La humedad se monitoreó todos los días, con la finalidad de no estar fuera del rango óptimo (50 % - 60 %), se ajustó a una humedad relativa del 60 % ya que el residuo del lirio estaba seco, al hacer las mezclas de residuos para el composteo se estuvo agregando agua hasta llegar a la humedad impuesta (véase figura 15), la humedad se midió con un higrómetro (véase figura 16).



Figura 15. Humedad impuesta del 60 %.

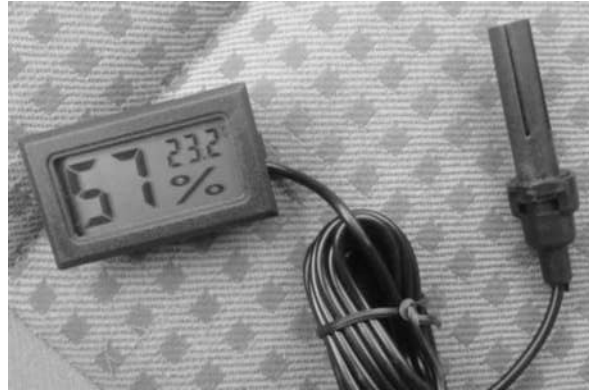


Figura 16. Higrómetro

#### 8.4.2.3 pH

Se monitoreó el pH, ya que el desarrollo de microorganismos degradadores de la materia orgánica está en estrecha relación con un pH óptimo, se mantuvo por debajo del 8.5.

Se midió el pH a los 14 días del proceso de composteo, para el lote 1 se obtuvo un pH de 8.45, para el lote 2 de 6.43 y para el lote 3 un pH de 7.61.

La última medición de pH se hizo al final del composteo (ver cuadro 11).

#### **8.4.2.4 Aireación**

Se proporcionó la aireación mediante la remoción de la biomasa con la manivela de modo manual todos los días en horario de medio día, con repeticiones de diez vueltas, para airear el interior del compostero y el oxígeno ser aprovechado por los microorganismos aerobios, además de oxidar materia orgánica.

#### **8.5 Análisis fisicoquímico del compost**

Se realizó un análisis fisicoquímico al compost para ver la calidad, comparar la composición del sustrato antes y después del proceso y definir sus propiedades benéficas que pudiera tener; además se realizó un comparativo con las especificaciones que marca la norma mexicana, NMX-FF-109-SCFI-2007 (DOF, 2008).

## 9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 9.1 Resultados de la caracterización de los residuos de aguacate, biosólido y lirio

Para alcanzar los objetivos planteados de esta investigación se realizó la experimentación de acuerdo con los resultados de la caracterización fisicoquímica de los residuos de aguacate (cuadros 6, 7, 8 y 9).

Cuadro 6. Composición química de los residuos de aguacate (% en base húmeda)

Muestra	Humedad	Cenizas	MO	C	NT	P	K
Mezcla	61.67	12.79	87.21	50.58	0.92	0.05	0.55
Cáscara	74.38	10.81	89.19	51.75	0.61	0.12	0.73
Semilla	55.07	13.67	86.33	50.07	0.87	0.016	0.73
Biosólido	54.17	18.51	81.48	47.25	1.02	1.88	1.69
Lirio	91.63	16.71	83.28	48.3	2.12	0.7	1.8

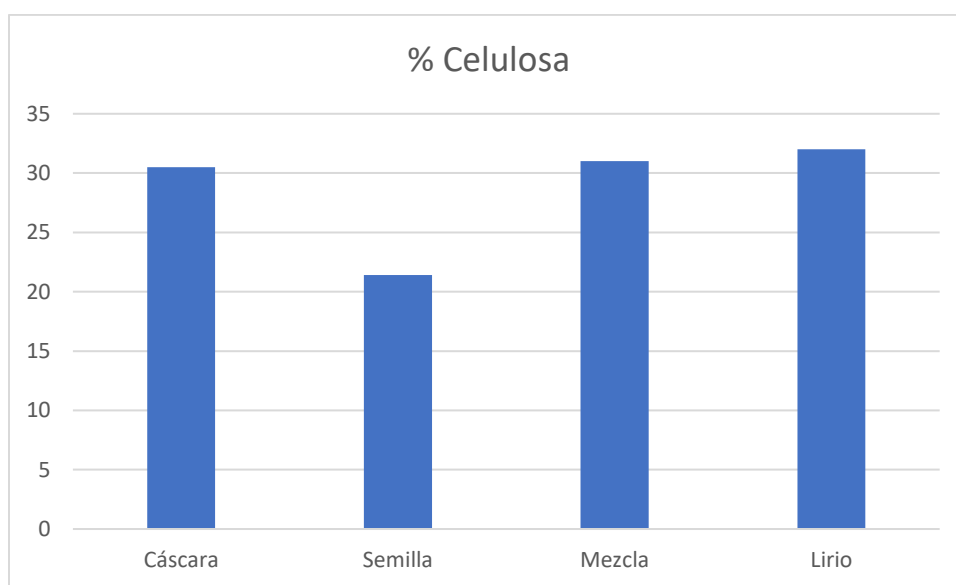
MO= Materia Orgánica; C= Carbono orgánico; NT= Nitrógeno total; P= Fosforo; K= Potasio

El cuadro 6 nos muestra la caracterización química de los residuos del aguacate, del biosólido y del lirio. Por su naturaleza el lirio es el residuo que tiene un mayor porcentaje de humedad y siendo la cáscara con un mayor porcentaje de Materia Orgánica, al igual que de Carbono orgánico, y el lirio con un mayor porcentaje de Nitrógeno total. El biosólido es el residuo con mayor porcentaje de cenizas, es decir, su contenido de sólidos fijos es mayor, por lo tanto, el contenido de Fósforo y Potasio es mayor en el biosólido.

Cuadro 7. Composición lignocelulósica de los residuos de aguacate y lirio (% en base seca).

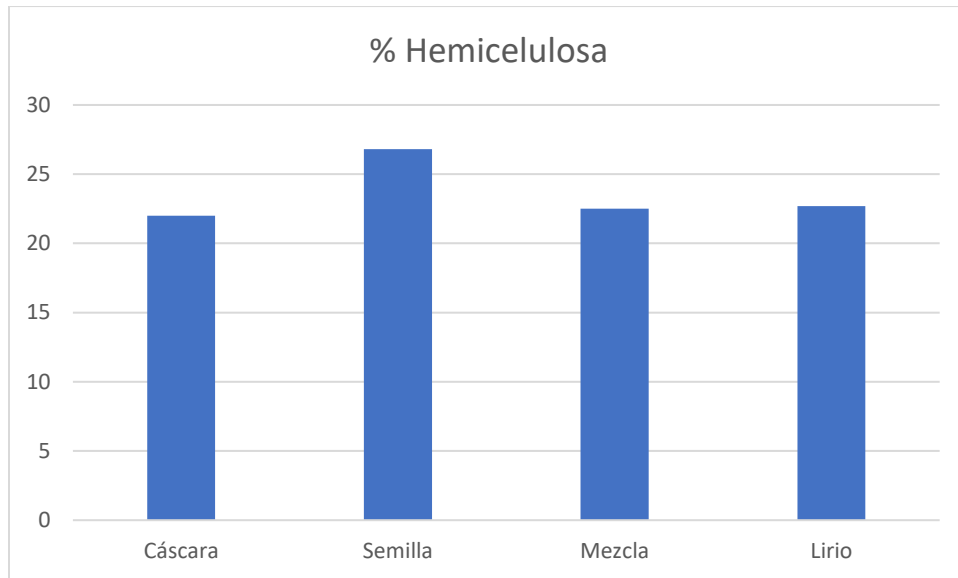
<b>Muestra</b>	<b>Celulosa</b>	<b>Hemicelulosa</b>	<b>Lignina</b>	<b>Extraíbles</b>
Cáscara	30.5	22	13	16.5
Semilla	21.4	26.8	15	16.4
Mezcla	31	22.5	8	21
Lirio	32	22.7	7.3	19.4

La composición lignocelulósica de los residuos de aguacate y lirio se discute en las gráficas 1, 2, 3, y 4, donde se visualiza el contenido de compuesto lignocelulósico.



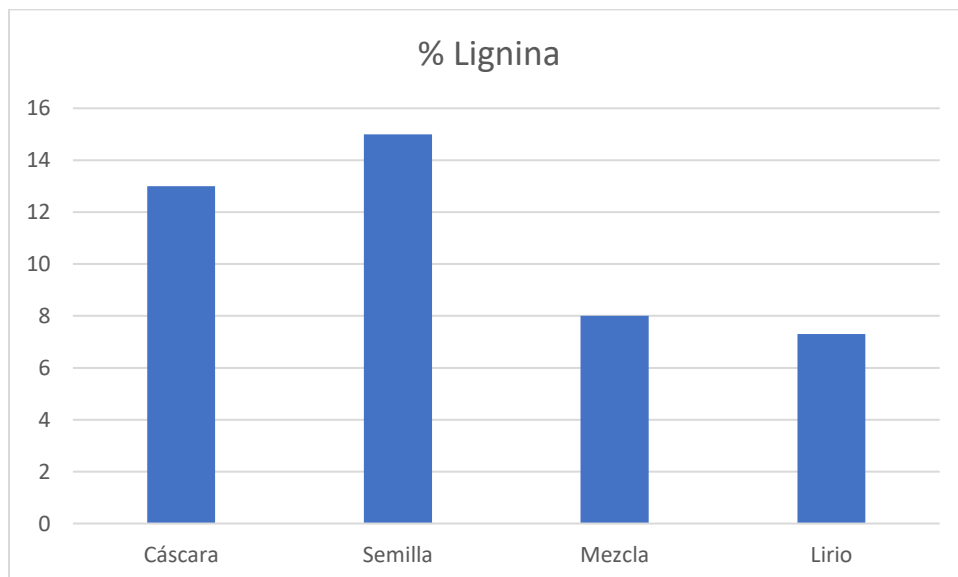
Gráfica 1. Contenido de celulosa por tipo de residuo (% en base seca).

El contenido de celulosa por tipo de residuo (Cáscara, semilla, mezcla y lirio), son significativos en la semilla, ya que su contenido de celulosa es menor con respecto a los demás residuos, como se aprecia en la gráfica 1, de acuerdo con el cuadro 7.



Gráfica 2. Contenido de Hemicelulosa por tipo de residuo (% en base seca).

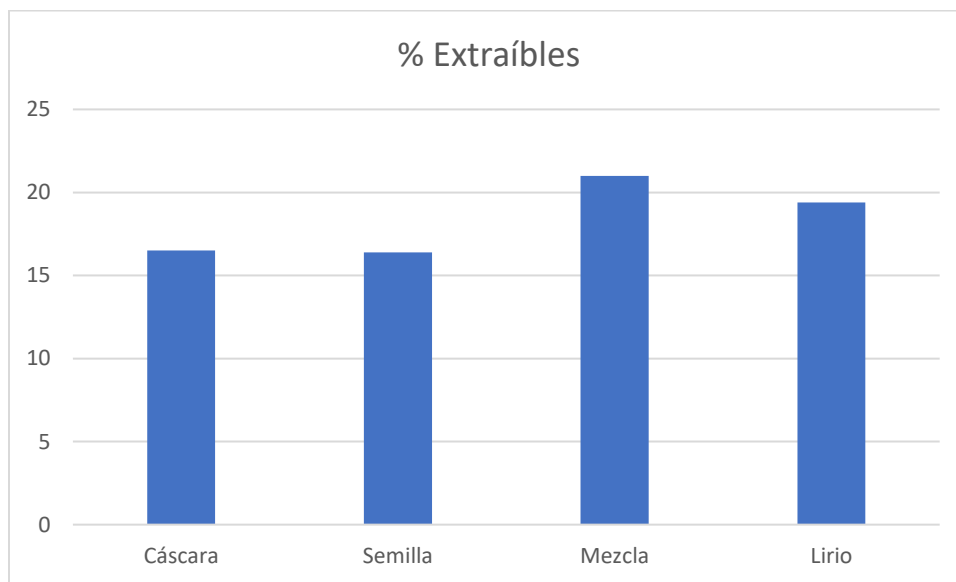
En la gráfica 2 se aprecia un mayor contenido de Hemicelulosa en la semilla con respecto a la cáscara, mezcla y el lirio.



Gráfica 3. Contenido de Lignina por tipo de residuo (% en base seca).

El contenido de lignina es notorio en menor cantidad en la mezcla y el lirio, con respecto a la cáscara y la semilla. (ver gráfica 3).

El contenido de compuestos orgánicos resistentes a la degradación por su estructura molecular compleja, como la hemicelulosa y la lignina, es mayor en la semilla de aguacate con respecto a los demás residuos evaluados.



Gráfica 4. Contenido de Extraíbles por tipo de residuo (% en base seca).

Los extraíbles se encuentran en los tejidos vegetales y son sustancias tales como minerales, azúcares, hidrocarburos alifáticos y aromáticos, ácidos grasos, grasas y aceites. Los residuos de mezcla y lirio tienen mayor contenido de extraíbles como se muestra en la gráfica 4, debido a su alto contenido de sustancias antes mencionadas.

Los análisis bromatológicos de los residuos de aguacate (mezcla), se muestran en el cuadro 8.

Cuadro 8. Análisis bromatológico de los residuos de aguacate (% en base seca)

<b>Parámetro</b>	<b>Réplica 1</b>	<b>Réplica 2</b>	<b>Réplica 3</b>	<b>promedio</b>
Materia seca %	29.21	29.95	26.64	28.60 ± 1.74
Nitrógeno total %	0.93	0.91	0.93	0.92 ± 0.01
Proteína bruta %	5.81	5.68	5.81	5.77 ± 0.08
Grasa Total %	4.24	3.31	10.14	5.90 ± 3.70
Fibra bruta %	53.4	49.9	57.13	53.48 ± 3.62
Cenizas totales %	3.69	3.03	3.86	3.53 ± 0.44
Fósforo %	0.06	0.02	0.06	0.05 ± 0.02
Calcio %	0.03	0.26	0.01	0.10 ± 0.14
Magnesio %	0.03	0.06	0.03	0.04 ± 0.02
Potasio %	0.46	0.59	0.59	0.55 ± 0.08
Sodio %	0	0.01	0.01	0.01 ± 0.01
Hierro ppm	67.8	38.25	65.3	57.12 ± 16.39
Manganeso ppm	3.13	2.36	0.33	1.94 ± 1.45
Zinc ppm	13.68	13.05	12.38	13.04 ± 0.65
Cobre ppm	2.78	7.92	4.88	5.19 ± 2.58

± Desviación estándar de las repeticiones

Analizando los resultados del análisis bromatológico de los residuos de aguacate del cuadro 8, encontramos un porcentaje alto de fibra bruta del 53.48 %, esto por su contenido de materia lignocelulósico (ver cuadro 7).

Cuadro 9. Composición química de metales del lirio (ppm en base seca)

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Zn ppm	0.57
Cd ppm	0.46
Cu ppm	0.42
Fe ppm	0.3
Ni ppm	0.23
Cr ppm	0.09

Zn= Zinc; Cd= Cadmio; Cu= Cobre; Fe= Hierro; Ni= Níquel; Cr= Cromo

EL lirio acuático contiene metales pesados, de acuerdo a su composición química como se muestra en el cuadro 9, esto debido al sitio de donde se extrajo el lirio, la presa Malpaís ubicada en el municipio de Queréndaro, Michoacán.

## **9.2 Monitoreo de la temperatura de la biomasa en el sistema**

La temperatura se midió cada tercer día para registrar su aumento dentro de cada lote del compostero. En el cuadro 10 se muestran los datos de las temperaturas que se registraron durante el proceso de composteo de los residuos orgánicos.

Cuadro 10. Temperaturas registradas en el proceso de composteo

Días	Temperatura (°C) Lote 1	Temperatura (°C) Lote 2	Temperatura (°C) Lote 3	Fecha
0	26.9	26.4	26.7	19/07/2020
2	28.6	27.9	28.1	21/07/2020
4	30.1	30.2	31.2	23/07/2020
6	32.5	32.8	32.4	25/07/2020
8	34.3	34.1	35.7	27/07/2020
10	35.8	35.6	36.4	29/07/2020
12	37.2	36.7	37.9	31/07/2020
14	39	38.8	39.2	02/08/2020
16	41.3	40.6	41.8	04/08/2020
18	42.4	41.9	42.6	06/08/2020
20	44.7	43.2	43.4	08/08/2020
22	48.8	47.4	47.6	10/08/2020
24	49.7	48.7	49.8	12/08/2020
26	51.2	50.3	52.3	14/08/2020
28	52.3	51.6	53.1	16/08/2020
30	53.4	52.7	54.5	18/08/2020
32	54.7	53.8	55.7	20/08/2020
34	55.6	54.8	56.3	22/08/2020
36	56.7	56.2	56.9	24/08/2020
38	56.9	57.4	58.1	26/08/2020
40	57.3	56.2	58.2	28/08/2020
42	54.2	55.1	57.4	30/08/2020
44	52.1	53.7	57.3	01/09/2020
46	50.5	51.3	56.4	03/09/2020
48	48.7	49.7	55.1	05/09/2020
50	46.3	47.5	54.2	07/09/2020
52	44.2	46.2	50.6	09/09/2020

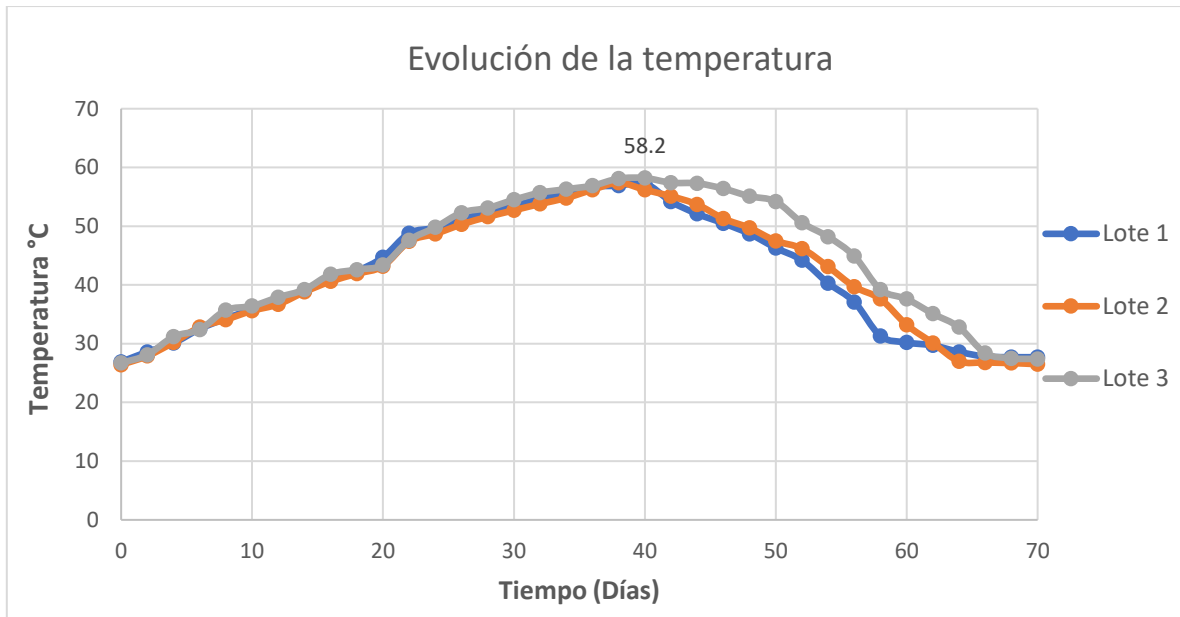
54	40.3	43.1	48.2	11/09/2020
56	37.1	39.7	44.9	13/09/2020
58	31.3	37.6	39.2	15/09/2020
60	30.2	33.2	37.6	17/09/2020
62	29.7	30.1	35.1	19/09/2020
64	28.6	27	32.8	21/09/2020
66	27.8	26.8	28.4	23/09/2020
68	27.7	26.7	27.5	25/09/2020
70	27.7	26.5	27.4	27/09/2020

°C= Grados Celsius

Para incrementar la temperatura interna del sistema composteo, se instaló un calentón de ambiente, ya que incrementó la temperatura ambiente hasta los 28 °C, manteniéndose así a una temperatura ambiente constante. Esto ayudó a incrementar su temperatura interna del proceso.

### **9.3 Tiempo de residencia del proceso de composteo**

En la gráfica 5 se esquematiza la evolución de la temperatura por lote del compostero, así se identifica de una manera rápida los días en que los tres lotes con las diferentes composiciones de biomasa alcanzaron las máximas temperaturas y de ahí se empezó a observar un decaimiento de la temperatura.



Grafica 5. Comportamiento de la temperatura por lote del compostero

El tiempo que duró el proceso de composteo fue de 70 días, con ayuda del incremento de la temperatura, también se dió un tiempo más de 15 días de maduración con temperatura ambiente, quedando con un tiempo total de composteo de 85 días.

En el lote 1 la etapa mesofílica se alcanzó en los días 20-32, la etapa termofílica en los días 34-40 y el enfriamiento comenzó a partir del día 52.

En el lote 2 la etapa mesofílica comenzó en los días 21-34, el comienzo de la etapa termofílica se alcanzó a partir de los días 36-38 y la etapa del enfriamiento comenzó en el día 54.

En el lote 3 la etapa mesofílica inició a partir de los días 21-30, la etapa termofílica durante los días 32-40 y el enfriamiento a partir del día 56.

#### 9.4 Resultados de la caracterización de la composición del compost

El compost resultante del composteo de los residuos del aguacate, tienen un color oscuro parecido a un suelo arcilloso y un olor a tierra mojada (ver figuras 17, 18 y 19), el compost se analizó en un laboratorio particular que prestó servicio para su análisis (ver cuadro 11)



Figura 17. Compost del lote 1



Figura 18. Compost del lote 2

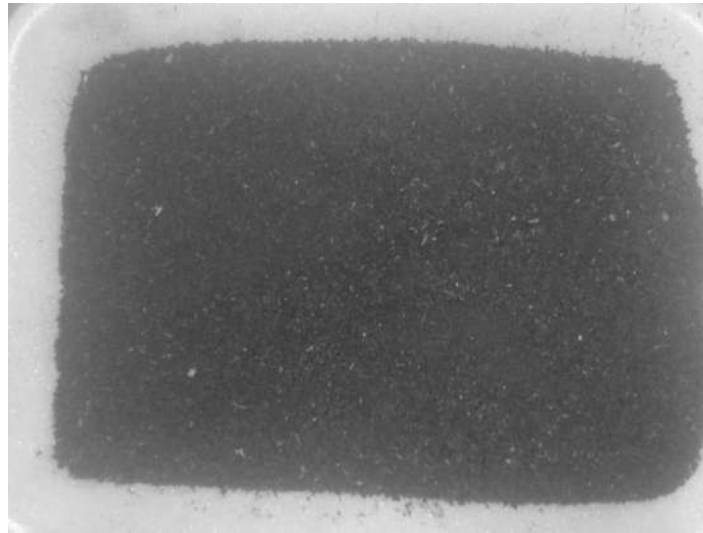


Figura 19. Compost del lote 3

Cuadro 11. Composición Química del compost (% en base seca)

Muestra	MO	C	NT	C/N	pH
Lote 1	40.31	23.37	1.94	12.04	7.84
Lote 2	39.78	23.07	1.66	13.89	6.32
Lote 3	37.66	21.84	1.72	12.69	7.43

MO= Materia Orgánica; C= Carbono Orgánico; NT= Nitrógeno total; C/N= Relación Carbono/Nitrógeno; pH= concentración de iones Hidrógeno

La composición química del compost del residuo de aguacate, resulta ser más altos los valores de Materia Orgánica, Carbono Orgánico y Nitrógeno total siendo valores significativos para el lote 1, donde se compostó la mezcla, el biosólido y el lirio.

Los porcentajes de la degradación de la materia orgánica de los residuos que se compostaron se puede apreciar en el cuadro 12.

Cuadro 12. Reducción de la degradación de la materia orgánica (% de Materia Orgánica en base seca)

<b>Lote</b>	<b>MO<sub>I</sub></b>	<b>MO<sub>F</sub></b>	<b>MO<sub>R</sub></b>
1	84.32	40.31	47.80
2	84.33	39.78	47.17
3	83.82	37.66	44.92

MO<sub>I</sub> = Materia Orgánica inicial; MO<sub>F</sub> = Materia Orgánica final; MO<sub>R</sub> = Materia Orgánica reducida del 100 %

En este cuadro 12 se puede observar que los porcentajes de degradación de la materia orgánica, obtenidos en este proceso disminuyen ostensiblemente el tiempo de retención (85 días), pues González et al, (2015) reportan en un sistema abierto (pilas), un tiempo de retención para los residuos de aguacate de 7 meses más 3 meses de maduración, con un tiempo total de composteo de 10 meses.

### 9.5 Evaluación de la calidad de la composición fisicoquímica del compost

En el cuadro 13 se muestran los resultados de la evaluación fisicoquímica del compost realizadas de acuerdo con las especificaciones de la norma mexicana NMX-FF-109-SCFI-2008) (DOF, 2008).

Cuadro 13. Evaluación de la calidad del compost (% en base seca)

PARÁMETRO	LOTE 1	LOTE 2	LOTE 3	ESPECIFICACIONES
				NMX-FF-109-SCFI-2008
Materia Orgánica	40.31	39.78	37.66	20-50
Carbono	23.37	23.07	21.84	≤20
Nitrógeno total	1.94	1.66	1.72	1-4
C/N	12.04	13.89	12.69	≤20
pH	7.84	6.32	7.43	5.5-8.5

C/N= Relación Carbono/Nitrógeno; pH= concentración de iones Hidrógeno

En este cuadro se puede observar que los parámetros analizados están dentro del rango óptimo para utilizar la composta e manera segura y con esto resolver un problema ambiental creciente de generación de estos residuos, pero con un tiempo de retención menos, con lo cual, este proceso implementado en esta investigación hace más factible económicamente la valorización de estos residuos.

## 10. CONCLUSIONES

- El composteo en sistema cerrado es un método factible para la degradación de los residuos de aguacate.
- La adición de sustratos como el biosólido y lirio ayudan a disminuir el tiempo de retención del proceso de composteo, pues el biosólido contiene bacterias que coadyuvan a acelerar el proceso de degradación de la materia orgánica contenida en los residuos de aguacate; el lirio seco a ajustar la humedad al rango óptimo del residuo.
- El sistema de composteo cerrado diseñado ayudó, para que se alcanzaran las temperaturas de la etapa termofílica (55 °C - 60 °C) deseadas.
- La evaluación de la calidad del compost obtenido por el proceso probado en esta investigación, cumple con las especificaciones de la Norma Mexicana NMX-FF-109-SCFI-2008 (Humus de lombriz) (DOF, 2008).

## 11. RECOMENDACIONES

- Estudiar el tratamiento de los residuos del aguacate por el método de composteo, en sistema abierto y aireación forzada.
- Estudiar y caracterizar el compost, para analizar y cuantificar los ácidos húmicos y fúlvicos; sin embargo, estos son compuestos orgánicos importantes como mejoradores de las propiedades químicas del suelo.
- Realizar análisis microbiológicos a los residuos y compost ya que en esta investigación no fue factible realizar estos análisis.
- Estudiar el tiempo de retención de la degradación de los residuos del aguacate mediante la adición de otros residuos acondicionadores diferentes a los utilizados en este estudio, ya que en la industria agropecuaria se generan varios residuos agropecuarios, como son los rastrojos de cosechas y estiércoles.

## BIBLIOGRAFÍA

- Buenrostro, O. (1992). Aprovechamiento de residuos sólidos provenientes de 6 mercados de la ciudad de Morelia, Michoacán, por composteo en digestión anaeróbica. (*Tesis de maestría*). Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca.
- Buenrostro, O. Bocco, G. & Bernache, G. (2001). Urban solid waste generation and disposal in Mexico: a case study. *Waste Management & Reserch*. 169- 176.
- Buenrostro, O.; Israde, I. (2003). La gestión de los residuos sólidos municipales en la cuenca del lago de Cuitzeo, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 161-169
- Ceballos, A. & Montoya, S. (2013). Evaluación química de la fibra en semilla, pulpa y cáscara de tres variedades de aguacate. *Bioteología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 103-112.
- DOF. (2003). *Norma oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002*. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Obtenido de Diario Oficial de la Federación: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=691939&fecha=15/08/2003](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=691939&fecha=15/08/2003)
- DOF. (2008). *Norma Mexicana NMX-FF-109-SCFI-2008*. Humus de lombriz, especificaciones y métodos de prueba. Obtenido de Diario Oficial de la Federación: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5044562&fecha=10/06/2008](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5044562&fecha=10/06/2008)

DOF. (1985). *Norma Mexicana NMX-AA-67-1985*. Norma Mexicana. Protección al ambiente – contaminación del suelo – residuos sólidos municipales – determinación de la relación Carbono/Nitrógeno. Obtenido de Diario Oficial de la Federación: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4755518&fecha=08/08/1985](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4755518&fecha=08/08/1985)

Dorantes-Álvarez, L., Ortiz-Moreno, A., & García-Ochoa, F. (2012). Avocado En P. Muhammad Siddiq, *Tropical and subtropical fruits: postharvest physiology, processing and packaging* (pág. 631). Wiley-Blackwell.

Echanove, H. (2008). Abriendo fronteras: el auge exportador del aguacate mexicano a Estados Unidos. *Anales de Geografía*. 9-28.

Gonzales-Fernández, J., Galea, Z., Alvarez, J. M., Hormaza, J., y Lopez, R. (2015). Evaluation of composition and performance of compost derived from guacamole productions residues. *Journal of Environmental Management*, 132-139.

Hans, S., & Zaborosch, C. (1997). *Microbiología General*. Barcelona: Omega.

Jiménez, B. E. (2001). *La contaminación ambiental en México*. D.F., México: Limusa.

Jiménez, M.; Caballero, J. y Chávez, M. (2016). Estudios sobre diversas compostas de lirio acuático (*E. Crassipes*) y lodo residual. Universidad Autónoma del Estado de México. 2do congreso internacional en ingeniería en desarrollo sustentable.

Laich, F. (2011). El papel de los microorganismos en el proceso del compostaje. *Proyecto BIOMUSA 1*.

Márquez, L.; (2011). *Residuos sólidos: un enfoque multidisciplinario Vol 1*. Libros En Red.

Montaño, N.M., Sandoval, A.L., Camargo, S.L. y Sánchez, J.M. (2010). Los s microorganismos: pequeños gigantes. *Ciencia y cultura*. 15-23.

Román, P.; Martínez, M. & Pantoja, A. (2013). *Manual de compostaje del agricultor*. Santiago, Chile: FAO.

SAGARPA. (31 de enero de 2018). *Se consolida México como el primer productor de aguacate a nivel mundial con casi dos millones de toneladas en 2017*. Obtenido de Boletín SAGARPA: <http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/bajacaliforniasur/boletines/Paginas/2018BS031.aspx#>

SECOFI. (1984). *Norma Mexicana NMX-AA-16-1984*. Norma Mexicana. Protección al ambiente-Contaminación del suelo-Residuos Sólidos Municipales- Determinación de humedad.

SECOFI. (1984). *Norma Mexicana NMX-AA-24-1984*. Norma Mexicana. Protección al ambiente - contaminación del suelo-residuos sólidos municipales - determinación de nitrógeno total.

SECOFI. (1985). *Norma Mexicana NMX-AA-21-1985*. Norma Mexicana. Protección al ambiente – contaminación del suelo – residuos sólidos municipales – determinación de materia orgánica.

SECOFI. (1985). *Norma Mexicana NMX-AA-94-1985*. Norma Mexicana. Protección al ambiente - contaminación del suelo - residuos sólidos municipales - determinación de fósforo total.

PROFEPA. (05 de septiembre de 2016). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. Obtenido de Procuraduría Federal de Protección al Ambiente: <https://www.gob.mx/profepa/documentos/ley-general-para-la-prevencion-y-gestion-integral-de-los-residuos-62914>

- Torres, V. (2009). La competitividad del aguacate mexicano en el mercado estadounidense. *Geografía agrícola*. 61-79.
- Tchobanoglous, G.; Theisen, H. y Vigil, S. (1997). *Gestión integral de residuos sólidos*. Madrid, España: McGraw-Hill.
- Tortosa, G. (10 de febrero de 2015). *Sistemas de compostaje*. Obtenido de sistemas de compostaje:  
<http://www.compostandociencia.com/2015/02/sistemas-de-compostaje/>
- Velasco, A. & Volke, T. (2003). El composteo: una alternativa tecnológica para la biorremediación de suelos en México. *Gaceta ecológica*, 41-53.
- Vicencio-de la Rosa, M.; Pérez, M.; Medina, E. & Martínez, M. (2011). Producción de composta y vermicomposta a partir de los lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de un rastro. *Revista Internacional de Contaminación ambiental*. 263-270.
- Wise, L. E., Murphy, M. D. & Dieco, A., (1946). Chlorite holocelluloses, its fractionation and beat in go summative Wood analysis and on studies on the hemicelluloses. *Paper Trade Journal* 122, 35-45.
- Zita, A. (2020). *Célula Eucariota y célula procariota*. Obtenido de Diferenciador:  
<https://www.diferenciador.com/celula-eucariota-y-celula-procariota/>